

ISSN 1684–8853

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

3(88)/2017

3(88)/2017

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

Founder

«Information and Control Systems», Ltd.

PublisherSaint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

M. Sergeev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Deputy Editor-in-Chief

E. Krouk

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Executive secretary

O. Muravtsova

Editorial Council

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

L. Chubraeva

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Kozlov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Meyer

Dr. Sc., Professor, Zurich, Switzerland

A. Ovodenko

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Y. Podoplyokin

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Phys.-Math., Novosibirsk, Russia

V. Simakov

Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, Russia

V. Vasilev

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Editorial Board

V. Anisimov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Phys.-Math., Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel

A. Dudin

Dr. Sc., Tech., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD., Professor, Riverside, USA

V. Khimenko

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Maltsev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Matvienko

Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Tomsk, Russia

V. Melekhin

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shelupanov

Dr. Sc., Tech., Professor, Tomsk, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Phys.-Math., Vologda, Russia

Editor: A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** M. Chernenko, A. Koleshko**Layout and composition:** J. Umnitsina**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67, B. Morskaya, 190000, St. Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: i-us.spb@gmail.com

Tel.: +7 - 812 494 70 02

The Journal was registered in the Ministry of Press,

Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation.

Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002.

Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom,

Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR)

due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd.,

JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

© Corporate authors, 2017

THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS**Fomicheva S. G.** *Theoretical Aspects of Knowledge base Quantization in Multi-Agent Systems* 2**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL****Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I.** *Creating Background Images and their use in Converting 2D Video into 3D Format* 11**Belim S. V., Larionov S. B.** *Impulse Noise Filtration based on Community Detection in Graphs* 18**Skatkov A. V., Voronin D. Y., Shevchenko V. I., Klyucharev A. A.** *Proactive and Reactive Risk Management of IT Services of Cloud Environments* 25**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS****Egorov I. V., Melekhin V. F.** *Analysis of Reliability and Structural Complexity for Various Implementations of a Finite State Machine Resistant to Soft Failures* 34**Martynova L. A., Rozengauz M. B.** *Efficient Operation of a Group of Standalone Unmanned Submersibles in a Network-Centric System of Underwater Illumination* 47**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Savin L. O., Korolev M. V., Nosov M. V.** *Predictive Models for Temporal Parameter Drift of Automotive Equipment during its Operation under Special Conditions* 58**INFORMATION SECURITY****Maltsev G. N., Lesnyak D. A.** *Security Maintenance Strategies in Information Systems* 67**INFORMATION CODING AND TRANSMISSION****Pastushok I. A.** *Transmission and Quality-of-Experience Estimation for HTTP-based Video. A Survey* 75**INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION****Grigoryev A. P., Burlutsky S. G.** *A Neuronet Navigational Training System* 89**CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS****Shelupanov A. A., Smolina A. R.** *Formal Foundation of Particular Methodology Design Support System for Computing Expertise* 99**Ponomarev A. V.** *Tagging Public Event Images based on Non-Monetary Incentives* 105**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS** 115Submitted for publication 21.04.17. Passed for printing 20.06.17. Format 60x84_{1/8}.
Phototype SchoolBookC. Digital printing.Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI.
67, B. Morskaya, 190000, St. Petersburg, Russia
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI.
67, B. Morskaya, 190000, St. Petersburg, RussiaThe journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue:
№ 48060 — annual subscript, № 15385 — semiannual subscript.

3(88)/2017

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-
УПРАВЛЯЮЩИЕ
СИСТЕМЫУчредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»Издатель
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроенияГлавный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФЗам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФОтветственный секретарь
О. В. МуравцоваРедакционный совет:
Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Васильев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФВ. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
К. Кристофолу,
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США
Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, ШвейцарияЮ. Ф. Подоплёкин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. В. Симаков,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФЛ. Фортуна,
д-р наук, проф., Катания, Италия
А. Л. Фрадков,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФЛ. И. Чубраева,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ
Ю. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФРедакционная коллегия:
В. Т. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ
Н. Блаунштейн,
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, ИзраильА. Н. Дудин,
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь
И. И. Думер,
д-р наук, проф., Риверсайд, СШАА. И. Зейфман,
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ
Г. Н. Мальцев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФГ. Г. Матвиенко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ
В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФА. В. Смирнов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. И. Хименко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФА. А. Шальто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. А. Шелупанов,
д-р техн. наук, проф., Томск, РФА. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
З. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФРедактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: М. Л. Черненко, А. Н. Колешко
Компьютерная верстка: Ю. В. УмницынаАдрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,
сайт: http://i-us.ruЖурнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.
Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

© Коллектив авторов, 2017

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

Фомичева С. Г. Теоретические аспекты квантования баз знаний
в мультиагентных системах 2

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Методы создания
фоновых изображений и их использование при конвертации
2D-видео в 3D-формат 11Белим С. В., Ларионов С. Б. Фильтрация импульсного шума на избр-
ражении на основе алгоритма выявления сообществ на графах 18Скатков А. В., Воронин Д. Ю., Шевченко В. И., Ключарев А. А.
Проактивный и реактивный риск-менеджмент IT-сервисов
облачных сред 25

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Егоров И. В., Мелехин В. Ф. Анализ показателей надежности
и сложности реализации различных вариантов структур автомата
с памятью при потоке мягких отказов 34Мартьянова Л. А., Розенгауз М. Б. Определение эффективного
поведения группы АНПА в сетевидной системе освещения
подводной обстановки 47

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Савин Л. О., Королев М. В., Носов М. В. Разработка прогнозных
моделей временного дрейфа определяющих параметров автомо-
бильной техники при ее эксплуатации в особых условиях 58

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Мальцев Г. Н., Лесняк Д. А. Применение стратегий поддержания
защищенности в информационных системах 67

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Пастушок И. А. Обзор передачи и оценок качества восприятия
видеоданных при использовании технологии адаптивной передачи
видео по протоколу HTTP 75

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ

Григорьев А. П., Бурлуцкий С. Г. Нейросетевая навигационная
тренажерно-обучающая система 89

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Шелупанов А. А., Смолина А. Р. Формальные основы системы
поддержки формирования частных методик производства
компьютерно-технической экспертизы 99Пономарев А. В. Разметка изображений массового мероприятия
его участниками на основе немонетарного стимулирования 105

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

115

Сдано в набор 21.04.17. Подписано в печать 20.06.17. Формат 60×84^{1/8}.
Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 13,8. Уч.-изд. л. 19,1. Тираж 1000 экз (1-й завод 140 экз). Заказ № 262.
Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.
Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить
через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:
№ 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КВАНТОВАНИЯ БАЗ ЗНАНИЙ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

С. Г. Фомичева^а, канд. техн. наук, профессор

^аНорильский государственный индустриальный институт, Норильск, РФ

Постановка проблемы: интенсивное использование беспроводных и мобильных сетей связи в распределенных информационно-телекоммуникационных системах и автоматизированных системах управления технологическими процессами промышленных корпораций приводит к формированию в архитектуре таких систем новых концептуальных сущностей, называемых агентами, которыми необходимо управлять в реальном масштабе времени. При оценке эффективности многоагентных систем на первый план выходит коммуникационная сложность взаимодействия агентов, напрямую зависящая от количества адаптируемых при коммуникации параметров. Для интеллектуальных агентов основными проблемами в данном случае являются, с одной стороны, требование к быстрой адаптации и самоадаптации параметров их баз знаний, а с другой — необходимость обеспечения целостности и защищенности как данных, так и знаний агентов. **Цель исследования:** разработка теоретических и алгоритмических механизмов мягкого квантования аддитивных продукционных баз знаний агентов, обеспечивающих снижение как вычислительной, так и коммуникационной сложности взаимодействия интеллектуальных агентов. **Результаты:** доказан ряд утверждений, которые позволяют выполнять изоморфные преобразования классических аддитивных нечетких моделей, функционирующих в поле вещественных чисел, в их аналоги, способные функционировать в конечных полях Галуа. Показан гомеоморфизм (топологический изоморфизм) рассматриваемых нечетких и нейронечетких моделей. На базе доказанных утверждений разработан алгоритм мягкого квантования нечетких импликаций. Сущность предложенного алгоритма мягкого квантования заключается в гибком управлении топологией нейронечетких иерархических моделей при сохранении заданной точности аппроксимации контролируемых агентом параметров. Новизна подхода состоит в том, что доказана принципиальная возможность адекватного квантования аддитивных продукционных баз знаний. Разработан механизм автоматического регулирования количества параметров оптимизации баз знаний, к которым относятся число термов лингвистических переменных, число параметров адаптации каждого лингвистического термина, количество уровней иерархии аддитивной нечеткой модели. Для этого в качестве ограничений приняты допущения о непрерывном покрытии пространства решений (континуум) терминами лингвистических переменных нечетких импликаций. Показано, что для обеспечения континуума при квантовании достаточно регулировать характеристику поля Галуа. **Практическая значимость:** разработанный метод мягкого квантования нечетких импликаций, во-первых, позволит существенно (на порядки) снизить объем базы знаний, необходимой агентам для принятия адекватных решений, тем самым упростить вычислительную и коммуникационную сложность взаимодействия агентов; во-вторых, даст возможность регулировать уровень защиты данных и знаний агентов.

Ключевые слова — аддитивные нечеткие модели, мультиагентные телекоммуникационные системы, изоморфизм, гомеоморфизм, квантование, конечные поля Галуа, приведенные полиномы над конечными полями, коммуникационная сложность.

Введение

Интенсивное развитие беспроводных и мобильных сетей связи, распределенных информационно-телекоммуникационных систем и, в частности, открытых мультиагентных систем приводит к формированию новых концептуальных сущностей, например таких, как агенты, которыми необходимо управлять в реальном масштабе времени [1]. Процесс коммуникаций между агентами осуществляется через «доски объявлений», «белые» и «желтые» страницы посредством сообщений. Структура сообщений при этом в основном рассматривается как набор квантованных данных, но не знаний. Понятие кванта знаний на сегодняшний день слабо формализовано. Для аддитивных нечетких моделей квантом знаний может выступать базисный набор элементарных нечетких импликаций, мощность которого и определяется на этапе квантования продукционной базы знаний.

При оценке эффективности многоагентных систем на первый план выходит коммуникацион-

ная сложность взаимодействия агентов, напрямую зависящая от количества адаптируемых при коммуникации параметров. Для интеллектуальных агентов основными проблемами в данном случае являются, с одной стороны, требование к быстрой адаптации и самоадаптации параметров их баз знаний, а с другой — необходимость обеспечения целостности и защищенности как данных, так и знаний агентов.

Целью работы является разработка теоретических и алгоритмических механизмов мягкого квантования аддитивных продукционных баз знаний агентов, обеспечивающих снижение коммуникационной сложности взаимодействия интеллектуальных агентов. В данной статье, во-первых, докажем возможность адекватного квантования продукционных баз знаний в принципе. Во-вторых, докажем, что аддитивные нечеткие модели могут быть со сколь угодно малой точностью аппроксимированы приведенными полиномами над конечными полями Галуа. Эти результаты необходимы для решения задачи оптимизации

ции параметров баз знаний агентов. В-третьих, приведем алгоритм мягкого квантования продукционных баз знаний, позволяющий в практических задачах адекватно выполнять процессы коммуникаций между агентами в автоматическом режиме.

С точки зрения коммуникационной сложности оптимизируемыми параметрами при квантовании знаний, представленных в виде аддитивных нечетких моделей, могут выступать, например, количество значимых правил базы знаний, число термов лингвистических переменных, число параметров адаптации каждого лингвистического термина, количество уровней иерархии аддитивной нечеткой модели, точность обобщения. Выбранные параметры квантования знаний, очевидно, определяют объем транспортируемой мобильными агентами базы знаний, скорость ее адаптации и модификации, возможность применения конкретных механизмов защиты структуры базы знаний и ее содержимого.

Также следует отметить, что уровень защиты знаний должен быть выше уровня защиты данных, на основе которых эти знания сформированы. То есть возникает необходимость в построении *иерархических* систем защиты как знаний, так и данных. Конструктивные подходы к созданию иерархических систем защиты информации существуют [2, 3] и, как правило, реализуются алгебраическими механизмами в конечных полях Галуа. Следовательно, структура транспортируемой базы знаний и ее содержимое должны быть подготовлены для адекватного применения к ним иерархических механизмов защиты. В частности, база знаний после ее *квантования* может быть представлена в виде изоморфных концептуальных сущностей, например таких, как *полиномы* над конечными полями Галуа.

Приведенные в статье доказательства подтверждают существование конструктивных алгоритмов непротиворечивого обмена информацией между агентами, а также возможность адекватного пополнения баз данных и знаний агентов на пути их миграции.

Аппроксимация аддитивных нечетких моделей полиномиальными функциями над полем вещественных чисел

В целом ряде работ [4–7] доказаны теоремы об универсальной аппроксимации нечетких продукционных моделей полиномами над полями вещественных чисел. Доказательства этих теорем опираются на теоремы Вейерштрасса и Стоуна в том смысле, что в основе этой универсальной аппроксимации лежит способность аддитивных нечетких моделей аппроксимировать любую полиномиальную функ-

цию, которой, в свою очередь, можно аппроксимировать любую непрерывную функцию.

Приведем здесь без доказательства теоремы Вейерштрасса и Стоуна [8].

Теорема 1.1 (Вейерштрасса). Пусть $f(x)$ — непрерывная функция, определенная на отрезке $[a, b]$. Тогда для любого $\varepsilon > 0$ существует такой многочлен $p(x)$ с вещественными коэффициентами, что для любого $x \in [a, b]$ выполнено условие

$$|f(x) - p(x)| < \varepsilon.$$

Теорема 1.2 (Вейерштрасса — Стоуна). Пусть $C(X)$ — кольцо непрерывных функций на бикompакте X с топологией равномерной сходимости, порожденной нормой

$$\|f(x)\| = \max_{x \in X} |f(x)|, f(x) \in C(X),$$

и пусть $C_0 \subseteq C(x)$ есть подкольцо, содержащее все константы и разделяющее все точки из X , т. е. для любых двух различных точек $x_1 \in X$ и $x_2 \in X$ существует функция $f(x) \in C_0$, для которой $f(x_1) \neq f(x_2)$. Тогда $[C_0] = C(x)$, т. е. всякая непрерывная функция на X есть предел равномерно сходящейся последовательности функций из C_0 .

Приведем также формулировку и доказательство теоремы Коско [5].

Теорема 1.3 (Коско). Аддитивная нечеткая система F универсально аппроксимирует функцию $f(X) \rightarrow Y$, если множество X компактно и функция $f(X)$ непрерывна на этом компакте.

Доказательство: Пусть $\varepsilon > 0$ — некоторая малая величина. Требуется показать, что $|F(x) - f(x)| < \varepsilon$ для всех $x \in X$, где X — компактное подмножество R^n . $F(x)$ — центроид выходной лингвистической переменной аддитивной нечеткой системы F .

Поскольку непрерывность $f(X)$ на компакте X определяет универсальную непрерывность, то существует некоторое фиксированное расстояние d такое, что для всех x и $z \in X$ $|f(x) - f(z)| < \frac{\varepsilon}{4}$, если $|x - z| < d$. Построим цепь открытых кубов M_1, \dots, M_m , которые покрывают X таким образом, что это приводит к наложению их в координатах n так, что каждый угол куба находится в центре c_j его соседа M_j .

Пусть B_j — симметричное нечеткое множество, сосредоточенное над $f(c_j)$. Тогда $f(c_j)$ есть центр (высота) нечеткого множества B_j . Пусть $u \in X$. Тогда конструкция u содержит самое большее 2^n перекрывающихся открытых кубов M_j . Пусть w — любой в том же множестве куб. Если $u \in M_j$ и $w \in M_k$, то для всех $v \in M_j \cap M_k$ имеем $|u - v| < d$ и $|u - w| < d$. Универсальная непрерывность подразумевает, что

$|f(u) - f(w)| \leq |f(u) - f(v)| + |f(v) - f(w)| < \frac{\varepsilon}{2}$. Тогда для центров кубов c_j и c_k имеем $|f(c_j) - f(c_k)| < \frac{\varepsilon}{2}$.

Пусть $x \in X$. Тогда x также находится самое большее в 2^n открытых кубах с центрами c_j и $|f(c_j) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{2}$. По k -й координате ограниченного пространства R^p устанавливается k -я высота (центр) элемента аддитивной системы $F(x)$, которая лежит либо «на» k -й высоте (центре) компоненты B_j , либо в «ближайшей окрестности» k -й высоты (центра) компоненты B_j .

Поскольку $|f(c_j) - f(c_k)| < \frac{\varepsilon}{2}$ для всех $f(c_j)$, то $|F(x) - f(c_j)| < \frac{\varepsilon}{2}$.

Тогда $|F(x) - f(x)| \leq |F(x) - f(c_j)| + |f(c_j) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$.

Доказательство теоремы Коско показывает, что нечеткие множества A_i и B_j можно заменить совокупностью конечных векторов (a_1^i, \dots, a_n^i) и (b_1^j, \dots, b_p^j) . Дискретный вариант B_j должен иметь высоту «в» или «близко» к центроиду B_j . Таким образом, всегда можно работать с большемерными гиперкубами, рассматривая нечеткие правила или продукции как картографическую матрицу (или нечеткую реляционную базу знаний) между гиперкубами, как точки в еще большем гиперкубе.

Конструктивным результатом доказательства этих теорем является оценка необходимого количества правил модели для заданной точности аппроксимации, которое определяется с помощью минимального расстояния между центроидами двух смежных нечетких множеств, представляющих заключения правил, обозначаемых как y_i и y_{i+1} :

$$|y_i - y_{i+1}| < \frac{\varepsilon}{2^g - 1}, \quad (1)$$

где ε — точность аппроксимации; g — максимальное число перекрытий (overlapping) нечетких множеств входных переменных на компактном множестве X (для одной входной переменной $g = 2$). Для одной входной переменной необходимое количество правил определяется выражением $n \geq \frac{|X|}{\varepsilon}$. Очевидно, что при стремлении ε к нулю количество правил неограничено, но для заданного значения ε количество правил может быть оценено с помощью (1).

Однако данные результаты не дают ответов на вопросы: какую конкретно нечеткую модель необходимо выбрать и сколько должно быть правил для аппроксимации заданной функции, каковы

механизмы регулирования точности аппроксимации, — а также остается не решенной проблема компактной упаковки аддитивной нечеткой модели в ограниченное адресное пространство.

Аппроксимация аддитивных нечетких моделей приведенными полиномами над конечными полями

Докажем основные утверждения, позволяющие обосновать и реализовать механизмы мягкого квантования знаний агентов и их надежного хранения в информационно-телекоммуникационных открытых мультиагентных системах. Для этого следует обосновать возможность создания аналогов нечетких и нейронечетких структур, адекватно функционирующих в конечных полях. Покажем, что:

Теорема 2.1. Аддитивная нечеткая система F со сколь угодно малой точностью $\varepsilon > 0$ аппроксимирует полином с вещественными коэффициентами $p(x) \rightarrow Y$, если множество X компактно.

Доказательство: В силу верности теоремы Коско имеем, что аддитивная нечеткая система F универсально аппроксимирует непрерывную функцию $f(x) \rightarrow Y$ на компактном множестве X , если эта функция непрерывна на этом компакте, т. е.

$$|F(x) - f(x)| < \varepsilon_1,$$

где $\varepsilon_1 > 0$ — сколь угодно малая величина, $x \in X$.

В соответствии с теоремой Вейерштрасса любая непрерывная функция $f(x)$, определенная на компакте X , может быть аппроксимирована с точностью $\varepsilon_2 > 0$ многочленом $p(x)$ с вещественными коэффициентами, т. е. для $\forall x \in X$ выполнено условие $|f(x) - p(x)| < \varepsilon_2$. Тогда

$$\begin{aligned} |F(x) - f(x)| &= |F(x) - (p(x) \pm \varepsilon_2)| = \\ &= |F(x) - p(x) \pm \varepsilon_2| < \varepsilon_1, \quad |F(x) - p(x)| < |\varepsilon_1 \pm \varepsilon_2|. \end{aligned}$$

Положив $\varepsilon = |\varepsilon_1 - \varepsilon_2|$, получаем требуемое утверждение $|F(x) - p(x)| < \varepsilon$.

Для доказательства иных аппроксимирующих свойств аддитивных нечетких и аддитивных нейронечетких систем потребуется ряд известных утверждений. Необходимость в этих утверждениях возникает в связи с требованием перехода из вещественного поля вычислений в поле вычислений над конечными полями. Отметим, что обычной дискретизацией вещественных чисел в множество целых чисел проблемы масштабирования баз знаний решить нельзя, так как множество целых чисел не является полем (в нем отсутствует мультипликативно обратный элемент). Кроме того, вычисления в конечных полях повсеместно используются в теории кодирования и в теории криптографии, без

которых, в свою очередь, невозможно обосновать параметры надежной передачи информации в каналах связи открытых мультиагентных систем информационно-телекоммуникационных систем.

Конечное поле — поле, число элементов которого конечно. Если число элементов поля является степенью q^m — некоторого натурального простого числа q , являющегося характеристикой этого поля, то такое поле называют полем Галуа и обозначают $GF(q^m)$. Известно [9], что для $\forall q$ и $\forall m \in N$, где N — множество натуральных чисел, существует единственное (с точностью до изоморфизма) поле из q^m элементов. Количество элементов поля называют *порядком* этого поля и обозначают $card(GF(q^m))$. Также известны утверждения 2.1–2.7 [9].

Утверждение 2.1. Поле $GF(q^m)$ содержит подполе $GF(q)$ в том и только в том случае, если $n|m$ (m делит n). В частности, в любом $GF(q^m)$ содержится $GF(q)$, называемое *простым* полем.

Утверждение 2.2. Поле $GF(q)$ изоморфно полю $Z(q)$ — классов вычетов кольца целых чисел по модулю q .

Любое конечное расширение поля алгебраично.

Утверждение 2.3. Поле вещественных чисел R является алгебраическим замыканием Ω поля Галуа, так как всякий отличный от константы многочлен с коэффициентами из $GF(q)$ имеет по крайней мере один корень на поле вещественных чисел R .

Утверждение 2.4. В любом фиксированном алгебраическом замыкании Ω поля $GF(q)$ существует только одно подполе $GF(q^m)$ для каждого m . Соответствие $m \leftrightarrow GF(q^m)$ является изоморфизмом между решеткой натуральных чисел (являющихся подмножеством вещественных чисел) относительно операции делимости и решеткой конечных алгебраических расширений поля $GF(q)$, лежащих в Ω относительно включения.

Такова же решетка множества конечных алгебраических расширений любого поля Галуа, лежащего в его фиксированном алгебраическом замыкании.

Утверждение 2.5. Алгебраическое расширение $GF(q^m)/GF(q)$ является простым, т. е. $\exists \alpha \in GF(q^m)$ — примитивный элемент такой, что $GF(q^m) = GF(q)(\alpha)$. Таким примитивным элементом α будет любой корень неприводимого многочлена степени m из кольца $GF(q)[X]$.

Утверждение 2.6. Множество элементов поля $GF(q^m)$ в точности совпадает с множеством корней многочлена $X^{q^m} - X$ в Ω , т. е. $GF(q^m)$ характеризуется как подполе элементов из Ω , инвариантных относительно автоморфизма $\tau: x \rightarrow x^{q^m}$, называемым автоморфизмом Фробениуса.

Утверждение 2.7. Если $GF(q^n) \supset GF(q^m)$, то расширение $GF(q^n)/GF(q^m)$ нормально и его группа Галуа $Gal(GF(q^n)/GF(q^m))$ циклическая порядка n/m .

В качестве образующей группы $Gal(GF(q^n)/GF(q^m))$ может быть взят автоморфизм τ .

Теоремы 1.1–1.3 и утверждения 2.1–2.7 позволяют доказать следующую теорему.

Теорема 2.2 [10]. Пусть аддитивная нечеткая система F со сколь угодно малой точностью $\varepsilon_1 > 0$ аппроксимирует полином $p(x)$ с вещественными коэффициентами на компакте X . Тогда $\exists q$ и \exists полином $g(\tilde{X})$ над $GF(q^m)$ ($\tilde{x} \in \tilde{X} = \{0, 1, \dots, q-1\}$, $m \in N$, $m > 0$) изоморфный $p(x)$, который F также аппроксимирует со сколь угодно малой точностью $\varepsilon_2 > 0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \pm o(\varepsilon_1)$.

Доказательство: В силу верности утверждений 2.3, 2.4 устанавливается изоморфизм компакта X вещественного поля и $GF(q^m)$. Далее, в силу утверждения 2.6, имеем существование лексикографического порядка элементов $GF(q^m)$, инвариантного относительно автоморфизма Фробениуса, из которого следует существование $g(\tilde{X})$ над $GF(q^m)$, $\tilde{x} \in \{0, 1, \dots, q-1\}$ и изоморфизм $p(X) \leftrightarrow g(\tilde{X})$.

В теореме 2.2 говорится о существовании полинома $g(\tilde{X})$ над $GF(q^m)$, который с заданной точностью аппроксимирует аддитивную нечеткую систему F , но не устанавливается вид этого полинома. Чтобы указать вид этого полинома, введем в рассмотрение ряд обозначений и ограничений.

Пусть $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ — вектор нечетких входных переменных $x \in X$, y — нечеткая выходная переменная аддитивной нечеткой системы F , $y \in Y$. Пусть q — некоторое априорно заданное простое число.

Ограничение 2.1. Пусть $A^{(i)} = \{A_1^{(i)}, A_2^{(i)}, \dots, A_q^{(i)}\}$ — множество лингвистических термов нечеткой входной переменной x_i , заданных на X соответствующими нечеткими множествами с функциями принадлежности $\mu_{A_l}(x_i) \in [0, 1]$ для $l = \overline{1, q}$. A — множество лингвистических термов вектора $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$:

$$A = A^{(1)} \times A^{(2)} \times \dots \times A^{(m)}.$$

Ограничение 2.2. Пусть $B = \{B_1, B_2, \dots, B_q\}$ — множество лингвистических термов, заданных на Y соответствующими нечеткими множествами с функциями принадлежности $\mu_{B_z}(y) \in [0, 1]$ для $z = \overline{1, q}$.

Ограничение 2.3. Пусть каждая функция принадлежности $\mu_{A_l}(x_i) \in [0, 1]$ для $l = \overline{1, q}$ и $\mu_{B_z}(y) \in [0, 1]$ для $z = \overline{1, q}$ является симметричной и имеет центроиды $x_i^{(l)}$ с вершинами в точках с абсциссами $\frac{l-1}{q-1}$ и основаниями:

$$\left[0, \frac{1}{2(q-1)}\right] \text{ при } l = 1, \left[1 - \frac{1}{2(q-1)}, 1\right] \text{ при } l = q \text{ и}$$

$$\left[\frac{l-1}{q-1} - \frac{1}{2(q-1)}, \frac{l-1}{q-1} + \frac{1}{2(q-1)}\right] \text{ при } l \neq 1 \text{ и } l \neq q.$$

То есть ограничения 2.1 и 2.3 указывают на то, что характеристика поля полностью определяет расположение и количество термов. Тогда можно доказать следующее утверждение.

Теорема 2.3. Аддитивная нечеткая система F при ограничениях 2.1–2.3 может быть аппроксимирована со сколь угодно малой точностью $\varepsilon > 0$ приведенным полиномом с коэффициентами над $GF(q)$.

Доказательство: Множество всех возможных паттернов $(x, y) = (x_1, x_2, \dots, x_m, y)$ полностью определяют состояния и выход аддитивной нечеткой системы F , причем в силу ограничения 2.1 количество различных векторов $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ ограничено и равно $\|A\| = q^m$.

Введение ограничений 2.3 на положение центроидов и размах оснований функций принадлежности обеспечивает непрерывное покрытие компакта X упорядоченными лингвистическими термами, что дает возможность применять теорему Коско и, следовательно, теоремы 2.1 и 2.2.

Тогда векторы $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ аддитивной нечеткой системы F могут быть изоморфно отображены в конечное поле $GF(q^m)$, а сама F с использованием ограничения 2.2 полностью задана ее таблицей значений для многозначной логики. Число строк в таблице значений равно $card(GF(q^m))$ и однозначно связано с мощностью базы правил для заданной точности аппроксимации, которое определяется с помощью минимального расстояния между центроидами двух смежных нечетких множеств, представляющих заключения правил.

Известно, что таблица истинности для булевых функций может быть задана полиномом Жегалкина, а алгебраическая нормальная форма для многозначной логики, определяемая таблица значений, — приведенным многочленом с коэффициентами в $GF(q)$.

Следовательно:

$$|F(x) - p(x)| = |F(\tilde{x}) - q(\tilde{x})| < \varepsilon,$$

где $F(\tilde{x})$ — изоморфное отображение F в $GF(q^m)$ для априорно заданного q , определяющего количество термов в ее нечетких переменных:

$$g(\tilde{x}) = a_0 \oplus \sum a_i \tilde{x}_i \oplus \sum a_{ij} \tilde{x}_i \tilde{x}_j \oplus \dots \oplus a_{12\dots m} x_1 x_2 \dots x_m, \quad (2)$$

где $g(\tilde{x})$ — приведенный многочлен над $GF(q)$; $a_i, a_{ij}, a_{12\dots m} \in GF(q)$; $\tilde{x} \in GF(q)$, $i = \overline{1, m_i}$.

Алгоритмы формирования приведенных полиномов аналогичны алгоритмам построения полиномов Жегалкина, среди последних наиболее эффективные приведены в работах [11, 12], что уже само по себе приближает решение задачи автоматического формирования полной базы

знаний агента. Число слагаемых полинома (2) определяется количеством различных мономов (элементарных конъюнкций при $q = 2$), которые в свою очередь являются элементарными правилами. Приведем нижние и верхние оценки сложности формирования функций в классе приведенных полиномов.

Оценки сложности формирования функций в классе приведенных полиномов над конечными полями

Введем ряд обозначений для оценки сложности функций в классе полиномов [11]. Множество всех функций многозначной логики с основанием q обозначим P_q . Пусть $l(G)$ обозначает количество слагаемых полинома G и называется длиной полинома G . Пусть $f(x_1, x_2, \dots, x_m) \in P_q$ и имеет соответствующий ей приведенный полином G_f над P_q . Введем функционал $l_G(f) = \min(l(G_f))$, обозначающий длину полинома G_f . Значение $l_G(f)$ называют сложностью функции f в классе приведенных полиномов.

Также введем в рассмотрение функцию $L_G(m) = \max_{f \in P_q(m)} (l_G(f))$, которая характеризует

сложность «самой сложной функции» от m переменных в классе приведенных полиномов. Функция $L_G(m)$ называется функцией Шеннона сложности в классе приведенных полиномов. Тогда можно доказать следующие утверждения для нижней и верхней оценок сложности функций.

Теорема 3.1. Нижняя оценка для функции Шеннона сложности в классе приведенных полиномов над $GF(q)$ задается неравенством

$$L_G(m) \geq \frac{q^m}{m \log_q(q+1)}.$$

Доказательство: Пусть $L_G(m) = L$. Всего существует $(q+1)^m$ мономов (элементарных конъюнкций при $q = 2$) от m переменных, поэтому количество полиномов длины не больше L от m переменных не превосходит $((q+1)^m)^L$. Число функций P_q от m переменных равно q^{q^m} . Очевидно, что количество полиномов не может быть меньше числа функций, иначе найдется функция, для которой не существует эквивалентный ей полином длины $\leq L$, что противоречит определению $L_G(m)$. Следовательно: $(q+1)^{mL} \geq q^{q^m}$. Выразив L из данного неравенства, получаем

$$L_G(m) \geq \frac{q^m}{m \log_q(q+1)}. \quad (3)$$

Оценку сверху для $L_G(m)$ можно получить, обобщив на случай многозначной логики верх-

нюю оценку для булевых функций, а именно [11]:
 $L_{P_2}(m) \leq 2 \frac{2^m}{m} (1 + \ln(m))$. Тогда для приведенного полинома в P_q получим

$$L_G(m) \leq \frac{q^{m+1}}{m} (1 + \ln(m)). \quad (4)$$

Как видно из выражений (3) и (4), при аппроксимации аддитивных нечетких систем приведенными полиномами над $GF(q^m)$ по-прежнему, как и в классических нечетких продукционных моделях, имеет место экспоненциальный рост количества правил при стремлении к нулю ошибки аппроксимации, что приводит к существенному росту либо вычислительной сложности, либо коммуникационной сложности и практической неприменимости. С практической точки зрения достаточно иметь приемлемую для адекватного принятия решения точность аппроксимации. В этом случае задача сводится к поиску компромисса между указанной точностью и количеством правил модели. Подходы к поиску такого компромисса могут быть следующими:

1) использовать алгоритмы формирования приближенных приведенных полиномов;

2) модифицировать известные из существующих рекурсивные алгоритмы, базирующиеся на формировании эквивалентных генераторов линейных рекуррентных последовательностей;

3) выполнить построение иерархических конструкций из адаптивных нечетких систем или их изоморфных образов над конечными полями, используя возможность представления приведенного полинома в виде произведения его неприводимых сомножителей.

Отметим, что ограничение 3.2 можно ослабить без потери общности до более слабого ограничения 3.4 на перекрытия оснований функций принадлежности, обеспечив касание термов более чем в одной общей точке, но этого достаточно, чтобы сохранить компакт X и, следовательно, оставить пространство топологичным.

Ограничение 3.4. Пусть каждая функция принадлежности $\mu_{A_l}(x_i) \in [0, 1]$ для $l=1, q$ и $\mu_{B_z}(y) \in [0, 1]$ для $z=1, q$ является симметричной и имеет центроиды $x_i^{(l)}$ с вершинами в точках с абсциссами $\frac{l-1}{q-1}$ и основания-

ми: $\left[0, \frac{1}{q-1}\right]$ при $l=1$, $\left[1-\frac{1}{q-1}, 1\right]$ при $l=q$ и $\left[\frac{l-1}{q-1} - \frac{1}{q-1}, \frac{l-1}{q-1} + \frac{1}{q-1}\right]$ при $l \neq 1$ и $l \neq q$.

Ограничения 3.2 и 3.4 указывают на диапазон возможных интервалов настройки параметров функций принадлежности, если аддитивная не-

четкая модель является адаптивной (нейронечеткой), сохраняя ее топологию.

Наличие целевой функции у агента позволяет добиться регулируемого баланса между количеством правил и точностью аппроксимации, формируя иерархические нечеткие продукционные модели (аддитивные m -входные иерархические нечеткие модели), включающие в себя $(m-1)$ -входных нечетких продукционных моделей [12]. Иерархическая схема при этом, очевидно, должна учитывать рейтингование вложенных в нее нечетких моделей (рейтинговые механизмы в данной статье не рассматриваются).

Докажем, что аддитивные m -входные иерархические нечеткие модели также являются универсальными аппроксиматорами. Для этого следует показать, что вид полинома, аппроксимирующего аддитивную нечеткую модель, может быть представлен некоторой иерархической структурой. Иерархическая структура в свою очередь всегда может быть получена из мультипликативной формы полинома.

Теорема 3.2. Существует полином $p(X) \rightarrow Y$ с вещественными коэффициентами и с мультипликативной структурой своих одночленов, который аппроксимирует аддитивная нечеткая система F со сколь угодно малой точностью $\varepsilon > 0$, если множество X компактно.

Доказательство: Возможность представления произвольного полинома в виде мультипликативной структуры его членов вытекает из существования интерполяционной формулы Лагранжа, а также непосредственно из утверждений теорем 2.3, Вейерштрасса и Коско. Формула Лагранжа в данном случае имеет следующий вид:

$$f(x_1, \dots, x_m) = \sum_{(a_1 a_2 \dots a_m)} f(a_1 a_2 \dots a_m) \times (x_1 + a_1 + 1) \dots (x_m + a_m + 1).$$

Теоремы 1.1–3.2 лежат в основе алгоритма мягкого квантования нечетких импликаций, представленного в следующем разделе. С помощью данного алгоритма появляется возможность автоматического регулирования мощности продукционных баз знаний, используемых, в частности, в многоагентных телекоммуникационных системах.

Алгоритм мягкого квантования нечетких импликаций

Как аддитивная, так и мультипликативная форма приведенного полинома, который является образом аддитивной нечеткой модели, позволяет распределять (и перераспределять) его мономы (элементарные дизъюнкции и конъюнкции при

$q = 2$) между отдельными агентами, объединенными в одну группу для выполнения целевой функции. Целевая функция представляет собой не что иное, как полную (или полную с заданной точностью аппроксимации) форму приведенного полинома (аддитивную или мультипликативную).

Подчеркнем, что любое метрическое пространство топологично. Изменяя число уровней иерархии m -входной иерархической нейронечеткой модели, мы, по сути, регулируем коэффициенты полинома Пуанкаре, которые есть не что иное, как числа Бетти. Обобщенный алгоритм мягкого квантования базы знаний одновременно конструирует ее архитектуру — строит адаптивный классификатор, балансируя между его метрической и топологической структурами. Основные шаги мягкого квантования базы знаний рассматриваемых архитектур следующие.

Шаг 1. Для каждой входной нечеткой переменной x_1, x_2, \dots, x_m базы знаний создать своего агента $A_j, j = 1, m$ (предполагается, что x_1, x_2, \dots, x_m нормированы).

Шаг 2. Каждого агента назначить ответственным за свою характеристику $q_i, i = 1, q$, где q — простое число или степень простого числа.

Шаг 3. Установить начальные значения для количества термов каждой топологии: для плоской $N_j^{flat} = 1$, для иерархической $N_j^{hier} = 1$.

Шаг 4. В параллельном режиме каждый агент решает задачу выбора топологии своего нечеткого входа.

До тех пор, пока $|f(x_{ji}) - \hat{f}(x_{ji})| = \varepsilon_i > \varepsilon$ ($\hat{f}(x_i)$ — эталонная выборка на этапе обучения) или число уровней иерархии модели меньше q , делаем параллельно:

— для плоской модели увеличиваем N_j^{flat} :
 $N_j^{flat} = N_j^{flat} q_i$ — число термов для x_j ;

— для иерархической модели фиксируем на первом слое для x_j количество термов равным q_i , для термов x_j со степенью принадлежности *второго* рода $\mu'(y, x_j) \geq \delta$ (δ зависит от решаемой задачи и известна априорно, обычно являясь точкой перехода, $\delta = 0,5$) добавить новый слой также с количеством термов, равным q_i : $N_j^{hier} = N_j^{hier} + q_i$.

Условие выхода из цикла говорит о том, что он конечен.

Шаг 5. Сравнить количество термов в соответствии с условием: если $N_j^{flat} \leq N_j^{hier}$, то оставить модель плоской (значит, выход y гладко зависит от x_j), иначе сохранить иерархию топологии.

Шаг 6. Инкапсулировать выбранную на шаге 4 топологию модели (считать сформированную топологию кандидатом на узел m -входной иерархической нейронечеткой модели, зафиксировать его топологию, рассчитанное количество термов и $q_i^{(j)}$).

Шаг 7. Ранжировать x_1, x_2, \dots, x_m в соответствии с их влиянием на целевую функцию y , объединить сформированные инкапсулированные узлы в иерархию в соответствии с разложением числа m по основанию $q_{opt} = \max_{j=1, m} q_i^{(j)}$.

Следовательно, количество входов для надуровня $m^{(+1)} = \log_{q_{opt}}(m)$. (Если $m^{(+1)} \geq q_{opt}$, то топологию можно наращивать до $m^{(+2)}$, но при этом алгоритм экспоненциально сходится).

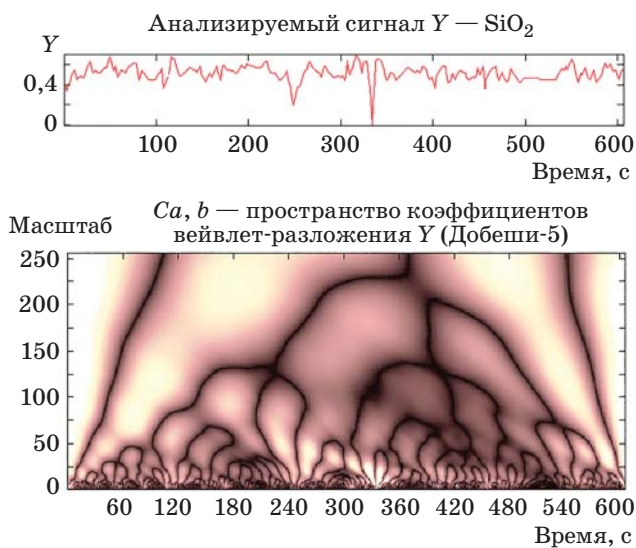
Шаг 8. Параметры настройки начальных термов для входов надуровня принять равными выходным термам текущего уровня. Проверить ошибку обобщения, при необходимости адаптировать параметры входных термов надуровня.

Шаг 9. В зависимости от решаемой задачи — если свою базу знаний агенту не нужно публиковать (т. е. он квантовался, чтобы получить данные от других агентов), то задачу квантования считать решенной. Если базу знаний нужно транспортировать через других агентов или по незащищенным каналам связи, то выполнить жесткое пороговое кодирование полученной топологии, сохранив массив настроек функций принадлежности на момент жесткого квантования. Объем такого массива линеен по отношению к количеству входов иерархической нейронечеткой модели. Для каждого входа в рамках своего узла найти приведенный полином, аппроксимирующий данный вход как линейную рекуррентную последовательность. При этом потеря информации не происходит, а объем передаваемой базы знаний определяется степенью полученного полинома.

Поскольку коммуникационная сложность CC определяется как глубина графа коммуникационного протокола, то из приведенного выше алгоритма мягкого квантования очевидно, что оценки коммуникационной сложности m -входной иерархической нейронечеткой модели определяются неравенством

$$\log q_{opt} \leq CC \leq \log \left(\min_j \left(\max_j N_j^{flat} + \max_j N_j^{hier} \right) \right) \leq \leq 2 \log q_{opt}, \quad j = 1, m.$$

Отметим, что на практике при решении задач автономного адаптивного управления технологическими параметрами, например в горно-металлургическом производстве, «плавающие» оптимизируемые выходные параметры успешно удается контролировать нейронечеткими сетями (агентами) с мощностью правил до 1000. Например, содержание оксида кремния SiO_2 в шлаке при выплавке медно-никелевых руд (Y), вейвлет-разложение (Добеши-5) коэффициентов которого отображено на рисунке, контролирует-



■ Вейвлет-разложение Добеши-5 контролируемого параметра Y

ся адаптивной системой [13] со средней мощностью правил 378 вместо 5^{16} при 16 входных нечетких параметрах. При этом переэквантование выполняется автоматически при появлении «четвертой ноги» во фрактальной структуре Y , меняя q_{opt} в диапазоне от 3 до 5. Важно, что информация о драгметаллах в открытых каналах передается защищенной.

В целом отметим, что иерархические адаптивные нейронечеткие модели, представленные приведенными полиномами, позволяют реализовать принципы распределенности многоагентных систем, а их практическая реализация [13] подтверждает эффективность функционирования в распределенных производственных информационно-телекоммуникационных системах.

Заключение

В данной статье на основании теорем об универсальной аппроксимации нечетких продукционных моделей доказаны теоремы о существова-

нии фиксированного простого числа q , при котором аддитивная нейронечеткая система F с симметричными функциями принадлежности для ее входных x_i и выходной переменной y на компакте X может быть аппроксимирована со сколь угодно малой точностью $\varepsilon > 0$ приведенным полиномом.

Даны верхние и нижние оценки функций Шеннона сложности для приведенных полиномов над конечными полями Галуа. Показана возможность аппроксимации иерархических нечетких и нейронечетких систем приведенными полиномами над конечными полями Галуа. Представлен алгоритм мягкого квантования аддитивных продукционных баз знаний и оценки коммуникационной сложности продукционной базы знаний, аппроксимируемой полиномом.

Полученные в статье доказательства могут быть использованы при решении задач автоматического квантования баз знаний, реализованных в виде аддитивных нечетких и нейронечетких сетей, что особенно важно при разработке интеллектуальных агентов открытых мультиагентных систем распределенных информационно-телекоммуникационных систем.

В частности, при решении практических задач представленные в статье результаты позволяют, во-первых, автоматически снижать объем продукционной базы знаний (на порядки) за счет построения иерархии правил базы знаний, представленных в виде мультипликативной и гранулированных форм ее приведенного полинома. При необходимости, наоборот, наращивать базу знаний нечеткими импликациями. Во-вторых, формировать метазнания в виде функций над приведенными полиномами. В-третьих, автоматически управлять уровнем защиты знаний и данных, изменяя его в соответствии с уровнем иерархии правил, выделенных на этапе квантования. В-четвертых, распределять и перераспределять правила между мобильными агентами перед транспортировкой базы знаний по каналам связи, распределяя тем самым время доставки ее получателю при обеспечении требуемого уровня надежности.

Литература

1. Тимофеев А. В., Юсупов Р. М. Интеллектуализация процессов управления и навигации робототехнических систем // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 2(3). С. 19–22.
2. Patent USA 7532724 H04L 9/00. Method for Encrypting and Decrypting Data for Multi-Level Access Control in an Ad-Hoc Network/ S. Bezzateev, Tae-chul Jung, Kyung-hee Lee, E. Krouk, A. Sitalov.
3. Фомичева С. Г. Защита информации в распределенных иерархических системах // Научно-техни-

ческие ведомости СПбГТУ. Информатика, телекоммуникации, управление. 2008. № 2. С. 91–97.

4. Борисов В. В., Круглов А. С., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. — М.: Горячая линия–Телеком, 2012. — 284 с.
5. Kosco B. Fuzzy System as Universal Approximators // Proc. of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, San Diego, 1992. P. 1153–1162.
6. Wang L. X. Fuzzy Systems are Universal Approximators // Proc. of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, San Diego, 1992. P. 1163–1169.

7. Ying H. Sufficient Conditions on Uniform Approximation of Multivariate Functions by General Takagi – Sugeno Fuzzy Systems with Linear Rule Consequents // *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*. 1998. Vol. 28. Part A. N 4. P. 515–520.
8. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. — М.: Физматлит, 2003. Т. 1. — 680 с.
9. Lidl R., Niederreiter H. *Finite Fields*. — Cambridge University Press, 1985. — 822 p.
10. Фомичева С. Г. Теория потоковых систем защиты информации. — Норильск: Норильский инд. ин-т, 2007. — 243 с.
11. Селезнева С. Н. Булевы функции и полиномы. http://mk.cs.msu.ru/images/e/ea/ Bool_polynoms.pdf (дата обращения: 25.01.2017).
12. Фомичева С. Г. и др. Моделирование развития информационно-телекоммуникационных систем. — СПб.: Синтез-Бук, 2009. — 384 с.
13. Фомичева С. Г., Конев А. В. Адаптивная система управления содержанием оксида кремния в шлаках при переработке медно-никелевых руд // *Программные продукты и системы*. 2014. № 3(107). С. 131–141.

UDC 621.391; 004.89

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.2

Theoretical Aspects of Knowledge base Quantization in Multi-Agent Systems

Fomicheva S. G.^a, PhD, Tech., Professor, levikha@rambler.ru

^aNorilsk State Industrial Institute, 7, 50 Let Oktyabrya St., 663310, Norilsk, Russian Federation

Introduction: Intensive use of wireless and mobile communication networks in distributed information-telecommunication systems and automated systems of control over technological processes in industrial corporations leads to the situation when the architecture of such systems forms new conceptual entities called agents which should be controlled in real time. When assessing the effectiveness of multi-agent systems, you should take into account the communication complexity of the interaction between the agents, which directly depends on the number of the adapted parameters. For intelligent agents, the main issues in this case are, on the one hand, the requirement of rapid adaptation and self-adaptive parameters of their knowledge bases and, on the other hand, the need to ensure the integrity and security of both the data and the agents' knowledge. **Purpose:** The goal of this research is developing theoretical and algorithmic ways for soft quantization of additive production knowledge bases, which would reduce the communication complexity of the interaction between intelligent agents. **Results:** We have proved a number of statements which allow you to perform isomorphic transformations of classical additive fuzzy models functioning in the field of real numbers into their analogs able to function in finite Galois fields. We have demonstrated the homeomorphism (topologic isomorphism) of the discussed fuzzy and neuro-fuzzy models. On the base of the proven statements, an algorithm of soft quantization of fuzzy implications has been developed. The essence of this algorithm is flexible control over the topology of neuro-fuzzy hierarchical models while maintaining the given accuracy of the approximation of the agent-controlled parameters. The novelty of our approach is the substantiated principal possibility of adequate quantization of additive production knowledge bases. A way has been found to automatically control the amount of knowledge base optimization parameters which include the number of terms in linguistic variables, the number of adaptation parameters for each linguistic terms, and the number of hierarchical levels in an additive fuzzy model. As constraints, we have accepted the assumptions about continuous coverage of the solution space (continuum) by terms of linguistic variables of fuzzy implications. It has been shown that to ensure a quantization continuum, it is sufficient to adjust the Galois field characteristic. **Practical relevance:** The developed method for soft quantization of fuzzy implications allows you to significantly (in several orders) reduce the volume of the knowledge base necessary for the agents to make appropriate decisions, thereby reducing the communication complexity of the interaction between the agents. Also, it provides the possibility to adjust the level at which the data and the knowledge of the agents are protected.

Keywords — Additive Fuzzy Models, Multi-Agent Telecommunication Systems, Isomorphism, Homeomorphism, Quantization, Finite Galois Field, Given Polynomials over Finite Fields, Communication Complexity.

References

1. Timofeev A. V., Iusupov R. M. Intellectualization of the Processes for Control and Robotic Navigation Systems. *Robototekhnika i tekhnicheskaja kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2014, no. 2(3), pp. 19–22 (In Russian).
2. Bezzateev S., Jung Tae-chul, Lee Kyung-hee, Krouk E., Sit-alov A. Method for Encrypting and Decrypting Data for Multi-Level Access Control in an Ad-Hoc Network. Patent USA 7532724 H04L 9/00.
3. Fomicheva S. G. Protection of Information in Distributed Hierarchical Systems. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika, telekommunikatsii, upravlenie*, 2008, no. 2, pp. 91–97 (In Russian).
4. Borisov V. V., Kruglov A. S., Fedulov A. S. *Nechetkie modeli i seti* [Fuzzy Models and Nets]. Moscow, Goriachaja liniia–Telekom Publ., 2012. 284 p. (In Russian).
5. Kosco B. Fuzzy System as Universal Approximators. *Proc. of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, 1992, pp. 1153–1162.
6. Wang L. X. Fuzzy Systems are Universal Approximators. *Proc. of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, 1992, pp. 1163–1169.
7. Ying H. Sufficient Conditions on Uniform Approximation of Multivariate Functions by General Takagi–Sugeno Fuzzy Systems with Linear Rule Consequents. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 1998, vol. 28, part A, no. 4, pp. 515–520.
8. Fikhtengol'ts G. M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniia* [Course of Differential and Integral Calculus]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 680 p. (In Russian).
9. Lidl R., Niederreiter H. *Finite Fields*. Cambridge University Press, 1985. 822 p.
10. Fomicheva S. G. *Teoriia potokovykh sistem zashchity informatsii* [The Stream Systems Theory for Information Protection]. Norilsk, Noril'skii industrial'nyi institute Publ., 2007. 243 p. (In Russian).
11. Selezneva S. N. *Bulevy funtsii i polinomy* [The Boolean Functions and Polynomial's]. Available at: http://mk.cs.msu.ru/images/e/ea/Bool_polynoms.pdf (accessed 25 January 2017).
12. Fomicheva S. G., et. al. *Modelirovanie razvitiia informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem* [The Simulation of the Development for Information and Telecommunication Systems]. Saint-Petersburg, Sintez-Buk Publ., 2009. 384 p. (In Russian).
13. Fomicheva S. G., Konev A. V. Adaptive Control System for Silicon Oxide Concentration in Slags at Processing Cooper-nickel Ores. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems], 2014, no. 3(107), pp. 131–141 (In Russian).

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ФОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ КОНВЕРТАЦИИ 2D-ВИДЕО В 3D-ФОРМАТ

Н. Н. Красильников^а, доктор техн. наук, профессор

О. И. Красильникова^а, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Постановка проблемы: технология конвертации 2D-видео в 3D-формат включает в себя две трудоемкие операции, выполнение которых, как правило, требует больших затрат ручного труда. К этим операциям относятся заполнение областей открытия, возникающих в результате смещения объектов сцены, обусловленного параллаксом, и выделение силуэтов объектов сцены путем семантической сегментации изображений конвертируемой последовательности кадров в процессе создания карты глубины. **Цель исследования:** разработка методов получения фоновых изображений конвертируемых последовательностей кадров и на их основе технологий заполнения областей открытия и выделения силуэтов изображений движущихся объектов. **Результаты:** разработаны методы создания фоновых изображений: метод предварительной съемки фонового изображения той же камерой, которая используется для съемки клипа; метод поиска фонового изображения в отснятом клипе и метод монтажа фонового изображения из фрагментов клипа для различных направлений движения объекта, — а также метод заполнения областей открытия, возникающих при конвертации 2D-изображений клипа в 3D-формат, с использованием для этой цели фонового изображения и метод выделения силуэтов изображений движущихся объектов, необходимых для создания карты глубины, из последовательности кадров клипа путем сопоставления изображений последовательности с фоновым изображением. **Практическая значимость:** разработанные методы позволяют при конвертации 2D-видео в 3D-формат сокращать трудоемкость процесса в десятки и более раз.

Ключевые слова — стереоскопическое изображение, фоновое изображение, область открытия, карта глубины.

Введение

В настоящее время одной из причин, тормозящих развитие и внедрение 3D-кино и телевидения, является недостаточное количество качественного 3D-контента, что объясняется трудностями его создания [1]. Непосредственная съемка 3D-фильма, по самым грубым и оптимистичным подсчетам, увеличивает изначальный бюджет 2D-фильма на 30–50 % и более. Поэтому наряду с методом непосредственной съемки фильма в стереоскопическом (3D) формате был разработан метод конвертации 2D-фильмов в 3D-формат. В настоящее время используются оба метода получения 3D-контента, но и там и там возникают проблемы. В первом случае наиболее сложными являются проблемы выбора параметров съемки, фокусного расстояния объектива, расстояния между оптическими осями объективов стереокамеры и т. д., а также редактирования уже отснятого материала в целях коррекции допущенных ошибок при выборе исходных параметров съемки. Во втором случае проблемы обусловлены как необходимостью большого объема ручного труда при выполнении конвертации, так и отсутствием полной информации об изображении конвертируемой сцены, полученном из одной точки съемки.

В настоящее время около 2/3 стереоскопических фильмов производится путем конвертации фильмов, снятых в формате 2D, в формат 3D [2, 3].

Одной из наиболее трудоемких операций конвертации последовательности 2D-изображений клипа фильма в 3D-формат является выполняемая вручную операция заполнения областей открытия, возникающих в результате обусловленного параллаксом смещения объектов сцены. Другой не менее трудоемкой операцией является сегментация, в результате которой выделяются изображения объектов на 2D-изображениях из фоновой части. Трудоемкость обусловлена тем, что, как правило, изображения объектов имеют сложную форму, которая к тому же изменяется при переходе от одного кадра к другому кадру видеопоследовательности. В связи с этим сегментация может быть только семантической, а следовательно, должна выполняться также вручную.

Проблема заполнения областей открытия

Рассмотрим проблему заполнения областей открытия вследствие смещения объектов, вызванного экранном параллаксом. При конвертации, в результате смещения изображений объектов вправо и влево относительно своего первоначального положения на исходном 2D-изображении, на изображениях стереопары образуются области, которые должны быть заполнены изображением фона, который на исходном изображении заслонен объектом, а поскольку такое изображение отсутствует, то образуются так называемые



■ **Рис. 1.** Пояснение к возникновению областей открытия



■ **Рис. 2.** Метод заполнения областей открытия фоновым изображением: *а* — исходное изображение, включающее в себя объект и фоновую часть; *б* — силуэт объекта; *в* — фоновое изображение

области открытия, и их необходимо заполнить. Одна из таких областей показана на рис. 1.

Часто эта проблема решается путем повторения пикселя на границе области открытия



■ **Рис. 3.** Результаты конвертации 2D-изображения в 3D-формат для левого компонента стереоскопического изображения, на котором области открытия видны (*а*); заполнены фрагментами фонового изображения (*б*)

(методом интерполяции нулевого порядка). Для этой цели предлагаются также метод линейной интерполяции, метод текстурного заполнения и ряд других [4–7]. К сожалению, ни один из них не позволяет получать удовлетворительные результаты.

Для полноценного решения проблемы заполнения областей открытия необходимо располагать фоновым изображением, которое не содержало бы движущиеся объекты [3, 8–11]. В этом случае области открытия могут быть просто заполнены соответствующими фрагментами фонового изображения. Таким образом, проблема заполнения областей открытия может быть сведена к более простой задаче — получению фонового изображения. Попутно отметим, что для этого не обязательно иметь все фоновое изображение, а достаточно располагать только областями, совпадающими с областями открытия, и проблема заполнения будет решена.

Кроме того, наличие фонового изображения упрощает создание карты глубины путем сравнения каждого из кадров конвертируемой видеопоследовательности с фоновым изображением и получения таким образом силуэтов изображений объектов, которые впоследствии, после соответствующей обработки, будут заполнены пикселями необходимой интенсивности. Проведенные нами исследования на видеопоследовательностях, взятых из реальных фильмов, показали, что в значительной части случаев фоновые изображения, на которых отсутствуют изображения объектов, могут быть сравнительно несложным способом получены из самой видеопоследовательности. Рис. 2, *а–в* и 3, *а, б* поясняют описываемый метод заполнения областей открытия.

Создание фонового изображения

Самым простым способом получения фонового изображения является предварительная съемка сцены камерой в отсутствие движущихся объектов. При этом необходимо, чтобы:

- съемка фонового изображения производилась той же камерой, что и съемка всего снимаемого сюжета (клипа), для которого снимается фоновое изображение;

- положение камеры было зафиксировано и не изменялось бы в процессе съемки клипа;

- при съемке фонового изображения и последующего клипа сохранялись бы неизменными все настройки камеры и режим освещения. Выполнение перечисленных условий может оказаться не таким простым, как представляется, особенно при съемке протяженных по времени клипов. Даже при съемках в студии трудно обеспечить неизменным режим освещения, поскольку перемещающиеся объекты, отбрасывая тени и переотражая свет от источников освещения, нарушают его.

Часто возможность произвести предварительную съемку фоновых изображений отсутствует, например, когда необходимо конвертировать уже отснятый фильм. В этом случае фоновые изображения можно создать путем сборки из фрагментов уже имеющихся последовательностей, на которых фон не заслонен движущимися объектами (рис. 4). На рис. 4, *а* и *б* приведены два кадра из мультфильма «Ну, погоди!», содержащие движущийся объект (волка), но эти кадры выбраны из видеопоследовательности таким образом, что движущийся объект на них в обоих случаях заслоняет различные части фона. Благодаря этому путем монтажа было составлено фоновое изображение (рис. 4, *в*). При выборе кадров видеопоследовательности, из которых в дальнейшем получается фоновое изображение, необходимо следить за тем, чтобы они были сняты при неизменном положении камеры. Это

выполняется путем их сравнения. В некоторых случаях возникает необходимость небольшого редактирования получаемого фонового изображения с тем, чтобы сделать незаметными места сшивки.

Теперь рассмотрим создание фонового изображения, когда в последовательности кадров клипа отсутствует хотя бы один кадр, который не содержит движущийся объект, но объект движется в направлении на камеру или от камеры, закрывая собой часть фона. Для реализации этого случая необходимо выполнить следующее:

- если объект перемещается на камеру, нужно, начиная со второго кадра от начала последовательности, изготовить ряд силуэтов движущегося объекта (их необходимое количество определяется опытным путем);

- определить для изображений этого объекта значения экранных параллаксов;

- путем морфологической обработки вида «эрозия» изготовленных силуэтов движущегося объекта удалить с каждого из них количество слоев пикселей, равное половине экранного параллакса;

- путем сравнения слоев посредством наложения подобрать ближайший к первому кадру кадр последовательности, в котором изображение движущегося объекта первого кадра полностью помещается внутри силуэта, предварительно подвергнутого эрозии. Начиная с этого ближайшего кадра и до конца последовательности изображение первого кадра последовательности можно использовать как фоновое.

В том случае если объект при движении удаляется от камеры, описанные выше действия необходимо выполнять, начиная с предпоследнего кадра последовательности, т. е. с кадра, на котором изображение движущегося объекта имеет небольшие размеры (рис. 5, *а-в* и 6, *а, б*).

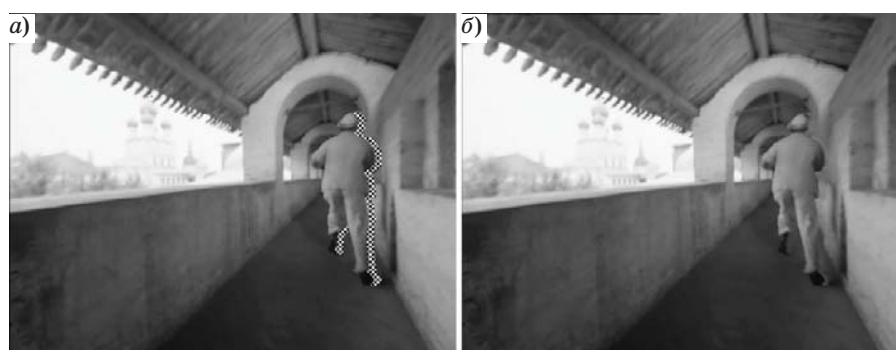
Для кадров, заключенных между кадром, который используется как фоновое изображение, и кадром, с которого фоновое изображение начинает использоваться для заполнения областей



■ **Рис. 4.** Создание фонового изображения из двух кадров: *а, б* — исходные изображения, включающие в себя объект (волка в разных местах коридора и фоновую часть); *в* — фоновое изображение, полученное из первых двух путем монтажа



■ **Рис. 5.** Создание фонового изображения из двух кадров: *а, б* — исходное изображение, на котором движущийся объект (человек) находится соответственно относительно близко к камере и далеко от камеры; *в* — силуэт этого движущегося объекта



■ **Рис. 6.** Результат конвертации исходного изображения в 3D-формат: на левом компоненте стереоскопического изображения области открытия видны (*а*) и заполнены фрагментами фонового изображения (*б*)

открытия, ничего другого не остается, как заполнить эти области одним из традиционных методов [3–7].

Адаптация фонового изображения к изменяющимся условиям съемки

Как уже было отмечено, фоновый компонент изображения в различных кадрах конвертируемой последовательности может быть подвержен небольшим изменениям, обусловленным незначительными варьированиями как освещения снимаемой сцены, так и положения снимающей камеры. Это особенно проявляется при съемке клипов, имеющих значительную протяженность во времени. Величины смещений фонового изображения в течение нескольких секунд, как показали измерения на реальных фильмах, не превышают одного пикселя. Изменения яркости пикселей фонового компонента изображения кадра при наличии в кадре движущихся объектов даже за это время могут быть вполне ощутимыми, особенно если движущиеся объекты отбрасывают тени.

Для компенсации рассогласования фоновых изображений, созданных одним из описанных выше методов, с фоновыми компонентами изображений, в которых производится заполнение областей открытия, необходимо производить их адаптацию к тем изменениям, которые имели место при съемке конвертируемых изображений кадров.

Вначале необходимо для каждого кадра конвертируемой последовательности изготовить индивидуальные фоновые изображения в предположении, что рассогласования имеют место только в виде смещений очередного конвертируемого кадра последовательности относительно исходного фонового изображения. При этом процедура компенсации будет состоять в смещении исходного фонового изображения до полного совпадения по столбцам и по строкам с фоновым компонентом изображения, в котором производится заполнение областей открытия.

После этого необходимо компенсировать рассогласование по яркости каждого изготовленного описанным методом индивидуального фонового изображения с фоновым компонентом изображения, в котором производится заполнение обла-

стей открытия. Операция эта выполняется с самого начала конвертируемой последовательности кадров в соответствии с правилом

$$L_{\Phi}(k, n, i) = L_c(k, n, i),$$

если $|L_c(k, n, i) - L_{\Phi}(k, n, i)| < P,$

где $L_{\Phi}(k, n, i)$ — индивидуальное фоновое изображение i -го кадра последовательности; $L_c(k, n, i)$ — изображение i -го кадра конвертируемой последовательности; k — номер строки; n — номер столбца; i — номер кадра; P — порог, который подбирается экспериментально [12].

Создание силуэта изображения движущегося объекта

Как уже было отмечено, наиболее сложной операцией при конвертации 2D-видео в 3D-формат является выделение силуэтов движущихся объектов из изображений кадров конвертируемой последовательности. Обусловлено это тем, что вследствие сложности контуров движущихся объектов эту операцию приходится выполнять вручную. Наличие фоновых изображений существенно упрощает проблему, поскольку операция выделения силуэтов движущихся объектов может быть в значительной степени автоматизирована путем сравнения изображения кадра, который содержит движущийся объект, с соответствующим фоновым изображением, и формирования на основе этого заготовки для изготовления силуэта (рис. 7, а–в). Выполняется это в соответствии с правилом

$$S(k, n, i) = \begin{cases} 255, & \text{если } |L_c(k, n, i) - L_{\Phi}(k, n, i)| \geq P, \\ 0, & \text{если } |L_c(k, n, i) - L_{\Phi}(k, n, i)| < P \end{cases},$$

где $S(k, n, i)$ — заготовка для изготовления силуэта изображения движущегося объекта.

Из рисунка видно, что вследствие флуктуационного шума, присутствие которого неизбежно как на изображении кадра, содержащего движущийся объект, так и на фоновом изображении, возникают характерные погрешности изображения заготовки силуэта, которые проявляются в виде незаполненных областей, нарушения гладкости контура, а также в виде отдельных выбросов шума на полях, которые должны оставаться незаполненными. Поэтому заготовка нуждается в ручном редактировании, которое заключается в заполнении незаполненных областей силуэта, сглаживании контуров и устранении светлых точек и штрихов в остальной части поля. Однако эта операция несравненно более простая, чем рисование силуэта движущегося объекта. Это особенно важно при конвертации видеопоследовательностей, протяженность которых часто превышает сотни кадров. Естественно, что перед тем как приступить к выполнению операции выделения силуэтов движущихся объектов, из изображений последовательности кадров, которые их содержат, следует произвести адаптацию фоновых изображений к изменяющимся условиям съемки в соответствии с описанным выше методом.

Заключение

В заключение отметим, что длительность клипов (отдельных сюжетов), из которых состоит видеопоследовательность реальных фильмов, обычно заключена в интервале от 3–5 с и до десятков секунд, следовательно, в пересчете на количество кадров, формирующих такую последовательность при частоте кадров 25 кадров/с, это составит от 75 и до нескольких сотен и даже тысяч кадров. Из этого следует, что метод заполнения областей открытия путем применения предварительно созданных для этой цели фоновых изображений позволяет существенно сократить объем



■ **Рис. 7.** Создание заготовки силуэта движущегося объекта: а — исходное изображение, включающее в себя движущийся объект (волка) и фоновую часть; б — фоновое изображение; в — изображение заготовки силуэта

работы по сравнению с методом заполнения этих областей ручным способом, поскольку метод интерполяции и другие применяемые в настоящее время методы не приводят к хорошим результатам.

Формирование фонового изображения позволяет также весьма существенно упростить возникающую при создании карты глубины проблему сегментации изображений движущихся объектов путем выделения их силуэтов.

Литература

1. Ватолин Д. С., Боков А. А., Федоров А. А. Тенденции изменения технического качества стереокино — 5 лет после «Аватара» // Мир техники кино. 2015. № 3(37). С. 17–28.
2. Real 3D or Fake 3D. <http://realorfake3d.com/> (дата обращения: 15.05.2017).
3. Ерофеев М. В., Ватолин Д. С. Многослойное решение проблемы полупрозрачных границ при построении стереоскопических изображений // Intern. Journal of Open Information Technologies. 2016. N 8(4). <http://istina.msu.ru/media/publications/article/854/979/27852059/310-900-1-PB.pdf>. (дата обращения: 15.05.2017).
4. Acharya T., Tsai P. S. Computational Foundations of Image Interpolation Algorithms // ACM Ubiquity. 2007. N 8. <http://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1317488> (дата обращения: 15.05.2017).
5. Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Методы конвертации 2D-изображений и видео в стереоскопический формат // Информационно-управляющие системы. 2015. № 5. С. 18–25. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.18
6. Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Исследование восприятия 3D-объектов зрительной системой человека для разработки методов конвертации 2D-изображений в стереоскопические изображения // Оптический журнал. 2015. № 10(82). С. 1–8.
7. Newson A., Almansa A., Fradet M., Gousseau Y., Pérez P. Video Inpainting of Complex Scenes // SIAM Journal on Imaging Sciences. 2014. N 4(7). P. 1993–2019. doi:10.1137/140954933
8. Ерофеев М. В., Ватолин Д. С. Матирование видео-последовательностей с использованием восстановленного фона // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 3. С. 19–25.
9. Wang J., Cohen M. F. Image and Video Matting: a Survey // Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision. 2007. N 2(3). P. 97–175. doi:10.1561/06000000019
10. Rhemann C., Rother C., Wang J., Gelautz M., Kohli P., Rott P. A Perceptually Motivated Online Benchmark for Image Matting // Computer Vision and Pattern Recognition: Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2009), Miami, Florida, USA. 2009. P. 1826–1833. doi:10.1109/CVPR.2009.5206503
11. Lee S.-Y., Yoon J.-C., Lee I.-K. Temporally Coherent Video Matting // Graphical Models. 2010. N 3(72). P. 25–33. doi:10.1016/j.gmod.2010.03.001
12. Красильников Н. Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 608 с.

UDC 612.843.721

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.11

Creating Background Images and Their use in Converting 2D video into 3D format

Krasilnikov N. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, NNKrasilnikov@yandex.ru

Krasilnikova O. I.^a, PhD, Tech., Associate Professor, OIKrasilnikova@yandex.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The technology of converting 2D video into 3D format includes two time-consuming operations which usually require a lot of manual labor. The first operation is filling up the opening areas which result from the scene object displacement caused by the parallax. The second one is the selection of scene object silhouettes by semantic segmentation of the frame sequence during the creation of the depth map. **Purpose:** We develop methods for obtaining background images of the frame sequences to be converted. These methods can be the base for a technology of filling up the opening areas and for a technology of allocating moving object silhouettes. **Results:** We have developed methods for creating background images, namely: a method for preliminary shooting of the background image by the same camera which is used for shooting the clip, a method of searching for the background image in the captured clip, and a method for assembling the background image from fragments of the clip for various directions of the object movement. Also, methods have been developed for filling up the opening areas which arise when converting 2D images of a clip into 3D format by using the background image for this purpose, and for allocating moving object image silhouettes (which are necessary for creating a depth map) from the clip frame sequence by comparing the images on the sequence with the background image. **Practical relevance:** The developed methods allow you to reduce the complexity of converting 2D videos into 3D format tenfold or more.

Keywords — Stereoscopic Image, Background Image, Opening Areas, Depth Map.

References

1. Vatolin D. S., Bokov A. A., Fedorov A. A. Trends in the Technical Quality of Stereoscopic — 5 Years after “Avatar”. *Mir tekhniki kino*, 2015, no. 3(37), pp. 17–28 (In Russian).
2. *Real 3D or Fake 3D*. Available at: <http://realorfake3d.com/> (accessed 15 May 2017).
3. Erofeev M. V., Vatolin D. S. Multilayer Solution of the Problem of Translucent Boundaries in the Construction of Stereoscopic Images. *Intern. Journal of Open Information Technologies*, 2016, vol. 4, no. 8. Available at: <http://istina.msu.ru/media/publications/article/854/979/27852059/310-900-1-PB.pdf> (accessed 15 May 2017).
4. Acharya T., Tsai P. S. Computational Foundations of Image Interpolation Algorithms. *ACM Ubiquity*, 2007, no. 8. Available at: <http://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1317488> (accessed 15 May 2017).
5. Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I. Methods of Converting 2D Images and Videos into Stereoscopic Format. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 5, pp. 18–25 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.18
6. Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I. Study of the Perception of 3D Objects by the Human Visual System in Order to Develop Methods for Converting 2D Images into Stereoscopic Images. *Opticheskiy zhurnal*, 2015, no. 10(82), pp. 1–8 (In Russian).
7. Newson A., Almansa A., Fradet M., Gousseau Y., Pérez P. Video Inpainting of Complex Scenes. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2014, no. 4(7), pp. 1993–2019. doi:10.1137/140954933
8. Erofeev M. V., Vatolin D. S. Matting Video Sequences using a Restored Background. *Tsifrovaia obrabotka signalov*, 2016, no. 3, pp. 19–25 (In Russian).
9. Wang J., Cohen M. F. Image and Video Matting: a Survey. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, 2008, no. 2(3), pp. 97–175. doi:10.1561/0600000019
10. Rhemann C., Rother C., Wang J., Gelautz M., Kohli P., Rott P. A Perceptually Motivated Online Benchmark for Image Matting. *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition “Computer Vision and Pattern Recognition” (CVPR 2009)*, Miami, Florida, USA, 2009, pp. 1826–1833. doi:10.1109/CVPR.2009.5206503
11. Lee S.-Y., Yoon J.-C., Lee I.-K. Temporally Coherent Video Matting. *Graphical Models*, 2010, no. 3(72), pp. 25–33. doi:10.1016/j.gmod.2010.03.001
12. Krasilnikov N. N. *Tsifrovaia obrabotka 2D- i 3D-izobrazhenii* [Digital Processing of 2D- and 3D-Images]. Saint-Petersburgs, BKhV-Peterburg Publ., 2011. 608 p. (In Russian).

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

ФИЛЬТРАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ШУМА НА ИЗОБРАЖЕНИИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ВЫЯВЛЕНИЯ СООБЩЕСТВ НА ГРАФАХ

С. В. Белим^а, доктор физ.-мат. наук, профессор

С. Б. Ларионов^а, аспирант

^аОмский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, Омск, РФ

Постановка проблемы: выявление и устранение импульсного шума на изображениях является актуальной задачей в теории и практике обработки сигналов. Существующие алгоритмы восстановления зашумленных изображений не обеспечивают достаточной точности либо изменяют незашумленные области изображения. **Цель:** разработка алгоритма фильтрации шума с использованием графов. **Результаты:** на базе предложенного алгоритма был реализован метод восстановления изображения, искаженного импульсным шумом. В процессе работы изображение представлялось в виде взвешенного, неориентированного графа, каждая вершина которого соответствует одной точке исходного изображения. К построенному графу применялся алгоритм выделения сообществ. Поврежденными считаются точки, которые соответствуют сообществам, состоящим из одной вершины. Реализованный метод был протестирован с помощью компьютерного эксперимента, проведенного как на черно-белых и на цветных искусственных изображениях, так и на фотографиях. Выявлено, что предложенный метод на 20 % эффективнее медианного фильтра при любом уровне зашумления. Более высокая эффективность предложенного метода обусловлена тем, что сначала ищутся поврежденные точки и потом восстанавливаются только они, тогда как большинство фильтров в процессе работы изменяют все точки изображения. Показана зависимость эффективности предложенного метода от процента шума на изображении.

Ключевые слова — импульсный шум, фильтрация изображений, выделение сообществ на графах.

Введение

Импульсный шум на цифровых изображениях проявляется как случайное изменение цвета отдельных, случайно расположенных пикселей, которые принято называть испорченными пикселями [1, 2]. Наличие шумов на изображении не только влияет на его визуальное восприятие, но и сказывается на результатах работы алгоритмов сегментации, выделения контуров, распознавания образов и т. д.

Для устранения влияния шумов широкое распространение получили сглаживающие фильтры. Наиболее часто используются фильтр Винера и медианный фильтр [3]. Следует также выделить нелокальные методы фильтрации [4–6], демонстрирующие более качественное подавление импульсного шума. Тем не менее сглаживающие фильтры обладают существенным недостатком, состоящим в изменении всего изображения в целом, а не только поврежденных пикселей. Данные изменения приводят к размытию контуров областей изображения и затрудняют его дальнейшую обработку.

Для минимизации влияния фильтра на не испорченную часть изображения используется подход, использующий поиск пикселей, измененных импульсным шумом. В дальнейшем действие фильтра ограничивается только испорченными пикселями. Задача поиска поврежденных пикселей сама по себе является достаточно сложной и решается, как правило, опираясь на анализ изображения методами Data Mining. В таком под-

ходе алгоритм устранения импульсного шума состоит из двух этапов. На первом этапе выполняется поиск поврежденных пикселей. На втором этапе выбирается новый цвет для каждого поврежденного пикселя. Для поиска поврежденных пикселей осуществляется последовательный проход по всему изображению с анализом цвета каждой точки. Принятие решения о поврежденности пикселя импульсным шумом принимается исходя из анализа его ближайших соседей, т. е. пикселей, соприкасающихся с данным пикселем по одной стороне либо по вершине.

Алгоритмы выявления испорченных пикселей можно разделить на две группы. Первая группа алгоритмов предназначена для выявления импульсного шума типа «Соль и перец». Особенностью данного вида шума является то, что поврежденные пиксели имеют либо максимальное значение цвета в палитре, либо минимальное. Соответственно, алгоритмы выявления поврежденных пикселей базируются на этой априорной информации [7–9]. Однако даже эти алгоритмы не гарантируют стопроцентное обнаружение поврежденных пикселей. Вторая группа алгоритмов ориентирована на импульсный шум случайного значения. Для импульсного шума случайного значения наибольшее распространение получили алгоритмы, использующие схему SD-ROM [10, 11]. Основная идея схемы SD-ROM заключается в анализе пикселей внутри скользящего окна размером 3×3 и принятия решения о поврежденности пикселя в центре этого окна. Алгоритм принятия решения в SD-ROM представ-

ляет собой пороговую схему. В работе [12] предложена схема принятия решения, включающая в себя метод анализа иерархий, при этом также используется скользящее окно. Повысить эффективность поиска поврежденных пикселей удастся путем перехода от анализа небольшой окрестности каждой точки к анализу изображения в целом. В статье [13] для поиска поврежденных пикселей используется метод построения ассоциативных правил. Для выявления правил с высоким уровнем поддержки анализируется все изображение. В работе [14] для выявления поврежденных пикселей используется алгоритм сегментации изображения. Импульсный шум детектируется на основе поиска сегментов, включающих в себя один пиксель.

Алгоритмы устранения импульсного шума на изображении с известным списком испорченных пикселей сводятся к заполнению таблицы с пропусками. Наиболее простой подход состоит в выборе цвета по среднему значению ближайших соседей. Такой метод дает неплохие результаты на областях равномерной заливки и совершенно не приемлем при наличии резких переходов цвета, так как приводит к размытию границ. Более действенен подход, основанный на линейных многообразиях [15]. Также для восстановления пропущенных данных могут быть использованы искусственные нейронные сети [16]. Эти алгоритмы основаны, как правило, на данных из локальной окрестности поврежденного пикселя. Защита изображений, передаваемых по каналам связи, может также осуществляться с помощью специфических преобразований, например стрип-метода [17–19]. Для устранения импульсного шума могут использоваться те же алгоритмы, что и для поиска поврежденных пикселей. В статье [20] представлен алгоритм восстановления, основанный на ассоциативных правилах, в работе [21] — алгоритм устранения импульсного шума на основе метода анализа иерархий.

Как показывает изучение перечисленных работ, методы, основанные на анализе всего изображения, обеспечивают более качественное устранение импульсного шума по сравнению с локальными методами. Целью данной статьи является разработка и апробация алгоритма устранения пикселей, поврежденных импульсным шумом, на основе метода выделения сообщества на графах, хорошо зарекомендовавшего себя в задаче сегментации изображения [22].

Постановка задачи и алгоритм фильтрации

Пусть на входе алгоритма задано изображение с импульсным шумом размерами $N \times M$ пикселей. Для определения положения пикселя на изображении будем использовать пару целых чисел (x, y) ,

представляющих собой его координаты. Число x принимает целые значения на отрезке $[0, N - 1]$, число y — целые значения на отрезке $[0, M - 1]$. В общем случае цветного изображения пиксель с координатами (x, y) характеризуется тремя цветовыми составляющими: $r(x, y)$ — интенсивность красного цвета, $g(x, y)$ — интенсивность зеленого цвета, $b(x, y)$ — интенсивность синего цвета.

Сопоставим изображению неориентированный взвешенный граф G . Каждому пикселю изображения будет соответствовать вершина графа G . Соединим ребрами только вершины, соответствующие пикселям, являющимся ближайшими соседями на изображении. Ближайшими соседями считаются пиксели, одна или обе координаты которых отличаются не более чем на единицу. Вес ребер будем вычислять на основе цветовых компонент пикселей, соответствующих концам ребра. Для двух соседних вершин $v_i = (x_i, y_i)$ и $v_j = (x_j, y_j)$ вес ребра будет равен

$$d(v_i, v_j) = \exp\left(-\frac{1}{h} \sqrt{(r_i - r_j)^2 + (g_i - g_j)^2 + (b_i - b_j)^2}\right).$$

Здесь $r_i = r(v_i, v_j)$, $g_i = g(v_i, v_j)$, $b_i = b(v_i, v_j)$. Настраиваемый параметр h определяет значение разности цвета между соседними пикселями, соответствующее переходу через границу двух сегментов. Данный параметр определяется пользователем и является общим для всего изображения. Как показано в работах [14, 18], такой вид весовой функции позволяет достаточно точно различать изменение цвета, соответствующее границам областей на изображении. Будем разбивать граф на подграфы, вершины которых связаны между собой сильнее, чем с остальными. Такие подграфы принято называть сообществами (community). Качество разбиения графа количественно может быть оценено с помощью функции модульности Ньюмана [23, 24]. Чем больше значение функции модульности, тем более качественно осуществлено разбиение. Поврежденными будем считать пиксели, объединение которых с любыми другими сообществами понижает значение функции модульности. Таким образом, будут выделены пиксели, образующие сообщества из одной вершины, т. е. сильно отличающиеся от своих ближайших соседей. Опишем эту процедуру формально.

Определим матрицу весов E для графа G . Значения диагональных элементов E_{ii} равны весам вершин. В начале работы алгоритма вес всех вершин нулевой. Остальные элементы матрицы весов E_{ij} ($i \neq j$) равны весу соответствующего ребра. Следует отметить, что в матрице E_{ij} будет много нулевых элементов, так как в графе G ребрами соединены только вершины, соответствующие ближайшим соседям на изображении. Матрица E будет симметричной относительно

главной диагонали, так как граф G неориентированный. Перейдем к приведенному виду матрицы весов $e = E/m$, где $m = \sum_{i,j=1}^{MN} E_{ij}$. Элемент e_{ij} равен доле веса заданного ребра в общем весе графа. В дальнейшем под матрицей весов будем понимать именно приведенный вид. Легко убедиться, что $\sum_{i,j=1}^{MN} e_{ij} = 1$.

Величина модульности определяется выражением [24, 25]

$$Q(G) = \sum_{i=1}^K e_{ij} - \sum_{i=1}^K a_i b_i,$$

где K — количество вершин графа; a_i — приведенная исходящая степень вершины v_i ($a_i = \sum_{j=1, j \neq i}^K e_{ij}$); b_i — приведенная входящая степень вершины v_i ($a_i = \sum_{j=1, j \neq i}^K e_{ji}$). Рассматриваемый граф является неориентированным, поэтому входящая и исходящая степени для всех вершин одинаковы ($a_i = b_i, i = 1, \dots, K$). Функция модульности принимает более простой вид

$$Q(G) = \sum_{i=1}^K e_{ij} - \sum_{i=1}^K a_i^2.$$

Для поиска сообществ на графе используем процедуру образования стяжек. Под стяжкой понимается преобразование, при котором некоторый подграф H графа G заменяется одной вершиной v_H . Если какая-то из вершин подграфа H была связана ребром с вершиной v из подграфа $G \setminus H$, то вершина v_H также будет связана ребром того же веса с вершиной v . Вес новой вершины будет равен сумме весов ребер и вершин, входящих в подграф H . Новый граф обозначим G_H . Подграф H будем считать сообществом, если $Q(G_H) > Q(G)$. Следует отметить, что при образовании стяжки уменьшается число вершин графа K . Нашей задачей является поиск вершин графа, не входящих ни в одно более крупное сообщество, проводимый с помощью следующего алгоритма.

1. Осуществляем последовательный проход по всем пикселям изображения.

2. Для каждого пикселя v поочередно рассматриваем ближайшие соседние пиксели $v^{(i)}$ ($i = 1, \dots, 8$). Рассматриваем подграфы, состоящие из двух вершин v и $v^{(i)}$ ($i = 1, \dots, 8$) и пытаемся объединить их в сообщество. При каждом объединении вычисляем изменение функции модульности ΔQ_i ($i = 1, \dots, 8$).

3. Если при объединении данной вершины в сообщества со всеми ближайшими соседями изменение функции модульности отрицательно ($\Delta Q_i < 0, i = 1, \dots, 8$), то соответствующий пиксель считаем поврежденным.

Изменение функции модульности достаточно быстро вычисляется из текущих характеристик графа, соответствующего изображению. При объединении вершин v_i и v_j изменение модульности будет иметь вид

$$\Delta Q = 2(e_{ij} - a_i a_j).$$

Очевидно, что предложенный алгоритм имеет линейную трудоемкость от числа пикселей.

После выявления поврежденных пикселей необходимо выбрать для них цвет, исследовав окружающие пиксели. Для этого оценим ближайших соседей. Пусть минимальное значение цветовой компоненты пикселей, соседних с поврежденным пикселем, равно m_1 , а максимальное — m_2 . Проведем последовательный перебор всех значений цвета поврежденного пикселя от m_1 до m_2 . Для каждого значения будем вычислять значение изменения функции модульности ΔQ при объединении данной вершины в сообщество с одним из ближайших соседей. В качестве окончательного цвета оставим тот, который позволяет получить максимальное значение изменения функции модульности.

Компьютерный эксперимент

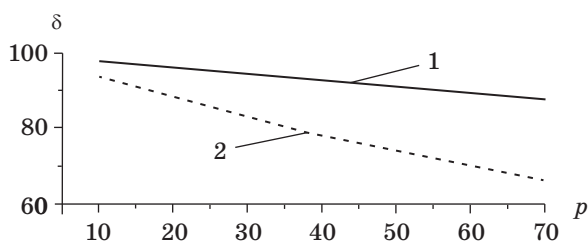
Компьютерный эксперимент проводился как на искусственных изображениях геометрических объектов, так и на цветных фотографиях. Уровень импульсного шума характеризовался величиной p , показывающей процент поврежденных пикселей по отношению к общему количеству пикселей изображения. Импульсный шум моделировался линейным конгруэнтным генератором псевдослучайных чисел, с помощью которого определялись как координаты поврежденных пикселей, так и их цвет. При проведении эксперимента количество испорченных пикселей варьировалось от 10 до 70 %. Улучшение изображения производилось посредством предложенного фильтра, а также, для сравнения, широко распространенного медианного фильтра.

Для сравнения близости изображений использовалась метрика Минковского [25, 26], согласно которой расстояние между изображениями A и C находится по формуле

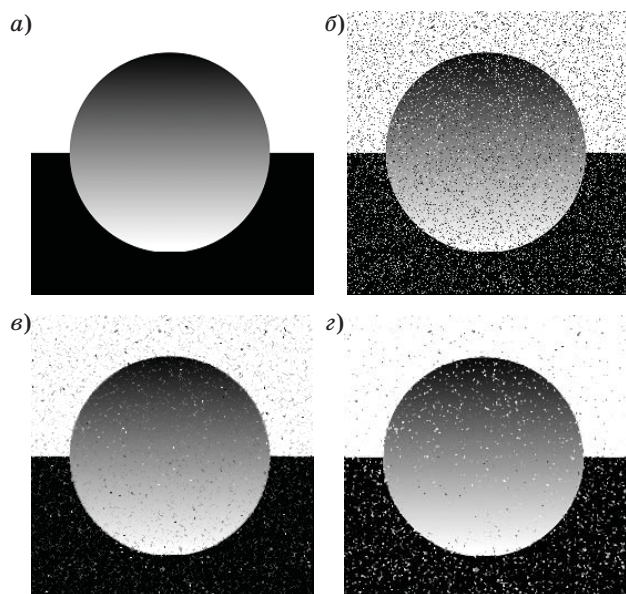
$$d(A, C) = \max_{n,m} \sum_{k=1}^N \frac{1}{N} |A_{nm}^{(k)} - C_{nm}^{(k)}|,$$

где A_{mn} и C_{mn} — значения цветов пикселей изображения A и C ; N — количество пикселей.

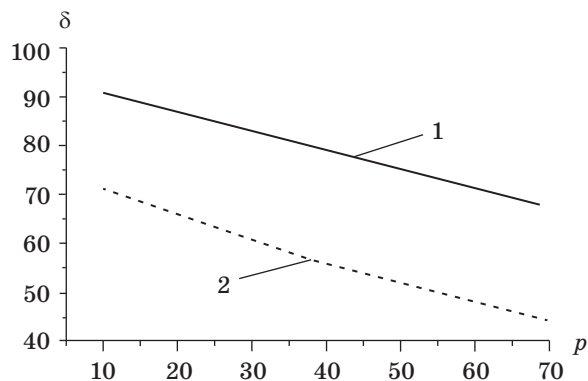
Относительное улучшение изображения вычислялось на основе расстояния $d(orig_fig, r_fig)$ от восстановленного изображения r_fig до исходного $orig_fig$ и расстояния $d(orig_fig, p_fig)$ от ис-



■ **Рис. 1.** Зависимость относительного улучшения изображения от процента зашумления для предложенного (1) и медианного (2) фильтра



■ **Рис. 2.** Результаты применения фильтра к искусственному изображению с уровнем шума $p = 20\%$: *a* — исходное изображение; *b* — зашумленное изображение; *в* — изображение, восстановленное предложенным фильтром; *г* — изображение, восстановленное медианным фильтром



■ **Рис. 3.** Зависимость относительного улучшения от процента зашумления искусственного изображения для предложенного (1) и медианного (2) фильтра



■ **Рис. 4.** Результаты применения фильтра к изображению «Lena» с уровнем шума $p = 20\%$: *a* — исходное изображение; *б* — зашумленное изображение; *в* — изображение, восстановленное предложенным фильтром; *г* — изображение, восстановленное медианным фильтром

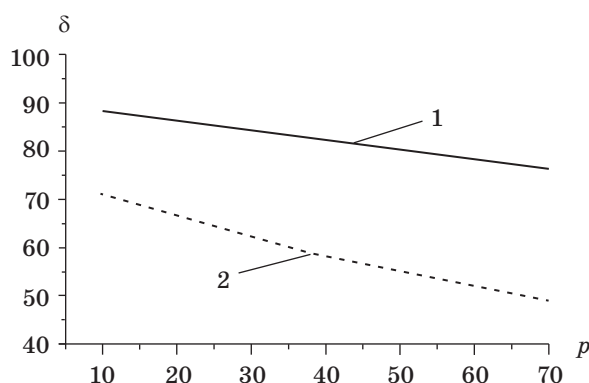
порченного изображения p_fig до исходного изображения $orig_fig$:

$$\delta = \frac{d(orig_fig, p_fig) - d(orig_fig, r_fig)}{d(orig_fig, p_fig)} \cdot 100\%.$$

Эксперимент для прямоугольной области с равномерной заливкой показал, что предложенный фильтр позволяет значительно улучшить изображение. Зависимость относительного улучшения от процента испорченных пикселей для предложенного и медианного фильтров представлена на рис. 1.

Результаты применения предложенного и медианного фильтров для улучшения искусственного изображения с наличием сплошной и градиентной заливки показаны на рис. 2, *a–г*.

Хорошо видно, что результаты предложенного фильтра более выигрышно выглядят для темных участков изображения, тогда как медианный фильтр дает лучший визуальный результат для светлой части изображения. Этот эффект связан с выбором нового цвета испорченного пикселя. При использовании медианного фильтра цвета восстановленных пикселей смещены в область белого цвета. При этом цвета окружающих его пикселей также изменяют свой цвет. Численное сравнение результатов работы показывает значительное преимущество предложенного алгоритма перед медианым фильтром.



■ Рис. 5. Зависимость относительного улучшения от процента зашумления изображения «Lena» с помощью предложенного (1) и медианного (2) фильтра

Зависимость относительного улучшения от процента зашумления искусственного изображения представлена на рис. 3.

Также данный фильтр позволяет получить значительно лучшие результаты и для фотографических изображений. Результаты для хорошо известного изображения «Lena» показаны на рис. 4, а–г.

Хорошо известно, что изображение «Lena» характеризуется большим количеством мелких деталей, которые создают сложности для всех фильтров. Предложенный фильтр дает значительно лучшие результаты даже при визуальном сравне-

нии. Зависимость относительного улучшения от процента зашумления представлена на рис. 5.

Заключение

Таким образом, предложенный фильтр обладает хорошими характеристиками при линейной трудоемкости. Как видно из графиков (см. рис. 1, 3 и 5), эффективность данного фильтра примерно на 20 % выше, чем медианного при любом проценте испорченных пикселей. Такое заметное преимущество объясняется тем, что обычные фильтры изменяют все пиксели изображения. Исправление испорченных пикселей приближает изображение к оригиналу, но при этом изменение неиспорченных пикселей увеличивает расстояние до оригинала. Данное свойство присуще не только медианному фильтру, но и всем традиционным фильтрам.

Предложенный в данной статье фильтр действует избирательно и изменяет только те пиксели, которые значительно отличаются от окружающих. С высокой вероятностью такие пиксели окажутся поврежденными импульсным шумом. Выбор нового цвета на основе присоединения к одному из соседних сообществ пикселей позволяет формировать группы близких по характеристикам точек. Также следует отметить высокое быстродействие фильтра, связанное с линейной трудоемкостью алгоритма, лежащего в его основе. Время обработки одного изображения в пределах погрешности одинаково с медианным фильтром.

Литература

1. Pitas I., Venetsanopoulos A. Nonlinear Digital Filters: Principles and Applications. — Boston: Kluwer Academic Publishers, 1990. — 391 p.
2. Huang T. S. Two-dimensional Digital Signal Processing II: Transforms and Median Filters. — Berlin a.o: Springer, 1981. — 391 p.
3. Boyle R., Sonka M., Hlavac V. Image Processing, Analysis, and Machine Vision, First Edition. — Cambridge: University Press, 2008. — 920 p.
4. Mitra S., Sicuranza G. Nonlinear Image Processing. — Academic Press, 2001. — 455 p.
5. Buades A., Morel J. A Non-Local Algorithm for Image Denoising // IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition 2, Washington DC, June 20–26, 2005. P. 60–65.
6. Dabov K., Foi A., Katkovnik V., Egiazarian K. Image Denoising by Sparse 3-D Transform-domain Collaborative Filtering // IEEE Transactions on Image Processing. 2007. N 8(16). P. 2080–2095. doi:10.1109/TIP.2007.901238
7. Chan R., Ho C., Nikolova M. Salt-and-pepper Noise Removal by Median-type Noise Detectors and De-tail-preserving Regularization // IEEE Transactions on Image Processing. 2005. N 10(14). P. 1479–1485. doi:10.1109/TIP.2005.852196
8. Kam H. S., Tan W. H. Noise Detection Fuzzy (NDF) Filter for Removing Salt and Pepper Noise // IVIC 2009: Visual Informatics: Bridging Research and Practice, Kuala Lumpur, November 11–13, 2009. P. 479–486. doi:10.1007/978-3-642-05036-7_45
9. Najeer A. J., Rajamani V. Design of Hybrid Filter for Denoising Images Using Fuzzy Network and Edge Detecting // American Journal of Science Research. 2009. N 3. P. 5–14.
10. Abreu E., Lightstone M., Mitra S. K., Arakawa S. K. A New Efficient Approach for the Removal of Impulse Noise from Highly Corrupted Images // IEEE Transactions on Image Processing. 1996. N 6(5). P. 1012–1025. doi:10.1109/83.503916
11. Garnett R., Huegerich T., Chui C., He W. A Universal Noise Removal Algorithm with an Impulse Detector // IEEE Trans Image Process. 2005. N 14(11). P. 1747–1754. doi:10.1109/TIP.2005.8572.61
12. Белим С. В., Селиверстов С. А. Использование метода анализа иерархий для выявления импульсно-

- го шума в графических объектах // Информационные технологии. 2015. № 4. С. 251–258.
13. **Белим С. В., Майоров-Зильбернагель А. О.** Алгоритм поиска поврежденных пикселей и удаления импульсного шума на изображениях с использованием метода ассоциативных правил // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. № 12. <http://technomag.bmstu.ru/doc/744983.html> (дата обращения: 08.02.2017). doi:10.7463/1214.0744983
 14. **Белим С. В., Кутлуниин П. Е.** Выявление поврежденных пикселей на изображении с помощью алгоритма кластеризации // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 3. С. 3–10. doi:10.14489/vkit.2016.03.pp.003-010
 15. **Ларионов И. Б.** Многомерные линейные многообразия как способ восстановления графической информации // Математические структуры и моделирование. 2010. № 1(21). С. 24–31.
 16. **Ларионов И. Б.** Карты Кохонена как способ восстановления мультимедийной информации // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 10. С. 29.
 17. **Mironovsky L. A., Slaev V. A.** Strip-method for Image and Signal Transformation. — Berlin: De Gruyter, 2011. — 160 p.
 18. **Мироновский Л. А., Слаев В. А.** Двустороннее поперечное стрип-преобразование и его корневые изображения // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 6–10.
 19. **Мироновский Л. А., Слаев В. А.** Стрип-метод помехоустойчивого преобразования изображений // Измерительная техника. 2006. № 8. С. 6–12.
 20. **Белим С. В., Майоров-Зильбернагель А. О.** Восстановление изображений со статическими пропусками на основе метода ассоциативных правил // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 12. С. 18–23. doi:10.14489/vkit.2014.12.pp.018-023
 21. **Белим С. В., Селиверстов С. А.** Алгоритм восстановления поврежденных пикселей на зашумленных изображениях на основе метода анализа иерархий // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. № 11. <http://technomag.bmstu.ru/doc/742145.html> (дата обращения: 20.01.2017). doi:10.7463/1114.0742145
 22. **Белим С. В., Ларионов С. Б.** Алгоритм сегментации изображений, основанный на поиске сообществ на графах // Компьютерная оптика. 2016. № 6. С. 904–910. doi:10.18287/2412-6179-2016-40-6-904-910
 23. **Newman M. E.** Analysis of Weighted Networks // Physical Review E. 2004. N 5(70). P. 056131. doi:10.1103/PhysRevE.70.056131
 24. **Cluset A., Newman M. E. J., Moore C.** Finding Community Structure in Very Large Networks // Physical Review E. 2004. N 6(70). P. 066111. doi:10.1103/PhysRevE.70.066111
 25. **DiGesù V., Staravoirov V. V.** Distance-based Functions for Image Comparison // Pattern Recognition Letters. 1999. N 20. P. 207–213. doi:10.1016/S0167-8655(98)00115-9
 26. **Jong-hyun Ryu, Sujin Kim, Hong Wan.** Pareto Front Approximation with Adaptive Sum Method in Multi-objective Simulation Optimization // Proc. of the 2009 Winter Simulation Conf. (WSC), Austin, December 13–16, 2009. P. 623–633.

UDC 004.932.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.18

Impulse Noise Filtration based on Community Detection in GraphsBelim S. V.^a, Dr. Sc., Phys.-Math, Professor, sbelim@mail.ruLarionov S. B.^a, Post-Graduate Student, me@stas-larionov.ru^aF. M. Dostoevskiy Omsk State University, 55a, Mira Av., 644077, Omsk, Russian Federation

Introduction: Recognition and removal of impulse noise in graphical images is a pressing problem in signal processing theory and practice. The existing noise reduction algorithms either lack sufficient accuracy or change the noise-free parts of the image. **Purpose:** The goal is to develop a noise filtration algorithm using graphs. **Results:** On the base of the proposed algorithm, a way was found to restore an image distorted by impulse noise. The image is represented as a non-oriented weighted graph. Each pixel of the image corresponds to a vertex in the graph. A community detection algorithm was applied to the graph. The noised pixels are those which correspond to communities containing only one vertex. The method was tested by a computer experiment conducted on grayscale and colored artificial images, as well as on photos. The proposed method is better than a median filter by 20% regardless of the noise level. Its higher efficiency is caused by the fact that most filters change all the image pixels, while the suggested method finds and restores only the noised ones. The dependence of the effectiveness of the proposed method on the image noise percentage is presented.

Keywords — Impulse Noise, Image Filtration, Community Detection in Graphs.

References

1. Pitas I., Venetsanopoulos A. *Nonlinear Digital Filters: Principles and Applications*. Boston, Kluwer Academic Publishers, 1990. 391 p.
2. Huang T. S. *Two-dimensional Digital Signal Processing II: Transforms and Median Filters*. Berlin a.o: Springer, 1981. 391 p.
3. Boyle R., Sonka M., Hlavac V. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision, First Edition*. Cambridge, University Press, 2008. 920 p.
4. Mitra S., Sicuranza G. *Nonlinear Image Processing*. Academic Press, 2001. 455 p.
5. Buades A., Morel J. A Non-Local Algorithm for Image Denoising. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2*, Washington DC, 2005, pp. 60–65.
6. Dabov K., Foi A., Katkovnik V., Egiazarian K. Image Denoising by Sparse 3-D Transform-domain Collaborative Filtering. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, no. 8(16), pp. 2080–2095. doi:10.1109/TIP.2007.901238
7. Chan R., Ho C., Nikolova M. Salt-and-pepper Noise Removal by Median-type Noise Detectors and Detail-preserving Regularization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, no. 10(14), pp. 1479–1485. doi:10.1109/TIP.2005.852196
8. Kam H. S., Tan W. H. Noise Detection Fuzzy (NDF) Filter for Removing Salt and Pepper Noise. *IVIC 2009: Visual Informatics: Bridging Research and Practice*, Kuala Lumpur, 2009, pp. 479–486. doi:10.1007/978-3-642-05036-7_45
9. Najeer A. J., Rajamani V. Design of Hybrid Filter for Denoising Images Using Fuzzy Network and Edge Detecting. *American Journal of Science Research*, 2009, no. 3, pp. 5–14.
10. Abreu E., Lightstone M., Mitra S. K., Arakawa S. K. A New Efficient Approach for the Removal of Impulse Noise from Highly Corrupted Images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, no. 6(5), pp. 1012–1025. doi:10.1109/83.503916
11. Garnett R., Huegerich T., Chui C., He W. A Universal Noise Removal Algorithm with an Impulse Detector. *IEEE Trans Image Process*, 2005, no. 14(11), pp. 1747–1754. doi:10.1109/TIP.2005.8572.61
12. Belim S. V., Seliverstov S. A. Hierarchy Analysis Method as a Way to Detect Impulse Noise on Images. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2015, no. 4, pp. 251–258 (In Russian).
13. Belim S. V., Mayorov-Zilbernagel A. O. Algorithm for Searching the Broken Pixels and Eliminating Impulse Noise in Images Using a Method of Association Rules. *Nauka i obrazovanie* [Science & Education], 2014, no. 12. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/744983.html> (accessed 08 February 2017) (In Russian). doi:10.7463/1214.0744983
14. Belim S. V., Kutlunin P. E. Impulse Noise Detection in Images Using a Clustering Algorithm. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Herald of Computer and Information Technologies], 2016, no. 3, pp. 3–10 (In Russian). doi:10.14489/vkit.2016.03.pp.003-010
15. Larionov I. B. Multidimensional Linear Manifolds as a Way to Restore Graphical Information. *Matematicheskie struktury i modelirovanie*, 2010, no. 1(21), pp. 24–31 (In Russian).
16. Larionov I. B. Kohonen Maps as a Way to Restore the Multimedia Information. *Zhurnal radioelektroniki*, 2010, no. 10, p. 29 (In Russian).
17. Mironovsky L. A., Slaev V. A. *Strip-method for Image and Signal Transformation*. Berlin, De Gruyter, 2011. 160 p.
18. Mironovsky L. A., Slaev V. A. Two-sided Noise-proof Strip-transform and its Root Images. *Izmeritel'naia tekhnika* [Measuring Technology], 2012, no. 10, pp. 6–10 (In Russian).
19. Mironovsky L. A., Slaev V. A. Strip-method of Noise-proof Image Transformation. *Izmeritel'naia tekhnika* [Measuring Technology], 2006, no. 8, pp. 6–12 (In Russian).
20. Belim S. V., Mayorov-Zilbernagel A. O. Image Restoration with Static Gaps on The Basis of Association Rules. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Herald of Computer and Information Technologies], 2014, no. 12, pp. 18–23 (In Russian). doi:10.14489/vkit.2014.12.pp.018-023
21. Belim S. V., Seliverstov S. A. The Analytic Hierarchy Method-Based Algorithm for Restoring Broken Pixels on the Noisy Images. *Nauka i obrazovanie* [Science & Education], 2014, no. 11. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/742145.html> (accessed 20 January 2017) (In Russian). doi:10.7463/1114.0742145
22. Belim S. V., Larionov S. B. An Algorithm of Image Segmentation Based on Community Detection in Graphs. *Komp'iuternaia optika* [Computer Optics], 2016, no. 6, pp. 904–910 (In Russian). doi:10.18287/2412-6179-2016-40-6-904-910
23. Newman M. E. Analysis of Weighted Networks. *Physical Review E*, 2004, vol. 70, no. 5, p. 056131. doi:10.1103/PhysRevE.70.056131
24. Clauset A., Newman M. E. J., Moore C. Finding Community Structure in Very Large Networks. *Physical Review E*, 2004, vol. 70, no. 6, p. 066111. doi:10.1103/PhysRevE.70.066111
25. DiGesù V., Staravoitov V. V. Distance-based Functions for Image Comparison. *Pattern Recognition Letters*, 1999, vol. 20, pp. 207–213. doi:10.1016/S0167-8655(98)00115-9
26. Jong-hyun Ryu, Sujin Kim, Hong Wan. Pareto Front Approximation with Adaptive Sum Method in Multiobjective Simulation Optimization. *Proc. of the 2009 Winter Simulation Conf. (WSC)*, Austin, 2009, pp. 623–633.

ПРОАКТИВНЫЙ И РЕАКТИВНЫЙ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТ ИТ-СЕРВИСОВ ОБЛАЧНЫХ СРЕД

А. В. Скатков^а, доктор техн. наук, профессор

Д. Ю. Воронин^а, канд. техн. наук

В. И. Шевченко^а, канд. техн. наук

А. А. Ключарев^б, канд. техн. наук, доцент

^аСевастопольский государственный университет, Севастополь, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: большинство случаев возникновения внештатных ситуаций в облачных средах является следствием неэффективного управления рисками. Например, конфликтные ситуации приводят к отказу в обслуживании и требуют принятия взвешенных, компромиссных решений по распределению ресурсов между операционными и системными процессами в облачной среде. Таким образом, задача управления рисками в облачных вычислительных средах представляется крайне актуальной. **Цель:** формализация задачи организации эффективного управления рисками в облачных вычислительных средах при использовании подходов проактивного и реактивного управления. **Результаты:** проведенный анализ основных угроз и уязвимостей облачного компьютеринга выявил необходимость использования проактивного и реактивного управления рисками при формировании и реализации необходимых контрмер. Предложенный информационный портрет риска позволяет визуализировать агрегированную оценку текущего состояния облачной вычислительной среды, что является обязательным условием автоматизированного принятия оперативных решений по управлению ИТ-сервисами в режиме реального времени. Приведено формализованное описание жизненного цикла облачной среды при проактивном и реактивном управлении, позволяющее сформулировать проблему риск-менеджмента в классе задач динамического программирования. Сущность предлагаемого подхода состоит в последовательном, многоэтапном выборе одного из альтернативных решений, например: уменьшить вероятности возникновения неблагоприятных событий; минимизировать возможные негативные последствия при возникновении внештатных ситуаций и т. д. Новизна предлагаемого подхода состоит в том, что он может быть эффективно использован как при проактивной, так и при реактивной методике управления рисками в облачных системах. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть применены для визуализации оперативной обстановки в рамках комплексной системы поддержки принятия решений по управлению ИТ-сервисами облачных вычислительных сред. Использование предложенного информационного портрета риска позволит обеспечить требуемую реактивность и интерактивность при взаимодействии с лицом, принимающим решения.

Ключевые слова — облачная вычислительная среда, риск-менеджмент, информационный портрет риска, проактивное управление, реактивное управление, угроза, контрмера, динамическое программирование.

Введение

Быстрорастущий уровень современной компьютеризации общества приводит к необходимости все более широко применять программные инструменты, в том числе технологии распределенной обработки данных. Облачные вычисления представляют собой информационную технологию для обеспечения удобного сетевого доступа к общему пулу настраиваемых вычислительных ресурсов (сетей, серверов, систем хранения данных, приложений, ресурсов, услуг и др.) по требованию, которые можно быстро активировать и предоставить с минимальными потерями на управление или минимальным взаимодействием с поставщиком услуг [1, 2]. В большинстве случаев облачные среды могут быть отнесены к объектам критического применения, для которых даже незначительные сбои при их функционировании могут приводить к существенным авариям или даже катастрофам [2–10]. Негативные последствия таких инцидентов характеризуются существенными материальными и репутационными

издержками, а в некоторых случаях — даже непосредственным образом влияют на безопасность целой страны или региона.

В соответствии с работами [4–6] под риск-менеджментом понимается процесс управления рисками ИТ-сервисов облачных сред. В таких системах принято выделять следующие состояния [11]: безопасные, работоспособные, предкритические и аварийные. Безопасные состояния характеризуются высокой стабильностью системы, т. е. отсутствием возможности непосредственного перехода в предкритические состояния. При недостаточной эффективности процедур обеспечения гарантированной работоспособности облачная среда имеет тенденцию к деградации, т. е. переходу из работоспособных состояний в состояния, близкие к критическим. В этом случае если не будут своевременно запущены стабилизирующие процессы ее реконфигурации, то даже незначительный сбой может привести к невозможности восстановления и переходу в аварийное (поглощающее) состояние, что, например, может соответствовать отказу в вычислительном обслуживании определенного этапа

крупномасштабной научной задачи. В настоящей статье приведены результаты анализа основных угроз и уязвимостей облачного компьютеринга, а также описаны ключевые особенности проактивного и реактивного подходов к риск-менеджменту.

Особенности риск-менеджмента IT-сервисов в облачных средах

В работе [10] рассматриваются различные вызовы, характерные для облачного компьютеринга. Основное внимание уделено организации безопасного и конфиденциального взаимодействия облачных сервисов, которое требует наличия специалистов высокой квалификации и современного дорогостоящего оборудования. Необходимость решать проблему обеспечения конфиденциальности обрабатываемых данных является существенным ограничением при использовании облачных сервисов [13] и источником возникновения неблагоприятных событий. На примере Amazon Web Services проанализированы [13] различные подходы к идентификации угроз информационной безопасности. Очевидно, что популярность мобильных облачных сервисов требует развития подходов к обеспечению информационной безопасности, так как сложность и стоимость систем

такого рода постоянно возрастает [14]. Авторы описания использования облачного аутсорсинга в Швейцарии [15] считают, что процедура миграции существенно зависит от индивидуальных характеристик компаний, таким образом, процессы риск-менеджмента должны быть адаптивными.

Существующие угрозы требуют создания эффективных технологий риск-менеджмента в облачных средах. В соответствии с работами [9, 12] принято выделять два базовых подхода к решению проблемы управления рисками — проактивный и реактивный. При проактивном управлении основной целью принимаемых решений является предупреждение возникновения различных неблагоприятных событий, приводящих к развитию рисков [9, 12]. Данный подход ориентирован на использование прогнозных оценок развития рисков и применяется для латентной части их жизненного цикла в условиях дефицита информации о величине возможных последствий развития негативных событий. Для реактивного подхода характерно наличие точных оценок последствий возникших инцидентов, и основной его целью является нейтрализация негативных последствий уже произошедших событий. Подробнее ключевые особенности проактивного и реактивного управления рисками облачных сред приведены на рис. 1.



■ Рис. 1. Ключевые особенности проактивного и реактивного управления рисками

Несмотря на существование различных подходов к оценке рисков в облачных средах [16–22], данная научная проблема остается до сих пор открытой [17]. В работе [18] предложен подход к оценке рисков информационной безопасности, который позволяет обеспечить акторов облачной вычислительной среды информацией, необходимой при принятии решений о выборе эффективного варианта взаимодействия [19]. Авторы статьи [20] предлагают использовать защитную стратегию для оценки облачных рисков. Предлагаемая экономико-основанная методология [21] реализована в программном комплексе, анализирующем корпоративные риски при использовании облачных технологий. Инструментальное средство ACRAM [22], состоящее из офлайн- и онлайн-модулей, позволяет оценивать риск неблагоприятного размещения ресурсов потребителя при миграции в облако. Большинство современных подходов базируется на известных методах принятия решений: теории игр [23], методе анализа иерархий [24] и т. д.

К сожалению, преимущества облачной обработки данных являются причиной возникновения дополнительных угроз и уязвимостей. Можно выделить следующие особенности риск-менеджмента в облачных средах.

1. Для адекватной визуализации текущей ситуации необходимо предложить эффективные подходы, позволяющие предоставить лицу, принимающему решение (ЛПР), агрегированную оценку текущего состояния облачной вычислительной среды, что является обязательным условием автоматизированного принятия оперативных решений по управлению ИТ-сервисами в режиме реального времени.

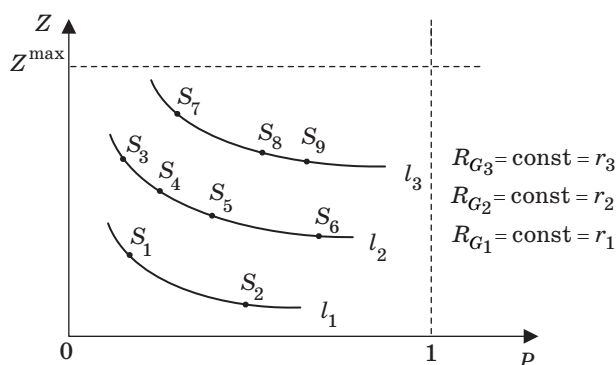
2. Процессы риск-менеджмента являются достаточно затратными, что требует внедрения адаптивных технологий запуска процедур стабилизирующей реконфигурации системы в соответствии со складывающейся информационной ситуацией.

3. Существующие подходы к формализации жизненного цикла облачной среды не в полной мере учитывают особенности проактивного риск-менеджмента.

Далее рассматриваются предлагаемые подходы к решению обозначенных проблем и системных противоречий.

Визуализация фазового пространства рисков облачной среды

Состояние облачной среды описывается точкой в n -мерном фазовом пространстве, т. е. каждая из координат описывает одну из рассматриваемых характеристик. Например, на рис. 2 изображено двухмерное пространство рисков.

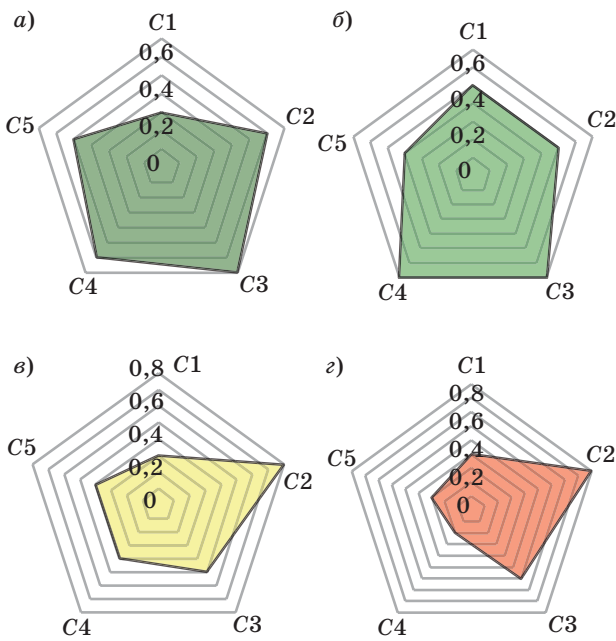


■ Рис. 2. Геометрическая интерпретация двухмерного пространства рисков облачной среды

Состояние S_i описывается кортежем $\langle P_{S_i}, Z_{S_i} \rangle$, где P_{S_i} — вероятность возникновения неблагоприятного события в состоянии S_i ; Z_{S_i} — потери, обусловленные возникновением неблагоприятного события в i -м состоянии. Под альтернативными состояниями облачной среды будем понимать элементы некоторой группы, обладающие важным свойством: значения агрегированных оценок риска у них совпадают. Графически элементы такой группы изображаются на одной и той же кривой, т. е. если точка, описывающая j -е состояние системы в пространстве риска, лежит на графике l_i , то $S_j \in G_j$, $R_{G_i} = \text{const} = r_i$, $i \neq j$, где R_{G_i} — оценка риска для i -й группы эквивалентных состояний облачной среды. Будем считать, что $\forall i \in (0, |S|)$: $Z_{S_i} \in [0, Z^{\max}]$, $P_{S_i} \in [0, 1]$. Двухмерное пространство рисков удобно использовать ЛПР при поиске компромиссных решений, для которых можно обеспечить улучшение одного из параметров риска (P или Z) за счет ухудшения другого без последующего увеличения агрегированной оценки риска. Это позволяет сделать процесс управления рисками более гибким и существенно расширяет область допустимых решений [11]. Однако двухмерное пространство риска, учитывающее зависимость только между компонентами риска P и Z , при решении ряда задач не всегда достаточно.

Для детальной визуализации характеристик состояний ИТ-сервисов облачной среды по аналогии с понятием информационного портрета [25] необходимо построить информационный портрет облачного риска. Здесь и далее под информационным портретом риска будем понимать выпуклую оболочку множества — некоторый профиль точек, описывающий риск состояний облачной среды. Например, на рис. 3, a – $г$ изображены информационные портреты облачного риска для состояний S_1, S_2, S_3, S_7 .

При визуализации анализировались значения нормированных характеристик эффективности



■ Рис. 3. Информационный портрет риска для состояния S_1 (а); S_2 (б); S_3 (в); S_7 (г)

функционирования облачной среды, описанные кортежем $CC = \langle C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 \rangle$, где C_i — элемент кортежа, сопоставленный обобщенной оценке риска для i -й группы рисков, например, информационных, ресурсных, операционных, финансовых, социальных. Следует отметить, что цвет заливки внутренней области информационного портрета облачного риска может варьироваться. Он зависит от агрегированной оценки риска R_{G_i} , вычисленной для анализируемого состояния облачной вычислительной среды.

Эта обобщенная оценка осуществляется на основе информационных признаков кортежа CC и системы правил вида if-then-otherwise:

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{if } \left[\left(C_1(S_i) > C_1^{rp} \right) \cup \left(C_2(S_i) > C_2^{rp} \right) \cup \dots \right. \\
 \left. \cup \left(C_k(S_i) > C_k^{rp} \right) \right], \text{ then } \left[S_i \in S^b \right]; \\
 \dots \\
 \text{if } \left[\left(C_1(S_i) > C_1^{rp} \right) \cup \left(C_2(S_i) < C_2^{rp} \right) \cup \dots \right. \\
 \left. \cup \left(C_k(S_i) = C_k^{rp} \right) \right], \text{ then } \left[S_i \in S^p \right]; \\
 \dots \\
 \text{if } \left[\left(C_1(S_i) \leq C_1^{rp} \right) \cup \left(C_2(S_i) \leq C_2^{rp} \right) \cup \dots \right. \\
 \left. \cup \left(C_k(S_i) \leq C_k^{rp} \right) \right], \text{ then } \left[S_i \in S^{ppk} \right]; \\
 \dots \\
 \text{otherwise } \left[S_i \in S^\pi \right],
 \end{array} \right\}$$

где S^b — подмножество безопасных состояний облачной среды; S^p — подмножество работоспособных состояний облачной среды; S^{ppk} — подмножество предкритических состояний облачной среды; S^π — аварийное, поглощающее состояние; C_j^{rp} — скалярная величина, задающая пороговое значение критичности для j -го элемента кортежа CC . Для различных предметных областей C_j^{rp} различна и определяется как при учете особенностей функционирования конкретной облачной среды, так и в соответствии со складывающейся ситуацией.

Для состояний облачной среды предлагается различать три уровня риска (соответствуют различным цветам заливки информационного портрета):

1) уровень уверенного функционирования облачной среды (зеленый цвет) — анализируемое состояние является безопасным и описывается элементом подмножества S^b ;

2) уровень существенного риска (желтый цвет) — среда находится в работоспособном состоянии, однако вероятность перехода системы в предкритическое состояние слишком высока;

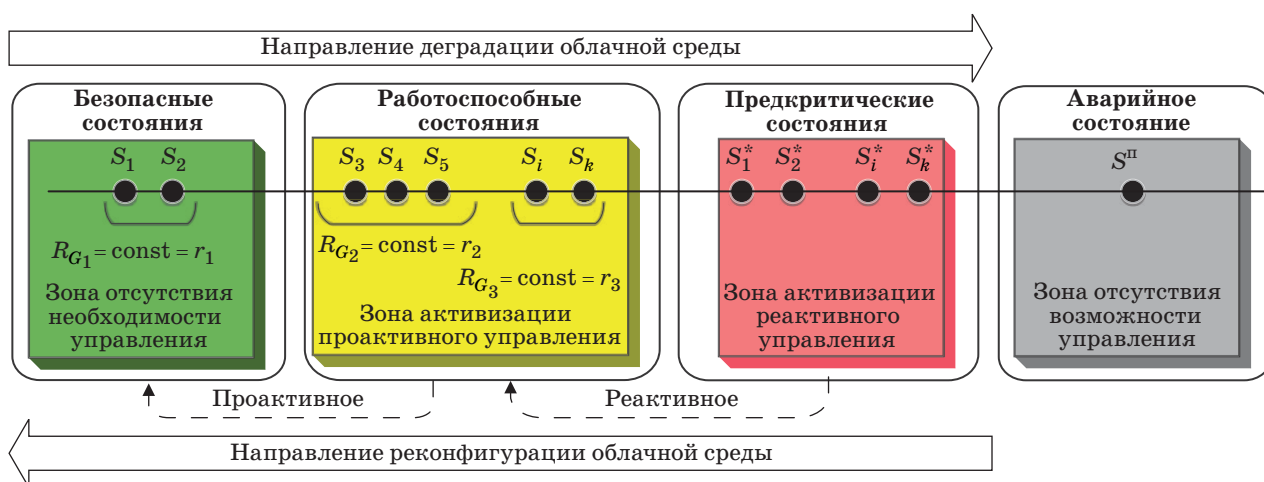
3) уровень неприемлемого риска (красный цвет) — анализируемое состояние облачной среды относится к подмножеству предкритических состояний S^{ppk} , и любой незначительный сбой в системе может привести к переходу в аварийное, невозвратное состояние.

Таким образом, предложенный информационный портрет риска является удобным средством визуализации системных характеристик, описывающих состояния облачной среды, и может быть использован ЛПР при принятии оперативных решений по управлению ИТ-сервисами.

Жизненный цикл облачной среды при проактивном и реактивном управлении

Проактивный подход ориентирован в основном на использование превентивных мер и эффективен как для весьма сложных, так и для относительно динамичных систем. С другой стороны, управляющие воздействия при реактивном подходе более затратные, чем при проактивном, но и реализуются сравнительно реже. Реактивный подход позволяет сэкономить на мониторинге, но при этом вероятность попасть в аварийное состояние становится существенно выше. Известно [2–9], что целью реактивного управления является недопущение переходов объекта критического применения в состояния, имеющие «неприемлемый» уровень риска, а проактивного — в состояния, имеющие «существенный» уровень риска.

Обобщенная диаграмма (рис. 4) позволяет систематизировать динамику состояний жизненного цикла облачной среды.



■ Рис. 4. Обобщенная диаграмма динамики состояний жизненного цикла облачной среды

Состояния облачной среды изображены точками и описываются при помощи множества $S = S^b \cup S^p \cup S^{прк} \cup S^п$; $S^b \cap S^p \cap S^{прк} \cap S^п = \emptyset$, подмножества $S^b = \{S_1, S_2, \dots, S_{|S^b|}\}$, $S^p = \{S_i, \dots, S_k, \dots, S_{|S^p|}\}$, $S^{прк} = \{S_i^*, \dots, S_k^*, \dots, S_{|S^{прк}|}\}$. С точки зрения функционирования облачной среды переходы между ее состояниями могут быть как конструктивные, так и деструктивные (согласно схеме, представленной на рис. 4). Под влиянием деградационных процессов происходят переходы между состояниями слева направо, а при успешных процедурах реконфигурации — справа налево.

Цель проактивного управления: необходимо $\forall t = \{1, 2, \dots, w\}$ найти такое управление $u^{опт}(t) = \arg \max_{u_i(t) \in U^A(t)} \Phi(u_i(t), t)$ при выполнении ограничения $S(u_i(t), t) \in S^b$, где w — число моментов времени при синхронном управлении облачной средой; $U^A(t)$ — множество допустимых управлений в момент времени t ; $\Phi(u_i(t), t)$ — функция, оценивающая эффективность управления $u_i(t)$ в момент времени t .

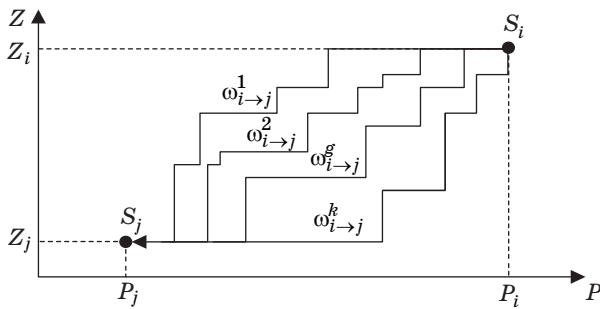
Цель реактивного управления: $\forall t = \{1, 2, \dots, w\}$ необходимо найти управление $u^{опт}(t) = \arg \max_{u_i(t) \in U^A(t)} \Phi(u_i(t), t)$ при одновременном выполнении ограничений $S(u_i(t), t) \notin S^{прк}$ и $S(u_i(t), t) \notin S^п$.

Несмотря на описанные различия, присутствующие в концепциях реактивного и проактивного подходов, для них можно сформулировать общую стратегическую директиву: реконфигурация облачной среды сводится к поиску

такой последовательности управлений, которая обеспечила бы наиболее эффективную траекторию перемещения из текущего состояния в желаемое при строгом соблюдении заданных выше ограничений. Под траекторией будем понимать последовательность состояний облачной среды при движении из состояния S_i в состояние S_j . Постановки данной задачи могут варьироваться в зависимости от доступности априорной информации, подхода к управлению (проактивный или реактивный) и выбранного метода решения. Например, координаты состояний в фазовом пространстве рисков могут быть заданы детерминированно либо стохастически; для каждого управления априорно могут быть известны полные или приближенные оценки его эффективности в рассматриваемый момент времени и т. д. Все это требует создания единого универсального инструментального средства, позволяющего принимать решения как в автоматическом, так и в автоматизированном режиме, эффективно используя неформализованный опыт ЛПР.

Рассмотрим постановку базового варианта задачи риск-менеджмента для случая двухмерного пространства рисков (траектории управления риском облачной среды проиллюстрированы на рис. 5).

Предполагается, что за один переход между состояниями возможно реализовать только одно из управлений: уменьшить вероятность возникновения неблагоприятного события либо уменьшить потери, связанные с его появлением. То есть между любыми двумя состояниями некоторой траектории управляющее воздействие формирует величину уменьшения одной из альтернативных характеристик — P либо Z . Последовательность управлений $U_{i \rightarrow j}^m = \{u_1^m, u_2^m, \dots, u_{|U^m|}^m\}$ формирует m -ю траекторию $\omega_{i \rightarrow j}^m = \{S_i, \dots, S_k, \dots, S_j\}$.



■ Рис. 5. Траектории управлений риском облачной среды

Формализация постановки задачи состоит в следующем.

Дано: $\langle S_i, S_j, \langle P_{S_i}, Z_{S_i} \rangle, \langle P_{S_j}, Z_{S_j} \rangle, \Omega_{\text{д}}^{i \rightarrow j}, \Theta \rangle$,

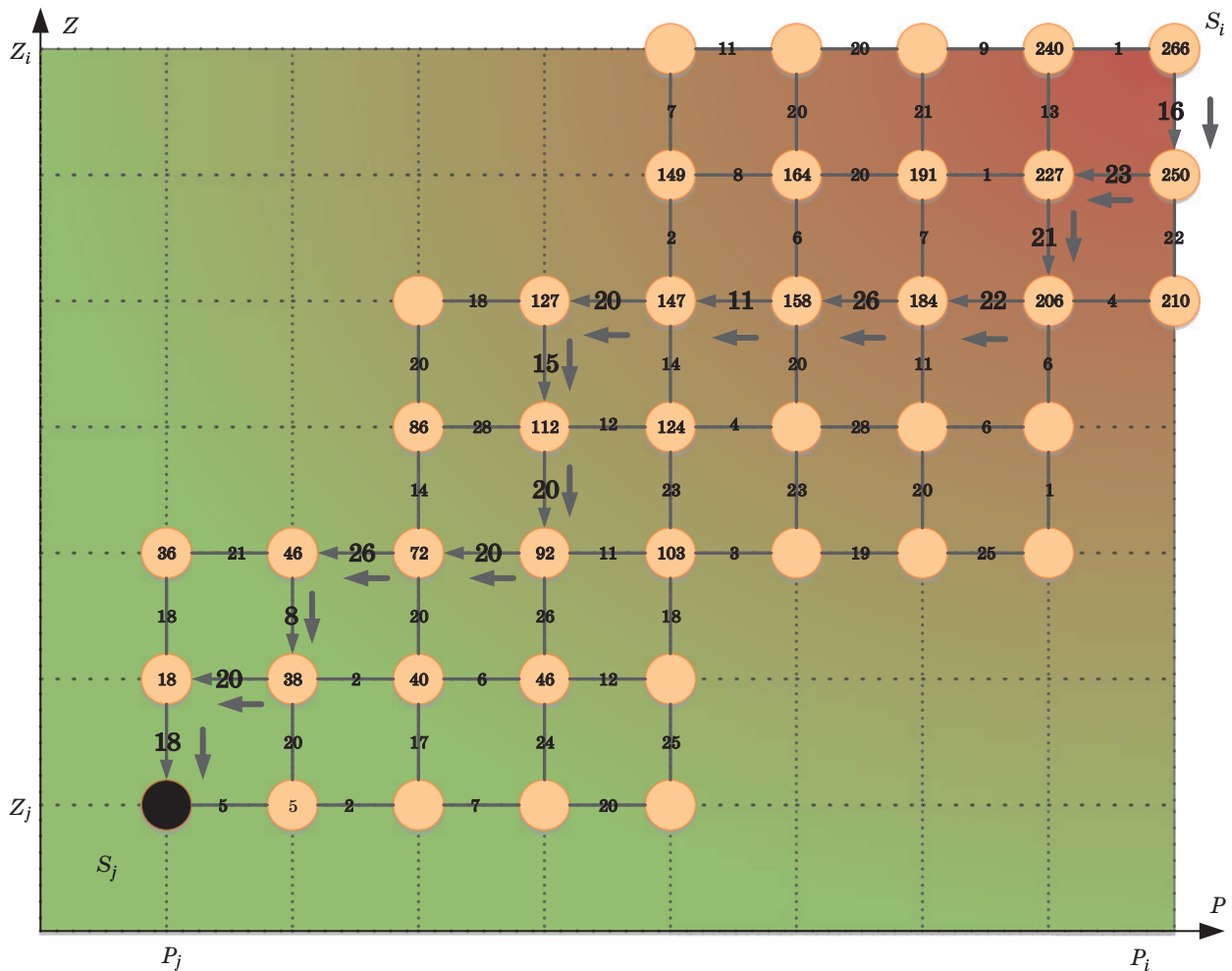
где $\Omega_{\text{д}}^{i \rightarrow j} = \{U^1, U^2, \dots, U^g, \dots, U^k, \dots, U^{|\Omega_{\text{д}}^{i \rightarrow j}|}\}$ — множество допустимых последовательностей

управлений при переходе из S_i в S_j ; $\Theta(U^m)$ — функция, оценивающая эффективность последовательности управлений при реализации траектории.

$$\text{Найти: } U_{i \rightarrow j}^{\text{опт}} = \arg \max_{U^m \in \Omega_{\text{д}}^{i \rightarrow j}} \Theta(U^m).$$

Применение подходов динамического программирования при решении задачи облачного риск-менеджмента

Для поиска эффективного управления риском облачной среды предлагается применить методы динамического программирования [26]. Введем упрощающее допущение: за один шаг управления может быть уменьшено альтернативно только P либо Z . Исходные данные $\langle S_i, S_j, \langle P_{S_i}, Z_{S_i} \rangle, \langle P_{S_j}, Z_{S_j} \rangle, \Omega_{\text{д}}^{i \rightarrow j}, \Theta \rangle$ представлены на рис. 6. Координаты точки S_i равны $\langle P_{S_i}, Z_{S_i} \rangle$, для S_j — $\langle P_{S_j}, Z_{S_j} \rangle$. Для каждого допу-



■ Рис. 6. Пример решения задачи управления рисками облачной среды при использовании динамического программирования

стимого управления (представлены дугами) известны оценки эффективности (отображеныazole дуг).

В узлах представлены наилучшие оценки эффективности достижения соответствующего состояния облачной среды. Интервалы $[P_{S_j}, P_{S_j}]$ и $[Z_{S_j}, Z_{S_j}]$ имеют одинаковую длину, что дает возможность пользоваться методами динамического программирования. Каждый такой интервал представляет собой определенный этап решения задачи, его результат — выбор эффективного управления для движения между соседними состояниями. Множество допустимых траекторий перехода из i -го состояния в j -е формируется перечислениями различных путей между узлами, описывающими состояния i и j . Для каждой траектории множество дуг, которое ее составляет, задано априорно. Для того чтобы оценить эффективность траектории, надо просуммировать эффективность управлений, которые описываются весами соответствующих дуг. Безусловно, представленную задачу можно было бы решить и полным перебором всех возможных траекторий, однако метод динамического программирования выдаст результат той же точности, но трудоемкость вычислений при этом будет существенно снижена. Результат решения задачи представлен на рис. 6. Оптимальная траектория движения из i -го состояния в j -е выделена стрелками. Ее эффективность равна 266 усл. ед.

Полученная базовая формализация задачи управления рисками облачных сред может быть дополнена ограничениями, характерными только для проактивного либо для реактивного подхода к управлению рисками. На выбор метода ее решения существенное влияние может оказать уровень доступной априорной информации о кортеже $\langle S_i, S_j, \langle P_{S_i}, Z_{S_i} \rangle, \langle P_{S_j}, Z_{S_j} \rangle, \Omega_d^{i \rightarrow j}, \Phi, \Theta \rangle$. Необходимость парирования дефицита этой информации существенно усложнит рассматрива-

емую задачу и потребует синтеза соответствующих информационных технологий, методов и инженерных решений, ориентированных на оказание квалифицированной интерактивной поддержки ЛПР при принятии решений в данной предметной области.

Заключение

Организация риск-менеджмента в облачных средах является нетривиальной, противоречивой научно-практической задачей. Обилие различных подходов к анализу угроз, оценке рисков и формированию необходимых контрмер существенно усложняет и без того трудоемкую задачу поиска компромисса при распределении ресурсов между сервисными и операционными процессами в критических вычислительных системах. Предложенная формализация данной задачи, в отличие от существующих подходов, предоставляет возможность интеграции различных проактивных и реактивных методик риск-менеджмента облачных систем, что позволяет Брокеру, с одной стороны, прогнозировать наступление рисков событий, а с другой — принимать оперативные решения по минимизации потерь, связанных с возникновением неблагоприятных событий. В частности, предложенный информационный портрет позволяет визуализировать агрегированную оценку риска для текущего состояния облачной вычислительной среды, что является обязательным условием принятия эффективных решений в режиме реального времени. Приведенный числовой пример иллюстрирует возможность использования методов динамического программирования при решении задач риск-менеджмента для случаев, когда размерность фазового пространства состояний системы является сравнительно малой.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-29-07936.

Литература

1. Erl T., Puttini R., Mahmood Z. Cloud Computing: Concepts, Technology & Architecture. — Pearson Education, 2013. http://servicetechbooks.com/pdf/cloud_sample_chapter_1.pdf (дата обращения: 15.10.2016).
2. Nelson L. S., Raouf B. Cloud Architectures, Networks, Services, and Management. — John Wiley & Sons, 2015. <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781119042655> (дата обращения: 15.10.2016).
3. Catteddu D., Hogben G. Cloud Computing: Benefits, Risks and Recommendations for Information Security. — ENISA, 2009. <https://www.enisa.europa.eu/>

4. Damenu T. K., Balakrishna C. Cloud Security Risk Management: A Critical Review // Proc. of the 9th IEEE Intern. Conf. on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies. 2015. P. 370–375. doi:10.1109/NGMAST.2015.25
5. Ku F. C., Chen T. C. The Risk Management Strategy of Applying Cloud Computing // Intern. Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). 2012. N 9. P. 18–27.
6. Fitó J. O., Macías M. L., Fernández J. G. Toward Business-driven Risk Management for Cloud Computing // Proc. of the Intern. Conf. on Network and Service

- Management. 2010. P. 238–241. doi:10.1109/CNSM.2010.5691291
7. **Habib S. M., Ries S., Muhlhauser M.** Towards a Trust Management System for Cloud Computing // Proc. of the 10th Intern. Conf. on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications. 2011. P. 933–939. doi:10.1109/TrustCom.2011.129
 8. **Grobauer B., Walloschek T., Stocker E.** Understanding Cloud Computing Vulnerabilities // Security & Privacy. 2011. N 2. P. 50–57. doi:10.1109/MSP.2010.115
 9. **Охтилев М. Ю., Мустафин Н. Г., Миллер В. Е., Соколов Б. В.** Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 11. С. 7–14.
 10. **Takabi H., Joshi J. B., Ahn G. J.** Security and Privacy Challenges in Cloud Computing Environments // Security & Privacy. 2010. N 6. P. 24–31. doi:10.1109/MSP.2010.186
 11. **Скатков А. В. и др.** Информационные технологии для критических инфраструктур: монография. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. — 306 с.
 12. **Саввин А.** Круги без границ. Человек, бизнес и информационные технологии как единая система. — М.: Юнайтед Пресс, 2010. — 160 с.
 13. **Mosca P., Zhang Y., Xiao Z., and Wang Y.** Cloud Security: Services, Risks, and a Case Study on Amazon Cloud Services // Intern. Journal of Communications, Network and System Sciences. 2014. N 12. P. 529–535. doi:10.4236/ijcns.2014.712053
 14. **Sang-Ho Na, Kyung-Hun Kim, and Eui-Nam Huh.** Threats Evaluation for SLAs in Cloud Computing // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Convergence Technology. 2013. P. 1570–1571.
 15. **Brender N., Markov I.** Risk Perception and Risk Management in Cloud Computing: Results from a Case Study of Swiss Companies // Intern. Journal of Information Management. 2013. N 5. P. 726–733. doi:10.1016/j.ijinfomgt.2013.05.004
 16. **Saripalli P., Walters B.** QUIRC: A Quantitative Impact and Risk Assessment Framework // Proc. of the IEEE 3rd Intern. Conf. on Cloud Computing. 2010. P. 280–288. doi:10.1109/CLOUD.2010.22
 17. **Theoharidou M., Tsalis N., Gritzalis D.** In Cloud we Trust: Risk-Assessment-as-a-Service // Proc. of the Intern. Conf. on Trust Management. 2013. P. 100–110.
 18. **Sangroya A., Kumar S., Dhok J., and Varma V.** Towards Analyzing Data Security Risks in Cloud Computing Environments // Proc. of the Intern. Conf. on Information Systems, Technology and Management. 2010. P. 255–265. doi:10.1007/978-3-642-12035-0_25
 19. **Skatkov A. V., Maschenko E. N., Shevchenko V. I., Voronin D. Y.** Actors Interactions Research in Cloud Computing Environments Using System Dynamics Methodology // Proc. of the 18th FRUCT & ISPIT Conf. 2016. P. 612–619.
 20. **Zhu S. C., Xu Y., Jin M. Y., Sheng L.** Cloud Computing Security Risk Assessment Based on Level Protection Strategy // Computer Security. 2013. N 5. P. 39–42.
 21. **Bellandi V., et al.** Toward Economic-Aware Risk Assessment on the Cloud // Security & Privacy. 2015. N 6. P. 30–37. doi:10.1109/MSP.2015.138
 22. **Chih C. A., Huang Y. L.** An Adjustable Risk Assessment Method for a Cloud System // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Software Quality, Reliability and Security. 2015. P. 115–120. doi:10.1109/QRS-C.2015.27
 23. **Skatkov A. V., Shevchenko V. I., and Voronin D. Y.** Game-theoretical Management Model for IT-services of ERP-systems Guaranteed Level Assurance in Cloud Environments // Proc. of the 5th IEEE Intern. Conf. on Informatics, Electronics & Vision, Dhaka, Bangladesh. 2016. P. 1113–1116. doi:10.1109/ICIEV.2016.7760172
 24. **Jiang Z. W., Zhao W. R., Liu Y., Liu B. X.** Model for Cloud Computing Security Assessment Based on Classified Protection // Computer Science. 2013. N 8. P. 151–156.
 25. **Карабутов Н. Н.** Структурная идентификация систем: анализ динамических структур. — М.: МГИУ, 2008. — 160 с.
 26. **Bellman R. E.** Dynamic Programming. — Princeton University Press, 2010. — 392 p.

UDC 004.94

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.25

Proactive and Reactive Risk Management of IT Services of Cloud Environments

Skatkov A. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, AVSkatkov@sevsu.ru

Voronin D. Y.^a, PhD, Tech., Associate Professor, dima@voronins.com

Shevchenko V. I.^a, PhD, Tech., Associate Professor, kvf.sevntu@gmail.com

Klyucharev A. A.^b, PhD, Tech., Associate Professor, ak@aanet.ru

^aSevastopol State University, 33, Universitetskaya St., 299053, Sevastopol, Russian Federation

^bSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Most of emergencies in cloud environments are the results of ineffective risk management. For example, conflict situations lead to a service denial and require balanced and compromise solutions on resource allocation between the operating and systemic processes in the environment. Thus, the problem of risk management in cloud computing environments is extremely urgent. **Purpose:** We need to formalize the problem of effective risk management in cloud environments using the approaches with proactive

or reactive control. **Results:** The conducted analysis of the main threats and vulnerabilities of cloud computing has identified the need of proactive or reactive risk management in order to form and implement the necessary countermeasures. The proposed information portrait of a risk allows you to visualize the aggregated assessment of the current state of a cloud computing environment, which is an indispensable condition for automated operational decision-making in real-time IT service management. A formalization has been given for a life cycle of a cloud environment supporting proactive or reactive control. This allows you to formulate the risk management problem in terms of dynamic programming. The essence of the proposed method is sequential multistage choice of one of alternative solutions, such as reducing the probability of adverse events, minimizing possible negative consequences of emergency situations, etc. The novelty of the proposed approach implies that it can be effectively used for either proactive or reactive risk management in cloud systems. **Practical relevance:** The obtained results can be used to visualize the operative situation within an integrated decision-support system aimed to manage IT services of cloud computing environments. The usage of the proposed information portrait of a risk will provide the necessary reactivity and interactivity of the interaction with the decision maker.

Keywords — Cloud Computing Environment, Risk Management, Information Portrait of a Risk, Proactive Management, Reactive Management, Threat, Countermeasure, Dynamic Programming.

References

- Erl T., Puttini R., Mahmood Z. *Cloud Computing: Concepts, Technology & Architecture*. Pearson Education, 2013. Available at: http://servicetechbooks.com/pdf/cloud_sample_chapter_1.pdf. (accessed 15 October 2016).
- Nelson L. S., Raouf B. *Cloud Architectures, Networks, Services, and Management*. John Wiley & Sons, 2015. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781119042655>. (accessed 15 October 2016).
- Catteddu D., Hogben G. *Cloud Computing: Benefits, Risks and Recommendations for Information Security*. ENISA, 2009. Available at: <https://www.enisa.europa.eu/publications/cloud-computing-risk-assessment> (accessed 15 October 2016).
- Damenu T. K., Balakrishna C. Cloud Security Risk Management: A Critical Review. *Proc. the 9th IEEE Intern. Conf. on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, 2015, pp. 370–375. doi:10.1109/NGMAST.2015.25
- Ku F. C., Chen T. C. The Risk Management Strategy of Applying Cloud Computing. *Intern. Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 2012, vol. 3, no. 9, pp. 18–27.
- Fitó J. O., Macías M. L., Fernández J. G. Toward Business-driven Risk Management for Cloud Computing. *Proc. the Intern. Conf. on Network and Service Management*, 2010, pp. 238–241. doi:10.1109/CNSM.2010.5691291
- Habib S. M., Ries S., Muhlhauser M. Towards a Trust Management System for Cloud Computing. *Proc. 10th Intern. Conf. on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications*, 2011, pp. 933–939. doi:10.1109/TrustCom.2011.129
- Grobauer B., Walloschek T., Stocker E. Understanding Cloud Computing Vulnerabilities. *Security & Privacy*, 2011, vol. 9, no. 2, pp. 50–57. doi:10.1109/MSP.2010.115
- Ohtilev M. Yu., Mustafin N. G., Miller V. E., Sokolov B. V. The Concept of Proactive Management of Complex Objects: Theoretical and Technological Bases. *Izvestija vuzov. Priboroostroenie*, 2014, vol. 57, no. 11, pp. 7–14 (In Russian).
- Takabi H., Joshi J. B., Ahn G. J. Security and Privacy Challenges in Cloud Computing Environments. *Security & Privacy*, 2010, vol. 8, no. 6, pp. 24–31. doi:10.1109/MSP.2010.186
- Skatkov A. V., et al. *Informatsionnye tekhnologii dlia kriticheskikh infrastruktur* [Information Technology for Critical Infrastructures]. Sevastopol, SevNTU Publ., 2012. 306 p. (In Russian).
- Savvin A. *Krugi bez granits. Chelovek, biznes i informatsionnye tekhnologii kak edinaiia sistema* [Circles without Borders. Man, Business and Information Technology as a System]. Moscow, United Press Publ., 2010. 160 p. (In Russian).
- Mosca P., Zhang Y., Xiao Z., and Wang Y. Cloud Security: Services, Risks, and a Case Study on Amazon Cloud Services. *Intern. Journal of Communications, Network and System Sciences*, 2014, vol. 7, no. 12, pp. 529–535. doi:10.4236/ijcns.2014.712053
- Sang-Ho Na, Kyung-Hun Kim, and Eui-Nam Huh. Threats Evaluation for SLAs in Cloud Computing. *Proc. IEEE Intern. Conf. on Convergence Technology*, 2013, pp. 1570–1571.
- Brender N., Markov I. Risk Perception and Risk Management in Cloud Computing: Results from a Case Study of Swiss Companies. *Intern. Journal of Information Management*, 2013, vol. 33, no. 5, pp. 726–733. doi:10.1016/j.ijinfmgmt.2013.05.004
- Saripalli P., Walters B. QUIRC: A Quantitative Impact and Risk Assessment Framework. *Proc. IEEE 3rd Intern. Conf. on Cloud Computing*, 2010, pp. 280–288. doi:10.1109/CLOUD.2010.22
- Theoharidou M., Tsalis N., Gritzalis D. In Cloud we Trust: Risk-Assessment-as-a-Service. *Proc. Intern. Conf. on Trust Management*, 2013, pp. 100–110.
- Sangroya A., Kumar S., Dhok J., and Varma V. Towards Analyzing Data Security Risks in Cloud Computing Environments. *Proc. Intern. Conf. on Information Systems, Technology and Management*, 2010, pp. 255–265. doi:10.1007/978-3-642-12035-0_25
- Skatkov A. V., Maschenko E. N., Shevchenko V. I., Voronin D. Y. Actors Interactions Research in Cloud Computing Environments Using System Dynamics Methodology. *Proc. 18th FRUCT & ISPIT Conf.*, 2016, pp. 612–619.
- Zhu S. C., Xu Y., Jin M. Y., Sheng L. Cloud Computing Security Risk Assessment Based on Level Protection Strategy. *Computer Security*, 2013, vol. 5, pp. 39–42.
- Bellandi V., et al. Toward Economic-Aware Risk Assessment on the Cloud. *Security & Privacy*, 2015, vol. 13, no. 6, pp. 30–37. doi:10.1109/MSP.2015.138
- Chih C. A., Huang Y. L. An Adjustable Risk Assessment Method for a Cloud System. *Proc. IEEE Intern. Conf. on Software Quality, Reliability and Security*, 2015, pp. 115–120. doi:10.1109/QRS-C.2015.27
- Skatkov A. V., Shevchenko V. I., Voronin D. Y. Game-theoretical Management Model for IT-services of ERP-systems Guaranteed Level Assurance in Cloud Environments. *Proc. 5th IEEE Intern. Conf. on Informatics, Electronics & Vision, Dhaka, Bangladesh*, 2016, pp. 1113–1116. doi:10.1109/ICIEV.2016.7760172
- Jiang Z. W., Zhao W. R., Liu Y., Liu B. X. Model for Cloud Computing Security Assessment Based on Classified Protection. *Computer Science*, 2013, vol. 8, pp. 151–156.
- Karabutov N. N. *Strukturnaia identifikatsiia sistem: analiz dinamicheskikh struktur* [Structural Identification Systems: Analysis of Dynamic Structures]. Moscow, MGIIU Publ., 2008. 160 p. (In Russian).
- Bellman R. E. *Dynamic Programming*. Princeton University Press, 2010. 392 p.

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И СЛОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ СТРУКТУР АВТОМАТА С ПАМЯТЬЮ ПРИ ПОТОКЕ МЯГКИХ ОТКАЗОВ

И. В. Егоров^а, аспирант

В. Ф. Мелехин^а, доктор техн. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: снижение проектной нормы в производстве полупроводниковых структур повышает чувствительность вычислительной техники к попаданию частиц высоких энергий (в частности, при работе в условиях радиации). Основное их влияние выражается в возникновении «мягких» отказов — искажений информации при сохранении работоспособности аппаратуры. Борьба с мягкими отказами требует разработки новых схемотехнических решений в системах со структурным резервированием, таких как конечные автоматы. **Цель:** оценка надежности и структурной сложности известных реализаций блоков с аппаратным резервированием при потоке мягких (информационных) отказов. **Результаты:** анализ различных реализаций блоков типа «автомат Мура» со структурным резервированием при потоке мягких отказов показал, что структурное резервирование памяти состояний автомата и внедрение механизмов самовосстановления данных в памяти позволяет качественно повысить продолжительность безотказной работы без увеличения сложности реализации по сравнению с невозстанавливаемыми структурами. Это объясняется тем, что в случае мягкого отказа элемент памяти остается работоспособным, и корректное состояние системы может быть полностью восстановлено путем перезаписи поврежденного бита по окончании периода восстановления. Невосстанавливаемый отказ происходит только в том случае, если в течение периода восстановления одновременно в нескольких экземплярах резервированного элемента памяти произошло искажение данных. Если при проектировании системы удастся обеспечить достаточно малый период восстановления, то возникновение этого события становится крайне маловероятным, что дает возможность многократно увеличить время безотказной работы устройства. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют определить направление разработки схемотехнических решений для конечного автомата, устойчивого к мягким отказам: блокирование распространения отказа в памяти состояний, периодическое восстановление искаженных бит памяти состояний и внедрение аппаратных средств для регистрации произошедших отказов.

Ключевые слова — автомат с памятью, комбинационная схема, анализ надежности, оценка сложности аппаратной реализации, синхронизация, мягкие отказы, структурное резервирование, восстанавливаемые системы, вероятность безотказной работы.

Введение

Под восстанавливаемыми системами будем понимать системы со структурным резервированием, информационной и временной избыточностью, подверженные потоку мягких отказов, вызванных воздействием радиации на полупроводниковые структуры элементов, в которых параллельно с выполнением программы организованы процессы периодического восстановления информации в экземплярах блоков, в которых возник мягкий отказ.

В работе [1] рассмотрены общие концептуальные представления о восстанавливаемых системах, подверженных потоку мягких отказов, и подходы к функционально-логическому проектированию подобных систем; определен ряд вопросов, требующих отдельного исследования.

Один из таких вопросов — это изучение влияния на надежность блока, соответствующего автомату с памятью, ложных импульсов, возникающих при действии радиации, в комбинационных схемах и в триггерах автомата, а также обоснование требований к функциональной организации таких блоков со структурным резер-

вированием и периодическим восстановлением экземпляров с мягким отказом.

Для обоснования наиболее целесообразного способа введения структурной избыточности проводится анализ распространения ложных сигналов, вызванных воздействием частиц высокой энергии на полупроводниковую структуру транзистора, по схеме автомата с резервированием и мажорированием. В работах [2, 3] рассмотрены процессы возникновения мягких отказов под действием радиации в логических элементах и триггерах. Установлена функциональная связь эффектов в полупроводниковых структурах транзисторов от попадания частиц высокой энергии с возникновением мягких отказов в цифровом устройстве. Рассматриваются полупроводниковые структуры и схемотехника элементов, выполненных по наиболее распространенной в настоящее время технологии КМОП (CMOS Fabrication) [4]. Полученные зависимости [3] являются базой для установления функциональных зависимостей между потоком событий в виде ложных импульсов на выходе вентиля (логического элемента) и характеристиками потока мягких отказов в автомате. Это выполнено в на-

стоящей работе. Полученные зависимости используются для сравнительного анализа вариантов структур автоматов со структурной избыточностью. При этом в качестве определяющих для принятия решения о выборе варианта структуры приняты два показателя: вероятность возникновения мягкого отказа в автомате; сложность реализации автомата.

Наиболее общим представлением устройства типа автомата с памятью является модель абстрактного автомата [4]. По этой модели можно точно определить число триггеров, требуемых для реализации памяти, а также число логических переменных на входе и выходе. Для отдельных триггеров получены [3] точные оценки для вероятности возникновения мягкого отказа и для сложности реализации (число транзисторов). Для комбинационных схем автомата по этой модели получить точные оценки не представляется возможным, но можно использовать известные асимптотические оценки сложности и глубины распространения сигналов [5]. Использование этих оценок и результатов, полученных в работах [2, 3], позволяет проводить сравнительный анализ структур и обосновать предлагаемые в работе решения.

Выбор типа абстрактного конечного автомата и его структурного представления для анализа

Модель абстрактного конечного автомата S представляется математической структурой: $S = \langle A, B, R, \delta, \lambda, r_0 \rangle$, где:

A — множество состояний входа (входной алфавит);

B — множество состояний выхода (выходной алфавит);

R — множество внутренних состояний;

δ — функция переходов;

λ — функция выходов;

$r_0 \in R$ — начальное состояние, в которое автомат приводится сигналом начальной установки.

В проектировании цифровых устройств используются три типа абстрактных конечных автоматов: автоматы Мили, Мура и Медведева [4]. Все три типа автоматов могут представить любой алгоритм. Для всех трех типов автоматов функция переходов имеет одинаковое теоретико-множественное представление: $\delta: A \times R \rightarrow R$. Типы автоматов различаются представлением функции выхода λ :

— для автомата Мили $\lambda: A \times R \rightarrow B$;

— для автомата Мура $\lambda: R \rightarrow B$;

— для автомата Медведева $\lambda: B = R$.

Как средства формализованного представления алгоритма эти модели равнозначны: для каждого автомата одного типа можно построить

эквивалентный автомат другого типа. С точки зрения реализации на электронных схемах типы автоматов имеют различия в двух отношениях: по качеству выходных сигналов; по затратам триггеров на память автомата.

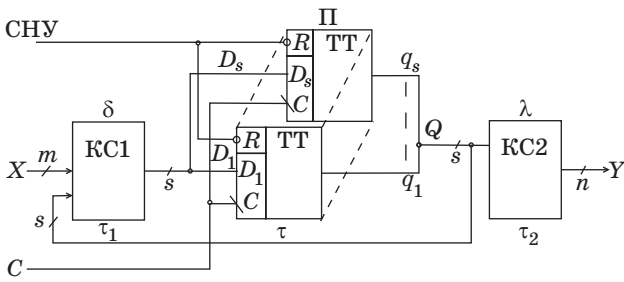
Наилучшее качество выходных сигналов имеет автомат Медведева. В этих автоматах значение выходного сигнала устанавливается сразу после переключения триггера синхронно с фронтом либо спадом тактового импульса и сохраняется в течение всего такта. Этот тип автоматов получает распространение в последнее время в связи с применением в СБИС встраиваемых средств тестирования, использующих метод последовательного сканирования и вывода выходных сигналов всех автоматов [4].

В автоматах Мура качество выходных сигналов несколько хуже, так как при их формировании выходные сигналы триггеров подвергаются некоторым функциональным преобразованиям, соответствующим функциям выходов λ . Но следует отметить, что глубина распространения сигналов в соответствующей комбинационной схеме невелика, поэтому переходные процессы распространения сигналов быстро завершаются в начале такта после переключения триггеров.

В автоматах Мили качество выходных сигналов хуже, чем в других типах автоматов. Это связано с тем, что при их формировании глубина распространения сигналов по сети элементов наиболее велика. Она включает процессы во внешней схеме, формирующей входные сигналы автомата, переключение триггеров и процессы в схеме, реализующей функции выходов λ . Эта схема имеет существенно большую сложность и глубину распространения сигналов в сравнении с автоматом Мура. У функций выхода автомата Мили больше число аргументов, как это видно из приведенного выше теоретико-множественного представления функций λ для разных типов автоматов. В связи с этим выходные сигналы в автомате Мили устанавливаются только в конце такта.

По затратам триггеров минимальное число имеет автомат Мили, максимальное — автомат Медведева. Таким образом, с точки зрения рассмотренных показателей автомат Мура дает компромиссное решение. Следует отметить, что автоматы Мура чаще всего и применяются при проектировании цифровой аппаратуры.

Рассмотрим структурную схему автомата Мура (рис. 1) и алгебраическую модель описания его работы. Обычно при разработке алгоритма работы блока, входящего в структуру вычислительной системы, известны входные и выходные переменные блока, представляющие собой векторы двоичных переменных $X[m:1] = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, $Y[n:1] = (y_1, y_2, \dots, y_n)$. Множества состояний входа (A) и выхода (B) соответствуют множеству



■ Рис. 1. Структурная схема автомата Мура

значений этих векторов: $A = \{X[m:1]\}$, $B = \{Y[n:1]\}$. Множество внутренних состояний R определяется в процессе построения модели абстрактного автомата. Поэтому мощность этого множества $|R|$ можно считать известной. Обычно используется двоичное кодирование состояний [4]. Количество разрядов s кода состояний $Q[s:1] = (q_1, q_2, \dots, q_s)$ (и, соответственно, триггеров в памяти автомата) определяется как $s = \lceil \log_2 |R| \rceil$. Если $2^s > |R|$, то для «лишних» состояний доопределяется функция переходов безусловными переходами из этих состояний в начальное состояние r_0 ($Q[s:1] = (0\dots 0)$).

Поскольку представление структурной схемы автомата нам требуется для получения оценок сложности реализации блоков (КС1, КС2, П) и их влияния на возникновение мягких отказов, то в структуре на рис. 1 использовано представление входных, выходных и внутренних переменных в виде приведенных выше векторов. Комбинационная схема КС1 реализует функцию переходов δ , КС2 реализует функцию выходов λ . Для реализации блока памяти П автомата использованы триггеры типа D , синхронизируемые спадом синхроимпульса C . Это один из наиболее распространенных типов триггера. Именно для него рассмотрены процессы, вызванные воздействием частиц высокой энергии на транзисторы схемы, и получены соответствующие оценки вероятностей отказа [3]. СНУ — сигнал начальной установки. Связи между блоками соответствуют функциям в автомате Мура: $\delta: \{X\} \times \{Q\} \rightarrow \{Q\}$; $\lambda: \{Q\} \rightarrow \{Y\}$.

В электронных схемах, реализующих блоки автомата, существуют задержки распространения сигналов. Обозначим задержку в КС1 — τ_1 , в КС2 — τ_2 , в П — τ . В математической модели конечного автомата приняты допущения: $\tau_1 = \tau_2 = 0$. Интервал между смежными переключениями памяти τ называют тактом. Работа автомата рассматривается в дискретном времени $t = t'/\tau = 0, 1, 2, \dots$; t' — непрерывное физическое время.

Разработчик алгоритма разбивает решение задачи на шаги. Для связи между шагами используются причинно-следственные отношения. Говорят, что алгоритмист пользуется логическим временем. Выполнению одного шага алгоритма соответствует такт работы автомата.

Электронная схема, реализующая автомат, работает в реальном физическом времени. В синхронных автоматах для согласования дискретного времени автомата (логического времени алгоритмиста) с физическим временем используется внешний генератор тактовых импульсов C . Предполагается, что выбор длительности такта τ производится с условием, что все переходные процессы изменения сигналов при их распространении по цепи элементов завершаются за время, меньшее τ . При использовании дискретного времени функции переходов и выходов представляют в алгебраической форме: $Q^{t+1} = \delta(Q^t, X^t)$; $Y^t = \lambda(Q^t)$, где индекс t соответствует текущему такту дискретного времени, а $t + 1$ — следующему такту.

Представим функции, реализуемые комбинационными схемами:

— для КС1:

$$\begin{aligned} D_1 &= f_1(x_1, \dots, x_m, q_1, \dots, q_s); \\ &\dots \\ D_s &= f_s(x_1, \dots, x_m, q_1, \dots, q_s); \end{aligned} \quad (1)$$

— для КС2:

$$\begin{aligned} y_1 &= \varphi_1(q_1, \dots, q_s); \\ &\dots \\ y_n &= \varphi_n(q_1, \dots, q_s). \end{aligned} \quad (2)$$

Итак, для блока структуры вычислительной системы, представленного абстрактным автоматом Мура, известны:

m, n — число входных и выходных двоичных переменных соответственно;

s — число триггеров в памяти автомата;

число функций f_i, φ_i , реализуемых КС1 и КС2 соответственно, и число аргументов этих функций.

Используя эти параметры, можно получить оценки сложности реализации блоков, глубины распространения сигналов и вероятностей возникновения мягких отказов.

Оценки сложности реализации и вероятностей возникновения мягких отказов в нерезервированной схеме конечного автомата Мура

Будем рассматривать оценки следующих показателей для автомата Мура (см. рис. 1):

— сложности реализации блоков (size complexity): $C_{КС1}$ — комбинационной схемы КС1; $C_{КС2}$ — комбинационной схемы КС2; $C_{П}$ — блока памяти (сложность выражена в числе логических элементов, л. э.);

— глубины распространения сигналов (depth complexity): $D_{КС1}$ — в КС1; $D_{КС2}$ — в КС2;

— вероятности событий: $P_{л.с.КС1}$ — возникновения ложного сигнала на выходе КС1; $P_{л.с.КС2}$ — ложного сигнала на выходе КС2; $P_{м.о.П}$ — мягкого отказа, связанного с изменением состояния памяти автомата.

Показатели сложности реализации необходимы при сравнительном анализе вариантов структурного резервирования, необходимы они и при расчетах вероятности отказов: чем выше сложность, тем больше транзисторов в схеме, тем больше потенциальных источников ложных сигналов.

Глубина распространения сигналов влияет не только на быстродействие, но и на работоспособность, поскольку вероятность распространения ложного сигнала до выхода схемы зависит от места его возникновения.

Из рис. 1 видно, что ложные сигналы на выходах КС2 не могут повлиять на состояние памяти автомата, а значит, не могут вызвать мягкий отказ. Но следует учесть, что автомат является блоком структуры системы, и выходы КС2 автомата могут быть связаны с входами других автоматов. Поэтому оценки для КС2 также необходимы.

Основной задачей получения оценок приведенных показателей является определение доли влияния памяти и комбинационных схем автомата на возникновение мягких отказов. Наиболее точно и содержательно это можно рассмотреть на конкретном примере, а затем мы обобщим полученные оценки и выводы на общий случай.

В качестве примера рассмотрим конечный автомат Мура средней сложности со следующими параметрами: число входов $m = 4$, число выходов $n = 4$, число внутренних состояний $|R| = 8$ (рис. 2, а). Граф переходов автомата приведен на рис. 2, б. Следует заметить, что хотя число входных переменных m может быть большим, условия перехода из одного состояния в другое зависят не от всех переменных x_i . Это связано с психологией разработчика алгоритмов. Доказано, что число альтернатив, рассматриваемых на отдельном шаге, не превышает 7 ± 2 .

Для реализации приведенного автомата потребуются 3 триггера, а функции КС1 и КС2 имеют следующий вид: $D_i = f_i(q_1, q_2, q_3, x_1, x_2, x_3, x_4)$, $i = 1, 2, 3$; $y_j = \varphi_j(q_1, q_2, q_3)$, $j = 1, 2, 3, 4$.

Оценим для блока памяти сложность реализации C_{Π} и вероятность мягкого отказа из-за попадания частицы в транзисторы триггеров $P_{м.о.П}$, используя результаты для триггера, полученные в работе [3] ($C_{тр} = 10$ л. э., $P_{тр} = 5P_{п.ч.т}$, число триггеров в памяти $s = 3$):

$$C_{\Pi} = C_{тр} \times 3 = 30 \text{ л. э.};$$

$$P_{м.о.П} = 3P_{тр} = 15P_{п.ч.т},$$

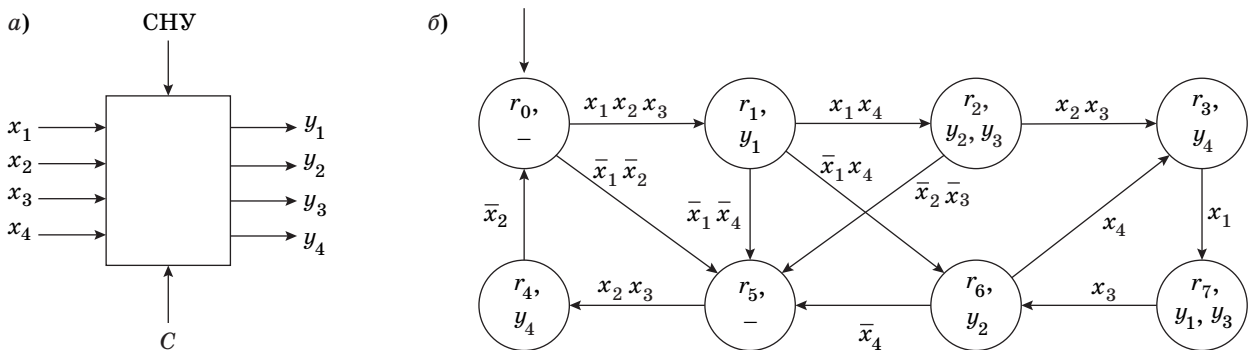
где $P_{п.ч.т}$ — вероятность попадания частицы в транзистор.

Для получения оценок соответствующих показателей КС1 и КС2 необходимо выполнить их синтез. Учитывая цели, поставленные в данной работе, можно ограничиться синтезом одной из функций в каждой группе, например D_1 и y_1 .

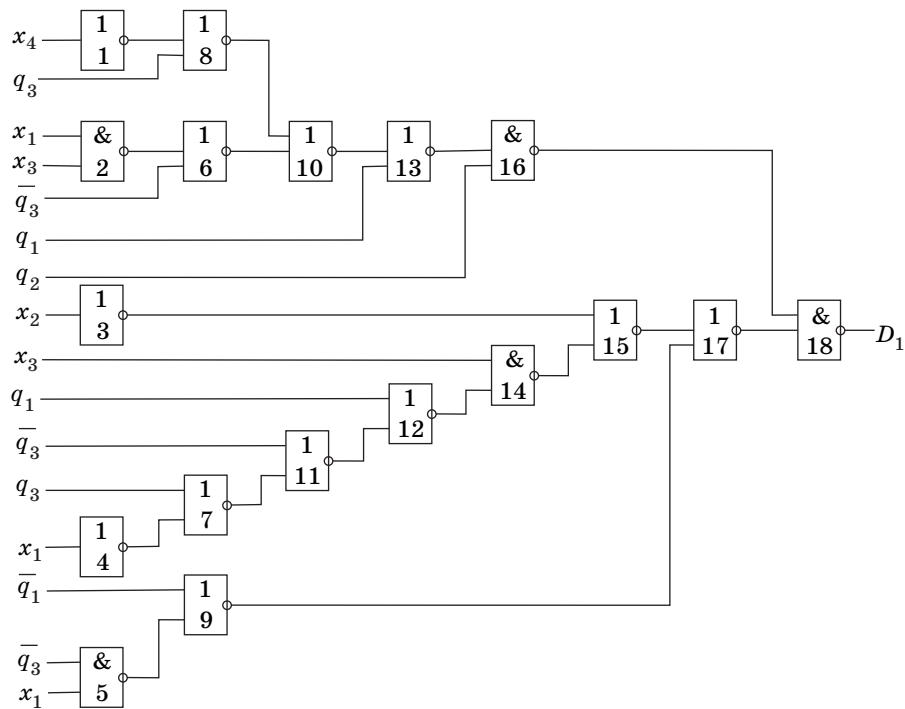
Выполним экономичное кодирование внутренних состояний автомата, используя один из известных эвристических алгоритмов. При этом, учитывая, что автомат инициальный, начальному состоянию дадим код $r_0 = (q_3, q_2, q_1) = (0, 0, 0)$. В это состояние автомат приводится по СНУ. Для остальных состояний в соответствии с алгоритмом получим: $r_1 = (1, 1, 1)$, $r_2 = (1, 1, 0)$, $r_3 = (0, 0, 1)$, $r_4 = (1, 0, 1)$, $r_5 = (1, 0, 0)$, $r_6 = (0, 1, 0)$, $r_7 = (0, 1, 1)$.

С использованием результатов кодирования и графа переходов на рис. 2, б определим функцию $D_1 = f_1(q_1, q_2, q_3, x_1, x_2, x_3, x_4)$ в дизъюнктивно-нормальной форме и после минимизации и факторизации представим ее в скобочной форме:

$$\begin{aligned} D_1 = f_1(q_1, q_2, q_3, x_1, x_2, x_3, x_4) = & x_1 x_2 x_3 \bar{q}_3 \bar{q}_2 \bar{q}_1 + \\ & + x_2 x_3 q_3 q_2 \bar{q}_1 + x_4 \bar{q}_3 q_2 \bar{q}_1 + x_2 x_3 q_3 \bar{q}_2 \bar{q}_1 + x_1 \bar{q}_3 \bar{q}_2 q_1 = \\ = & \bar{q}_2 (x_2 x_3 \bar{q}_1 (x_1 \bar{q}_3 + q_3) + x_1 \bar{q}_3 q_1) + \\ & + q_2 \bar{q}_1 (x_2 x_3 q_3 + x_4 \bar{q}_3). \end{aligned}$$



■ Рис. 2. Пример автомата Мура: а — представление в виде черного ящика; б — граф переходов



■ Рис. 3. Пример схемы, реализующей функцию D_1

По графу переходов определим функцию выхода

$$y_1 = \varphi_1(q_1, q_2, q_3) = q_3q_2q_1 + \bar{q}_3q_2q_1 = q_2q_1 = \overline{\bar{q}_2 + \bar{q}_1}.$$

Синтезируем схему реализации функции D_1 в базисе элементов КМОП: 2И-НЕ, 2ИЛИ-НЕ и НЕ. Воспользуемся результатами анализа влияния на эти элементы частиц высокой энергии [3]. Для синтеза функции, представленной в скобочной форме, на заданном элементном базисе воспользуемся алгоритмом, использующим представление типов функций арифметическими полиномами [7]. Синтезированная схема (рис. 3) содержит 18 логических элементов, включая три инвертора, и имеет глубину распространения сигнала $D = 8$.

Реализация функции y_1 тривиальна, для получения сигнала на одном выходе КС2 требуется один логический элемент 2ИЛИ-НЕ.

Произведем оценку вероятности $P_{\text{л.с.КС1},1}$ возникновения ложного сигнала на первом выходе комбинационной схемы КС1, приведенной на рис. 3. Вероятность возникновения ложного сигнала на выходе инвертора и двухвходового логического элемента равна вероятности попадания частицы высокой энергии в один транзистор $P_{\text{п.ч.т}}$ [3]. Вероятность появления ложного сигнала на выходе двухвходового элемента при поступлении ложного сигнала на его вход равна $1/2$. Поэтому вероятность P_i появления на выходе комбинационной схемы ложного сигнала, возникшего из-за попадания в i -й элемент частицы высокой энер-

гии, зависит от числа k_i элементов цепи от выхода i -го элемента до выхода схемы. Так, для элемента $i = 1$ на рис. 3 $k_i = 5$, соответственно, получим $P_1 = 2^{-5}P_{\text{п.ч.т}}$. Поэтому

$$P_{\text{л.с.КС1},1} = \sum_{i=1}^{18} P_i = P_{\text{п.ч.т}}(2^{-5} + 2^{-5} + 2^{-3} + 2^{-7} + 2^{-3} + 2^{-4} + 2^{-6} + 2^{-4} + 2^{-2} + 2^{-3} + 2^{-5} + 2^{-4} + 2^{-2} + 2^{-3} + 2^{-2} + 2^{-1} + 2^{-1} + 1) \approx 3,4P_{\text{п.ч.т}}. \quad (3)$$

Полагая примерно одинаковыми по сложности схемы, формирующие сигналы на всех трех выходах КС1, для вероятности возникновения ложного сигнала хотя бы на одном выходе схемы КС1 получим:

- $P_{\text{л.с.КС1}} = 3 \times P_{\text{л.с.КС1},1} = 10,2 \times P_{\text{п.ч.т}}$;
- сложность схемы $C_{\text{КС1}} = 3 \times 18 = 54$ л. э.;
- глубина распространения сигналов $D_{\text{КС1}} = 8$.

Рассмотрим соответствующие показатели для схемы КС2.

Учитывая, что для реализации функции $y_1 = \overline{\bar{q}_2 + \bar{q}_1}$ требуется один элемент 2ИЛИ-НЕ, для вероятности возникновения ложного сигнала на первом выходе комбинационной схемы КС2, соответственно, получим:

- $P_{\text{л.с.КС2},1} = P_{\text{п.ч.т}}$;
- вероятность появления ложного сигнала хотя бы на одном выходе схемы КС2 $P_{\text{л.с.КС2}} = nP_{\text{л.с.КС2},1} = 4P_{\text{п.ч.т}}$;
- сложность $C_{\text{КС2}} = 4$ л. э.;

— глубина распространения сигналов $D_{КС2} = 1$.

Рассмотрим обобщенные оценки сложности реализации, глубины распространения сигналов и вероятности появления ложных сигналов на выходе комбинационной схемы КС1 рассматриваемого примера по числу n аргументов функции $D_1 = f_1(q_1, q_2, q_3, x_1, x_2, x_3, x_4)$ без выполнения синтеза схемы и сравним их с полученными выше точными оценками.

В работе [5] доказаны теоремы, утверждающие, что для большинства комбинационных схем, реализующих логическую функцию от n переменных в базисе $\Omega = (И-ИЛИ-НЕ)$, справедливы оценки:

— для сложности реализации $C_{\Omega}(f)$:

$$\frac{2^n}{n}(1 + \varepsilon) \geq C_{\Omega}(f) \geq \frac{2^n}{n}(1 - \varepsilon) - 2n^2, \text{ при } n \geq 5$$
 справедлива оценка

$$C_{\Omega}(f) = \frac{2^n}{n}; \quad (4)$$

— для глубины распространения $D_{\Omega}(f) \leq n$.

Соответственно, для функции D_1 получим

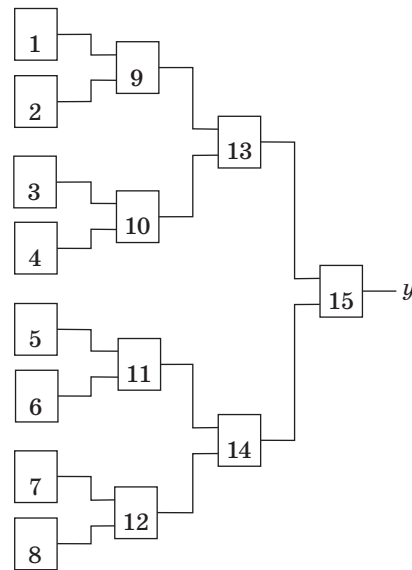
$$C_{\Omega}(D_1) = \frac{2^7}{7} = 18,28. \text{ Это хорошо согласуется с известным количеством элементов, равным 18.}$$

$D_{\Omega}(D_1) = 7$. Это тоже хорошо согласуется с точной оценкой $D(D_1) = 8$.

Для вероятности возникновения ложного сигнала на выходе схемы, вызванного попаданием частицы высокой энергии в транзистор, обобщенные оценки отсутствуют. Рассмотрим получение такой оценки, опираясь на те рассуждения, которые использовали выше для примера рис. 3. Было показано, что наибольший вклад в вероятность появления ложного сигнала на выходе y_1 вносит последний элемент (корень дерева) и связанные с ним два элемента. Опираясь на приведенные выше рассуждения, рассмотрим два частных случая комбинационных схем, для которых легко получить обобщенную оценку и которые являются предельными случаями возможных реализаций схемы и поэтому позволяют получить верхнюю и нижнюю оценку вероятности в общем случае.

Первый случай соответствует графу «бинарное дерево» (рис. 4).

Оценим величину $P_{б.д.}$, соответствующую вероятности возникновения ложного сигнала на его выходе. Сгруппируем элементы по столбцам, так как у элементов каждого столбца одинаковая глубина распространения сигнала (число элементов k_i в трассе прохождения сигнала с выхода i -го элемента до выхода схемы). Вероятность возникновения ложного сигнала в отдельном элементе — $P_{п.ч.т.}$. Для элементов каждого столбца опре-



■ Рис. 4. Комбинационная схема, соответствующая графу «бинарное дерево»

делим вероятность прохождения $P_{при}$ возникшего ложного сигнала на выход схемы. Для нулевого столбца (корневой вершины дерева, элемента 15) $P_{пр0} = 1$. Для первого столбца (элементы 13 и 14) трасса прохождения ложного импульса содержит один элемент $k_1 = 1$. Поэтому $P_{пр1} = 2^{-k_1} = \frac{1}{2}$. Но

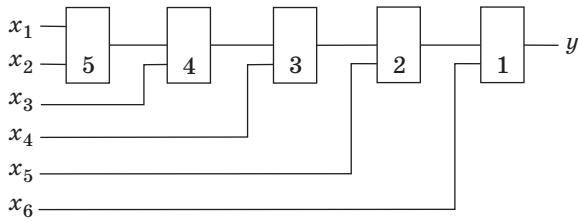
элементов в 1-м столбце два, поэтому вероятность появления ложного сигнала на выходе схемы из-за попадания частицы в один из элементов 1-го столбца $P_1 = 2 \times \frac{1}{2} \times P_{п.ч.т.} = P_{п.ч.т.}$. Аналогичный результат получим для 2-го и 3-го столбцов. Особенностью схемы с графом бинарного дерева является то, что каждый столбец вызывает появление ложного сигнала на выходе схемы с вероятностью $P_{п.ч.т.}$. Число столбцов совпадает с глубиной распространения сигналов в бинарном дереве $D_{б.д.}$. Для рис. 4 имеем $P_{б.д.} = D_{б.д.} \times P_{п.ч.т.} = 4P_{п.ч.т.}$

Сложность схемы рис. 4 $C_{б.д.} = 2^{D_{б.д.}} - 1 \approx 2^{D_{б.д.}}$.

Реальная схема (см. рис. 3) отличается от бинарного дерева, начиная с 3-го уровня элементов по удаленности от выхода D_1 . Большинство элементов произвольной схемы примерно такой же сложности удалены от корневой вершины дальше, чем в бинарном дереве.

Вероятность возникновения ложного сигнала на выходе комбинационной схемы, реализующей логическую функцию f_n от n переменных, можно представить в виде $P_{КС}(f_n) = k(n)P_{п.ч.т.}$. Примерную верхнюю оценку $k_B(n)$ для коэффициента k в выражении для вероятности $P_{КС}(f_n)$ можно получить следующим образом.

Будем использовать оценку сложности реализации функции f_n (4). Рассмотрим бинарное де-



■ Рис. 5. Комбинационная схема типа цепи логических элементов

рево такой же сложности $C_{б.д} = C(f_n)$. Определим глубину распространения сигналов в эквивалентном бинарном дереве $D_{б.д}$:

$$D_{б.д} = \log_2 C_{б.д} = \log_2 C(f_n) = n - \log_2 n.$$

Соответственно, для коэффициента $k_B(n)$, округляя в меньшую сторону, получим $k_B(n) = [n - \log_2 n]$.

Для получения нижней оценки $k_H(n)$ рассмотрим второй предельный случай построения схемы — цепь элементов (рис. 5).

Вероятность возникновения ложного сигнала на выходе схемы в виде цепи из пяти элементов

$$P_{л.с.ц}(5) = P_{п.ч.т}(1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16) \approx 1,94 P_{п.ч.т}.$$

Обобщая для цепи, состоящей из n элементов, получим

$$P_{л.с.ц}(n) = P_{п.ч.т} \sum_{k=1}^n \frac{1}{2^{k-1}}.$$

Таким образом, $k_H(n)$ является суммой первых n членов бесконечно убывающей геометрической прогрессии с первым членом, равным 1, и знаменателем, равным 1/2:

$$k_H(n) = \frac{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n}{1 - \frac{1}{2}} = 2 - \frac{1}{2^{n-1}}.$$

Обобщенная оценка вероятности возникновения ложного сигнала, вызванного попаданием частицы высокой энергии в транзистор, на выходе схемы, реализующей функцию от n переменных:

$$[n - \log_2 n] P_{п.ч.т} > P_{л.с}(f_n) > 2 - \frac{1}{2^{n-1}}.$$

Для рассмотренного выше примера комбинационной схемы, реализующей функцию от семи переменных, получена точная оценка: $P_{л.с.КС1,1} = 3,4 P_{п.ч.т}$. Сравним ее с обобщенными верхней

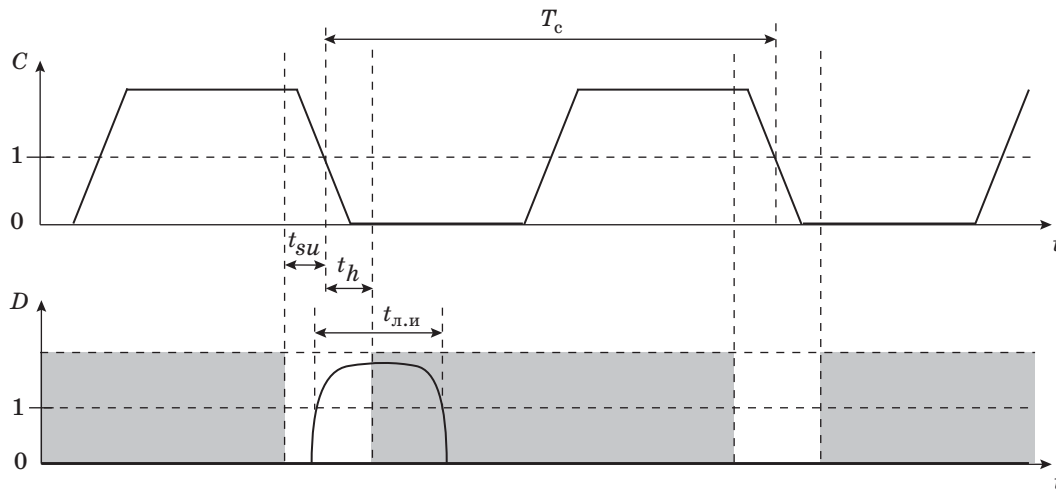
и нижней оценками: $k_B(7) = [7 - \log_2 7] = 4 > 3,4$; $k_H(7) \approx 2 < 3,4$. Результат вполне удовлетворительный.

Анализ влияния радиационных воздействий на элементы конечного автомата

На работу рассматриваемого конечного автомата оказывают влияние ложные сигналы, возникающие при попадании частицы высокой энергии в закрытый транзистор логических элементов, входящих в схему памяти Π и комбинационной схемы КС1. Ложные сигналы на выходе комбинационной схемы КС2 на работу данного автомата воздействия не оказывают, поэтому КС2 исключим из рассмотрения. Ложный сигнал, возникающий в схеме памяти автомата, приводит к изменению состояния автомата и поэтому является мягким отказом. Ложный сигнал на выходах КС1 еще не является отказом, но может стать причиной отказа, если вызовет переключение памяти. Рассмотрим связь следующих событий: появление ложного сигнала на одном из выходов КС1; переключение памяти под действием этого сигнала.

Мы рассматриваем синхронные автоматы. В них используются триггеры, синхронизируемые спадом либо фронтом тактового импульса. Эти триггеры имеют два важных параметра: t_{su} — время предустановки (Set-Up Time) и t_h — время удержания (Hold Time) [4, 6].

Эти интервалы времени показаны на рис. 6 для триггера типа D , синхронизируемого спадом импульса C . Именно этот тип триггера выбран для реализации памяти рассматриваемого автомата. Закрашенными областями отмечены интервалы времени, когда информационный сигнал D может изменяться. В интервале $t_{su} + t_h$ сигнал D должен оставаться неизменным. Значение сигнала D в этом интервале определяет новое состояние триггера в наступающем такте. В современных триггерах $t_{su} + t_h = 0,2 - 2$ нс. Ложный импульс на выходе комбинационной схемы КС1, соединенном с входом D триггера, может изменить состояние триггера и вызвать мягкий отказ, если он присутствует в интервале $t_{su} + t_h$. В противном случае мягкого отказа не возникнет. Учитывая, что поступление ложных сигналов во все моменты времени равновероятны, определим вероятность мягкого отказа автомата из-за попадания частицы в транзистор элементов комбинационной схемы КС1. Пусть ложный импульс имеет длительность $t_{л.и}$. Тогда вероятность возникновения мягкого отказа по причине попадания частицы в КС1 в течение периода синхронизации T_c равна вероятности пересечения интервала $t_{л.и}$ с интервалом $t_{su} + t_h$ (иными словами, вероятности



■ **Рис. 6.** Тактирование переключений триггеров типа *D*, синхронизируемых спадом синхроимпульса *C*

появления ложного импульса менее чем за $t_{л.и}$ до наступления интервала $t_{su} + t_h$):

$$P_{м.о.КС1} = P_{л.с.КС1}(t_{л.и} + t_{su} + t_h)/T_c.$$

Минимальная длительность такта определяется максимальной задержкой распространения сигнала в КС1 + П + КС2. Учитывая, что глубина распространения сигналов в системе $D_{сист} > 10$, а $t_{л.и} \approx 1$ нс, можно считать, что $(t_{л.и} + t_{su} + t_h)/T_c < 0,15$, а вероятность мягкого отказа при возникновении ложного сигнала в КС1 определяется соотношением

$$P_{м.о.КС1} < 0,15P_{л.с.КС1}. \quad (5)$$

Следует отметить, что при попадании частицы в транзистор памяти автомата мягкий отказ возникает независимо от момента попадания.

Определим вероятность мягкого отказа автомата

$$\begin{aligned} P_{м.о.а} &= P_{м.о.П} + P_{м.о.КС1} = \\ &= s \times P_{п.ч.т} + P_{л.с.КС1}(t_{л.и} + t_{su} + t_h)/T_c. \end{aligned}$$

С учетом изложенного определим вероятность мягкого отказа приведенного примера автомата (см. рис. 2) и сравним влияние на возникновение мягкого отказа блока памяти и КС1:

$$\begin{aligned} P_{м.о.а} &= P_{м.о.П} + P_{м.о.КС1} = \\ &= 15P_{п.ч.т} + 0,15 \times 10,2P_{п.ч.т} = \\ &= 15P_{п.ч.т} + 1,53P_{п.ч.т} = 16,53P_{п.ч.т}. \end{aligned}$$

Таким образом, влияние КС1 составляет около 10 %.

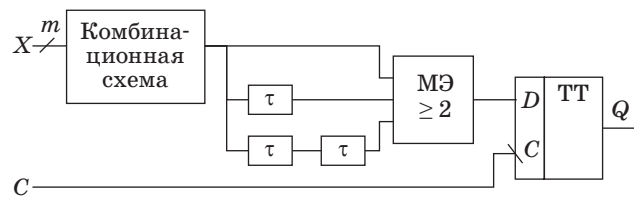
Методы уменьшения влияния ложных сигналов на выходах комбинационных схем

Рассмотрим схемотехнические способы уменьшения влияния комбинационной схемы на возникновение мягких отказов.

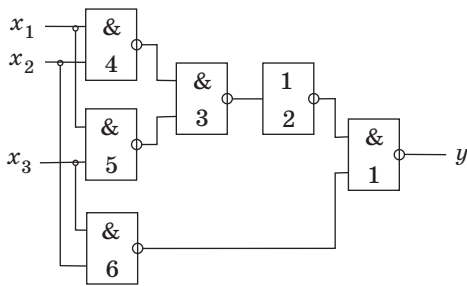
В работах [8–10] рассматривается влияние коротких сигналов, порожденных воздействием радиации на интегральные схемы, на работу вычислительных устройств; описан способ защиты триггера от воздействия кратковременного ложного сигнала на его информационном входе, связанном с выходом комбинационной схемы (рис. 7).

В цепи, связывающей выход комбинационной схемы и информационный вход триггера, используются элементы задержки и мажоритарный элемент МЭ. Если длительность ложного импульса не превышает задержку τ , то на выходе МЭ он не появится. Однако МЭ может стать источником ложного сигнала на информационном входе триггера. Оценим вероятность такого события и эффективность такого способа.

Схема МЭ (рис. 8) содержит шесть элементов. Используя ту же методику, которую применили выше для анализа комбинационной схемы КС1,



■ **Рис. 7.** Способ уменьшения влияния на работу триггера кратковременных ложных импульсов на выходе комбинационной схемы



■ Рис. 8. Схема мажоритарного элемента

оценим вероятность появления ложного сигнала на выходе МЭ:

$$P_{л.с.МЭ} = \sum_{i=1}^6 P_i = P_{п.ч.т} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \right) = 3P_{п.ч.т}.$$

Сравнивая полученный результат с оценкой $P_{л.с.КК1,1} = 3,4P_{п.ч.т}$, видим, что применение приведенного на рис. 7 способа уменьшает вероятность появления ложного сигнала на информационном входе триггера всего на 10 %, т. е. способ не является эффективным.

Сравнительный анализ надежности и сложности реализации вариантов построения структур блоков типа автомата с памятью

Будем сравнивать три типа структур автомата Мура:

- структуру автомата без структурного резервирования (см. рис. 1);
- структуру с троированием автомата, троированием МЭ на его входах (см. рис. 1 в работе [3]) и без периодического восстановления информации (структура, используемая в случаях невосстанавливаемых отказов элементов);
- структуру с троированием автомата, троированием МЭ на его входах и восстановлением информации в конце каждого цикла реализации алгоритма.

Будем сравнивать два показателя: вероятность возникновения отказа за время решения задачи (вероятность того, что задача не будет решена) и сложность реализации структуры (в числе логических элементов). Считается, что все отказы, возникающие в структурах в ходе решения задачи, являются восстанавливаемыми. Если на выход автомата поступают искаженные данные, то работоспособность автомата считается утраченной.

Поскольку проводимое сравнение имеет целью обоснование подхода к функциональной организации автомата, его удобнее провести на рас-

смотренном выше примере автомата (см. рис. 2), для которого получены точные оценки.

Структура 1: *автомат без структурного резервирования* (см. рис. 1, 2).

Оценка сложности реализации:

$$C_{a1} = C_{\Pi} + C_{КК1} + C_{КК2} = 30 + 54 + 4 = 88 \text{ л. э.}$$

Частоту отказа структуры $q_{м.о.а}$ выразим через частоту попадания заряженных частиц в транзистор $q_{п.ч.т}$:

$$q_{м.о.а} = q_{м.о.П} + q_{м.о.КК1} = 16,53q_{п.ч.т}.$$

Резервирование в структуре отсутствует, поэтому возникновение мягкого отказа сразу приводит к потере работоспособности.

Полагая, что моменты возникновения отказов подчиняются экспоненциальному закону распределения случайной величины, оценим вероятность $P_{о.а1}$ отказа структуры автомата 1 за время решения задачи T_3 :

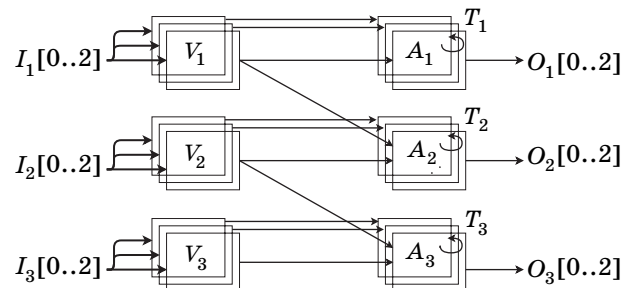
$$P_{о.а1} = 1 - e^{-16,53q_{п.ч.т}T_3}.$$

Вероятность безотказной работы автомата в течение времени решения задачи T_3 вычисляется по формуле

$$\bar{P}_{о.а1} = 1 - P_{о.а1} = e^{-16,53q_{п.ч.т}T_3}.$$

Структура 2: *автомат с троированными блоками и троированными входными МЭ без периодического восстановления информации* (рис. 9).

Данная структура подробно рассматривается в работе [2]. Каждый автомат (сложности C_{a1}) в ней троирован и по сравнению с базовой структурой дополнительно содержит троированные МЭ (сложности $C_{МЭ}$) для каждого бита входных данных автомата. В рассматриваемом примере разрядность входного сигнала $m = 4$, поэтому об-



■ Рис. 9. Структура 2: I_1, I_2, I_3 — входные данные; V_1, V_2, V_3 — группы троированных МЭ; A_1, A_2, A_3 — группы троированных блоков типа «конечный автомат с памятью» с периодическим восстановлением (каждая тройка блоков имеет свой собственный период восстановления T_1, T_2, T_3); O_1, O_2, O_3 — выходы троированных блоков

щая сложность реализации структуры 2 определяется выражением

$$C_{a2} = 3C_{MЭ} \times m + 3C_{a1} = 3 \times 6 \times 4 + 3 \times 88 = 72 + 264 = 336 \text{ л. э.}$$

Рассматривая сложность реализации данной структуры, наряду с ростом количества логических элементов по сравнению со структурой 1, необходимо также отметить трехкратное увеличение количества связей между элементами.

При оценке работоспособности требуется учитывать влияние МЭ: так как они подключаются непосредственно ко входам КС1, оно эквивалентно усложнению КС1. Поэтому вклад МЭ в надежность по аналогии с КС1 умножается на рассчитанный в (5) коэффициент 0,15, отражающий вероятность возникновения сбоя в момент перепада синхроимпульса памяти.

Частота возникновения отказов в экземпляре автомата с подключенным МЭ определяется выражением

$$q_{o.э.a2} = q_{m.o.п} + q_{m.o.кc1} + q_{MЭ} = 16,98q_{п.ч.т}$$

где оценка влияния МЭ $q_{MЭ} = 2,5q_{п.ч.т}$ была получена тем же способом, что и $P_{л.с.кc1,1}$ в (3).

Исходя из предположения об экспоненциальном законе распределения случайных событий, представим вероятностную функцию возникновения отказа в экземпляре автомата:

$$P_{o.э.a2} = 1 - e^{-q_{o.э.a2}T_3}$$

Вероятность отказа данной структуры равна вероятности возникновения отказов в двух экземплярах автомата из трех в течение времени решения задачи. Пусть A_n — событие отсутствия отказа в экземпляре n ($n \in 1..3$) автомата в течение времени T_3 , \bar{A}_n — событие возникновения отказа в течение времени T_3 . Тогда к отказу приведут следующие комбинации несовместных в совокупности событий: $A_1A_2A_3$, $A_1A_2\bar{A}_3$, $A_1\bar{A}_2A_3$.

Поскольку все экземпляры автомата идентичны, вероятности возникновения событий A_n и \bar{A}_n для любого n

$$P(A_n) = P_{o.э.a2}; P(\bar{A}_n) = 1 - P_{o.э.a2}.$$

По формуле сложения вероятностей несовместных событий вычисляем вероятность возникновения отказа в троированном автомате в течение времени выполнения задачи:

$$P_{o.a2} = 3P_{o.э.a2}^2(1 - P_{o.э.a2}) + P_{o.э.a2}^3 = P_{o.э.a2}^2(3 - 2P_{o.э.a2}) = (1 - e^{-16,98q_{п.ч.т}T_3})^2(1 + 2e^{-16,98q_{п.ч.т}T_3}).$$

Вероятность безотказной работы автомата в течение времени выполнения задачи определяется выражением

$$\bar{P}_{o.a2} = 1 - P_{o.a2} = 1 - (1 - e^{-16,98q_{п.ч.т}T_3})^2(1 + 2e^{-16,98q_{п.ч.т}T_3}).$$

Структура 3: автомат с троированными блоками и троированными входными МЭ и периодическим восстановлением информации.

В отличие от рассмотренной выше структуры 2, данная структура содержит механизм периодического восстановления информации: в конце каждого цикла реализации автомата в алгоритме предусмотрено формирование сигнала сброса R , принудительно переводящего все три экземпляра автомата в начальное состояние.

Мягкий отказ в одном из экземпляров меняет его состояние на одном из шагов реализации алгоритма. Дальнейшая траектория изменений состояния этого автомата отличается от автоматов без сбоя, поэтому он в момент окончания реализации алгоритма (решения задачи) находится в другом состоянии. Его необходимо переключить в начальное состояние. Для этого необходимо в последнем такте реализации алгоритма дополнительно формировать сигнал R . Схемотехнически это реализуется просто. Сброс устраняет рассинхронизацию работы экземпляров троированной структуры.

С точки зрения структурной сложности данная реализация не отличается от предыдущей:

$$C_{a3} = C_{a2} = 336 \text{ л. э.}$$

Оценка вероятности отказа также производится по аналогии с предыдущей структурой с учетом единственного отличия: к отказу системы приводит одновременный отказ двух экземпляров автомата не в течение времени решения задачи T_3 , а в течение цикла работы автомата $T_{ц}$ (цикла реализации алгоритма). Таким образом, если задача включает в себя несколько циклов (или работа блока состоит в непрерывной циклической реализации алгоритма), устойчивость к мягким отказам возрастает:

$$P_{o.a3} = (1 - e^{-19,53q_{п.ч.т}T_{ц}})^2(1 + 2e^{-19,53q_{п.ч.т}T_{ц}}).$$

Поскольку в начале каждого цикла происходит восстановление состояния системы, то вероятность $\bar{P}_{o.a3}(n)$ безотказной работы автомата при последовательном выполнении n циклов может быть оценена как произведение вероятностей безотказной работы в течение каждого цикла:

$$\bar{P}_{o.a3}(n) = (1 - P_{o.a3})^n = (1 - (1 - e^{-19,53q_{п.ч.т}T_{ц}})^2(1 + 2e^{-19,53q_{п.ч.т}T_{ц}}))^n.$$

Оценка результатов сравнения

Расчитанные выше характеристики сложности реализации анализируемых структур перечислены в табл. 1.

Для сравнения показателей надежности приведем графики безотказной работы каждой структуры (рис. 10) при следующих входных параметрах:

- интенсивность попадания заряженных частиц в один транзистор $q_{п.ч.т} = 0,0005$;
- общее время, необходимое для полного решения задачи, $T_3 = 100$;
- время реализации одного рабочего цикла автомата $T_{ц} = 10$;
- время одного такта работы автомата $T_c = 1$.

Оценка производится на интервале времени T_3 , необходимом для решения автоматом его основной вычислительной задачи.

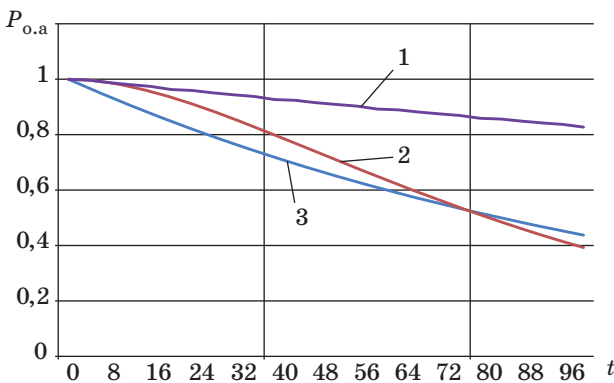
Ось X обозначает текущее время t решения задачи. По оси Y расположена вероятность нахождения автомата в работоспособном состоянии (1 — гарантированно работоспособен, 0 — гарантированно неработоспособен).

Итоговая вероятность нахождения автомата в работоспособном состоянии (значение при $t = 100$) на момент окончания решения задачи приведена в табл. 2.

Сравнение функций работоспособности структур 1 и 2 (см. рис. 10) позволяет сделать вывод о влиянии резервирования в условиях возникнове-

■ Таблица 1

Структура	Сложность реализации, л. э.	Избыточность связей между блоками
Структура 1	88	Нет
Структура 2	336	Да
Структура 3	336	Да



■ Рис. 10. Функции работоспособности анализируемых структур 1–3

■ Таблица 2

Структура	Вероятность успешного решения задачи
Структура 1	0,44
Структура 2	0,39
Структура 3	0,84

ния только восстанавливаемых отказов: надежность при применении резервирования без самовосстановления повышается только на начальном участке кривой (при малом времени решения задачи). Если время, необходимое для решения задачи, значительное, то структура 2 (начиная с момента времени 80,0) уступает нерезервированной структуре 1, так как увеличение числа элементов повышает вероятность попадания заряженной частицы (возникновения отказа).

Структура 3 из-за периодического восстановления значительно превосходит структуру 2 с точки зрения надежности, если общая задача состоит из большого числа циклов. При текущих условиях длительность цикла была в 10 раз меньше общего времени задачи, что привело к возрастанию вероятности успешного решения с 39 до 84 %.

Заключение

В ходе исследований произведена оценка влияния потока мягких отказов (к примеру, вызванных радиацией) на работу конечного автомата.

Установлено, что элементы комбинационных схем в значительно меньшей степени по сравнению с элементами памяти влияют на надежность автомата с точки зрения устойчивости к мягким отказам. Это объясняется тем, что ложный импульс, наведенный заряженной частицей, при попадании в комбинационную схему имеет малую длительность (доли наносекунд) и изменяет состояние автомата только в том случае, если его появление совпадает с перепадом синхроимпульса, тактирующего элементы памяти, к которым подключена комбинационная схема.

На основе полученных результатов проанализирована целесообразность применения известных методов повышения надежности конечного автомата, таких как использование структурного резервирования и периодического самовосстановления. Произведенная оценка структурной сложности и надежности различных отказоустойчивых структур показала, что наибольшую защиту от мягких отказов по сравнению с методами структурного резервирования обеспечивают механизмы периодического самовосстановления (чем чаще производится восстановление, тем больше эффективность его использования).

Полученные в ходе работы оценки были рассчитаны для конкретной реализации автомата Мура средней сложности с использованием асимптотических оценок сложности, результаты обобщены для любых автоматов с памятью. Результаты работы имеют большое практическое применение, так как позволяют синтезировать лучшую структуру с точки зрения сложности и надежности на этапе проектирования. В то же время выбор конкретной структуры зависит от условий функционирования синтезируемой системы. Если наряду с мягкими отказами в системе существует вероятность возникновения невосстанавливаемых отказов, совместно с предложенными механизмами самовосстановления целесообразно использовать традиционные методы структурного резервирования.

Полученные результаты позволяют сформулировать требования к расширению функций и поиску новых схемотехнических решений, эффективных при потоке мягких отказов:

- 1) блокирование распространения мягкого отказа в памяти автомата;
- 2) повышение эффективности средств для уменьшения влияния ложных сигналов на выходе комбинационной схемы, управляющей переходами памяти;
- 3) периодическое восстановление состояния отказавшего экземпляра памяти;
- 4) выявление, регистрация и подсчет числа мягких отказов в автомате.

Реализация вышеперечисленных функций является темой отдельного исследования.

Литература

1. Егоров И. В., Мелехин В. Ф. Анализ проблемы повышения радиационной стойкости информационно-управляющих систем на этапе функционально-логического проектирования // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1. С. 26–31. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.26
2. Егоров И. В., Мелехин В. Ф. Методы и средства анализа надежности структурных блоков с резервированием и периодическим восстановлением информации на различных этапах проектирования вычислительных систем // Информационно-управляющие системы. 2016. № 2. С. 26–34. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.19
3. Егоров И. В., Мелехин В. Ф. Анализ процессов в конечном автомате при воздействии радиации. Оценка вероятности искажения информации // Информационно-управляющие системы. 2016. № 3. С. 24–33. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.24
4. Kaeslin H. Digital Integrated Circuit Design. From VLSI Architectures to CMOS Fabrication. — Cambridge University Press, 2008. <http://www.roletech.net/books/DigitalIntegratedCircuit.pdf> (дата обращения: 10.04.2016).
5. Savage J. E. Models of Computation: Exploring the Power of Computing. — Addison Wesley, 1998. — 672 p.
6. Мурог С. Системное проектирование сверхбольших интегральных схем. Кн. 1. — М.: Мир, 1985. — 288 с.
7. Колосов В. Г., Мелехин В. Ф. Проектирование узлов и систем автоматики и вычислительной техники. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 256 с.
8. Eaton P., Benedetto J., Mavis D., Avery K., Sibley M., Gadlage M., Turflinger T. Single Event Transient Pulsewidth Measurements Using a Variable Temporal Latch Technique // IEEE Transactions on Nuclear Science. Dec. 2004. Vol. 51. N 6. P. 3365–3368.
9. Rollins N., Wirthlin M., Caffrey M., Graham P. Evaluating TMR Techniques in the Presence of Single Event Upsets // Proc. of the 6th Annual Intern. Conf. on Military and Aerospace Programmable Logic Devices (MAPLD), Washington, D.C. September 2003. <http://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2047&context=facpub> (дата обращения: 05.08.2016).
10. She Xiaoxuan, Samudrala P. K. Selective Triple Modular Redundancy for Single Event Upset (SEU) Mitigation // Adaptive Hardware and Systems: NASA/ESA Conf. 2009. P. 344–350.

UDC 681.3

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.34

Analysis of Reliability and Structural Complexity for Various Implementations of a Finite State Machine Resistant to Soft Failures

Egorov I. V.^a, Post-Graduate Student, iegorov@kspt.icc.spbstu.ru

Melekhin V. F.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, melekhin@kspt.ftk.spbstu.ru

^aPeter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikheskaia St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Up-to-date design rules used in computer engineering make hardware unreliable when working under radiation. A hit of a charged particle causes a “soft failure” — a situation when hardware elements remain in usable condition but the information transmitted or stored in the memory is corrupted. We need to develop new circuitry solutions which would increase the resistance of

hardware (especially finite states machines) to soft failures. **Purpose:** The estimation of reliability characteristics for various redundant structures of a Moore automaton in case of a flow of soft failures. **Results:** The comparison between the known Moore automaton prototypes has shown that redundant internal memory and self-recovery of corrupted data in the memory allow us to significantly increase the duration of trouble-free functioning, without making the implementation more sophisticated as compared to non-recoverable structures. In case of a soft failure, a memory bit remains functional, and the valid state of the system can be restored by overwriting the corrupted bit with a valid one when the recovery is over. An unrecoverable failure can occur only if several instances of redundant units of the memory are corrupted simultaneously during a single recovery period. If we manage to ensure a sufficiently small recovery period in the system, it will dramatically prolong its non-failure operating time. **Practical relevance:** The obtained results allow you to determine the ways of developing fault-tolerant finite state machines resistant to soft failures: blocking the propagation of a soft failure in the memory, periodic self-recovery of corrupted bits, and introducing additional hardware to detect and register failures.

Keywords — Finite State Machine, Combinational Circuit, Reliability Analysis, Hardware Complexity Estimation, Synchronization, Soft Failures, Structural Redundancy, Recoverable System, Reliability Function.

References

1. Egorov I. V., Melekhin V. F. Analysis of Radiation Resistance Improvement Issue for Information and Control Systems at the Stage of Functional and Logical Design. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 1, pp. 26–31 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.26
2. Egorov I. V., Melekhin V. F. Methods and Tools for Structural Block Reliability Analysis with Reservation and Periodic Information Recovery at Various Stages of Computing System Design. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 2, pp. 26–34 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.19
3. Egorov I. V., Melekhin V. F. Analysis of Processes in a Finite State Machine under Radiation. Probabilistic Assessment of Information Distortion. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 3, pp. 24–33 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.24
4. Kaeslin H. *Digital Integrated Circuit Design. From VLSI Architectures to CMOS Fabrication*. Cambridge University Press, 2008. Available at: <http://www.roletech.net/books/DigitalIntegratedCircuit.pdf> (accessed 10 April 2016).
5. Savage J. E. *Models of Computation: Exploring the Power of Computing*. Addison Wesley, 1998. 672 p.
6. Muroga S. *Sistemnoe proektirovanie sverkhbol'shikh integral'nykh skhem* [System Design of Very-large-scale Integrated Circuits]. Moscow, Mir Publ., 1985. Vol. 1. 288 p. (In Russian).
7. Kolosov V. G., Melekhin V. F. *Proektirovanie uzlov i sistem avtomatiki i vychislitel'noi tekhniki* [Design of Units and Systems of Automatic Equipment and Computer Technology] Saint-Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1983. 256 p. (In Russian).
8. Eaton P., Benedetto J., Mavis D., Avery K., Sibley M., Gadlage M., Turflinger T. Single Event Transient Pulsewidth Measurements using a Variable Temporal Latch Technique. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Dec. 2004, vol. 51, no. 6, pp. 3365–3368.
9. Rollins N., Wirthlin M., Caffrey M., Graham P. Evaluating TMR Techniques in the Presence of Single Event Upset. *Proc. of the 6th Annual Intern. Conf. on Military and Aerospace Programmable Logic Devices (MAPLD)*, Washington, D.C., September 2003. Available at: <http://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2047&context=facpub> (accessed 05 August 2016).
10. She Xiaoxuan, Samudrala P. K. Selective Triple Modular Redundancy for Single Event Upset (SEU) Mitigation. *Adaptive Hardware and Systems, NASA/ESA Conf.*, 2009, pp. 344–350.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющихся в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ ГРУППЫ АНПА В СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

Л. А. Мартынова^а, доктор техн. наук, старший научный сотрудник

М. Б. Розенгауз^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

^аАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: актуальная в настоящее время сетевая система освещения подводной обстановки включает в себя группу автономных необитаемых подводных аппаратов, обеспечивающих освещение подводной обстановки и мониторинг морской среды, и стационарные станции дозаправки, принимающие данные от аппарата и пополняющие его энергоресурс. При проектировании сетевая система возникает задача принятия решения относительно дозаправки автономных необитаемых подводных аппаратов так, чтобы, с одной стороны, ресурса оказалось достаточно для перехода до следующей станции дозаправки, а с другой стороны, общее время осмотра района не превысило заданное. **Цель исследований:** разработка метода принятия решения относительно дозаправки автономных необитаемых подводных аппаратов, обеспечивающего эффективное функционирование группы автономных необитаемых подводных аппаратов в сетевая система освещения подводной обстановки. **Результаты:** предложен новый метод принятия решения, основанный на использовании дополнительного фактора — энергоресурса, необходимого для преодоления расстояния между ближайшей и последующей станциями дозаправки. Проведено математическое моделирование и с его помощью численные эксперименты, направленные на определение количественных показателей использования традиционных критериев принятия решения и предложенного метода. Полученные методом статистических испытаний результаты показали преимущество использования предложенного в работе метода принятия решения относительно дозаправки автономных необитаемых подводных аппаратов. **Практическая значимость:** при проектировании сетевая система освещения подводной обстановки оценка возможностей автономных необитаемых подводных аппаратов и станций дозаправки позволяет решать задачи топологии их размещения, ресурсоемкости, временных характеристик.

Ключевые слова — автономный необитаемый подводный аппарат, математическое моделирование, метод принятия решения, станция дозаправки, сетевая система.

Введение

В настоящее время перспективным направлением развития системы безопасности обширных акваторий является создание сетевая система защиты [1]. В силу сложных геофизических условий создание сетевая система связано с преимущественным использованием подводных роботов [2, 3]. Например, основным приоритетом ВМС США является развертывание в арктических морях мультиагентной системы сбора разведывательной и обеспечивающей ее (метеорологической, гидрологической, океанографической, геологической) информации [4, 5]. Элементами мультиагентной системы являются, в том числе, автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) и донные станции дозаправки и приема от АНПА информации [6].

Несколько АНПА, объединенных в группу, предназначены для освещения подводной обстановки по результатам методического осмотра при обходе района по заданному маршруту. Во время осмотра собирается информация об обнаруженных объектах и состоянии морской среды. Эта информация периодически передается потребителю через станции, предназначенные для сбора

информации и дозаправки АНПА для пополнения его энергоресурса.

Очевидно, что построение столь сложной сетевая система связано, прежде всего, с решением вопросов эффективности ее функционирования как в целом, так и отдельных составных частей, в частности — группы АНПА.

На эффективность функционирования группы АНПА влияние оказывают как техническое состояние АНПА, так и выполнение группой АНПА предписанных функций.

В настоящей работе эффективность технических средств будем считать достаточной для решения поставленных задач и будем рассматривать вопросы выполнения группой АНПА предписанной ей функции — осмотра заданного района в течение заданного промежутка времени.

Ограничение на время осмотра предъявляет, в свою очередь, определенные требования:

— постоянно иметь своевременно запрошенные АНПА, в противном случае выход из строя АНПА увеличивает нагрузку на другие АНПА, что приводит к снижению эффективности функционирования группы АНПА;

— время отвлечения на дозаправку должно быть минимизировано, поскольку отвлечение

связано с прохождением пути до станции дозаправки, затратами времени собственно на дозаправку, прохождением пути обратно на маршрут. Кроме того, дозаправка влечет за собой также дополнительный расход энергоресурса на преодоление пути до станции дозаправки и обратно.

Слишком частое выполнение дозаправок приводит к частому отвлечению с маршрутной траектории и увеличению времени, затрачиваемому на осмотр района в целом, что снижает эффективность функционирования группы АНПА. Редкое отвлечение на дозаправки может привести к преждевременному израсходованию энергоресурса до того, как АНПА успеет дозаправиться. В свою очередь, это приведет к невозможности дальнейшего использования АНПА и, следовательно, к увеличению времени осмотра заданной акватории, так как осмотр района будет осуществляться меньшим количеством АНПА. Поэтому задача выбора момента дозаправки является актуальной.

Имеется район, в котором развернута сетевая система, и элемент этой системы — группа АНПА, которая осматривает район в целях получения информации о состоянии морской среды и освещения подводной обстановки. Предполагается, что АНПА двигаются по определенному маршруту, проходящему по специально выделенным «коридорам» (по аналогии с авиацией). Периодически каждому АНПА группы требуется восполнять запасы энергоресурса. Необходимо определить правило, по которому АНПА примет решение о пополнении запасов энергоресурса на ближайшей станции дозаправки так, чтобы группа АНПА функционировала эффективно. Применительно к группе АНПА эффективное функционирование означает, что свою работоспособность должно сохранять по крайней мере то количество АНПА из группы, которое обеспечивает осмотр района в отведенное время. В обеспечение эффективного функционирования следует своевременно принять решение о необходимости отклонения от маршрутной траектории для дозаправки. Прогнозировать заранее принятие решения невозможно, поскольку с течением времени происходит изменение как внешних, так и внутренних условий функционирования АНПА. Изменение условий оказывает прямое влияние на удельный расход энергоресурса, зависящий от направления внутренних течений в морской среде, изменения параметров среды — плотности, температуры, вязкости, солености и т. д.

Целью работы явилась разработка метода определения необходимости дозаправки АНПА в процессе осмотра заданного района, применение которого направлено на повышение эффективности функционирования группы АНПА

в сетевидной системе защиты морских акваторий.

Показатель эффективности

Эффективность АНПА — это степень достижения поставленной перед АНПА цели. Целью является осмотр района в течение заданного времени.

В качестве показателя эффективности функционирования группы АНПА в работе принята вероятность выполнения миссии группой АНПА. Выполнение миссии заключается в осмотре района в заданное время.

Предполагается, что невыполнение миссии может быть вызвано двумя причинами:

— полным исчерпанием энергоресурса из-за невозможности дозаправки АНПА; в этом случае нагрузка по решению поставленной в районе задачи ложится на оставшиеся АНПА из группы, вследствие чего время осмотра заданной территории увеличивается;

— слишком частыми дозаправками, что приводит к увеличению времени осмотра района и повышенному расходу электроэнергии АНПА.

Поэтому задача заключается в том, чтобы, с одной стороны, минимизировать время на дозаправку АНПА, а с другой, чтобы текущего заряда батареи хватило АНПА для перемещения до следующей станции дозаправки.

Вероятность эффективного функционирования $P_{эф}$ группы АНПА определяется отношением заданного на осмотр района времени $t_{здн}$ к времени $t_{осм}$, затраченному на полный осмотр заданного района:

$$P_{эф} = t_{здн}/t_{осм} \text{ при } t_{здн} < t_{осм};$$

$$P_{эф} = 1 \text{ при } t_{здн} \geq t_{осм}.$$

Рассмотрим влияние указанных причин на эффективность.

1. Увеличение времени осмотра заданной акватории за счет того, что часть АНПА вышла из строя и их «обязанности» перераспределяются между оставшимися АНПА, определяется следующим образом.

Пусть количество АНПА, осматривающих заданный район, — N , заданное время осмотра района — $t_{здн}$. У каждого АНПА условно имеется свой участок (зона ответственности), на осмотр которого он затрачивал время $t_{осм}$.

Если один из АНПА группы вышел из строя по причине израсходования электроэнергии, то количество АНПА становится равным $N - 1$. Предполагая, что производительность АНПА осталась прежней, время осмотра в этом случае будем определять выражением

$$t'_{осм} = t_{осм} + 1/(N - 1)t_{осм}.$$

Если из строя вышли I АНПА ($I < N$), то выражение увеличения времени выполнения задачи осмотра будет иметь вид

$$t'_{\text{осм}} = t_{\text{осм}} + 1/(N - I)t_{\text{осм}}.$$

Отсюда следует, что для минимизации времени осмотра необходимо стремиться к снижению I .

2. Увеличение времени осмотра за счет отвлечений АНПА на дополнительную дозаправку оказывает влияние следующим образом.

Время осмотра $t_{\text{осм}}$ определяется временем движения по маршруту $t_{\text{марш}}$ и временем, затрачиваемым на отвлечение на дозаправку на станциях дозаправки $t_{\text{запр}}$:

$$t_{\text{осм}} = t_{\text{марш}} + t_{\text{запр}}. \quad (1)$$

Время движения по маршруту $t_{\text{марш}}$ не зависит от отвлечений, поскольку в любом случае маршрут должен быть полностью пройден. Время, затрачиваемое на отвлечение на дозаправку, определяется количеством отвлечений $M_{\text{ст}}$ и временем, затрачиваемым на отдельно взятое отвлечение $t_{\text{ст}}$:

$$t_{\text{запр}} = M_{\text{ст}}t_{\text{ст}}.$$

Время, затрачиваемое на отвлечение на дозаправку, определяется временем на преодоление расстояния до станции дозаправки $t_{\text{д/ст}}$, временем, затрачиваемым непосредственно на дозаправку $t_{\text{запр}}$, временем движения от станции дозаправки до выхода на маршрут $t_{\text{п/ст}}$:

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{д/ст}} + t_{\text{п/ст}} + t_{\text{запр}}.$$

Здесь время $t_{\text{д/ст}}$, $t_{\text{п/ст}}$, $t_{\text{запр}}$ будем считать постоянными величинами, поэтому влияние на время отвлечения на дозаправку оказывает число отклонений $M_{\text{ст}}$: чем меньше $M_{\text{ст}}$, тем система функционирования группы АНПА эффективнее.

Принятые решения относительно дозаправки зависят от критерия, по которому принимается решение на отклонение на дозаправку. Поэтому на следующем этапе исследований определим критерий, по которому АНПА принимает решение по уходу с маршрута на дозаправку.

Варианты выбора критерия принятия решения

В качестве критерия, по которому принимается решение на отклонение на дозаправку, предлагается использовать критическое значение энергозапаса АНПА $q_{\text{кр}}$. Вопрос заключается в том, каким выбрать $q_{\text{кр}}$. Можно выбрать, ориентируясь на достаточность ресурса для преодоления самого длинного участка между заправками,

чтобы в том случае, если решение придется принимать в начале самого длинного участка (именно в этот момент может сложиться так, что остаточный уровень заряда достигнет критического), то ресурса должно хватить на весь этот длинный участок.

Но вероятность такого события очень мала, более вероятно событие, при котором либо участок не самый длинный, либо даже если длинный, то АНПА должен принимать решение, находясь не в самом его начале, а посередине или в конце. Поэтому целесообразно сначала рассмотреть классические подходы к принятию решения относительно выбора $q_{\text{кр}}$.

Пусть в текущий момент времени остаток энергоресурса АНПА составляет $q(t)$. Пусть расстояние $M_{\text{ст}}$ между станциями заправки равно L_1, \dots, L_m . При принятии решения происходит сравнение остатка $q(t)$ с критическим значением $q_{\text{кр}}$, и в зависимости от результатов сравнения принимается решение о необходимости отворота на дозаправку.

Для определения критического значения уровня энергоресурса можно использовать различные подходы к принятию решения, основными из которых в условиях неопределенности являются [7]:

- критерий Вальда (критерий «максимина», пессимизма);
- критерий «максимакса» (оптимизма);
- критерий Гурвица (критерий «оптимизма-пессимизма», или «альфа-критерий»).

Критерий Вальда предполагает, что из всех возможных вариантов решения выбирается та альтернатива, которая из всех самых неблагоприятных ситуаций развития события имеет наибольшее из минимальных значений. Наиболее неблагоприятной является альтернатива, при которой АНПА оказывается на самом протяженном участке между станциями заправки, т. е. путь, который необходимо преодолеть до отворота на станцию дозаправки, составляет $L_{\text{АНПА}} = \max \{L_1, \dots, L_m\}$.

Поэтому $q_{\text{кр}} = t_{\text{кр}}/q_e$, где $t_{\text{кр}}$ — время, затрачиваемое АНПА на преодоление участка протяженностью $L_{\text{АНПА}}$; q_e — удельный расход электроэнергии АНПА.

Из соображений кинематики время $t_{\text{кр}}$ определяется выражением $t_{\text{кр}} = L_{\text{АНПА}}/V_{\text{АНПА}}$, где $V_{\text{АНПА}}$ — скорость АНПА.

При использовании критерия Вальда АНПА будет каждый раз принимать решение относительно необходимости подзарядки, аккумуляторная батарея (АБ) АНПА всегда будет достаточно заряжена, однако при этом АНПА придется заходить на каждую станцию дозаправки и тем самым увеличивать время осмотра заданного района.

При этом эффективность P_{\min} будет минимальна, поскольку много времени будет затрачено на отвлечение на дозаправки. «Макс» в названии критерия означает, что используем положение АНПА в начале выбранного участка, т. е. предполагаем проход максимального расстояния.

Критерий «максимакса» предполагает, что из всех возможных вариантов решений выбирается то, при котором из всех самых благоприятных ситуаций развития событий имеется наибольшее из максимальных значений. Благоприятной является ситуация, когда АНПА находится в текущий момент времени на самом коротком участке между станциями дозаправки: $L_{\text{АНПА}} = \min \{L_1, \dots, L_m\}$. Поэтому рассчитывается так же, как и в критерии Вальда.

Эффективность функционирования группы при этом максимальная (P_{\max}), так как отвлечений на дозаправки будет гораздо меньше, и время осмотра окажется в пределах заданного.

Критерий Гурвица позволяет руководствоваться при выборе решения в условиях неопределенности некоторым средним результатом эффективности, находящимся в промежутке между значениями по критериям «максимакса» и «максимина». Оптимальная альтернатива решения по критерию Гурвица определяется на основе формулы

$$A = \alpha P_{\max} + (1 - \alpha) P_{\min},$$

где A — средневзвешенная эффективность по критерию Гурвица для конкретной альтернативы; α — альфа-коэффициент, принимаемый с учетом рискованного предпочтения в поле от 0 до 1 (значения, приближающиеся к нулю, характерны для субъекта, не склонного к риску; значение, равное 0,5, характерно для субъекта, нейтрального к риску; значения, приближающиеся к единице, характерны для субъекта, склонного к риску; в рассматриваемой задаче риск заключается в использовании пониженного значения критического уровня заряда; P_{\max} и P_{\min} — максимальное и минимальное значения эффективности АНПА по конкретной альтернативе.

Сказанное означает, что при формировании критерия используется не самый короткий и не самый протяженный участки, а промежуточный. Выбор значения параметра α определяется конкретным соотношением между параметрами движения АНПА, объемом заряда и расстояниями между станциями заправок.

Недостатком перечисленных критериев является неопределенность участка, на котором находится АНПА в текущий момент времени, из-за которой приходится принимать решение либо «с запасом», и тем самым снижать эффективность по времени осмотра, либо «с риском» того, что часть АНПА из группы не успела пополнить свой запас

энергоресурса и вышла из строя, и тем самым также снижать эффективность. Эта неопределенность усугубляется еще тем, в каком именно месте участка будет достигнуто $q_{\text{кр}}$ — в начале участка или в его конце, перед самой станцией дозаправки.

В связи с этим в работе предлагается метод, учитывающий не только критический уровень заряда, при достижении которого необходимо принять решение относительно пополнения запасов электроэнергии АНПА, а и дополнительный наряду с $q_{\text{кр}}$ параметр — расстояние L до следующей станции дозаправки.

Метод принятия решения о дозаправке

Метод заключается в следующем. В каждый момент времени происходит оценка остатка энергоресурса $q(t)$, текущего расхода $q_{\text{расх}}(t)$ и расстояния L_j между ближайшей и следующей станциями дозаправки, т. е. длины следующего участка. Далее происходит сравнение остатка заряда $q_{\text{ост}}(t)$ и критического значения $q_{\text{кр}}$. Если остатка $q_{\text{ост}}(t)$ достаточно до ближайшей станции и не достаточно до следующей, то принимается решение о дозаправке на ближайшей станции. Если же ресурса достаточно до следующей станции, то принимается решение заправиться на ней, пропустив ближайшую.

При подходе к следующей станции дозаправки вновь анализируются собственный запас и расстояние, необходимые для перехода к ближайшей станции и следующей станции. И вновь принимается решение относительно необходимости поворота на ближайшую станцию. Математически это означает следующее.

Пусть имеется информация о параметрах:

q_e — удельном расходе энергоресурса АНПА в единицу времени;

$t_1 = L_1/q_e$ — времени, необходимом для перехода до первой ближайшей станции от момента принятия решения, при первоначальном подходе именно это расстояние АНПА и необходимо пройти для прибытия на станцию дозаправки;

$t_2 = L_2/q_e$ — времени, необходимом для перехода до второй ближайшей станции от момента принятия решения;

$q_{\text{ост}}$ — остаточном значении энергоресурса АНПА;

$$L_1 < L_2.$$

Тогда в момент $q_{\text{ост}} = q_{\text{кр}}$ происходит сравнительный анализ:

$q_1 = q_{\text{расх}} t_1$ — объема электроэнергии, затрачиваемого для преодоления расстояния L_1 до ближайшей станции дозаправки;

$q_2 = q_{\text{расх}} (t_1 + t_2)$ — объема электроэнергии, затрачиваемого для преодоления расстояния L_2 до следующей ближайшей станции дозаправки.

Поскольку $L_1 < L_2$, то и $q_1 < q_2$.

Если $q_{\text{ост}} t_1 > L_1$ и $q_{\text{ост}} t_1 + q_{\text{ост}} t_2 < L_2$, то принимается решение о дозаправке на ближайшей станции. В этом случае разницы между использованием первоначального подхода и предложенного в настоящей работе метода нет.

Если $q_{\text{ост}} t_1 > L_1$ и $q_{\text{ост}} t_1 + q_{\text{ост}} t_2 > L_2$, то принимается решение о пропуске ближайшей станции и дозаправке на следующей станции.

Для определения преимущества предложенного метода проведем сравнение с вариантом выбора станции дозаправки, например по критерию Вальда (критерий пессимизма «дозаправка на ближайшей станции на всякий случай»).

Имеем $q_{\text{полн}}$ — полный запас энергоресурса АНПА, $q_{\text{кр}}$ — тот критический уровень, после которого принимается решение о дозаправке, t_{x1} — время хода АНПА до критического значения, определяемого по первоначальной схеме; t_{x2} — время хода АНПА до критического значения, определяемого по предложенному методу. Очевидно, что чем выше $q_{\text{кр}}$, тем чаще происходит дозаправка, так как промежуток времени между отвлечениями на дозаправку становится меньше.

В первом случае (дозаправка на ближайшей станции) критический уровень $q_{\text{кр}1} = q_{\text{полн}} - q_e t_{x1}$.

Во втором случае (дозаправка на ближайшей станции при условии, что до второй не дотянуть) критический уровень $q_{\text{кр}2} = q_{\text{полн}} - q_e t_{x2}$.

Тогда

$$\text{при } q_{\text{кр}1} > q_{\text{кр}2} \quad t_{x1} < t_{x2}. \quad (2)$$

Это означает, что в первом случае промежуток времени меньше, поэтому решение о дозаправке наступает чаще. Количество отвлечений на дозаправки определяется выражением

$$M_{\text{ст}1} = t_q / t_{x1}, \quad (3)$$

где t_q — время полного израсходования энергоресурса АНПА.

Соответственно, количество отвлечений на дозаправки во втором случае определяется выражением

$$M_{\text{ст}2} = t_q / t_{x2}. \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), с учетом (2) получаем

$$M_{\text{ст}1} > M_{\text{ст}2}, \quad (5)$$

что означает, что в первом случае отвлечений на дозаправки больше, следовательно, время, затрачиваемое на осмотр, больше, чем во втором случае.

Перепишем (1) в виде

$$t_{\text{осм}} = t_{\text{марш}} + M_{\text{ст}} t_{\text{ст}}.$$

Отсюда после подстановки получаем

$$t_{\text{осм}1} = t_{\text{марш}} + M_{\text{ст}1} t_{\text{ст}}; \quad t_{\text{осм}2} = t_{\text{марш}} + M_{\text{ст}2} t_{\text{ст}}.$$

С учетом (5) получаем

$$t_{\text{осм}1} > t_{\text{осм}2}.$$

Это означает, что при $t_{\text{осм}2} > t_{\text{здн}} > t_{\text{осм}1}$ первоначальный вариант принятия решения не будет удовлетворять требованиям эффективности. Вариант с использованием предложенного метода, как раз наоборот, обеспечит требуемую эффективность, так как время осмотра района находится в пределах заданного.

Для того чтобы получить количественные оценки преимущества предложенного метода перед первоначальным вариантом принятия решения относительно дозаправки, был проведен численный эксперимент для рассмотрения различных вариантов критического значения заряда АБ, и на основе показателя эффективности $P_{\text{эф}}$ определены преимущества от использования предложенного метода.

Для расчета показателя эффективности $P_{\text{эф}}$ специально была разработана математическая модель оценки эффективности функционирования системы АНПА — станции дозаправки.

Математическая модель функционирования группы АНПА с использованием станций дозаправки

Моделирование процессов

Математическая модель воспроизводит процессы:

- движения АНПА;
- принятия решения относительно отворота на ближайшую станцию дозаправки;
- разряда АБ в ходе выполнения миссии;
- заряда разряженной АБ на станции дозаправки.

Моделирование движения АНПА

Движение АНПА в общем случае моделируется как перемещение материальной точки: в i -м такте имитации вычисляются координаты АНПА по формулам

$$X_{\text{АНПА}i} = X_{\text{АНПА}i} + V_{\text{АНПА}} \Delta t \cos(Q_{\text{АНПА}});$$

$$Y_{\text{АНПА}i} = Y_{\text{АНПА}i} + V_{\text{АНПА}} \Delta t \sin(Q_{\text{АНПА}});$$

$$Z_{\text{АНПА}i} = Z_{\text{АНПА}i} + V_{\text{АНПА}} \Delta t \sin(\theta_{\text{АНПА}}),$$

где $Q_{\text{АНПА}}$ — курс АНПА; $\theta_{\text{АНПА}}$ — дифферент АНПА; Δt — длительность такта имитации.

В имитационной модели учитываются разгон/ торможение АНПА, в результате чего текущая скорость АНПА определяется выражением

$$V_{АНПАi} = V_{АНПАi-1} + a_i \Delta t,$$

где a_i — ускорение АНПА в i -м такте имитации. Моделирование принятия решения относительно отворота на ближайшую станцию дозаправки осуществлялось в соответствии с алгоритмом предложенного в настоящей работе метода.

Моделирование разряда батареи

Расчет текущего уровня заряда АБ в процессе эксплуатации происходил следующим образом. Зависимость уровня разряда АБ от времени аппроксимирована кусочно-непрерывной функцией и разбита на три участка [8–10]:

- кратковременный линейный участок;
- участок «основного» заряда — линейный;
- участок «окончательного» заряда — линейный.

Текущий уровень заряда АБ $Q_{тек}$ на момент времени $t_{тек}$ определяется выражениями

$$Q_{тек} = Q_{исх} - \frac{(t_1 - t_{тек})}{t_1 - t_{нач}} (Q_1 - Q_{исх}) \text{ при } t_{тек} < t_1;$$

$$Q_{тек} = Q_1 - \frac{(t_2 - t_{тек})}{t_2 - t_1} (Q_2 - Q_1) \text{ при } t_1 < t_{тек} < t_2;$$

$$Q_{тек} = Q_2 - \frac{(t_3 - t_2)}{t_3 - t_2} (Q_3 - Q_2) \text{ при } t_2 < t_{тек} < t_3,$$

где $Q_{исх}$ — первоначальный заряд АБ на момент старта АНПА; $t_{тек}$ — текущий момент времени;

$t_{нач}$ — начальный момент времени (старт АНПА); t_1 — момент времени окончания первого участка; t_2 — момент времени окончания второго участка; t_3 — момент времени окончания третьего участка, соответствующий моменту полного разряда АБ; Q_1, Q_2, Q_3 — уровни заряда на указанные моменты времени, задаются в процентах от номинального значения полностью заряженной АБ.

Расход энергии АБ в текущем i -м такте имитации определяется выражением

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^{N_y} q_i \Delta t,$$

где N_y — количество устройств, потребляющих в текущем такте имитации энергию АБ; q_i — потребляемый ресурс каждого из устройств в текущем такте имитации.

Оставшийся энергоресурс $Q_{ост}$ АБ АНПА в каждом такте имитации определяется выражением

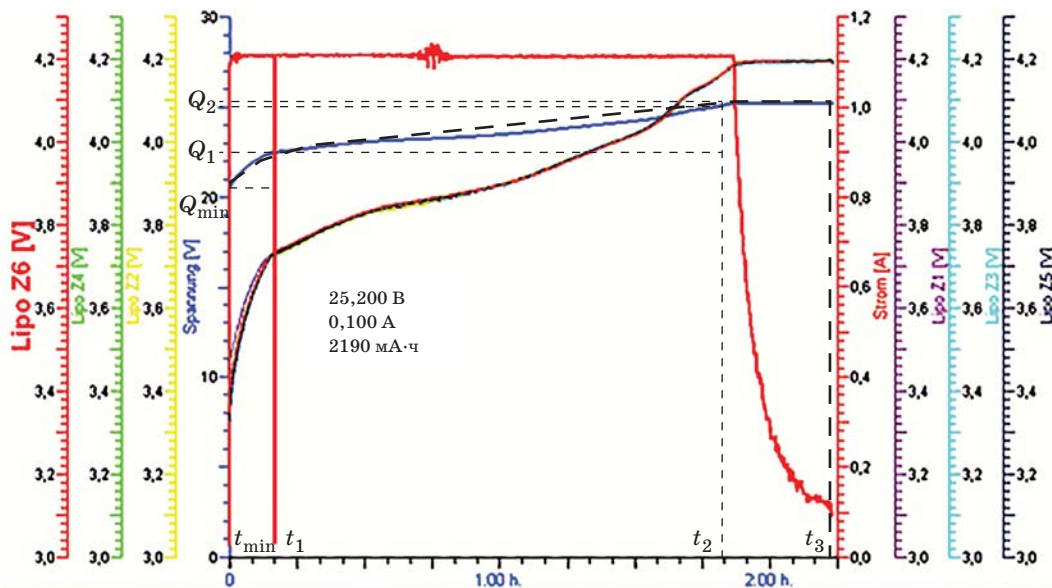
$$Q_{ост} = Q_{исх} - \int_{t_{нач}}^{t_{тек}} \Delta Q dt = Q_{исх} - \int_{t_{нач}}^{t_{тек}} \sum_{i=1}^{N_y} q_i dt.$$

Моделирование процесса заряда батареи

Расчет уровня заряда АБ $Q_{зар}$ определяется функционалом

$$Q_{зар} = f(Q_{min}, M_{зар}, \Delta t_M, T, U, I_{зар}, t_{зар}),$$

где Q_{min} — уровень заряда к моменту начала процесса заряда АБ; $M_{зар}$ — количество циклов до последнего заряда; Δt_M — промежуток времени от последнего заряда; T — температура окру-



■ Рис. 1. Аппроксимация линии изменения уровня заряда с течением времени (пунктирная линия черного цвета)

жающей среды, при которой осуществлялся заряд АБ перед началом выполнения миссии; U — максимальное напряжение при заряде; $I_{зар}$ — ток заряда; $t_{зар}$ — время заряда.

В зависимости от текущего времени определялся текущий уровень заряда. При расчете текущего уровня процесс заряда АБ условно был разделен на три участка:

- кратковременный линейный участок;
- участок «основного» заряда — линейный;
- участок «окончательного» заряда — линейный (рис. 1).

Текущий уровень $Q_{тек}$ заряда АБ определялся выражениями

$$Q_{зар} = Q_{min} + \frac{(t_1 - t_{тек})}{t_1 - t_{min}}(Q_1 - Q_{min}) \text{ при } t_{тек} < t_1;$$

$$Q_{зар} = Q_1 + \frac{(t_2 - t_{тек})}{t_2 - t_1}(Q_2 - Q_1) \text{ при } t_1 < t_{тек} < t_2;$$

$$Q_{зар} = Q_2 + \frac{(t_3 - t_2)}{t_3 - t_2}(Q_3 - Q_2) \text{ при } t_2 < t_{тек} < t_3.$$

Определение показателя эффективности

Расчет вероятности выполнения миссии происходил с использованием метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) [11, 12], применяемого авторами ранее при проведении подобных исследований [13–17].

Проводилась серия из $N_{исп}$ испытаний. В каждом испытании оценивалась эффективность функционирования группы АНПА. Для этого задавалось время, в течение которого группа АНПА должна осмотреть заданный район. Далее в процессе моделирования осмотра района группой АНПА определялся текущий запас энергоресурса каждого АНПА и проводился анализ его достаточности для выполнения осмотра. Если принималось решение о необходимости отворота к станции дозаправки для пополнения энергоресурса, моделировался сход АНПА с маршрутной траектории и его движение к станции дозаправки, дозаправка АНПА и движение АНПА от станции дозаправки на маршрутную траекторию. Если решение о дозаправке не принималось, АНПА продолжал движение по маршрутной траектории без отворота к станции дозаправки.

Задавался маршрут движения АНПА так, чтобы в ходе осмотра заданного района каждый АНПА двигался по замкнутой траектории и по окончании испытания оказывался в точке своего старта. В зависимости от запаса энергоресурса при моделировании могло оказаться, что энергоресурс АНПА полностью израсходован. В этом случае принималось, что этот АНПА перестает функционировать. Остальные АНПА группы продолжали

осмотр заданного района. Невозможность функционирования группы АНПА регистрировалась тогда, когда все АНПА группы полностью расходовали свой запас энергоресурса.

Если из всех четырех АНПА по крайней мере один продолжал функционировать, то регистрировалось время, равное времени испытания, и считалось, что остановки АНПА не произошло. Далее по серии испытаний определялось, в скольких испытаниях к i -му моменту миссия не была выполнена.

По результатам численного моделирования и проведения серии испытаний строилась зависимость вероятности выполнения миссии от времени. Вероятность выполнения миссии определялась как отношение количества испытаний, в которых не был зафиксирован полный расход энергоресурса, к i -му моменту времени, к общему количеству испытаний.

Количество испытаний, в которых не произошло полного расхода энергоресурса системы, рассчитывалось суммированием: весь временной диапазон разбивался на участки, и определялось, сколько АНПА полностью израсходовали свой энергоресурс в пределах каждого временного участка. С течением времени количество нерезультативных испытаний возрастало.

Например, пусть из $N_{исп} = 100$ на j -м интервале оказалось K_j прекращений функционирования группы из-за полного расхода энергоресурса каждого АНПА группы. Следовательно, количество результативных испытаний $N_{р.исп}$ составляло $N_{р.исп} = N_{исп} - K_j$.

По всем временным интервалам, количество которых обозначим $M_{инт}$, определялось общее количество вышедших из строя АНПА $K_m = \sum_{j=1}^{M_{инт}} K_j$.

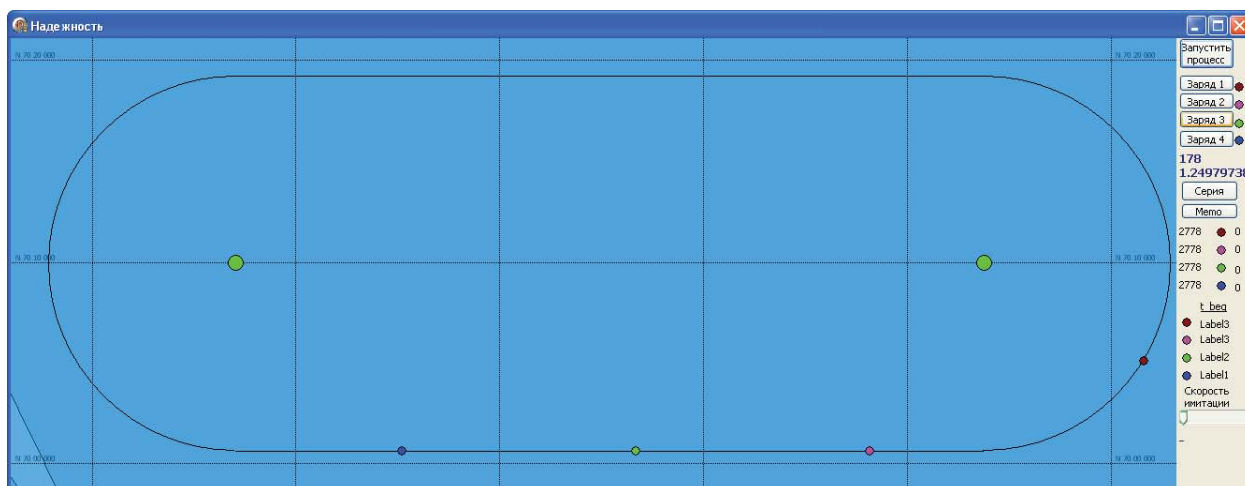
Следовательно, к j -му интервалу количество результативных испытаний составляло $N_{исп} - K_m$. Поэтому вероятность выполнения миссии на j -м интервале определялась выражением $P_j = (N_{исп} - K_m)/N_{исп}$.

Описанная математическая модель была использована для проведения численного эксперимента по выявлению работоспособности метода и оценке повышения эффективности за счет его использования.

Условия, исходные данные и результаты численного эксперимента

В ходе проведения численного эксперимента рассматривалась следующая тактическая ситуация (рис. 2).

Имеется акватория 1200×600 м. Имеются две стационарно расположенные станции дозаправки, координаты которых (100,100) и (1100,100).



■ Рис. 2. Положение АНПА (точки на линии), траектории движения АНПА (линия) и станции дозаправки (кружки светло-зеленого цвета)

В районе функционируют четыре АНПА, двигаясь друг за другом по определенной траектории, осматривая район. Маршрут движения представляет собой две параллельные линии, удаленные друг от друга на 200 м и соединенные между собой полуокружностью радиусом 100 м. Движение всех четырех АНПА происходит против часовой стрелки. Скорость движения АНПА принималась постоянной и равной 2 уз.

Для дозаправки АНПА отклонялся от маршрутной траектории и двигался к станции дозаправки. Отклонение возможно было только в начале или в конце прямолинейного участка движения. Заходить на станцию дозаправки можно с любого из прямолинейных отрезков.

Предполагалось, что на удельный расход электроэнергии АНПА влияние оказывают факторы, характерные для морской среды, поэтому случайным являлся удельный расход энергоресурса в процессе движения АНПА, который менялся каждые 500 тактов имитации. Удельный расход разыгрывался случайным образом в предположении того, что увеличение расхода может достигать двукратного размера, т. е. диапазон изменения удельного расхода составлял от 1,0 до 2,0. Значение расхода разыгрывалось равновероятно.

В процессе эксперимента моделировалось движение АНПА, поворот к станции дозаправки в случае принятия решения о дозаправке. В момент дозаправки цвет станции меняется на красный.

Рассматривались три варианта принятия решения относительно дозаправки на ближайшей станции, а также предложенный метод, всего — четыре варианта:

— критерий Вальда соответствовал значению критического заряда, достаточного для перехода самого протяженного участка между станциями дозаправки, т. е. 1800 м;

— критерий «максимакса» соответствовал значению критического заряда, необходимого на преодоление самого короткого расстояния между станциями дозаправки, т. е. 1000 м;

— критерий Гурвица соответствовал промежуточному значению критического заряда, необходимому для преодоления 1200 и 1600 м до станции дозаправки;

— предложенный метод, учитывающий наряду с критическим значением остаточного заряда также расстояние между ближайшей и следующей станциями дозаправки.

При проведении серии из 100 экспериментов длительность испытания составляла 10 000 тактов имитации.

В результате формировались накопленные данные в каждом временном диапазоне. Если конец испытания по причине полного расхода ресурса всеми АНПА группы наступал в диапазоне 3000–4000 тактов имитации, то этот результат учитывался также и в последующих диапазонах: от 4000 до 5000, от 5000 до 6000 и т. д., и наконец, от 9000 до 10 000 тактов имитации. Поэтому при определении вероятности выполнения миссии к концу испытания вероятность выполнения миссии стремилась к 0, поскольку результативными оказывались только единичные испытания.

Таким образом, результатом выполнения серии испытаний из 100 испытаний является массив моментов времени, в которые функционирование группы АНПА становилось невозможным. По полученным результатам строилась зависимость (в графическом виде) изменения вероятности выполнения миссии с течением времени.

На рис. 3 приведены результаты численных экспериментов — зависимость изменения вероятности выполнения миссии с течением времени. Время по горизонтальной оси приведено в тактах

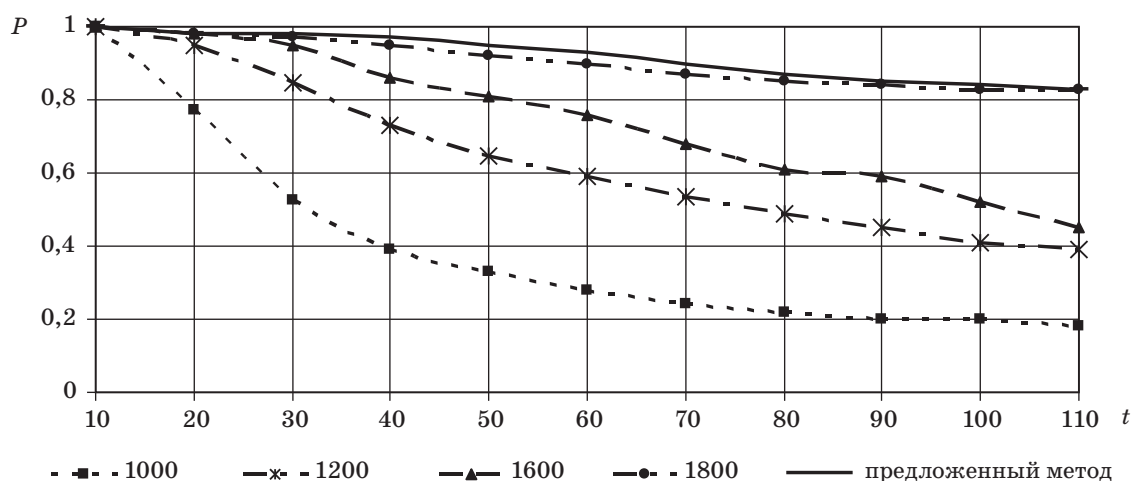


Рис. 3. Изменение вероятности выполнения миссии с течением времени

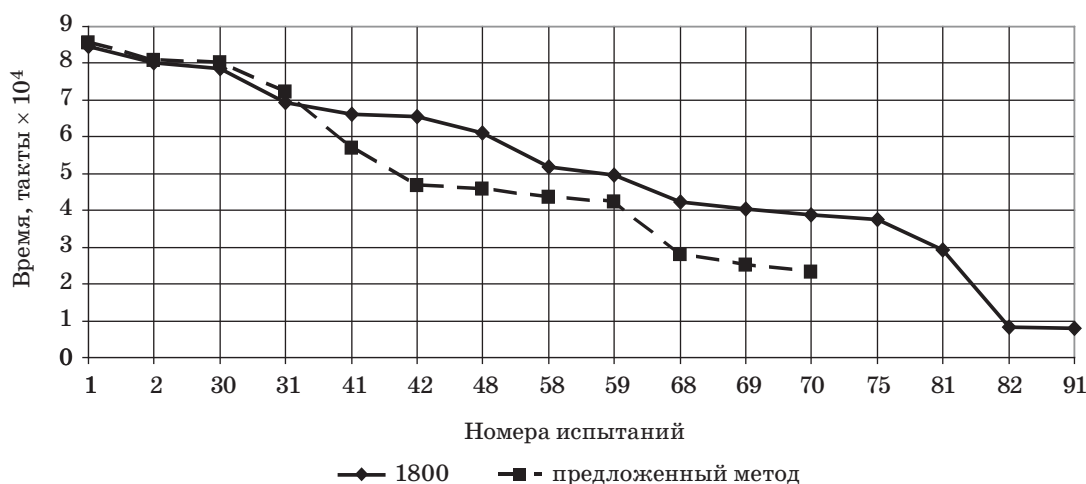


Рис. 4. Зависимость времени осмотра района от количества отвлечений на дозаправку

имитации, каждое деление соответствует количеству тысяч тактов имитации, например, число 10 соответствует 10 тысячам тактов имитации.

Пунктирными линиями показаны результаты, полученные с использованием критериев принятия решения Вальда (1800 м), Гурвица (1000 м), «максимакса» (1200, 1600 м); сплошной линией выделен результат с использованием предложенного метода определения необходимости дозаправки.

Из графика, приведенного на рис. 3, видно, что:

1. При использовании критерия Гурвица решение принималось о дозаправке на каждой второй станции. При этом происходила экономия временного и энергетического ресурса АНПА и группы в целом, однако вероятность выполнения миссии оказалась крайне низкой из-за того, что АНПА не успевали добраться до станции дозаправки.

2. С увеличением критического значения заряда, необходимого для преодоления расстояния

1200 м (при использовании критерия «максимакса»), вероятность выполнения миссии повысилась в среднем на 0,3, при повышении до 1600 м — еще на 0,1 по вероятности выполнения миссии.

3. Использование критерия Вальда привело к существенному повышению вероятности выполнения миссии, которая в заданный промежуток времени не опускалась ниже 0,8.

Однако с точки зрения временных ограничений на осмотр заданного района эффективность функционирования группы АНПА все равно осталась низкой. Дозаправка происходила на каждой станции, что привело к значительному повышению времени осмотра заданного района.

4. При использовании предложенного метода время, затраченное на осмотр заданного района, оказалось существенно меньше, чем при использовании критерия Вальда, а вероятность выполнения миссии оказалась несколько выше. На рис. 4 приведено время остановки всех АНПА группы при

использовании критерия Вальда и предложенного метода. Номера испытаний предварительно были ранжированы так, чтобы с увеличением номера испытания снижалось время остановки всех АНПА группы. Из рис. 4 видно, что при использовании предложенного метода принятия решения время выполнения миссии выше в среднем на 10 000 тактов имитации.

Заключение

При рассмотрении различных подходов к принятию решения относительно выбора критического значения остаточного уровня электрического заряда АБ АНПА:

- определен показатель эффективности выполнения миссии;
- разработан метод определения оптимального выбора момента отворота на дозаправку;

— разработана математическая модель оценки эффективности функционирования группы АНПА в сетевидной системе;

— проведены численные эксперименты, результаты которых позволили разработать рекомендации по выбору момента времени на отворот на дозаправку.

По результатам проведенных исследований было выявлено, что целесообразно наряду с критическим зарядом использовать дополнительные параметры. Предложенный метод, который учитывал также расход энергии между ближайшей и следующей станциями дозаправки, привел к повышению эффективности функционирования группы АНПА в сетевидной системе освещения подводной обстановки. Повышение вероятности выполнения миссии составило в среднем 0,1 из-за превышения времени осмотра заданного района, вызванного остановками АНПА группы по причине нехватки энергоресурса.

Литература

1. Пешехонов В. Г., Брага Ю. А., Машошин А. И. Сетевидный подход к решению проблемы освещения подводной обстановки в Арктике // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 3. Т. 128. С. 219–227.
2. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. М. Д. Агеева. — М.: Наука, 2005. — 320 с.
3. Пантов Е. Н., Махин Н. Н., Шереметов Б. Б. Основы движения подводных аппаратов. — Л.: Судостроение, 1973. — 216 с.
4. Белоусов И. Г. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США (2013) // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 5. С. 79–88.
5. Цариченко С. С. АНПА GAVIA — подводный исследователь // Гидротехника. 2011. № 2 (22). С. 112–114.
6. FDECO Program. www.navaldrone.com/FDECO.html (дата обращения: 21.02.2017).
7. Черноуцкий А. А. Методы принятия решений. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 408 с.
8. Костенко В. В., Михайлов Д. Н. Определение параметров энергосилового устройства автономного необитаемого подводного аппарата по заданной дальности хода // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 70–73.
9. Особенности заряда и эксплуатации аккумуляторов. www.os-propo.info/content/view/98/1/ (дата обращения: 21.02.2017).
10. Герасимов В. А., Филоженко А. Ю., Чепурин П. И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 47–55.
11. Гмурман В. Е. Теория вероятности и математическая статистика. — М.: Высш. шк., 2000. — 305 с.
12. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 400 с.
13. Мартынова Л. А. Имитационная модель оценки эффективности функционирования АНПА // Тр. Междунар. конф. по судостроению и океанотехнике, Санкт-Петербург, 6 июня–8 июля 2016 г. — СПб.: СПбГМТУ, 2016. С. 455–469.
14. Мартынова Л. А., Розенгауз М. Б. К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5. С. 25–34. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.25
15. Мартынова Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В. Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // Материалы конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2016), 4–6 октября 2016 г. СПб., 2016. С. 205–209.
16. Мартынова Л. А., Машошин А. И. Особенности оценки эффективности функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов в нестандартных ситуациях // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». СПб.: Ап4Принт, 2016. С. 86–91.
17. Безрук Г. Г., Мартынова Л. А. Оценка эффективности образцов робототехнических комплексов в условиях противодействия // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. 2016. № 11–12 (101–102). С. 45–49.

UDC 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.47

Efficient Operation of a Group of Standalone Unmanned Submersibles in a Network-Centric System of Underwater IlluminationMartynova L. A.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, martynowa999@bk.ruRozengauz M. B.^a, PhD, Tech., Senior Researcher, rozengauz_mb@mail.ru^aState Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: A typical modern network-centric system of underwater illumination includes a group of standalone unmanned submersibles providing the illumination and monitoring of the marine environment, and immovable refill stations accepting the data from a device and filling up its energy resource. Designing a network-centric system implies a decision-making problem concerning the refill of the submersibles in order, on the one hand, to provide a sufficient resource for the transition to the next refill station and, on the other hand, to ensure that the general time of the survey does not exceed the predefined limit. **Purpose:** We develop a decision-making method for the refill of standalone unmanned submersibles, which would provide effective functioning for a group of submersibles in a network-centric system of underwater illumination. **Results:** A new decision-making method has been proposed which uses an additional factor: the energy necessary to cover the distance between the nearest refill station and the next one. Mathematical modeling and numerical experiments were conducted to determine the quantitative characteristics of using the conventional decision-making criteria and the proposed method. The obtained results have demonstrated an advantage of using the proposed method. **Practical relevance:** When designing a network-centric system of underwater illumination, assessing the possibilities of standalone unmanned submersibles and refill stations allows you to solve the problems of their placement topology, resource intensity and temporal characteristics.

Keywords — Standalone Unmanned Submersible, Mathematical Modeling, Decision-Making Method, Refill Station, Network-Centric System.

References

1. Peshehonov V. G., Braga Yu. A., Mashoshin A. I. Network-Centric Approach to a Solving of the Problem in Arctic. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 3, vol. 128, pp. 219–227 (In Russian).
2. *Autonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii* [Independent Underwater Robots. Systems and Technologies], Ed. M. D. Ageev. Moscow, Nauka Publ., 2005. 320 p. (In Russian).
3. Pantov E. N., Mahin N. N., Sheremetov B. B. *Osnovy dvizheniia podvodnykh apparatov* [Bases of the Movement of Submersibles]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1973. 216 p. (In Russian).
4. Belousov I. G. Modern and Perspective Uninhabited Submersibles of Naval Forces of the USA (2013). *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2013, no. 5, pp. 79–88 (In Russian).
5. Tsarichenko S. S. ANPA GAVIA is an Underwater Researcher. *Gidrotekhnika*, 2011, no. 2 (22), pp. 112–114 (In Russian).
6. *FDECO Program*. Available at: www.navaldrone.com/FDECO.html (accessed 03 March 2017) (In Russian).
7. Chernorutsky A. A. *Metody priniatiia reshenii* [Decision Making Methods]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005. 408 p. (In Russian).
8. Kostenko V. V., Mikhailov D. N. Determination of Parameters AUV'S Power Plant on the Set of Long Cruising Rang. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 3 (140), pp. 70–73 (In Russian).
9. *Osobennosti zariada i ekspluatatsii akkumulatorov* [Features of a Charge and Operation of Accumulators]. Available at: www.os-propo.info/content/view/98/1/ (accessed 03 March 2017).
10. Gerasimov V. A., Filozhenko A. J., Chepurin P. I. Structure of the System Noncontact Energy Issue of Autonomous Undersea Device. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 3 (140), pp. 47–55 (In Russian).
11. Gmurman V. E. *Teoriia veroiatnosti i matematicheskaia statistika* [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 2000. 305 p. (In Russian).
12. Buslenko N. P. *Modelirovanie slozhnykh sistem* [Modeling of Difficult Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 400 p. (In Russian).
13. Martynova L. A. A Simulation Model of an Efficiency Evaluation of Functioning of ANPA. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po sudostroeniiu i okeanotekhnike* [Proc. Intern. Conf. on Naval Architecture and Ocean Engineering]. Saint-Petersburg, 2016, pp. 455–469. Available at: <https://yadi.sk/i/mDou6wzuiuVvS3> (accessed 03 March 2017) (In Russian).
14. Martynova L. A., Rozengauz M. B. Reliability of an Autonomous Underwater Vehicle with a Multiagent Control System. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 5, pp. 25–34 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.25
15. Martynova L. A., Mashoshin A. I., Pashkevich I. V. Approaches to an Efficiency Evaluation of the Autonomous Underwater Vehicle. *Materialy konferentsii "Upravlenie v morskikh i ajerokosmicheskikh sistemah" (UMAS-2016)* [Proc. of the Conf. "Management in Sea and Space Systems" (UMAS-2016)], Saint-Petersburg, 2016, pp. 205–209 (In Russian).
16. Martynova L. A., Mashoshin A. I. Features of an Efficiency Evaluation of Functioning of Autonomous Underwater Vehicle in Emergency Situations. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Jekstremal'naja robototekhnika"* [Proc. of the Intern. Scientific and Technical Conf. "Extreme Robotics"]. Saint-Petersburg, Ap4Print Publ., 2016, pp. 86–91 (In Russian).
17. Bezruk G. G., Martynova L. A. An Efficiency Evaluation of Samples of Robotic Complexes in the Conditions of Counteraction. *Voprosy oboronnoy tekhniki*, Ser. 16, 2016, no. 11–12 (101–102), pp. 45–49 (In Russian).

РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ВРЕМЕННОГО ДРЕЙФА ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

Л. О. Савин^а, сотрудник

М. В. Королев^а, канд. техн. наук, доцент

М. В. Носов^а, канд. техн. наук

^аАкадемия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, РФ

Постановка проблемы: воздействие внешних факторов окружающей среды отрицательно сказывается на процессах эксплуатации автомобильной техники. Несвоевременное прогнозирование и диагностика существенно снижают надежность как отдельных узлов, так и в целом автомобиля, что в свою очередь ограничивает ресурс его работы. **Цель:** анализ, в зависимости от математического аппарата, методов прогнозирования, определяющих параметры состояния транспортного средства, и разработка прогнозных моделей временного дрейфа этих параметров при эксплуатации автомобильной техники в различных условиях. **Результаты:** разработаны прогнозные модели дрейфа параметров автотранспорта при его эксплуатации в особых условиях. Под особыми условиями эксплуатации понимаются такие, когда происходит сочетание нескольких неблагоприятных природно-климатических факторов: температуры окружающей среды, запыленности воздуха и т. д. Новизна подхода состоит в том, что выбор вида функции, описывающей изменение контролируемых параметров узлов и агрегатов транспорта во времени, должен производиться с учетом описанных в начале работы дестабилизирующих факторов, влияющих на его техническое состояние. **Практическая значимость:** использование прогнозных моделей в работе позволит рассчитать момент достижения определяющими параметрами автомобилей своих предельно допустимых значений. Сформулированные аналитические выражения могут быть использованы для нахождения вероятности безотказной работы узлов и агрегатов автомобильной техники на заданном интервале времени. В дальнейшем на основе данных зависимостей могут быть сформированы показатели эффективности функционирования автотранспорта, зависящие от периодичности проведения, и рассчитаны оптимальные значения периодичности, при которых введенные показатели будут достигать своих экстремальных значений.

Ключевые слова — особые условия, автомобильная техника, дрейф параметров, модели прогнозирования, эксплуатация автомобилей, вероятностные показатели.

Введение

В настоящее время роль и значение автомобильного транспорта постоянно возрастают. Очевидно, что при этом все более и более важную роль начинают играть вопросы повышения надежности автомобильной техники (АТ) и обеспечения ее работоспособности на заданном интервале времени (сроке службы). Существенность этих вопросов возрастает при эксплуатации АТ в так называемых особых условиях: экстремальных температур (на Крайнем Севере, в Заполярье или в пустынных районах), повышенной влажности, сложного рельефа местности (например, в горах), бездорожья и т. д. При этом перечисленные экстремальные условия эксплуатации АТ, как правило, характеризуются одновременным сочетанием нескольких неблагоприятных факторов, каждый из которых оказывает влияние на техническое состояние как АТ в целом, так и ее отдельных узлов. Воздействие дестабилизирующих факторов приводит к постепенному изменению контролируемых параметров АТ, а выход этих параметров за допустимые пределы, как правило, приводит к отказу.

Влияние особых условий эксплуатации на техническое состояние АТ

Основными процессами, вызывающими изменение технического состояния деталей и АТ в целом, являются различные виды изнашивания [1]: абразивное, характерное для трущихся деталей: тормозных накладок колодок или открытых узлов трения типа шкворневых соединений и рессорных шарниров; эрозийное, которому подвержены, например, рабочие поверхности тарелок выпускных клапанов двигателя и жиклеры карбюратора; окислительное, наблюдаемое на деталях цилиндропоршневой группы, гидроусилителей, тормозной системы с гидроприводом; усталостное и коррозионное изнашивание, а также пластическая деформация, коррозия, усталостное разрушение и иные физико-химические изменения материала (старение) различных деталей. Скорость протекания таких процессов существенно зависит от условий эксплуатации АТ. Так, например, интенсивность изнашивания агрегатов АТ в зависимости от температуры воздуха изменяется по параболической кривой и имеет минимум, соответствующий оптимальной температуре, при этом очевидно, что для каждого

агрегата существует наиболее подходящий тепловой режим. Так, по данным эксплуатации АТ в условиях жаркого сухого климата были определены 154 детали 18 наименований, параметры которых лимитируют надежность двигателя КамАЗ [1]. При этом в жарких и сухих условиях эксплуатации на долю двигателя приходится 30–40 % всех отказов АТ, трудоемкость устранения которых составляет до 50 % трудоемкости ремонта. Из-за быстрого испарения тормозной жидкости образуются паровые пробки в пневмогидравлическом и гидравлическом тормозных приводах, что повышает риск возникновения в них отказов. Увеличение пенообразования жидкостей в гидроусилителе рулевого привода влечет за собой уменьшение рабочего давления, которое сказывается на работоспособности гидроусилителя, и т. д.

По этим же данным сильная запыленность воздуха является основной причиной абразивного износа узлов и агрегатов АТ. При работе автомобилей ЗИЛ в карьерах с повышенной запыленностью интенсивность изнашивания цилиндропоршневой группы двигателей может достичь катастрофических величин уже через несколько тысяч километров пробега. Эффективность работы системы охлаждения АТ при запыленности воздуха также снижается, в ней образуется накипь, при этом происходит быстрое старение масла из-за окислительного процесса, способствующего отложению механических примесей и смолистых веществ на поверхности многих деталей, и т. д. При низких температурах (на Крайнем Севере) износ холодных двигателей при их пуске составляет до 70 % от общих эксплуатационных износостойчивости используемых материалов приводит к более частым поломкам узлов и агрегатов АТ, фактический срок службы которой в районах с холодным климатом в 1,5–2 раза ниже нормативного. Установлена также и существенная температурная зависимость показателей надежности [2]: поток отказов деталей и узлов АТ в зимнее время возрастает в 1,5–2,5 раза по сравнению с летним; наработка на отказ и коэффициент готовности из-за хрупких поломок деталей уменьшаются в три и более раза, и пр. В горных условиях эксплуатации увеличиваются нагрузки на детали и элементы рулевого управления, снижается эффективность работы тормозной системы АТ с пневмогидравлическим и пневматическим приводами, из-за частых торможений на спусках интенсивно изнашиваются тормозные диски, у коробок передач и агрегатов силовой передачи происходит повышенный износ элементов главного фрикциона. Ряд прибрежных морских районов характеризуется повышенной коррозионной активностью воздуха, и свойственная таким районам агрессивность окружающей среды также

вызывает интенсивную коррозию деталей, сокращая ресурс автомобиля примерно на 10 %.

Помимо природно-климатических условий, на техническое состояние АТ влияют дорожные условия, а также условия движения. Так, для сцепления и рулевого управления наиболее легкими являются условия эксплуатации при движении по дорогам с асфальтобетонным покрытием, а наиболее тяжелыми — по улицам городов. Для тормозной системы наиболее легкие условия эксплуатации — при движении по грунтовым дорогам в равнинных местностях и наиболее тяжелые — при движении в карьерах, и т. д. В среднем износ и разрушение дорожного покрытия сокращают надежность АТ на 14–33 %.

Совокупное влияние возможных сочетаний названных выше условий учитывается специальными поправочными коэффициентами. Так, для жаркого и холодного климата для периодичности технического обслуживания (ТО) используется коэффициент 0,9; для оценки трудоемкости работ по ТО — от 1,1 до 1,3; до капитального ремонта коэффициент предусматривает 0,7–0,9 установленного пробега и т. д.

Современный автомобиль состоит из 15–18 тысяч деталей, из которых около 9 тысяч теряют свои первоначальные свойства при работе, причем около 3–4 тысяч деталей имеют срок службы меньше, чем сама АТ, и являются объектом особого внимания при эксплуатации, особенно в экстремальных условиях [2]. Проведенный анализ имеющихся работ по данной тематике позволил выделить из общей совокупности технических параметров АТ ряд наиболее важных, которые вплотную связаны с ускоренным выходом из строя узлов АТ в особых условиях его эксплуатации. Такие параметры будем в дальнейшем называть определяющими, при этом очевидно, что для конкретных условий эксплуатации АТ эти параметры могут быть различными. Таким образом, под определяющим параметром АТ будем понимать такой информативный (контролируемый) параметр, который в данный момент времени оказывает наибольшее влияние (имеет решающее значение) для обеспечения работоспособности АТ и при выходе которого за допустимые пределы происходит отказ АТ. Следовательно, поддержание значений указанных параметров в пределах нормы позволит обеспечить работоспособность АТ в течение заданного интервала времени (срока службы).

Обзор существующих методов прогнозирования случайных процессов и возможность их использования для оценки надежности АТ

Зная закономерности постепенного изменения значений определяющих параметров АТ с течением времени (их временного дрейфа) и предвидя

момент выхода этих параметров за установленные пределы, можно произвести их заблаговременную и своевременную настройку (регулировку) и тем самым не допустить отказа АТ. Задача по установлению момента достижения определяющим параметром своего предельно допустимого значения решается путем прогнозирования, по результатам которого делают научно обоснованные выводы о потенциальной надежности того или иного узла (агрегата) АТ, т. е. о возможности его использования по назначению в течение интервала времени до момента очередного контроля. Классификация существующих методов прогнозирования в зависимости от применяемого математического аппарата довольно обширна и включает свыше двухсот методов [3]. На практике наиболее широко применяются так называемые статистические методы, направленные на обработку количественной информации об объекте прогнозирования по принципу выявления содержащихся в ней закономерностей развития и математических взаимосвязей характеристик с целью получить прогнозные модели. В свою очередь, статистические методы прогнозирования включают методы экстраполяции и методы статистической классификации [3]. В зависимости от используемого математического аппарата различают два вида прогнозирования экстраполяцией: аналитическое прогнозирование, основанное на применении экстраполяционных полиномов (например, Лагранжа) или уравнений регрессии, и вероятностное прогнозирование, основанное на теории вероятностей. Целью аналитического прогнозирования является определение времени безотказной работы обслуживаемого объекта. Исследование присущих АТ закономерностей должно быть основано на использовании вероятностно-статистических методов прогнозирования, позволяющих получить плотность распределения времени до выхода параметра за допустимые пределы, а также вероятность безотказной работы на заданном интервале времени [4]. Однако невозможность учесть все внешние и внутренние воздействующие факторы приводит к некоторой неопределенности состояния анализируемых параметров АТ. В этих условиях применение к анализу параметров АТ чисто детерминированных подходов не всегда оправдывает себя [5].

Рассмотрим существующие модели случайных процессов (СП) и возможность их применения для прогнозирования экстраполяцией дрейфа контролируемых параметров АТ. Так, известно несколько способов задания случайных функций времени, из которых наиболее полным является определение случайного процесса с позиций аксиоматического подхода к теории вероятностей, предложенное А. Н. Колмогоровым [6]. При таком представлении СП исходят из того, что его исчерпывающей характеристикой является

многомерный закон распределения. Полное описание случайного процесса дается совместным распределением бесчисленного множества его сечений, взятых в любые моменты времени. Таким образом, как и любой СП, временной дрейф контролируемых параметров АТ может быть описан многомерной плотностью распределения. Однако теория СП в общем виде отличается значительной сложностью математического аппарата и поэтому мало пригодна для решения инженерных задач [4]. Следовательно, важное значение приобретает выявление моделей СП, которые должны отражать существенные свойства реальных процессов и в то же время быть простыми и удобными для расчета основных характеристик. Одни из разновидностей таких моделей — так называемые квазидетерминированные (КД) модели, которые подробно описаны ниже.

Таким образом, большая часть известных теоретических методов прогнозирования надежности имеет ряд недостатков и ограничений, существенно затрудняющих возможности их применения на практике. Не являются исключением и известные работы по прогнозированию надежности АТ [2, 7–13]. Поскольку все они, как правило, не ставят своей целью разработку новых методов прогнозирования, а используют уже существующие, то имеют все те же, присущие общим методам прогнозирования, недостатки. К таким недостаткам, как уже отмечалось, относится невозможность учета воздействия на АТ всей совокупности воздействующих на нее факторов, приводящая к неопределенности состояния анализируемых параметров АТ и затрудняющая применение к их анализу известных методов аналитического прогнозирования, в том числе с использованием уравнений регрессии, а также методов факторного анализа. Кроме того, указанные методы отличаются значительной сложностью математического аппарата и поэтому также мало пригодны для решения прикладных задач. Использование же на практике многомерных плотностей распределения СП приводит к значительным математическим трудностям не только при решении задач прогнозирования, но и при расчетах вероятностных характеристик и изучении закономерностей изменения параметров АТ во времени. Это в полной мере относится, например, к работам П. П. Ощепкова [2] и А. Н. Макаровой [7], использовавших для прогнозирования надежности методы регрессионного анализа; В. Л. Литвиненко и М. А. Саблиной, описывающих возможность аналитического прогнозирования надежности [8], к публикациям В. В. Ионов, основанным на использовании вероятностно-статистического прогнозирования, а также прогнозирования при помощи статистической классификации [9], работам Л. В. Ефремова, посвященным использованию ме-

тодов факторного анализа [10], и других авторов [11–13]. Имеющиеся ограничения всех указанных способов значительно затрудняют их использование при практической эксплуатации АТ и делают нерациональным их выбор для прогнозирования экстраполяцией временного дрейфа контролируемых параметров АТ. Вместе с тем принципиально новые возможности вероятностного описания СП для изучения закономерностей изменения выходных параметров АТ во времени в целях решения задач прогнозирования появляются при использовании КД-моделей СП, под которыми понимаются неслучайные функции времени, зависящие от нескольких случайных аргументов (случайных величин).

Прогнозирование надежности АТ при помощи КД-моделей временного дрейфа ее определяющих параметров

Анализ воздействий описанных выше дестабилизирующих факторов позволяет сделать вывод, что изменению во времени контролируемых параметров АТ присуща характерная особенность, проявляющаяся в том, что их случайному изменению свойственно медленное либо неубывание, либо невозрастание его значения, сопровождающееся незначительными отклонениями от монотонности. При этом постепенное изменение этих значений не исключает кратковременных, сравнительно небольших его возрастаний. Таким образом, значение контролируемых параметров АТ флуктуирует вокруг некоторой монотонно изменяющейся функции. Эта особенность позволяет представить процесс изменения данных параметров в виде суммы двух его составляющих — монотонной и флуктуационной [4], т. е.

$$y(t) = y_{\text{КД}}(t) + \psi(y, t), \quad (1)$$

где $y_{\text{КД}}(t)$ — КД-функция времени, описывающая протекание необратимых физических процессов; $\psi(y, t)$ — стационарный случайный процесс, описывающий действие обратимых флуктуаций внутренних и внешних условий.

Таким образом, при слабых флуктуациях монотонность СП позволяет для описания процесса дрейфа параметров использовать квазислучайный (квазидетерминированный) процесс, представляющий собой совокупность детерминированной функции, отражающей закономерность дрейфа параметров.

В качестве базовых функций для КД-моделей могут использоваться различные детерминированные функции. При этом выделяют две разновидности моделей дрейфа параметра: достаточно общие (универсальные) модели, отражающие в широких пределах различный характер изме-

нения параметра, и элементарные модели, имитирующие, как правило, конкретную закономерность дрейфа [3].

К универсальным следует отнести модель следующего вида:

$$\Pi(t) = \sum_{l=1}^{\mu} A_l F_l(\xi, t), \quad (2)$$

где $\Pi(t)$ — контролируемый параметр АТ; $F_l(\xi, t)$ — базисное выражение, составляющее основу многочлена; A_l — степенные адаптационные коэффициенты; $l = 1, 2, \dots, \mu$ — степень базисных выражений.

Выражение вида (2) достаточно точно описывает монотонные процессы и представляет собой сумму полиномов различных степеней от 1 до μ , вклад которых в изменения функций различен и характеризуется зависимостью $A = f(l)$, $l = 1, 2, \dots, \mu$.

В ряде случаев при решении задачи прогнозирования может использоваться обобщенная математическая модель дрейфа выходного параметра, представленная в виде дифференциального уравнения [3]

$$d\Pi(t) / dt = -kF(\Pi), \quad (3)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости дрейфа; $F(\Pi)$ — функция, определяемая принятой гипотезой о характере дрейфа.

Очевидным достоинством моделей вида (2), (3) является их универсальность. Вместе с тем анализ закономерностей изменения контролируемых параметров АТ показывает возможность их аппроксимации значительно более простыми аналитическими выражениями — различными степенными, показательными, логарифмическими и другими функциями. При этом наиболее подходящими являются следующие виды моделей.

— Линейная модель дрейфа

$$\Pi(t) = \Pi_0 - a_1 t. \quad (4)$$

Линейные модели достаточно хорошо описывают процесс простого накопления необратимых изменений, характерных, например, для постепенного износа деталей АТ под воздействием сил трения, зависящего от материала и качества обработки поверхностей, смазки, нагрузки, теплового режима и пр. [9].

— Экспоненциальная модель

$$\Pi(t) = \Pi_0 e^{\frac{-vt}{T_0}}. \quad (5)$$

Экспоненциальные модели используются для описания процессов старения материалов, они

наиболее адекватны реальным физическим процессам, происходящим, например, при так называемых усталостных разрушениях деталей АТ.

— Логарифмическая модель

$$\Pi(t) = \Pi_0 - \Pi_0 \ln \left(1 + \frac{vt}{\Pi_0} \right). \quad (6)$$

Логарифмические модели могут применяться для описания процесса старения материалов, у которых скорость старения убывает обратно пропорционально накопившимся в этих материалах изменениям.

— Нелинейная (параболическая) модель

$$\Pi(t) = a_0 - a_1 t + a_2 t^2 \quad (7)$$

или

$$\Pi(t) = a_0 + a_1 t - a_2 t^2. \quad (8)$$

Параболические модели используются, если кроме простого накопления необратимых изменений имеются какие-либо ускоряющие или замедляющие факторы, например воздействие высокой влажности или температуры.

Кроме рассмотренных моделей, для описания дрейфа определяющих параметров АТ могут использоваться и иные, более сложные модели, например кубическая зависимость и др. При этом каждая из функций вида (4)–(8) может описывать закономерность временного дрейфа контролируемых параметров АТ и имеет случайные коэффициенты Π_0 , a_1 (и a_2), распределенные по одному из известных законов. Задача прогнозирования технического состояния АТ сводится к определению плотности распределения времени (ПРВ) до выхода параметра за установленные нормативными документами пределы, т. е. к нахождению плотности распределения функции по заданному распределению ее аргументов. Найденная плотность распределения будет являться исчерпывающей (универсальной) характеристикой непрерывной случайной величины, полностью характеризующей ее с вероятностной точки зрения.

Разработка и исследование моделей дрейфа

Линейная модель дрейфа

Выразив t из выражения (4), описывающего линейную модель дрейфа контролируемого параметра АТ, можно записать

$$t = \frac{\Pi_0 - \Pi(t)}{a_1}. \quad (9)$$

С учетом того, что контролируемые параметры АТ со временем изменяются, достигая своего предельно допустимого значения $\Pi_{пр}$ в момент

времени $\tau_{пр}$, т. е. $\Pi(\tau_{пр}) = \Pi_{пр}$, выражение (9) можно записать в виде

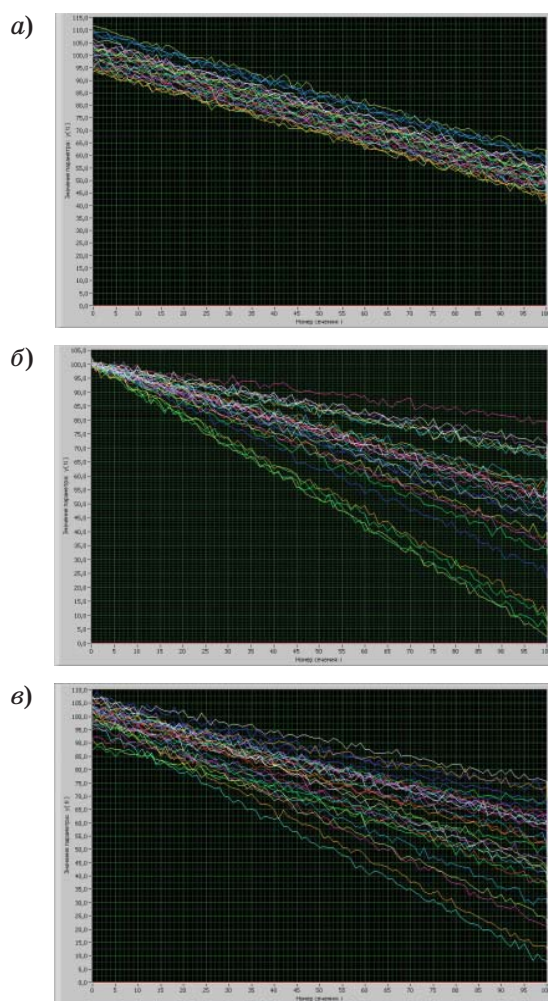
$$\tau_{пр} = \frac{\Delta\Pi}{a_1}, \quad (10)$$

где

$$\Delta\Pi = \Pi_0 - \Pi_{пр}. \quad (11)$$

Введение граничного (предельно допустимого) значения параметра $\Pi_{пр}$ и связанного с ним случайного времени достижения случайным процессом дрейфа параметра этого предельного значения $\tau_{пр}$ позволяет перейти к вероятностному описанию свойств АТ при ее длительном функционировании в простой и наглядной форме в виде одномерной функции распределения вместо многомерной.

Так, при линейной модели дрейфа параметра возможны три случая (рисунок, а–в).



■ Примеры линейных зависимостей временного дрейфа контролируемых параметров АТ для различных случайных коэффициентов: а — $\Delta\Pi$; б — a_1 ; в — a_1 и $\Delta\Pi$

В первом случае дрейф контролируемого параметра происходит монотонно для всей выборки АТ, что соответствует ситуации, когда все они эксплуатируются в одинаковых условиях; во втором случае скорость дрейфа параметра у различных экземпляров АТ различна, когда проведена начальная регулировка параметров АТ и условия ее эксплуатации различны; в третьем случае и начальное значение параметра, и скорость его дрейфа у всех выбранных экземпляров АТ различны.

Случай 1. В уравнении (10) a_1 — случайная величина, распределенная по заданному закону $\omega(a_1)$, $\Delta\Pi$ — постоянная величина (константа).

В соответствии с общим подходом к решению задачи выразим из (11) случайную величину a_1 , получив обратную функцию ψ_{a_1} :

$$a_1 = \psi_{a_1} = \frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}}. \quad (12)$$

Находя модуль ее производной, получаем якобиан J_{a_1} :

$$J_{a_1} = \frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}^2}. \quad (13)$$

В соответствии с (11) выражение для плотности распределения времени достижения параметром своего предельного значения имеет вид

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \omega(\psi_{a_1}) J_{a_1}, \quad (14)$$

где $\omega(\psi_{a_1})$ — плотность распределения обратной функции (12).

Подставив в формулу (14) выражения (13) и (12), запишем выражение для ПРВ достижения параметром предельно допустимого значения

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}^2} \omega\left(\frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}}\right). \quad (15)$$

Случай 2. Пусть теперь в выражении (10) $\Delta\Pi$ — случайная величина, распределенная по заданному закону $\omega(\Delta\Pi)$, a_1 — постоянная величина. Для данного случая по аналогии с предыдущим в качестве обратной функции выберем случайную величину $\Delta\Pi$, выразив ее из формулы (10):

$$\Delta\Pi = \psi_{\Delta\Pi} = a_1 \tau_{\text{пр}}. \quad (16)$$

Найдя модуль производной этого выражения, получим якобиан $J_{\Delta\Pi}$:

$$J_{\Delta\Pi} = a_1. \quad (17)$$

Используя зависимости (14), (16), (17), запишем итоговое выражение для ПРВ достижения параметром предельного значения

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = J_{\Delta\Pi} \omega(\psi_{\Delta\Pi}) = a_1 \omega(a_1 \tau_{\text{пр}}). \quad (18)$$

Случай 3. Коэффициенты уравнения (10) $\Delta\Pi$ и a_1 — это случайные величины, которые имеют распределение $\omega_1(a_1)$ и $\omega_2(\Delta\Pi)$. Аналогично второму случаю в качестве обратной функции выберем случайную величину $\Delta\Pi$, имеющую вид (16). Дифференцируя обе части этого выражения, получим якобиан J , имеющий вид (17). В соответствии с общим подходом запишем выражение для ПРВ достижения параметром своего предельного значения с учетом выражений (16) и (17):

$$\begin{aligned} \omega(\tau_{\text{пр}}) &= \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(a_1) \omega_2(\psi_{\Delta\Pi}) J da_1 = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(a_1) \omega_2(a_1 \tau_{\text{пр}}) a_1 da_1. \end{aligned} \quad (19)$$

Полученные зависимости совпали с выражениями, полученными графическим методом [6], что доказывает их справедливость.

От формул ПРВ достижения параметром своего предельного значения в общем виде (15), (18), (19) можно перейти к частному случаю, когда коэффициенты $\Delta\Pi$ и a_1 имеют не произвольный, а нормальный закон распределения случайных коэффициентов $\Delta\Pi$ и a_1 . Тогда эти уравнения можно записать в следующем виде:

— когда случайным является один из коэффициентов a_1 и $\Delta\Pi$ соответственно:

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{a_1}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}} - M_{a_1}\right)^2}{2\sigma_{a_1}^2}\right]; \quad (20)$$

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = a_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta\Pi}} \exp\left[-\frac{(a_1 \tau_{\text{пр}} - M_{\Delta\Pi})^2}{2\sigma_{\Delta\Pi}^2}\right]; \quad (21)$$

— когда случайными являются оба коэффициента a_1 и $\Delta\Pi$:

$$\begin{aligned} \omega(\tau_{\text{пр}}) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi\sigma_{a_1}\sigma_{\Delta\Pi}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}} - M_{a_1}\right)^2}{2\sigma_{a_1}^2}\right] \times \\ &\times \exp\left[-\frac{(\Delta\Pi - M_{\Delta\Pi})^2}{2\sigma_{\Delta\Pi}^2}\right] \frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}^2} d\Delta\Pi. \end{aligned} \quad (22)$$

Для нахождения вероятности невыхода параметром $\Pi(t)$ за пределы $\Pi_{\text{пр}}$ в течение заданного времени t_3 необходимо подставить выражения (20)–(22) в формулу

$$P(\Pi(t) \geq \Pi_{\text{пр}} \forall t \leq t_3) = 1 - \int_0^{t_3} \omega(\tau_{\text{пр}}) d\tau_{\text{пр}}.$$

Логарифмическая модель дрейфа

Для логарифмической модели дрейфа контролируемых параметров АТ вида (5) процесс нахождения ПРВ достижения параметром своего предельного значения $\omega(\tau_{\text{пр}})$ может быть рассмотрен для двух возможных случаев: 1) v — случайная величина, распределенная по заданному закону $\omega(v)$, Π_0 — постоянная величина (константа); 2) Π_0 и v — случайные величины, также распределенные по заданным законам $\omega_1(\Pi_0)$ и $\omega_2(v)$ соответственно. Для каждого из них согласно описанному выше подходу можно получить аналитические выражения для ПРВ до достижения параметром предельного значения, соответственно:

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \omega(\psi_v) J_v = \omega(\psi_v) \frac{\Pi_0}{\tau_{\text{пр}}^2} \left(1 - \exp \frac{\Delta \Pi}{\Pi_0} \right);$$

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_2(\psi_v) \omega_1(\Pi_0) \frac{\Pi_0}{\tau_{\text{пр}}^2} \left(1 - \exp \frac{\Delta \Pi}{\Pi_0} \right) d\Pi_0.$$

Экспоненциальная модель дрейфа

Для экспоненциальной модели дрейфа контролируемых параметров АТ вида (4) процесс нахождения ПРВ достижения параметром своего предельного значения $\omega(\tau_{\text{пр}})$ так же, как и для логарифмической модели, может быть рассмотрен для двух аналогичных случаев. При этом в соответствии с описанным выше подходом выражения для ПРВ достижения параметром предельного значения будут иметь вид

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \omega(\psi_v) J_v = \omega(\psi_v) \frac{\Pi_0}{\tau_{\text{пр}}^2} \ln \left(\frac{\Pi_0}{\Pi_{\text{пр}}} \right);$$

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(\psi_v) \frac{\Pi_0}{\tau_{\text{пр}}^2} \ln \frac{\Pi_0}{\Pi_{\text{пр}}} \omega(\Pi_0) d\Pi_0.$$

Выбор вида функции, описывающей изменение контролируемых параметров АТ во времени, должен производиться с учетом описанных в начале работы дестабилизирующих факторов, влияющих на техническое состояние АТ при особых условиях ее эксплуатации.

Заключение

Таким образом, с использованием КД-моделей в работе были получены аналитические выражения для ПРВ достижения определяющим параметром АТ своего предельно допустимого значения. Данные выражения могут быть использованы для нахождения вероятности безотказной работы узлов и агрегатов АТ на заданном интервале времени. В дальнейшем на основе данных зависимостей могут быть сформированы показатели эффективности функционирования АТ, на которые влияет периодичность проведения ТО, и рассчитаны оптимальные значения периодичности ТО АТ, при которых введенные показатели будут достигать своих экстремальных значений.

Предложенный в статье подход, в отличие от известных методов прогнозирования (например, [7]), не требует доведения значений контролируемых параметров до предельно допустимого значения, т. е. достижения состояния отказа. Напротив, предложенные авторами прогнозные модели временного дрейфа параметров АТ как раз и направлены именно на предотвращение ее отказов, т. е. по своему содержанию носят предупредительный характер. Очевидно, что для разработки прогнозных моделей требуется набор и обобщение статистических данных, но не по числу отказов автомобильной техники, а по значениям контролируемых параметров в различные моменты времени. В качестве таких статистических данных могут быть использованы, например, результаты измерений параметров, проведенных при предыдущих сеансах ТО, и на практике задача по сбору и накоплению такой статистики не представляет значительных трудностей. В качестве необходимых действий для дальнейших исследований по данной тематике следует отметить и апробацию разработанных моделей на практике. Такая задача требует организации и проведения эксперимента по влиянию конкретных условий эксплуатации на определенные типы АТ, набора и анализа статистических данных, выбора соответствующей прогнозной модели временного дрейфа контролируемых параметров, а также проверки ее адекватности.

Литература

1. Лукинский В. С., Зайцев Е. И. Прогнозирование надежности автомобилей. — Л.: Политехника, 1991. — 224 с.
2. Ощепков П. П. Оценка влияния надежности автомобиля КамАЗ на безопасность дорожного движения в условиях Севера: дис. ... канд. техн. наук / ЯГУ им. М. М. Аммосова. — Якутск, 2000. — 147 с.
3. Калявин В. П. Основы теории надежности и диагностики. — СПб.: Элмор, 1998. — 172 с.
4. Вентцель Е. В., Овчаров Л. А. Задачи и упражнения по теории вероятностей. — М.: Высш. шк., 2000. — 366 с.
5. Ситчихина М. В. Разработка моделей и программных средств прогнозирования остаточного ресурса оборудования: дис. ... канд. техн. наук/ Байкальский университет экономики и права. — Иркутск, 2003. — 130 с.
6. Вентцель Е. В. Теория вероятностей. — М.: Высш. шк., 1999. — 576 с.
7. Макарова А. Н. Методика оперативного корректирования нормативов периодичности технического обслуживания с учетом фактических условий эксплуатации автомобилей: дис. ... канд. техн. наук / Тюменский государственный нефтегазовый университет. — Тюмень, 2015. — 216 с.
8. Литвиненко В. Л., Саблина М. А. Оценка и прогнозирование надежности транспортных средств // Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко. 2014. № 151. С. 67.
9. Ионов В. В. Исследование эксплуатационной надежности агрегатов трансмиссии автомобилей КамАЗ // Вестник Северо-Восточного государственного университета. 2013. № 20. С. 82–87.
10. Ефремов Л. В. Проблемы управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией машин. — СПб.: Art-Xpress, 2015. — 206 с.
11. Агеев Е. В., Щербаков А. В., Пикалов С. В. Особые условия технической эксплуатации и экологическая безопасность автомобилей: учеб. пособие. — Курск: Университетская книга, 2015. — 212 с.
12. Bayneva I. I., Baynev V. V. Study and Computer Modeling of Dependability of Technical Objects // Dependability. 2013. N 3. P. 38–54.
13. Trukhanov V. M. Ensuring the Reliability of Mechanical Systems by Means of Control Interventions // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2005. N 3. P. 85.

UDC 621.396

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.58

Predictive Models for Temporal Parameter Drift of Automotive Equipment during its Operation under Special Conditions

Savin L. O.^a, Employee, leonidys77@yandex.ru
 Korolev M. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, korol80@list.ru
 Nosov M. V.^a, PhD, Tech., nosovm@mail.ru

^aAcademy of the Federal Guard Service of the Russian Federation, 35, Priborostroitel'naya St., 302034, Orel, Russian Federation

Introduction: Impact of external environmental factors affects automotive engineering operations. Failures in forecasting and diagnostics significantly reduce the reliability of individual units and the vehicle as a whole, which in turn limits its operational life. Purpose: Depending on the mathematical tools, we analyze the forecasting methods which determine the vehicle condition parameters, and develop predictive models of temporal drift of these parameters for functioning under various conditions. **Results:** Predictive models have been developed for the parameter drift of a vehicle during its operation under special conditions. The special operation conditions are a combination of several adverse natural factors: temperature, dustiness of the air, etc. The novelty of our approach is that the functions describing the temporal changes of the controlled parameters of the vehicle units should be chosen with due regard to the above-mentioned destabilizing factors which influence the technical condition. **Practical relevance:** Predictive models allow you to calculate the moment when the critical parameters of a vehicle achieve their maximum permissible values. The obtained analytical expressions can be used to find the probability of failure-free operation of units and assemblies at a specified interval of time. In the future, these dependencies can be used to form vehicle operating efficiency indicators and calculate the optimal duration for technical inspection period during which these indicators will achieve their extreme values.

Keywords — Special Conditions, Automotive Engineering, Parameter Drift, Predictive Model, Operation of Vehicles, Probability Rates.

References

1. Lukinskii V. S., Zaitsev E. I. *Prognozirovanie nadezhnosti avtomobilei* [Forecasting the Reliability of Cars]. Leningrad, Politekhnik Publ., 1991. 224 p. (In Russian).
2. Oshhepkov P. P. *Otsenka vliianiia nadezhnosti avtomobilia KamAZ na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniia v usloviakh Severa*. Dis. kand. tekhn. nauk [Evaluation of the Impact of Reliability of the Kamaz Vehicle on Road Safety in the North]. PhD tech. sci. diss.]. Yakutsk, Iakutskii gosudarstvennyi universitet imeni M. M. Ammosov Publ., 2000. 147 p. (In Russian).
3. Kaliavin V. P. *Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostiki* [Fundamentals of the Theory of Reliability and Diagnostics]. Saint-Petersburg, Elmor Publ., 1998. 172 p. (In Russian).
4. Ventcel' E. V., Ovcharov L. A. *Zadachi i uprazhneniia po teorii veroiatnostei* [The Problems and Exercises in Probability

- Theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 366 p. (In Russian).
5. Sitchikhina M. V. *Razrabotka modelei i programnykh sredstv prognozirovaniia ostatochnogo resursa oborudovaniia*. Dis. kand. tekhn. nauk [Development of models and software for forecasting the residual life of equipment. PhD tech. sci. diss.]. Irkutsk, Baikal'skii gosudarstvennyi universitet ekonomiki i prava Publ., 2003. 130 p. (In Russian).
 6. Ventcel' E. V. *Teoriya veroyatnostej* [Theory of Probability]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1999. 576 p. (In Russian).
 7. Makarova A. N. *Metodika operativnogo korrektsionirovaniia normativov periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniia s uchetom fakticheskikh uslovii ekspluatatsii avtomobilei*. Dis. kand. tekhn. nauk [Technique of Operative Correction of Norms of Periodicity of Maintenance Service Taking into Account Actual Conditions of Exploitation of Cars. PhD tech. sci. diss.]. Tyumen, Tiimenskii gosudarstvennyi neftegazovyi universitet Publ., 2015. 216 p. (In Russian).
 8. Litvinenko V. L., Sablina M. A. Estimation and Prediction of Vehicle Reliability. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta sel'skogo khoziaistva imeni Petra Vasilenko*, 2014, no. 151, p. 67 (In Russian).
 9. Ionov V. V. Study of the Operational Reliability of KamAZ Vehicles Transmission Units. *Vestnik Severo-Vostochnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 20, pp. 82–87 (In Russian).
 10. Yefremov L. V. *Problemy upravleniia nadezhnostno-orientirovannoi tekhnicheskoi ekspluatatsiei mashin* [Problems of Reliability-Oriented Technical Operation of Machines]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2015. 206 p. (In Russian).
 11. Ageev E. V., Shherbakov A. V., Pikalov S. V. *Osobyie usloviia tekhnicheskoi ekspluatatsii i ekologicheskaiia bezopasnost' avtomobilei* [Special Conditions of Technical Operation and Environmental Safety of Cars]. Kursk, Universitetskaiia kniga Publ., 2015. 212 p. (In Russian).
 12. Bayneva I. I., Baynev V. V. Study and Computer Modeling of Dependability of Technical Objects. *Dependability*, 2013, no. 3, pp. 38–54.
 13. Trukhanov V. M. Ensuring the Reliability of Mechanical Systems by Means of Control Interventions. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2005, no. 3, p. 85.

**Научный журнал
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»
выходит каждые два месяца.**

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4800 рублей, для подписчиков стран СНГ — 5400 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru,

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru,

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru/>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2016 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки ([http://cyberleninka.ru/](http://cyberleninka.ru/journal/n/informatsionno-upravlyayuschiesistemy)

journal/n/informatsionno-upravlyayuschiesistemy).

ПРИМЕНЕНИЕ СТРАТЕГИЙ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Г. Н. Мальцев^а, доктор техн. наук, профессор

Д. А. Лесняк^а, канд. техн. наук, старший преподаватель

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: обеспечение информационной безопасности является важным условием функционирования любой информационной системы, в которой циркулирует критически важная информация. Процесс поддержания состояния информационной безопасности в условиях угроз ее нарушения носит характер конфликтного взаимодействия между средствами защиты и нарушителем. При этом возможны различные стратегии поддержания защищенности информационных систем исходя из характера возможных действий, средств и целей нарушителей. **Цель:** анализ условий применения упреждающей стратегии обеспечения информационной безопасности, основанной на прогнозировании действий нарушителя и принятии упреждающих мер по обеспечению требуемого уровня защищенности системы. **Результаты:** сравнительный анализ стратегий поддержания защищенности информационной системы на основе контроля ее текущего состояния и прогнозирования показал, что обе рассмотренные стратегии имеют свои преимущества и недостатки и должны исходить из характера возможных действий, средств и целей нарушителя, однако стратегия поддержания защищенности на основе прогнозирования изменения уровня защищенности системы, позволяющие обосновать необходимый период управления средствами защиты информации. **Практическая значимость:** использование методики расчета вероятностно-временных характеристик состояния защищенности на основе вероятностного описания конфликтного взаимодействия значительно повышает защищенность информационных систем, реализующих гибкое управление средствами защиты от несанкционированного доступа в процессе их функционирования.

Ключевые слова — информационная безопасность, информационное противоборство, уровень защищенности, стратегия поддержания защищенности.

Введение

Функционирование информационных систем (ИС), в которых циркулирует критически важная информация, неразрывно связано с обеспечением их информационной безопасности (ИБ) и защищенности информационных ресурсов [1, 2]. Проблема поддержания защищенности ИС особенно остро стоит в тех случаях, когда имеет место ее постоянное функционирование в условиях угроз нарушения ИБ. Это имеет место в распределенных ИС: в сетевых телекоммуникационных системах с большим числом точек доступа и неконтролируемыми уязвимостями, а также в радиотехнических системах передачи информации и системах беспроводного доступа вследствие их электромагнитной доступности [3, 4]. Точки доступа и беспроводные каналы передачи информации оказываются наиболее уязвимыми звеньями распределенных ИС, и их защищенность может быть определяющей для ИБ системы в целом.

В рамках принятой классификации угроз ИБ целями действий нарушителя могут быть перехват (кража), уничтожение (прерывание), подмена (модификация или фальсификация) информации [1, 5]. Первичной угрозой ИБ является перехват и связанный с ним несанкционированный

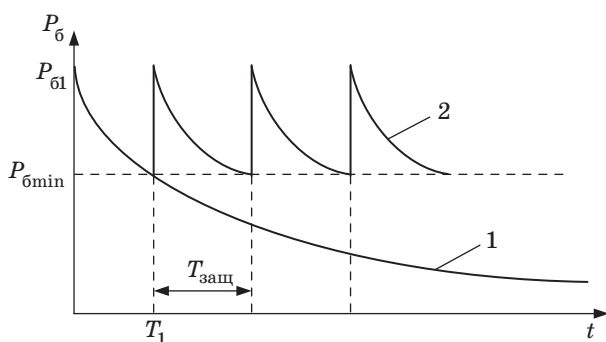
доступ (НСД) нарушителя к информации. НСД, как угроза ИБ, имеет самостоятельное значение, а также является первой фазой реализации других угроз ИБ, в частности, угроз модификации и фальсификации информации.

Как показывает практика, даже при внедрении современных технологий защиты информации не удается обеспечить гарантированную защищенность систем обработки, хранения и передачи критической информации. Это связано с современными достижениями криптоанализа [6], а также с тем, что взаимодействие между средствами защиты и нарушителем носит конфликтный характер информационного противоборства, при котором обе стороны действуют одновременно, совершая те или иные действия с учетом текущей обстановки и действий противоположной стороны, и обладают информированностью о действиях друг друга [7]. В этих условиях возможны различные стратегии поддержания защищенности ИС исходя из характера возможных действий, средств и целей нарушителей. В настоящей статье обосновывается применение упреждающей стратегии обеспечения ИБ, основанной на прогнозировании состояния ИБ с учетом ожидаемых действий и возможностей нарушителя и принятия упреждающих мер по обеспечению требуемого уровня защищенности ИС.

Общий принцип и стратегии поддержания уровня защищенности ИС

В общем случае требуемый уровень защищенности информации обеспечивается созданием и поддержанием в работоспособном состоянии комплекса средств защиты информации (КСЗИ) ИС, включающего как технические, так и организационные методы обеспечения ИБ [2, 3]. Состав КСЗИ определяется исходя из требований к ИБ системы, ожидаемых угроз и целей нарушителей. Взаимодействие между средствами защиты и нарушителем в условиях постоянного действия угроз ИБ и применения средств защиты может быть описано моделями конфликтного взаимодействия [7, 8]. Нападающая сторона — нарушитель — накапливает информацию и постоянно ведет анализ действий защищающей стороны, что объективно приводит к изменению с течением времени среды безопасности, а именно к снижению защищенности ИС. Защищающаяся сторона — средства защиты — для поддержания состояния защищенности ИС с определенной периодичностью контролирует состояние ИБ и при необходимости вносит изменения (настройки) в КСЗИ, соответствующие текущим условиям функционирования. При этом под правильным функционированием средств защиты понимается предотвращение ими реализации нарушителем угроз ИБ.

Принцип поддержания требуемого уровня защищенности ИС в условиях действия угроз ИБ представлен на рис. 1. Он соответствует подходу к анализу ИБ с использованием теории надежности [9, 10]. Кривая 1 соответствует снижению с течением времени t вероятности обеспечения ИБ P_6 без внесения изменений в КСЗИ, кривая 2 соответствует поддержанию вероятности обеспечения ИБ не ниже минимально допустимой $P_{6\min}$ за счет периодического внесения изменений в КСЗИ. Чтобы гарантировать требуемый уровень ИБ, механизм контроля состояния защищенности ИС должен



■ **Рис. 1.** Измерение во времени вероятности обеспечения ИБ в отсутствие и при наличии настройки КСЗИ

функционировать так, чтобы необходимые изменения в КСЗИ проводились через определенный интервал времени $T_{\text{защ}}$, выбираемый исходя из допустимого снижения вероятности обеспечения ИБ при правильном функционировании средств защиты [6].

В случае, когда поддержание уровня защищенности ИС с течением времени не осуществляется, даже при начальном полностью защищенном состоянии системы ($P_6(0) = P_{61} = 1$) через интервал времени T_1 вероятность защищенного состояния системы достигнет минимально допустимого значения $P_{6\min}$ и будет продолжать снижаться на всем жизненном цикле ИС. Характер изменения (снижения) вероятности P_6 от времени t будет определяться темпами ведения нападающей стороной — нарушителем — анализа деятельности защищающейся стороны по поддержанию уровня защищенности ИС.

В случае, когда осуществляется поддержание уровня защищенности ИС с течением времени t , с периодичностью $T_{\text{защ}}$ производится изменение параметров КСЗИ таким образом, чтобы вероятность защищенного состояния системы не опускалась ниже минимально допустимого значения $P_{6\min}$. Полагается, что внесение изменений в КСЗИ соответствует устранению обнаруженных нарушителем уязвимостей и приводит к тому, что система возвращается в полностью защищенное состояние ($P_6(nT_{\text{защ}}) = 1, n = 1, 2, \dots$). Очевидно, что чем меньше интервал времени между изменениями параметров КСЗИ, тем больше гарантий защиты. При этом основной задачей становится определение периода изменения параметров КСЗИ $T_{\text{защ}}$, при котором в любой момент времени t в течение длительности жизненного цикла ИС выполняется условие $P_6(t) < P_{6\min}$.

Рассмотренный принцип поддержания требуемого уровня защищенности ИС предопределяет необходимость учета динамики изменения состояния ее ИБ (текущей среды безопасности) для правильного выбора периодичности управления используемыми в КСЗИ средствами защиты информации $T_{\text{защ}}$.

Для поддержания защищенности ИС на требуемом уровне в условиях изменения среды безопасности должна быть предусмотрена соответствующая стратегия поддержания защищенности [2, 7]. Для ее реализации КСЗИ должен допускать управление своими функциями и характеристиками отдельных средств для настройки под текущую среду безопасности по результатам контроля или прогнозирования состояния защищенности ИС. При этом оценивание действующих угроз и текущего состояния защищенности системы соответствует контролю и анализу текущей среды безопасности, а настройка и внесение изменений в состав КСЗИ соответствуют управ-

лению средствами защиты в целях противодействия действующим угрозам ИБ. Результатом функционирования КСЗИ является защищенное (защита обеспечена) или незащищенное (защита не обеспечена) состояние ИС.

В общем случае контроль и анализ защищенности ИС предполагает мониторинг и оценку текущего состояния защищенности от действующих угроз. Управление КСЗИ по результатам мониторинга и оценки текущего состояния защищенности осуществляется таким образом, чтобы состояние ИБ системы поддерживалось на требуемом уровне. При этом принципиальное значение приобретает возможность оперативно — в реальном времени или с допустимой задержкой — выполнения мониторинга текущего состояния защищенности ИС от действующих угроз. Под допустимой задержкой понимается задержка, соответствующая так называемому критическому сроку жизни информации — интервалу времени, необходимому нарушителю для ее использования в своих целях.

Поскольку любая угроза ИБ реализуется в результате НСД к ИС, контроль ее защищенности наряду с оценкой текущего уровня защищенности должен включать в себя обнаружение воздействий (атак) нарушителей и фактов их НСД. От того, существует ли возможность эффективно оперативно выполнять эти операции соответствующими аппаратными или программными средствами, входящими в состав КСЗИ, зависит стратегия поддержания защищенности ИС. Можно выделить две основные стратегии поддержания защищенности ИС: на основе контроля и на основе прогнозирования ее текущего состояния.

При наличии возможности оперативного обнаружения средствами КСЗИ атак нарушителей и фактов их НСД в ИС реализуется стратегия поддержания защищенности на основе контроля ее текущего состояния. В соответствии с классификацией систем и процессов защиты информации [2, 7] данная стратегия соответствует оперативно-диспетчерскому управлению процессами функционирования систем защиты информации. Она получает широкое распространение в сетевых системах связи и передачи данных, в том числе в радиосетях с интенсивным трафиком и высокой частотой атак нарушителей, направленных на реализацию широкого спектра угроз ИБ. Для этого средствами защиты многоуровневого КСЗИ осуществляются совместный контроль событий безопасности и активности абонентов, мониторинг защищенности сетей доступа и технологических сетей управления предоставлением услуг. В большинстве случаев характер угроз позволяет их обнаружить и локализовать НСД с допустимыми потерями в качестве обслуживания абонентов сети, а накопление статистических данных об

обнаруженных атаках позволяет эффективно им противодействовать при управлении (настройке) КСЗИ [3, 11].

В отсутствие возможности оперативного обнаружения средствами КСЗИ атак нарушителей и фактов их НСД в ИС реализуется стратегия поддержания защищенности на основе прогнозирования ее текущего состояния. В соответствии с классификацией систем и процессов защиты информации [2, 7] по принципу реализации данная стратегия соответствует календарно-плановому управлению процессами функционирования систем защиты информации. Она получает широкое распространение при поддержании защищенности информационно-вычислительных систем от отдельных угроз ИБ, например, при обновлении антивирусной защиты, а также при предотвращении НСД к информации в результате криптоанализа при реализации алгоритмов прямого перебора, временная сложность которых известна [6, 12]. При этом определяемый по результатам прогнозирования защищенности ИС календарный период управления (настройки) КСЗИ на длительных интервалах времени может изменяться при изменении на этих интервалах используемых при прогнозировании исходных данных, например, ожидаемой активности нарушителя.

Обе рассмотренные стратегии поддержания защищенности имеют свои преимущества и недостатки. Достоинством стратегии поддержания защищенности на основе контроля ее текущего состояния является то, что она реализуется как процесс адаптации к реально действующим (обнаруженным) угрозам ИБ, что соответствует непосредственной оценке текущего состояния защищенности ИС. В то же время по своему характеру данная стратегия является оборонительной — она реагирует на обнаружение атак и попыток НСД, а не предотвращает их вообще. Недостатком стратегии поддержания защищенности на основе прогнозирования ее текущего состояния является то, что она реализуется как процесс предотвращения не реальных, а ожидаемых угроз ИБ по результатам прогноза, который, строго говоря, не может быть полностью достоверным. В то же время данная стратегия оказывается единственно возможной при поддержании защищенности критически важных ИС. По своему характеру данная стратегия является упреждающей и направлена на недопущение реализации угроз ИБ.

Существует ряд ИС, в которых возможности использования стратегии поддержания защищенности на основе контроля ее текущего состояния ограничены. Это обусловлено следующими причинами. Во-первых, высокой ценой риска реализации угроз НСД, который может привести к серьезным последствиям и значительному

ущербу в критически важных сферах деятельности. Во-вторых, требованиями обеспечить количественные характеристики защищенности на высоком уровне, достижение которого может быть проверено только аналитическими методами. В таких ИС необходимо использовать стратегию поддержания защищенности на основе прогнозирования ее текущего состояния. При этом на основе математических моделей изменения условий функционирования ИС могут быть рассчитаны вероятностно-временные характеристики состояния защищенности и на их основе определены интервалы времени, в течение которых обеспечивается требуемый (заданный) уровень защищенности ИС.

Вероятностно-временные характеристики состояния защищенности ИС при управлении параметрами средств защиты на основе ее прогнозирования

Вероятностные модели являются одним из основных видов моделей конфликтного взаимодействия и применимы к широкому классу ИС [5, 6]. Они позволяют описать изменения состояния противоборства конфликтующих сторон при заданных функциях плотности распределения вероятностей их действий, направленных на достижение превосходства, без наложения существенных ограничений на вид этих распределений. Если параметрами распределений являются средние времена обеспечения защиты и реализации угроз, то вероятностные модели позволяют определить соотношение между этими параметрами, при которых достигается требуемый уровень результативности действий сторон защиты и нападения [9], в рассматриваемом случае — результативность применения КСЗИ.

Вероятностное описание процесса конфликтного взаимодействия сторон защиты и нападения осуществляется с использованием функций распределения вероятностей случайных моментов времени применения средств защиты и реализации угроз нападения [13, 14]. Выигрыш той или иной стороны на некотором интервале времени длительностью T заключается в реализации своего варианта действий раньше, чем будет реализован соответствующий вариант действий противоположной стороны. Для заданных плотностей вероятности случайных моментов времени применения средств защиты $\varphi_{защ}(t)$ и реализации угроз нападения $\varphi_{нап}(t)$ вероятности пребывания в состоянии выигрыша на интервале времени $[0, T]$ стороны нападения $P_{нап}(T)$ и стороны защиты $P_{защ}(T)$ определяются следующими выражениями:

$$P_{нап}(T) = \int_0^T \varphi_{нап}(\tau) \left(1 - \int_0^\tau \varphi_{защ}(t) dt \right) d\tau; \quad (1)$$

$$P_{защ}(T) = \int_0^T \varphi_{защ}(\tau) \left(1 - \int_0^\tau \varphi_{нап}(t) dt \right) d\tau. \quad (2)$$

Определение вероятности успешного преодоления средств защиты $P_{нап}(T)$ и недопущения преодоления средств защиты $P_{защ}(T)$ в соответствии с выражениями (1) и (2) формализовано для интервала времени длительностью T с началом действий в момент времени $t = 0$ и некоторых фиксированных на данном интервале плотностей вероятности случайных моментов применения средств защиты $\varphi_{защ}(t)$ и реализации угроз нападения $\varphi_{нап}(t)$. Для любого значения T выполняется $P_{нап}(T) + P_{защ}(T) = 1$.

Если полагать, что в случае реализации угрозы осуществляется доступ к защищаемому ресурсу, а в случае обеспечения защиты доступ исключается, то рассматриваемый случай сводится к описанию реализации одиночной угрозы и одиночного применения средств защиты. Конфликтное противоборство складывается из многократных попыток реализации угроз и постоянного применения средств защиты на последовательности временных интервалов T_1, T_2, \dots . Для описания общего случая реализации угроз в условиях применения средств защиты выражение (1) последовательно применяется к интервалам времени T_1, T_2, \dots . Для каждого интервала времени задаются плотности вероятности $\varphi_{защ}(t)$ и $\varphi_{нап}(t)$, а при расчете вероятностей $P_{нап}(T)$ и $P_{защ}(T)$ в соответствии с выражениями (1) и (2) полагается, что началу каждого интервала времени соответствует $t = 0$.

Для анализа условий реализации угроз нападения осуществляется переход от вероятности успешного преодоления средств защиты $P_{нап}(T)$ на интервале времени $[0, T]$ к вероятности НСД нарушителя $P_{НСД}(t)$ в текущий момент времени t . В наихудшем с точки зрения нарушителя случае при очередном применении средств защиты происходит полное обновление параметров системы защиты анализируемых ресурсов. Тогда результаты мониторинга ИС, накопленные нарушителем на интервале времени длительностью $t_{защ\ i}$, в течение которого применялся i -й набор параметров системы защиты, при смене набора параметров системы защиты становятся устаревшими и неинформативными и, начиная с момента времени $t = \sum_{i=0}^n t_{защ\ i}$, $n = 1, 2, \dots$, нарушителю нуж-

но начинать мониторинг сначала. Чем больше интервал времени $t_{защ\ i}$, в течение которого применяется i -й набор параметров системы защиты, тем больших значений достигает на этом интервале вероятность $P_{НСД}(t)$.

В общем случае длительность случайных интервалов времени применения изменяемых пара-

метров системы защиты $t_{защ i}$ описывается плотностью распределения вероятностей применения средств защиты $\varphi_{защ}(t)$. При фиксированном периоде применения средств защиты $t_{защ i} = T_{защ}$ и $\varphi_{защ}(t) = \delta(t - T_{защ})$. При принятых допущениях переход от вероятности $P_{нап}(T)$ к вероятности $P_{НСД}(t)$ осуществляется следующим образом. Исходной является полученная в результате описания процесса НСД нарушителя к ИС, как конфликтного взаимодействия, функциональная зависимость от аргумента T вероятности реализации угрозы $P_{нап}(T)$. Вероятность НСД нарушителя $P_{НСД}(t)$ в текущий момент времени t в общем случае определяется зависимостью $P_{нап}(T)$ с заменой аргумента T на аргумент $t - \sum_{i=0}^n t_{защ i}$:

$$P_{НСД}(t) = P_{нап}\left(t - \sum_{i=0}^n t_{защ i}\right),$$

$$\sum_{i=0}^n t_{защ i} \leq t \leq \sum_{i=0}^{n+1} t_{защ i}, n=1, 2, \dots \quad (3)$$

Для перехода от зависимости $P_{нап}(T)$ к зависимости $P_{НСД}(t)$ необходимо задание моментов времени $t_{защ i}$, $i = 1, 2, \dots$. В общем случае получаем:

$$P_{НСД}(t) = P_{нап}(t) \text{ при } 0 \leq t \leq t_{защ1};$$

$$P_{НСД}(t) = P_{нап}(t - t_{защ1}) \text{ при } t_{защ1} \leq t \leq t_{защ1} + t_{защ2};$$

$$P_{НСД}(t) = P_{нап}(t - t_{защ1} - t_{защ2})$$

при $t_{защ1} + t_{защ2} \leq t \leq t_{защ1} + t_{защ2} + t_{защ3}$ и т. д.

При фиксированном периоде $T_{защ}$ смены параметров системы защиты вероятность НСД нарушителя $P_{НСД}(t)$ в текущий момент времени t определяется зависимостью $P_{нап}(T)$ с заменой аргумента T на аргумент $(t - nT_{защ})$:

$$P_{НСД}(t) = P_{нап}(t - nT_{защ})$$

при $nT_{защ} \leq t \leq (n + 1)T_{защ}$, $n = 1, 2, \dots$.

В данном случае $t_{защ i} = T_{защ}$, $i = 1, 2, \dots$, и для перехода от зависимости $P_{нап}(t)$ к зависимости $P_{НСД}(t)$ необходимо задание величины $T_{защ}$. В результате получаем

$$P_{НСД}(t) = P_{нап}(t) \text{ при } 0 \leq t \leq T_{защ};$$

$$P_{НСД}(t) = P_{нап}(t - T_{защ}) \text{ при } T_{защ} \leq t \leq 2T_{защ};$$

$$P_{НСД}(t) = P_{нап}(t - 2T_{защ}) \text{ при } 2T_{защ} \leq t \leq 3T_{защ} \text{ и т. д.}$$

На основе выражений (1) и (3) проведены расчеты вероятности НСД нарушителя $P_{НСД}(t)$ для различных соотношений между постоянными времени применения средств защиты $T_{защ}$ и ре-

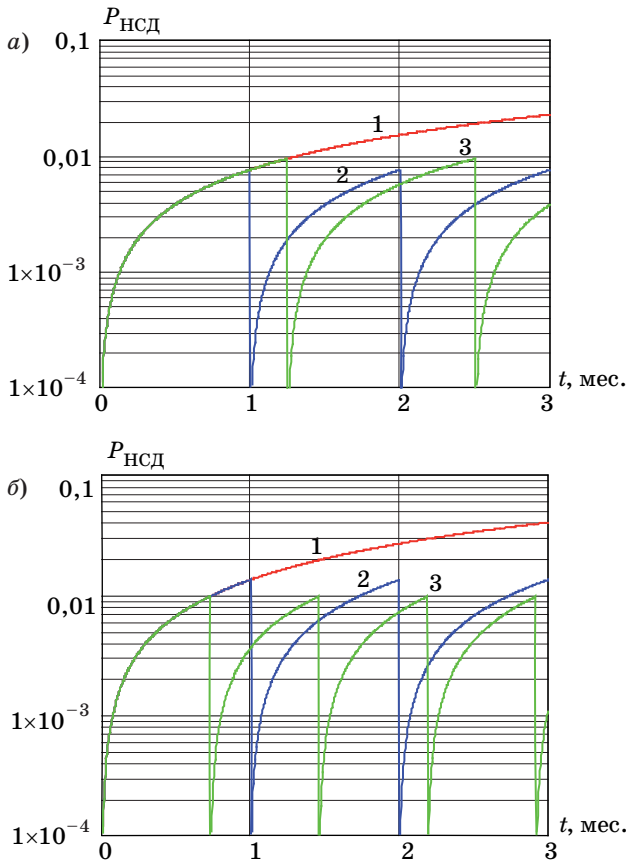
ализации угроз нападения $T_{нап}$. Действия стороны нападения характеризовались экспоненциальным законом распределения вероятностей случайных моментов времени реализации угроз

$$\text{нападения } \varphi_{нап}(t) = \frac{1}{T_{нап}} \exp\left(-\frac{t}{T_{нап}}\right), \text{ действия}$$

стороны защиты — законом распределения вероятностей применения средств защиты типа δ -функции $\varphi_{защ}(t) = \delta(t - T_{защ})$, что соответствует календарному принципу смены параметров КСЗИ.

В качестве примера рассматривался КСЗИ с типичным директивно установленным периодом управления параметрами (смены параметров) $T_{защ} = 1$ мес. Полагалось, что нарушитель предпринимает попытки по преодолению КСЗИ с постоянной времени реализации угроз нападения $T_{нап}$, изменяющейся в зависимости от обстановки, в которой ведется информационное противоборство. Задавалось $T_{нап} = 10$ лет для нормальной обстановки и $T_{нап} = 6$ лет для обстановки обострения информационного противоборства. Во втором случае имеет место активизация действий нарушителя, и за счет качественного и количественного увеличения привлекаемых им средств для анализа действий защищаемой стороны, преодоления защиты и доступа к защищаемым ресурсам величина $T_{нап}$ уменьшается.

В качестве приемлемого уровня защищенности, который должен обеспечивать КСЗИ в любой момент времени, рассматривалась вероятность НСД нарушителя $P_{НСД} = 10^{-2}$. Проведенные расчеты показали, что при выбранных исходных данных требуемый уровень защищенности обеспечивается при $T_{защ} = 37$ сут в нормальной обстановке и $T_{защ} = 22$ сут в обстановке обострения информационного противоборства. Таким образом, период управления параметрами КСЗИ $T_{защ} = 1$ мес. в первом случае гарантированно обеспечивает требуемый уровень защищенности, а во втором случае является недостаточным. Отметим, что на практике приемлемый уровень вероятности НСД нарушителя $P_{НСД}$ может изменяться в широких пределах в зависимости от типа ИС, характера угроз и защищаемых информационных ресурсов. Так, допустимая вероятность вскрытия ключей шифрования в системах криптографической защиты информации может составлять очень малые величины. Допустимый уровень вероятности НСД нарушителя $P_{НСД} = 10^{-2}$ выбран для примера, демонстрирующего степень защищенности при рассмотренном соотношении между величинами $T_{защ}$ и $T_{нап}$ — ежемесячная смена параметров КСЗИ при случайном характере реализации угроз нападения с постоянной времени в несколько лет.



■ **Рис. 2.** Зависимость вероятности НСД от времени в нормальной обстановке (а) и в обстановке обострения информационного противоборства (б)

На рис. 2, а и б представлены зависимости вероятности НСД нарушителя к ИС от времени $P_{НСД}(t)$ для рассмотренных случаев функционирования КСЗИ с календарной сменой параметров в различные периоды действия нарушителя, совершающего попытки преодоления КСЗИ и реализации НСД к ИС.

На рис. 2, а представлены расчетные зависимости $P_{НСД}(t)$ в нормальной обстановке при $T_{нап} = 10$ лет. Кривая 1 соответствует использованию одних и тех же параметров КСЗИ, кривая 2 — смене параметров КСЗИ с периодом $T_{защ0} = 1$ мес. (30 сут), кривая 3 — смене параметров КСЗИ с периодом $T_{защ1} = 1,23$ мес. (37 сут). На рис. 2, б представлены расчетные зависимости $P_{НСД}(t)$ в обстановке обострения информационного противоборства при $T_{нап} = 6$ лет. Кривая 1 соответствует использованию одних и тех же параметров КСЗИ, кривая 2 — смене параметров КСЗИ с периодом $T_{защ0} = 1$ мес. (30 сут), кривая 3 — смене параметров КСЗИ с периодом $T_{защ1} = 0,73$ мес. (22 сут). На обоих рисунках момент времени $t = 0$ соответствует началу жизненного цикла ИС или очередному обновлению параметров ее КСЗИ.

Практический интерес представляет выигрыш в ИБ, который имеет место в тех случаях, когда с учетом текущего состояния защищенности ИС требуется более частый контроль и внесение изменений в КСЗИ, чем с периодичностью, определяемой директивно. Если задаваемый по календарному принципу период обновления параметров КСЗИ составляет $T_{защ0}$, а период обновления параметров КСЗИ, требуемый с учетом текущего уровня защищенности ИС, составляет $T_{защ1}$, то выигрыш в ИБ имеет место при $T_{защ0} > T_{защ1}$ и составляет

$$B = \begin{cases} (T_{защ0} - T_{защ1}) / T_{защ0}, & T_{защ0} > T_{защ1}; \\ 0, & T_{защ0} \leq T_{защ1}. \end{cases} \quad (4)$$

Величина выигрыша в информационной безопасности B , определяемая выражением (4), есть доля времени, в течение которого при управлении параметрами КСЗИ по календарному принципу с периодом $T_{защ0}$ вероятность НСД нарушителя к ИС выше требуемого уровня. Эта величина изменяется от 0 до 1 и может быть выражена в процентах. В рассмотренном примере в нормальной обстановке ежемесячное обновление параметров КСЗИ обеспечивает поддержание требуемого уровня вероятности НСД нарушителя, а в обстановке обострения информационного противоборства за счет более частого управления параметрами КСЗИ с учетом текущего состояния защищенности ИС обеспечивается выигрыш $B = 0,27$ — при обновлении параметров КСЗИ без учета текущего состояния защищенности ИС вероятность НСД нарушителя оказывается выше требуемого уровня в течение 27 % времени.

Предельные значения величины B соответствуют выполнению требований по ИБ при управлении параметрами КСЗИ по календарному принципу ($B = 0$ при $T_{защ0} \leq T_{защ1}$) и значительному превышению периода управления параметрами КСЗИ по сравнению с требуемым периодом управления с учетом текущего уровня защищенности ИС ($B \rightarrow 1$ при $T_{защ0} \gg T_{защ1}$). Если в течение жизненного цикла ИС управление параметрами КСЗИ не предусматривается, то в качестве $T_{защ0}$ необходимо рассматривать длительность всего жизненного цикла.

При $T_{защ0} < T_{защ1}$ положительный эффект при управлении параметрами КСЗИ с учетом текущего состояния защищенности ИС может состоять в возможности увеличения в $T_{защ1}/T_{защ0}$ раз периода обновления параметров КСЗИ при сохранении требуемого уровня ИБ. В рассмотренном примере в нормальной обстановке приемлемый уровень защищенности, характеризуемый требуемой вероятностью НСД нарушителя, сохраняется при увеличении периода обновления параметров КСЗИ в 1,23 раза. При управлении пара-

метрами аппаратуры криптозащиты увеличение допустимого периода обновления параметров позволяет более «экономно» использовать ключи, не отнесенные в результате предшествующего криптоанализа к «слабым» [6, 12].

Заключение

В условиях информационного противоборства планирование применения определенной стратегии поддержания защищенности ИС должно исходить из характера возможных действий, средств и целей нарушителя и предусматривать управление механизмами защиты, гарантирующее требуемый уровень защищенности. Это достигается выбором стратегии обеспечения ИБ. Рассмотренные стратегии обеспечения ИБ в ус-

ловиях изменяющейся обстановки (среды безопасности) предполагают контроль и анализ защищенности ИС на основе мониторинга и оценки текущего состояния защищенности от действующих угроз. Управление КСЗИ по результатам мониторинга и оценки текущего состояния защищенности осуществляется таким образом, чтобы состояние ее ИБ системы поддерживалось на требуемом уровне. Рассмотренный принцип поддержания защищенности ИС с использованием упреждающей стратегии обеспечения ИБ на основе прогнозирования ее текущего состояния может быть рекомендован для использования в КСЗИ широкого класса ИС, к которым предъявляются директивные требования по обеспечению заданного уровня защищенности в процессе их функционирования.

Литература

1. Устинов Г. Н. Основы информационной безопасности систем и сетей передачи данных. — М.: СИНТЕГ, 2000. — 248 с.
2. Малюк А. А. Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации. — М.: Горячая линия-Телеком, 2004. — 280 с.
3. Романец Ю. В., Тимофеев П. А., Шаньгин В. Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. — М.: Радио и связь, 2001. — 376 с.
4. Щербаков В. Б., Ермаков С. А. Безопасность беспроводных сетей: стандарт IEEE 802.11. — М.: РадиоСофт, 2010. — 256 с.
5. Столлинс В. Криптография и защита сетей: принципы и практика: пер. с англ. — М.: Вильямс, 2001. — 672 с.
6. Ростовцев А. Г., Маховенко Е. Б. Теоретическая криптография. — СПб.: Профессионал, 2003. — 479 с.
7. Гаценко О. Ю. Защита информации. Основы организационного управления. — СПб.: Сентябрь, 2001. — 228 с.
8. Владимиров В. И., Лихачев В. П., Шляхин В. М. Антагонистический конфликт радиоэлектронных систем. Методы и математические модели. — М.: Радиотехника, 2004. — 384 с.
9. Шахов В. Г., Елизарова Ю. М. Анализ и расчет информационной безопасности. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. — 136 с.
10. Радько Н. М., Скобелев И. О. Риск-модели информационно-телекоммуникационных систем при реализации угроз удаленного и непосредственного доступа. — М.: РадиоСофт, 2010. — 232 с.
11. Зима В. М., Молдовян А. А., Молдовян Н. А. Безопасность глобальных сетевых технологий. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. — 368 с.
12. Корниенко А. А., Еремеев М. А., Адагуров С. Е. Средства защиты информации на железнодорожном транспорте. (Криптографические методы и средства). — М.: Маршрут, 2006. — 256 с.
13. Мальцев Г. Н., Панкратов А. В., Лесняк Д. А. Исследование вероятностных характеристик изменения защищенности информационной системы от несанкционированного доступа нарушителей // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 50–59. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.50
14. Мальцев Г. Н., Панкратов А. В. Вероятностное описание возможностей доступа к защищенным ресурсам с использованием средств инженерного анализа // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2015. № 2. С. 37–46.

UDC 681.3.067

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.67

Security Maintenance Strategies in Information Systems

Maltsev G. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, georgy_maltsev@mail.ru

Lesnyak D. A.^a, PhD, Tech., Lecturer, denislesnyk@mail.ru

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Ensuring information security is an important functioning condition in any information system where crucial information circulates. The process of maintaining information security under threats of its violation looks like a conflict interaction between the means of protection and a violator. Security maintenance can follow various strategies, proceeding from the nature of

possible actions, tools and purposes of the violators. **Purpose:** We analyze the conditions of using an anticipatory strategy of information security maintenance based on predicting the violator's actions and taking preventive measures to ensure the required level of system security. **Results:** Comparative analysis of information system security maintenance strategies on the basis of monitoring or prediction has shown that both the considered strategies have their own advantages and disadvantages and must take into account the possible actions, tools and purposes of the violator. However, the strategy based on prediction of the system state is the only possible one to maintain the security of crucial information systems. The probabilistic and temporal characteristics of the security condition have been studied for the case of implementing the anticipatory strategy when the parameters of the protection tools vary on the basis of predicting the changes in the system security level. This allows you to substantiate the necessary period of control over the information protection tools. **Practical relevance:** Calculating the probabilistic and temporal characteristics of the security condition on the basis of a probabilistic description of the conflict interaction considerably improves the security of information systems with flexible control over their protection tools.

Keywords — Information Security, Informational Antagonism, Security Level, Security Maintenance Strategy.

References

1. Ustinov G. N. *Osnovy informatsionnoi bezopasnosti sistem i setei peredachi dannykh* [Bases of Information Security of Systems and Data Transmission Networks]. Moscow, SINTEG Publ., 2000. 248 p. (In Russian).
2. Maliuk A. A. *Informatsionnaia bezopasnost': kontseptual'nye i metodologicheskie osnovy zashchity informatsii* [Information Security: Conceptual and Methodological Bases of Information Security]. Moscow, Goriachaia liniia-Telecom Publ., 2004. 280 p. (In Russian).
3. Romanets Iu. V., Timofeev P. A., Shan'gin V. F. *Zashchita informatsii v komp'iuternykh sistemakh i setiakh* [Information Security in Computer Systems and Networks]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2001. 376 p. (In Russian).
4. Shherbakov V. B., Ermakov S. A. *Bezopasnost' besprovodnykh setei: standart IEEE 802.11* [Safety of Wireless Networks]. Moscow, RadioSoft Publ., 2010. 256 p. (In Russian).
5. Stallings W. *Cryptography and Network Security Principles and Practices*. New Jersey, Prentice Hall, 2000. 592 p.
6. Rostovtsev A. G., Makhovenko E. B. *Teoreticheskaiia kriptografiia* [Theoretical Cryptography]. Saint-Petersburg, Professional Publ., 2003. 479 p. (In Russian).
7. Gatsenko O. Iu. *Zashchita informatsii. Osnovy organizatsionnogo upravleniia* [Information security. Basics of Organizational Management]. Saint-Petersburg, Sentiabr' Publ., 2001. 228 p. (In Russian).
8. Vladimirov V. I., Likhachev V. P., Shliakhin V. M. *Antagonisticheskii konflikt radioelektronnykh sistem. Metody i matematicheskie modeli* [Antagonisticheskyy Conflict of RadioElectronic Systems. Methods and Mathematical Models]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 384 p. (In Russian).
9. Shahov V. G., Elizarova Ju. M. *Analiz i raschet informatsionnoi bezopasnosti* [Analysis and Calculation of Informational Safety]. Omsk, OmGTU Publ., 2010. 136 p. (In Russian).
10. Rad'ko N. M., Skobelev I. O. *Risk-modeli informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem pri realizatsii ugroz udalennogo i neposredstvennogo dostupa* [Risk-Models of Information and Telecommunication Systems at Realization of Threats of Remote and Direct Access]. Moscow, RadioSoft Publ., 2010. 232 p. (In Russian).
11. Zima V. M., Moldovjan A. A., Moldvjan N. A. *Bezopasnost' global'nykh setevykh tekhnologii* [Safety of Global Network Technologies]. Saint-Petersburg, SPbGU Publ., 1999. 368 p. (In Russian).
12. Korniyenko A. A., Yeremeyev M. A., Adadurov S. E. *Sredstva zashchity informatsii na zheleznoorozhnom transporte. (Kriptograficheskie metody i sredstva)* [Information Means of Protection on Railway Transport: Cryptographic Methods and Means]. Moscow, Marshrut Publ., 2006. 256 p. (In Russian).
13. Maltsev G. N., Pankratov A. V., Lesnyak D. A. Probabilistic Characteristics of Information System Security Changes under Unauthorized Access. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 1, pp. 50–59 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.50
14. Maltsev G. N., Pankratov A. V. The Probability Description of Opportunities of Access to the Protected Resources with use of Means of the Engineering Analysis. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'iuternye sistemy*, 2015, no. 2, pp. 37–46 (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста: входите на страницу <http://www.researcherid.com>, слева под надписью «New to ResearcherID?» нажимаете на синюю кнопку «Join Now It's Free» и заполняете короткую анкету. По указанному электронному адресу получаете сообщение с предложением по ссылке заполнить полную регистрационную форму на ORCID. Получаете ID.

ОБЗОР ПЕРЕДАЧИ И ОЦЕНОК КАЧЕСТВА ВОСПРИЯТИЯ ВИДЕОДАНЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ АДАПТИВНОЙ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕО ПО ПРОТОКОЛУ HTTP

И. А. Пастушок^{а, 1}, ассистент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Введение: рост числа обслуживаемых устройств и объемов видеотрафика в современных телекоммуникационных системах приводит к необходимости адаптации существующих сетей для передачи видеоданных. Наибольший объем видеоданных передается с использованием технологии Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH) по протоколу прикладного уровня HTTP. **Цель:** обзор технологий передачи видеоданных по протоколу HTTP и оценок качества восприятия видеоданных в целях подбора методики оценки качества восприятия видео в зависимости от объема доступных объективных показателей обслуживания. **Результаты:** проведен обзор технологии передачи видео по протоколу HTTP и на его основе описана трехкомпонентная модель передачи видеоданных при использовании DASH, включающая в себя модели видеоконтент-сервера, сети передачи информации и пользовательского устройства. Обзор показал, что технология DASH приводит к незначительному увеличению нагрузки на сеть по сравнению с другими технологиями. Однако данная технология инвариантна к сети передачи информации. Инвариантность обеспечивается использованием протокола HTTP в сочетании с протоколом транспортного уровня TCP. Технология DASH передачи видео уменьшает нагрузку на сеть за счет хранения видео в различных наборах качества на видеоконтент-сервере, позволяющая пользовательскому устройству выбрать характеристики видео для конкретных условий в сети передачи информации. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют разработчику приложений для передачи видеоданных принимать решение о целесообразности использования технологии DASH по конкретным требованиям к системе передачи видео, разработчику телекоммуникационных систем — проводить оценки качества восприятия видеопотока на различных узлах сети, на основе которых возможно сформировать управление для увеличения производительности сети при передаче видеоданных.

Ключевые слова — передача видео по HTTP-протоколу, DASH, HPD, HAS, оценка качества обслуживания.

Введение

В настоящий момент происходит бурное развитие систем сотовой мобильной связи. Данное явление вызвано как увеличением числа абонентов в сети, так и ростом популярности мобильных сервисов, в особенности доставки видео по запросу, занимающего более 55 % объема всего мобильного трафика, большая часть которого передается с использованием протокола HyperText Transfer Protocol (HTTP) [1]. Подобное распределение трафика между мобильными сервисами и его постоянный рост приводят к необходимости оптимизации существующих систем передачи информации для передачи именно видеоконтента.

При оптимизации передачи видеоданных важно определить ключевые показатели производительности, при которых пользователь будет удовлетворен обслуживанием, а также критерии, описывающие качество восприятия воспроизведе-

дения загруженного видео. Однако оценка качества восприятия видео является нетривиальной задачей ввиду субъективного восприятия проигрывания пользователем. Отличительной особенностью видео от других видов контента в сети Интернет является зависимость оценки качества передачи от характеристик воспроизводящего устройства. Общепринятым критерием качества восприятия является Mean Opinion Score (MOS), который может быть получен на основе опроса группы пользователей [2], что критично замедляет получение результата.

В данной работе рассматривается специфика передачи видеоконтента по протоколу HTTP в современных телекоммуникационных сетях. Описывается структура системы передачи видеоданных и формат ее представления видеопоследовательности при передаче с использованием технологии DASH. Проводится обзор реализаций программных комплексов, обеспечивающих загрузку видео на клиентском устройстве, методик, позволяющих оценить качество восприятия видеоданных исходя из доступных характеристик воспроизведения видео. Демонстрируется влияние объективных характеристик сети передачи информации на качество восприятия видео.

¹ Научный руководитель — доктор технических наук, заведующий кафедрой инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения А. М. Тюрликов.

Структура систем передачи видеоданных по технологии DASH

В настоящее время существует множество технологий передачи видеоданных через телекоммуникационные сети. Наибольшее распространение получили технологии на основе протокола прикладного уровня HTTP: Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH), включающую в себя технологии Progressive Download (HPD) и HTTP Adaptive Streaming (HAS) [1]. Изначально технологии передачи видеоданных через протокол HTTP была стандартизирована Международной электротехнической комиссией (ISO/IEC) в 2012 г. [3], в настоящее время представлена в спецификации консорциума, разрабатывающего решения для беспроводной связи, 3GPP (3rd Generation Partnership Project) [4].

Система передачи видеоданных при использовании технологии DASH состоит из трех основных компонентов (рис. 1): системы видеоконтент-серверов (ВКС), пользовательских устройств и сети передачи информации. Рассмотрим особенности данных компонентов. Программный модуль ВКС обеспечивает хранение, представление и доставку видеоданных с использованием протоколов HyperText Transfer Protocol, HyperText Transfer Protocol Secure или Transport Layer Security. На пользовательском устройстве установлен программный комплекс — видеоплеер, который организует управление загрузкой видеоданных с ВКС путем формирования последовательности запросов на видеоданные. Видеоплеер устанавливает соединение с ВКС и отправляет на него запросы по протоколу HTTP. Важно отметить, что передача информации в технологии DASH происходит с использованием протокола гарантированной доставки данных Transmission Control Protocol (TCP), что приводит к невозможности потери данных при их прохождении через сеть передачи информации.

В технологии DASH к сети передачи информации предъявляется только требование обеспечения корректной работы протокола HTTP и всех нижележащих уровней модели OSI. Таким образом, в соответствии со стандартом DASH [4] в настоящей работе сеть передачи информации представляется в виде «черного ящика» с некоторыми характеристиками, обладающего произвольной структурой, построенного на любом физическом принципе и обеспечивающего корректную работу протокола HTTP.

Такие требования к сети передачи информации и сетевым протоколам обеспечили стандарт DASH широкое распространение в сети Интернет. Важным достоинством данной технологии является возможность ее использования без дополнительного программного обеспечения — необходим только браузер. Недостатком технологии передачи видео по протоколу HTTP является повышенный уровень избыточности при передаче информации из-за протокола TCP, который реализует квитирование сообщений.

При прохождении видеоданных через сеть на пользовательское устройство происходит задержка. Это приводит к появлению негативных эффектов воспроизведения: длительному времени ожидания начала проигрывания, остановке воспроизведения ввиду недостатка загруженных данных и, как следствие, уменьшению удовлетворенности пользователя просмотром.

Организация передачи видео посредством технологии DASH

В стандарте DASH для передачи видеоданных был разработан специальный формат хранения видеопоследовательности. Вся исходная последовательность видео разбивается на интервалы равной длины, называемые сегментами, и проводится их сквозная нумерация. Каждый сегмент характеризуется тремя значениями: идентифи-



■ **Рис. 1.** Структура системы передачи видеоданных на основе стандарта DASH: MPD — формат Media Presentation Description

катором видео, порядковым номером и репрезентацией.

Репрезентация является общепринятой характеристикой видеоданных в технологии DASH, описывающая взаимосвязь между битовой скоростью, рекомендованным разрешением и частотой кадров. Под битовой скоростью понимается количество бит, затрачиваемое на хранение контента в одну единицу времени (Bitrate). Рекомендованное разрешение — размер экрана, заполняемый при воспроизведении потока. Единицей измерения разрешения потока является прогрессивная развертка (p), например, экран высокого разрешения (High Definition) обозначается 720p, что соответствует 720 точкам (пикселям) по вертикали. Такая нотация основана на стандартном соотношении сторон экрана 16:9, следовательно, значение по вертикали задает и значение по горизонтали, для примера, представленного выше, разрешение составляет 1280×720 пикселей. Сервисом YouTube, основанным на стандарте DASH, представлены рекомендации по взаимосвязи параметров репрезентации для стационарных и мобильных устройств (табл. 1) [5, 6].

Из анализа представленной таблицы следует, что при увеличении разрешения репрезентации на одну позицию битовая скорость возрастает примерно в два раза; для мобильных устройств

битовая скорость ниже, чем для стационарных. Последний факт вызван разницей между размерами экранов мобильных и стационарных устройств.

Формат MPD, описывающий каждый сегмент последовательности: идентификатор, длительность и репрезентацию, — был разработан для описания всей имеющейся информации о последовательности [4]. Файл данного формата загружается на видеоплеер перед началом загрузки видео, и на основе информации, записанной в нем, видеоплеер будет осуществлять загрузку видеопоследовательности.

Важным фактором при передаче видеоконтента по технологии DASH является программный комплекс на стороне клиента — видеоплеер. Тип используемого плеера сильно влияет на работу системы передачи видеоданных в целом, так как каждая возможная реализация определяет характеристики трафика, проходящего через сеть передачи данных, а его реакция на характеристики сети непосредственно отражается на степени удовлетворенности сервисом. Таким образом, для оценки качества передачи видео необходимо провести анализ существующих реализаций видеоплееров.

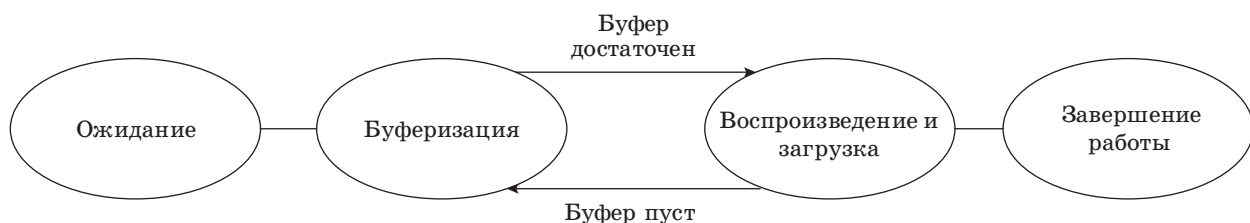
В настоящее время каждый сервис доставки видеоконтента использует собственную реализацию видеоплеера, что затрудняет выработку обобщенной модели. Однако всевозможные плееры описываются конечным автоматом (рис. 2).

В начальный момент он находится в состоянии *Ожидание* начала загрузки (ожидание команды начала загрузки от пользователя). После получения команды от пользователя о начале загрузки будет установлено соединение с ВКС, отправлен запрос на первый сегмент видеоданных и осуществлен переход в состояние *Буферизация*. В данном состоянии не происходит демонстрация видео, производится накопление данных. После накопления достаточной длительности последовательности видеоплеер перейдет в состояние *Воспроизведение и загрузка*.

В состоянии *Воспроизведение и загрузка* происходит одновременная демонстрация видео (опустошение буфера) и загрузка данных (наполнение буфера). Если ввиду состояния сети пере-

■ Таблица 1. Рекомендуемые сервисом YouTube характеристики битовой репрезентации

Прогрессивная развертка	Битовая скорость видео, Мбит/с		
	Стандартная частота кадров (24, 25, 30)	Высокая частота кадров (48, 50, 60)	Видео для мобильных устройств
2160p (4K)	35–45	53–68	13,5
1440p (2K)	16	24	6
1080p	8	12	3
720p	5	7,5	1,5
480p	2,5	4	0,7
360p	1	1,5	0,45
240p	–	–	0,25



■ Рис. 2. Конечный автомат видеоплеера

дачи информации скорость опустошения буфера превышает наполнение, то в некоторый момент времени в буфере не найдется данных для осуществления воспроизведения. Данное событие называется опустошение буфера (Rebuffering), и при его наступлении плеер переходит в состояние *Буферизация*, где будет находиться до накопления достаточного объема данных для продолжения проигрывания. После окончания загрузки плеер закрывает соединение с ВКС и переходит в состояние *Завершение работы*, в котором ожидается окончание просмотра пользователем видео.

Описанный конечный автомат задает основную модель трафика в сети при просмотре видео. Пользователь просматривает последовательность видеороликов с паузами между ними, как следствие, на сетевом уровне фиксируется чередование периодов высокой и низкой активности пользователя.

Отличия разных видеоплееров заключены только в состоянии *Воспроизведение и загрузка*, где в зависимости от правил формирования запросов на сегменты видео будет формироваться уникальная модель генерируемого трафика.

Всевозможные плееры, использующие технологию DASH, разделены на два множества — HPD и HAS. Основным отличием является проведение адаптации репрезентации видеоряда под условия канала передачи информации: плееры группы HPD не осуществляют адаптацию, поэтому далее в работе они будут называться *неадаптивными*, плееры группы HAS, осуществляющие адаптацию, будут называться *адаптивными*.

Первыми будут рассмотрены неадаптивные плееры. Несмотря на отсутствие адаптации видеоряда, они достаточно распространены и используются для трансляции мероприятий в режиме реального времени, когда затруднительно организовать кодирование видео в несколько репрезентаций. Единственным способом изменения репрезентации является действие пользователя. После загрузки заголовочного файла пользователю предлагают выбрать битовую репрезентацию, и видеоплеер отправляет один запрос с ее указанием на ВКС. Далее будет организована загрузка информации. При изменении пользователем битовой репрезентации на сервер отправляется новый запрос с указанием ее идентификатора и номера сегмента, начиная с которого необходимо организовать отправку видеоконтента (рис. 3, а). Из описанного выше следует, что неадаптивные плееры в период высокой активности осуществляют загрузку в непрерывном режиме, что значительно повышает нагрузку на сеть передачи информации.

Следующим шагом в развитии видеоплееров стали адаптивные плееры [4]. Часто для обозна-

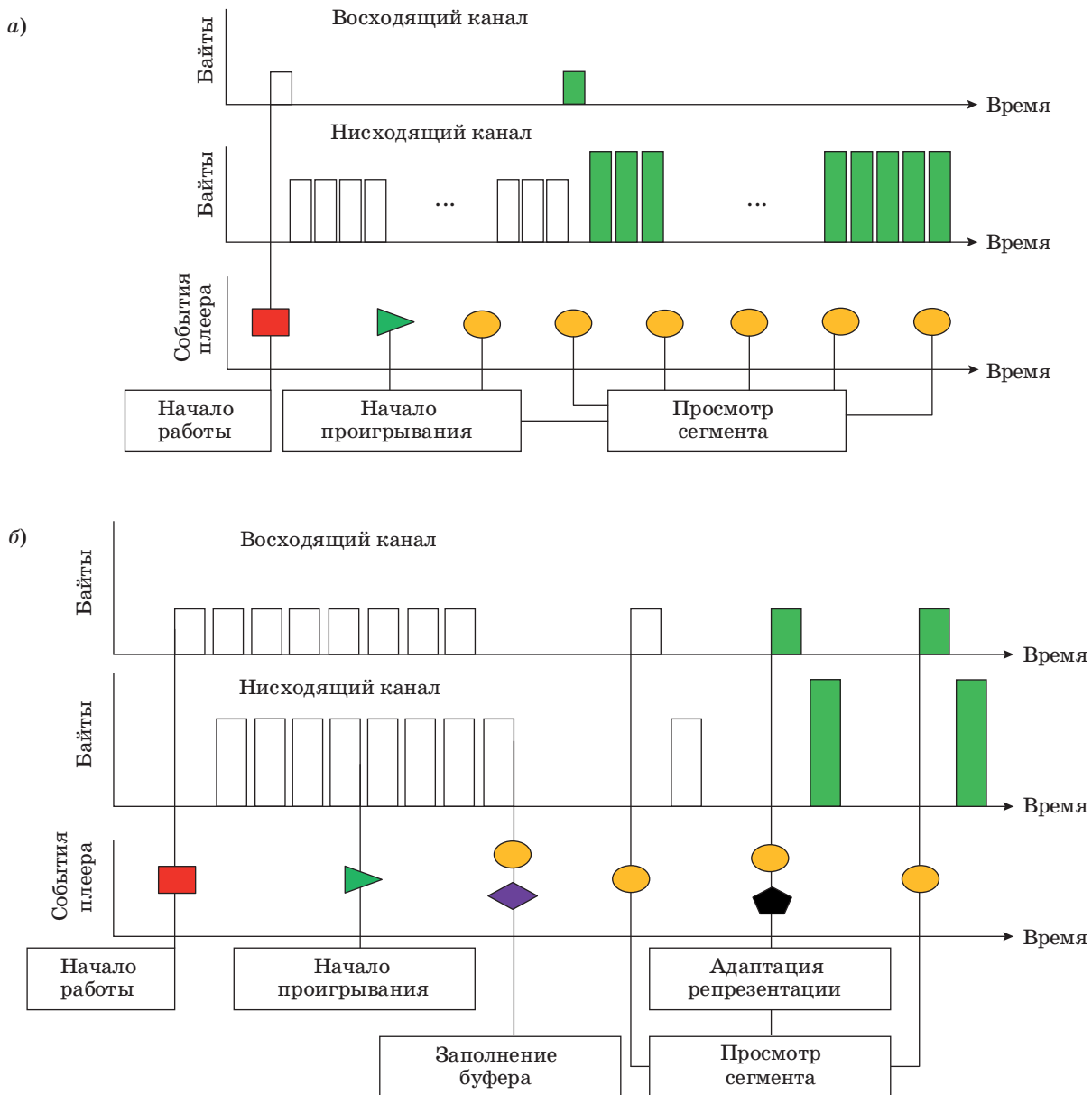
чения адаптивного плеера используется название стандарта DASH. Отдельной веткой развития технологии DASH стала HTTP Live Streaming (HLS). Плееры, построенные на основе этих технологий, отличаются рекомендованной длительностью сегментов видео: в DASH длительность сегмента 2–4 с, а в HLS — около 10 с [6].

В 2012 г. был опубликован стандарт для передачи видеоконтента MPEG-DASH, на данный момент актуальна версия 2014 г. [3]. Как было сказано ранее, стандарт DASH описывает формат хранения видеоконтента и видеоплеер, поддерживающий этот формат.

Данный формат позволяет организовать адаптивную передачу видеопотока, под адаптивностью понимается изменение битовой репрезентации, которое может осуществлять как плеер, так и пользователь. Наиболее важной частью стандарта является именно возможность адаптации битовой репрезентации к свойствам сети передачи информации (возможной скорости получения информации). В стандарте DASH не указаны конкретные правила, позволяющие осуществлять адаптацию потока.

В настоящее время наиболее популярным сервисом хранения и доступа к видеоданным является YouTube. Сервис YouTube построен на основе технологии DASH, что позволяет ему быть запущенным в любом современном браузере; это обеспечило данному сервису такую колоссальную популярность. Однако его исходный код является закрытым, что затрудняет его анализ. Существует ряд исследований, анализирующих его работу на основе захвата трафика в канале [7, 8]. Их авторы проводили анализ работы сервиса YouTube в различные временные периоды, из его результатов следует, что изначально сервис поддерживал неадаптивный плеер, а актуальная версия основывается на стандарте DASH. Обобщенная логика адаптивных плееров представлена на рис. 3, б. Из ее анализа следует, что в период высокой активности плеер делает паузы между заказами сегментов, обусловленными скоростью просмотра контента, что приводит к уменьшению загрузки сети.

Для окончательного определения модели трафика адаптивных плееров необходимо провести анализ алгоритмов адаптации репрезентации. Существует открытая реализация опорного видеоплеера Dash.js, в текущий момент она развивается и дополняется, в этой работе будет описана логика работы плеера версии 1.5. Исходный код написан на языке JavaScript и доступен на GitHub [9]. Важно отметить, что существует стандарт организации передачи видео через протокол HTTP — DASH, после его выпуска был собран консорциум DASH Industry Forum, который занимается продвижением данного стандарта и



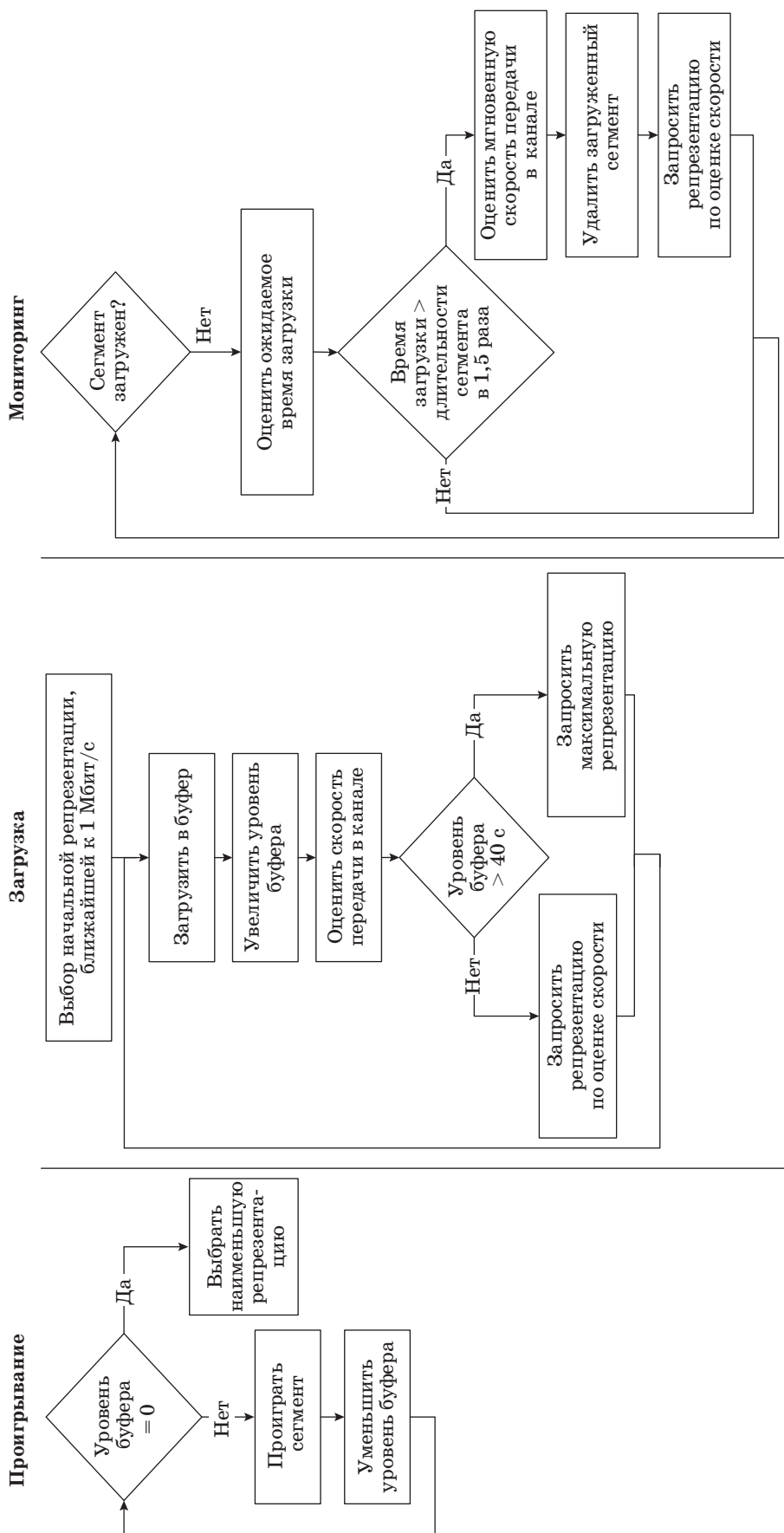
■ Рис. 3. Логика работы неадаптивного (а) и адаптивного (б) видеоплеера

предоставляет открытую реализацию видеоплеера и серверных приложений.

Данная реализация опирается на значение уровня буфера — длительность видеопоследовательности, которая находится и доступна на пользовательском устройстве в текущий момент времени. На основе значения этого параметра происходит принятие решений об адаптивном выборе репрезентации (рис. 4). Важно отметить, что описанная логика задает модель поведения плеера в состоянии *Воспроизведение и загрузка* и правило перехода в состояние *Буферизация*. Во время загрузки данных дополнительно осуществляется мониторинг загрузки во избежание пере-

оценки канала передачи информации и перехода в состояние *Буферизация*. Таким образом, в данном плеере осуществлен механизм предсказания времени загрузки текущего сегмента и принятия решения о его изменении.

Любой адаптивный плеер имеет возможность работать в неадаптивном режиме путем отключения функционала адаптации репрезентаций. Если отключена адаптация, то плеер может поддерживать одновременную загрузку нескольких сегментов, однако по умолчанию такой функционал не используется для экономии трафика в сотовых сетях. Основные параметры адаптации видеопотока представлены в табл. 2 [6, 9].



■ Рис. 4. Логика адаптивного выбора репрезентации опорного плеера Dash.js

■ Таблица 2. Сводная таблица параметров адаптации видеопотока

Параметр	Описание	Значение
Общие параметры		
Длительность сегмента видеоданных	Длительность сегментов, на которые разделена видеопоследовательность	От 2 до 10 с
Размер начальной буферизации	Длительность видеопоследовательности, которая должна быть загружена перед началом воспроизведения (начальная буферизация)	12 с
Максимальный размер буфера	Максимальная длительность видеопоследовательности, которая может быть помещена в буфер на плеере	> 60 с
Параметры адаптации репрезентации видеопотока		
Начальная оценка канала	Оценка канала передачи данных, на основе которой будет выбран первый сегмент	1 Мбит/с
«Память» при оценке скорости канала	Число сегментов, на основе которых будет производиться оценка скорости канала передачи информации	3 сегмента
Понижающий коэффициент оценки скорости	Коэффициент для понижения оценки скорости передачи информации при оценке скорости загрузки	0,9
Достаточный уровень буфера	Длительность буферизированного видеопотока, при котором плеер будет заказывать только максимальную репрезентацию	40 с
Коэффициент порогового ожидания загрузки сегмента	Длительность числа сегментов, которую будет ожидать плеер перед удалением текущего сегмента (см. рис. 4, «Мониторинг»)	1,5

Методики оценки качества передачи видеоконтента по технологии DASH

Выше было описано, каким образом видеоданные могут быть доставлены с ВКС на пользовательское устройство на основе технологии DASH. В зависимости от характеристик соединения пользователь может быть в различной степени удовлетворен использованием сервиса. Таким образом, для оценки производительности сети передачи информации необходимо иметь возможность оценить удовлетворенность пользователя в зависимости от характеристик передачи видео. Важно отметить, что удовлетворенность пользователя — это субъективная оценка, которая зависит от множества факторов и не определяется только объективными характеристиками обслуживания. Поэтому далее в работе будут представлены методики оценки качества передачи видеоконтента, которые ставят перед собой задачу оценить качество обслуживания, опираясь на значение объективных характеристик. Выбор методики оценки во многом определяется типом используемого видеоплеера.

Для неадаптивных видеопотоков длительности от 30 до 60 с существует разработанный ITU-T

стандарт P.1201 оценки качества просмотренной последовательности на основе информации, доступной на клиентском устройстве [10] (далее в работе для обозначения данного стандарта будет использоваться сокращение ITU MOS). То есть существует способ на основе большого массива объективных характеристик воспроизведения видео оценить удовлетворенность пользователя от просмотра, причем полученное значение не отличается от результата, полученного в ходе демонстрации данной последовательности группе экспертов.

На основе характеристик входного видеопотока и его воспроизведения рассчитываются два показателя качества: воспроизведение, аудио и видео. Каждый из них представляет из себя число от 1 до 5, чем выше данное значение, тем более удовлетворенным считается пользователь по данным показателям. Далее полученные значения агрегируются в результирующее значение MOS. Пользователь считается удовлетворенным, если данное значение выше трех. Рассмотрим более подробно каждый показатель качества:

1) аудио и видео — данный показатель учитывает такие параметры видеопотока, как битовая скорость, частота кадров, аудио- и видеокодеки,

сложность сцен в репрезентации; большое влияние на оценку оказывает разрешение экрана устройства, на котором производится демонстрация;

2) воспроизведение — показатель, учитывающий характеристики воспроизведения видео: длительность начальной буферизации, длительность и количество опустошений буфера во время просмотра.

Значение показателя качества аудио и видео можно рассматривать как максимальный уровень удовлетворенности пользователя: если пользователь будет полностью удовлетворен качеством воспроизведения, то результирующее значение будет равно показателю аудио и видео. Однако если воспроизведение будет неидеальным (длительная задержка до начала просмотра, наличие событий опустошения буфера), то это уменьшит результирующее значение. Для получения максимального значения показателя воспроизведения необходимо, чтобы длительность начальной буферизации не превышала 3 с и отсутствовали опустошения буфера в течение всего времени. Данный показатель очень чувствителен к наличию событий опустошения буфера (спадает экспоненциально от функции, учитывающей количество и длительность опустошений буфера), даже небольшое их количество приводит к резкому уменьшению значения показателя воспроизведения и, как следствие, результирующего значения ITU и MOS.

Данный стандарт сложен для аналитического анализа ввиду большого числа зависимых переменных (разрешение репрезентации определяет большое число постоянных для расчета фактора аудио и видео и т. д.). В данной работе он приведен как опорный способ оценки качества видео, все дальнейшие описанные способы будут опираться на данный стандарт.

Компанией Huawei было представлено свое решение для оценки удовлетворенности пользователя при просмотре видео — U-vMOS [11]. Данный способ так же, как и стандарт ITU и MOS, производит вычисление факторов качества по нескольким показателям: длительности начальной буферизации (sInteraction), разрешению репрезентации (sQuality) и замиранию воспроизведения видео (sView). Каждый фактор определен в интервале от 1 до 5.

Последовательно рассмотрим факторы по отдельности. Фактор качества разрешения битовой репрезентации определяется в зависимости от устройства, на котором происходит воспроизведение видеопотока. Компанией Huawei были рассмотрены два основных размера экрана: 100" телевизионного (ТВ) и 9,7" смартфона — и предложена таблично заданная функция для оценки удовлетворенности пользователя от просмотра

■ Таблица 3. Оценка качества репрезентации U-vMOS

Разрешение битовой репрезентации	Оценка sQuality	
	для ТВ	для смартфона
8K	5	5
5K	4,72	5
4K	4,65	4,78
2K	4,2	4,58
1080p	4	4,45
720p	3,15	4
480p	2,44	3,64
360p	1,66	3

■ Таблица 4. Оценка длительности ожидания начала воспроизведения U-vMOS

Оценка sInteraction	Ожидание начала воспроизведения	
	для ТВ	для смартфона
5	≤100 мс	≤ 100 мс
4	1 с	1 с
3	2 с	3 с
2	5 с	5 с
1	8 с	10 с

битовых репрезентаций различного разрешения (табл. 3).

Показатель качества sInteraction основан на длительности ожидания начала воспроизведения, заданной табл. 4. Она характеризуется длительностью нахождения видеоплеера в состоянии *Буферизация* до начала показа видео.

Последним показателем качества будет рассмотрена характеристика воспроизведения видео — sView. При передаче видео по запросу может возникать остановка воспроизведения ввиду недостаточной скорости загрузки информации, данный эффект является одним из негативных факторов воспроизведения. Для ее оценки вычисляется процент времени, когда пользователь наблюдает замирание воспроизведения по отношению ко всей длительности времени просмотра. Полученные значения пересчитываются в оценку качества воспроизведения в соответствии с табл. 5.

После того как рассчитаны все вышеперечисленные показатели качества, результирующее

■ **Таблица 5.** Оценка качества воспроизведения U-vMOS

Оценка sView	Длительность замираний воспроизведения, %	
	для ТВ	для смартфона
5	0	0
4	0,1	5
3	1	10
2	5	15
1	10	30

■ **Таблица 6.** Коэффициенты для расчета значения MOS в методологии U-vMOS

Коэффициент	Для ТВ	Для смартфона
α	0,66	0,71
β	0,77	0,77

значение может быть получено следующим образом:

$$U\text{-vMOS} = (s\text{Quality} - 1) \times \left[\frac{\alpha(s\text{Interaction} - 1) + \beta(s\text{View} - 1)}{4(\alpha + \beta)} \right] + 1,$$

где коэффициенты α и β заданы табл. 6 в зависимости от вида вещания.

Из вида функции U-vMOS следует, что если зафиксировать некоторое значение показателя sQuality, то результирующее значение не может превышать значение данного показателя. Таким образом, чтобы получить значение MOS, превышающее 3, необходимо демонстрировать пользователю видеопоток с разрешением не менее 720p и 360p для телеэкранов и смартфонов соответственно. Показатели качества sInteraction и sView, отличные от пяти, только понижают результирующее значение MOS. Как следствие, для обеспечения значения U-vMOS больше трех следует обеспечивать более высокие репрезентации.

Компанией Huawei был также представлен программный комплекс для разработчиков систем, который позволяет оценить качество воспроизведения на стороне пользовательского устройства для большинства платформ [12].

Реализованный программный комплекс представлен в виде библиотеки на языке C++. Он позволяет оценить качество для адаптивного видеопотока неограниченной длительности на основе методики U-vMOS. На вход поступают «сырые» данные для каждого просмотренного сегмента: разрешение, битовая скорость, замирание воспроизведения и длительность ожидания начала воспроизведения. На выходе представлены оценки воспроизведения потока (sQuality, sInteraction, sView) и результирующее значение оценки удовлетворенности пользователя от просмотра.

Таким образом, метод оценки U-vMOS применим для адаптивного и неадаптивного видеопотока. Данное свойство позволяет использовать его для большего множества видеоконтента по сравнению со стандартом ITU MOS. Из описания методик оценок качества воспроизведения видео ITU MOS и Huawei U-vMOS следует, что для их использования необходимо иметь доступ к информации на видеоплеере. Данное ограничение значительным образом сужает возможную сферу их применения.

В ряде работ ставится задача оптимизации передачи видео через существующие сотовые сети на основе аналитического исследования функции MOS. Авторы данных работ отмечают, что описанные выше методы невозможно использовать в качестве целевых функций ввиду большого числа параметров и их сложной, нелинейной взаимосвязи. В подобных работах рассматриваются аппроксимации MOS, которые опираются на меньшее число параметров. Также утверждается, что оптимизация (минимизация или максимизация) таких аппроксимаций приводит к максимизации функции MOS. В табл. 7 представлены аппроксимации функции MOS, отсортированные в порядке возрастания количества используемых критериев для оценки качества обслуживания. Представленные аппроксимации могут быть использованы в трех областях: уменьшения сложности расчета значения MOS на пользовательском устройстве, проведения аналитических исследований производительностей сетей передачи информации и вычисления оценки восприятия на промежуточных узлах сети.

Возможно табл. 7 использовать следующим образом: зафиксировать некоторый объем данных, доступный разработчику сети, и выбрать те критерии качества обслуживания, которые могут оценить удовлетворенность пользователя. Например, при знании битовой скорости просматриваемого потока можно использовать метод, описанный в работе [16], однако если добавить информацию о длительности опустошения буфера и просмотра, возможна более точная оценка на основе критерия [17].

■ Таблица 7. Аппроксимации функции MOS для интерактивного видео

Формула	Описание	Источник
Процент замирания воспроизведения потока (Rebuffering Percentage (Stalling))		
$g_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{rb_i(t)}{rb_i(t) + d_i(t)};$ $\text{minimize: } \sum_i g_i$	g_i — процент времени, когда пользователь наблюдал замирание воспроизведения потока; $rb_i(t)$ — длительность замираний воспроизведения потока за время t ; $d_i(t)$ — длительность просмотренной последовательности за время t	[13, 14]
Отношение длительности ожидания и просмотра видеоряда (Waiting/Watching Time Ratio)		
$q_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{w_i(t)}{d_i(t)};$ $\text{minimize: } \sum_i q_i$	$w_i(t)$ — длительность ожидания в течение времени t , учитывающая начальные буферизации и замирания воспроизведения потока	[15]
Взвешенные суммы характеристик воспроизведения		
$MOS_i = f_{RATE}(R_i);$ $\text{maximize: } \sum_i MOS_i$	R_i — битовая скорость просматриваемого потока	[16]
$f_i = k_1 \ln R_i - k_2 \frac{rb_i(t)}{d_i(t)};$ $\text{maximize: } \sum_i f_i$	k_1, k_2 — весовые коэффициенты приоритета функции от битовой скорости и замираний воспроизведения соответственно, $k_2 \gg k_1$	[17]
$\text{minimize: } W\lambda - \theta$	λ — средний процент времени замирания воспроизведения по всем пользователям; θ — среднее значение скорости битовой репрезентации по всем пользователям; W — весовой коэффициент приоритета замирания воспроизведения, сравним со значением θ	[18]
$QoE_i[t] = W_1 \log \left(\frac{R_i[t] - W_2 (Buf_i[t] - Buf_{thr})^2}{-W_3 (R_i[t] - R_i[t-1])^2} \right);$ $\text{maximize: } \sum_i QoE_i[t]$	W_1 — весовые коэффициенты; $R_i[t]$ — битовая скорость в момент времени t ; $Buf_i[t]$ — уровень буфера в момент времени t ; Buf_{thr} — пороговое значение уровня буфера	[19]
$MOS_i = \frac{a_1 + a_2 FrR_i + a_3 \log(R_i^{TCP})}{1 + a_4 PL_i + a_5 (PL_i)^2};$ $\text{maximize: } \sum_i MOS_i$	a_i — коэффициенты, зависящие от характеристик просматриваемого контента; FrR_i — частота кадров потока; R_i^{TCP} — скорость получения информации; PL_i — вероятность потери пакета	[20]
$MOS_i = \frac{b - a}{1 + c_0 (R_i^{TCP})^{-c_1} (c_2)^{SUD_i}} + a;$ $\text{maximize: } \sum_i MOS_i$	a, b — нормирующие константы; c_i — константы, подобранные в ходе эксперимента; SUD_i — длительность ожидания начала воспроизведения	[21, 22]
$\begin{cases} MOS_{Res}(Resl_i) = 1,475 \log(Resl_i) - 6,15 \\ MOS_{Reb}(RebRate_i) = 0,738 e^{-RebRate_i} \\ MOS_{SUD}(SUD_i) = -0,02 SUD_i + 2,53 \end{cases}$ $MOS_i = 0,174 MOS_{Res}(Resl_i) MOS_{Reb}(RebRate_i) \times MOS_{SUD}(SUD_i);$ $\text{maximize: } \sum_i MOS_i$	$Resl_i$ — разрешение репрезентации; $RebRate_i$ — отношение времени просмотра к длительности опустошения буфера	[23]

О взаимосвязи характеристик сети передачи информации и качества восприятия видеоданных

После определения методов оценки качества восприятия видеопотока необходимо продемонстрировать, каким образом характеристики сети передачи информации влияют на восприятие видеопоследовательности. Важно отметить, что все объективные характеристики сети передачи информации (задержка, джиттер и т. д.) агрегируются в полезной скорости получения информации на уровне приложения — скорость получения информации, не учитывающая накладные расходы при доставке информации. За основу рассмотрения в данной части работы был взят критерий качества восприятия U-vMOS.

Зафиксируем длительность начальной буферизации для видео равной 2 с (sInteraction) и построим плоскость всевозможных значений критерия U-vMOS. Исходя из описания методологии, для получения оценки требуется информация о разрешении видеопотока и процента времени прерывания воспроизведения. Для получения оценки sQuality используем значения из табл. 1 о взаимосвязи между битовой скоростью потока и его разрешением для мобильных устройств, а в качестве оценочного значения выберем среднее значение. Для получения промежуточных значений для битовой скорости и всех таблично задан-

ных функций показателей качества U-vMOS был использован метод бета-сплайна с кубической степенью полинома. Полученный результат представлен на рис. 5.

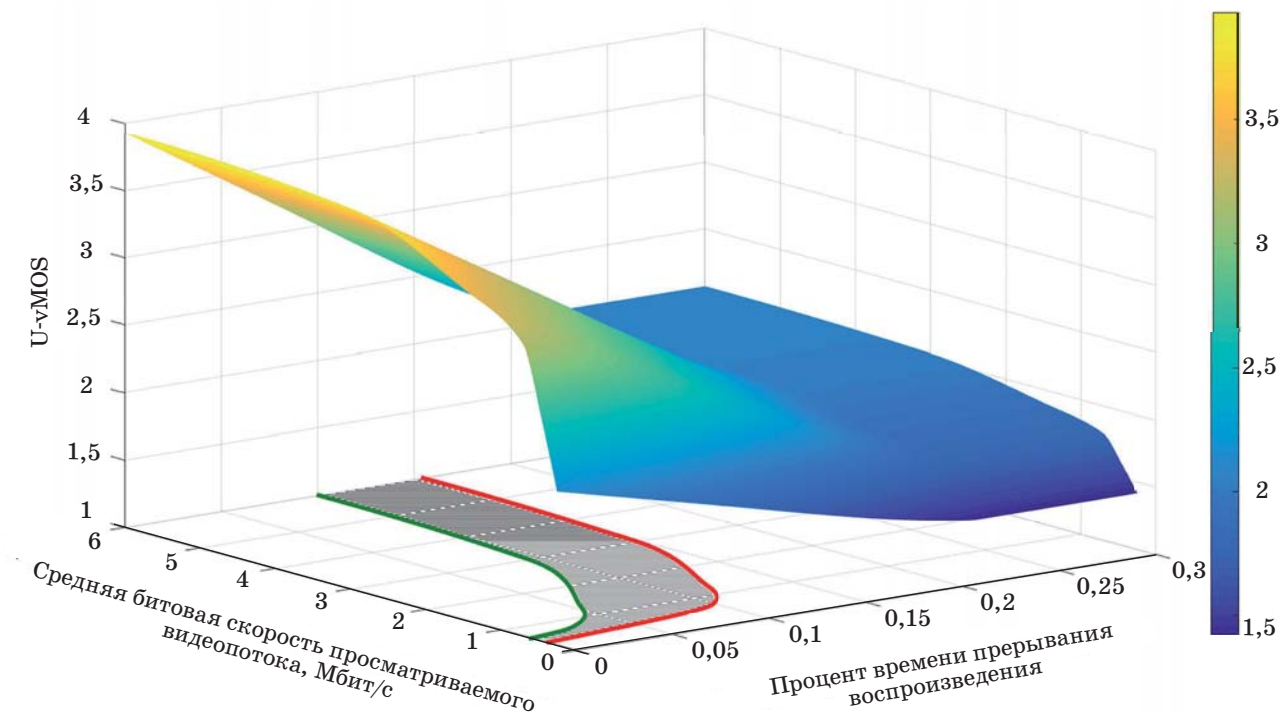
Процесс управлением полезной скоростью передачи информации во время просмотра видео может привести в одну из возможных точек полученной плоскости. Значения по оси аппликат находятся в диапазоне от 1 до 4, разделим плоскость на три области.

Область высокого значения критерия восприятия (левее заштрихованной области) соответствует значениям выше трех. Если пользователю была обеспечена полезная скорость загрузки информации для попадания в данную область, то он будет удовлетворен качеством обслуживания.

Граничная область (заштрихованная область) соответствует значениям в отрезке от 2,5 до 3. Граничная область характеризует пограничное состояние удовлетворенности пользователя.

Область низкого значения критерия восприятия (правее заштрихованной области) соответствует значениям ниже 2,5. В данной области полезной скорости недостаточно для обеспечения достойного уровня обслуживания, т. е. пользователь считается неудовлетворенным.

Следовательно, для достижения наибольшей производительности сети полезная скорость получения информации должна изменяться так, чтобы максимизировать число пользователей



■ Рис. 5. Зависимость качества восприятия от объективных характеристик сети

в области высокого значения критерия восприятия. Подобный анализ может быть проведен по всем критериям качества восприятия видеопотока, представленным ранее.

Заключение

В результате данной работы был проведен обзор передачи видеоконтента при использовании технологии DASH в современных телекоммуникационных сетях. Рассмотрены особенности технологии DASH: структура и назначение компонентов, формат представления видеоданных. Приведено описание видеоплееров, использующих данную технологию.

В статье продемонстрировано, каким образом особенности работы видеоплеера влияют на

оценку качества видеопотока. Осуществлен обзор известных методик оценки удовлетворенности пользователя на основе объективных характеристик системы передачи информации и обслуживания. Показано, что существуют методики оценки качества передачи видеоконтента, которые позволяют производить оценку для большого множества видеоконтента (произвольной длительности, адаптивного и т. д.), по сравнению со стандартизированными методами (Р. 1201). С использованием данной методики показана зависимость качества восприятия видео от объективных характеристик сети.

Работа выполнена в рамках инициативного научного проекта № 8.8540.2017/БЧ «Разработка алгоритмов передачи данных в системах IoT с учетом ограничений на сложность устройств».

Литература

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016–2021 White Paper. 2017. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html> (дата обращения: 01.04.2017).
2. **Маколкина М. А.** Оценка качества восприятия видео на основе распознавания эмоций // *Электросвязь*. 2015. № 9. С. 24–28. issn0013-577
3. ISO/IEC 23009-1:2014. Information Technology, Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH); Progressive Download and Dynamic Adaptive. — ISO/IEC, 2014. — 144 p.
4. 3GPP TS 26.247 v14.0.0. Transparent End-to-End Packet Switched Streaming Service (PSS); Progressive Download and Dynamic Adaptive Streaming Over HTTP (3GP-DASH). — 3GPP, 2016. — 104 p.
5. Рекомендуемые настройки кодирования. <https://support.google.com/youtube/answer/1722171?hl=ru> (дата обращения: 01.04.2017).
6. Video as a Basic Service of LTE Networks: Mobile vMOS Defining Network Requirements. <http://www.huawei.com/minisite/4-5g/en/industryjsdc-j.html> (дата обращения: 01.04.2017).
7. **Oyman O., Singh S.** Quality of Experience for HTTP Adaptive Streaming Services // *IEEE Communication Magazine*. 2012. N 4. P. 20–27. doi:10.1109/issn0163-6804
8. **Ameigeiras P., Ramos-Munoz J., Navarro-Ortiz J., Lopez-Soler J. M.** Analysis and Modelling of YouTube Traffic // *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2012. N 23. P. 360–377. doi:10.1002
9. Dash Industry Forum. <https://github.com/Dash-Industry-Forum/dash.js/wiki> (дата обращения: 01.04.2017).
10. P.1201. Amendment 2, Parametric Non-intrusive Assessment of Audiovisual Media Streaming Quality Amendment 2: New Appendix III Use of ITU-T P.1201 for Non-adaptive, Progressive Download Type Media Streaming. — ITU-T, 2013. — 23 p.
11. U-vMOS, Benchmarking Video Experience. <http://www.huawei.com/minisite/ubbf2015/ppt/PPT-111-vMOS-Video%20Experience%20Standard%20-%20Ken%20Wang%20-%2020150908%20V1.pdf> (дата обращения: 01.04.2017).
12. U-vMOS SDK. <http://developer.huawei.com/ru/ict/Products/TelecoSoftware/VideoExperienceCapability/U-vMOS/SDK> (дата обращения: 01.04.2017).
13. **Ramamurthi V., Oyman O.** Video-QoE Aware Radio Resource Allocation for HTTP Adaptive Streaming// *IEEE ICC 2014 — Communication QoS, Reliability and Modeling Symposium*, Sydney, June 10–14, 2014. P. 1076–1081.
14. **Pastushok I., Turlikov A.** Lower Bound and Optimal Scheduling for Mean user Rebuffering Percentage of HTTP Progressive Download Traffic in Cellular Networks// 2016 XV Intern. Symp. “Problems of Redundancy in Information and Control Systems” (REDUNDANCY), Saint-Petersburg, September 26–29, 2016. P. 105–111.
15. **Bakin E., Evseev G., Turlikov A.** Lower Bound of Mean user Waiting/Watching Time Ratio in Wireless Video Streaming Network// 2014 IEEE Global Communications Conf., Austin TX, December 7–12, 2014. P. 1170–1175.
16. **Essaili A. E., Schroeder D., Staehle D., Shehada M., Kellerer W., Steinbach E.** Quality-of-Experience Driven Adaptive HTTP Media Delivery// *IEEE ICC 2013 — Communication QoS, Reliability and Modeling Symp.*, Budapest, June 9–13, 2013. P. 2480–2485.
17. **Борисовская А. В., Пастушок И. А.** Эвристический алгоритм выбора подоптимальных значений ха-

рактистик видеопотока и параметров алгоритма распределения ресурсов радиоканала// Научная сессия ГУАП: сб. докл., Санкт-Петербург, 10–16 апреля 2015 г. СПб., 2015. С. 209–219.

18. Bui N., Valentin S., Widmer J. Anticipatory Quality-Resource Allocation for Multi-user Mobile Video Streaming// 2015 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Hong Kong, April 26 – May 1, 2015. P. 245–250.
19. Pu W., Zou Z., Chen C. W. Video Adaptation Proxy for Wireless Dynamic Adaptive Streaming over HTTP// Proc. of 19th Intern. Packet Video Workshop, Munich, May 10–11, 2012. P. 65–70.
20. Khan A., Sun L., Jammeh E., Ifeachor E. Quality of Experience-Driven Adaptation Scheme for Video Applications over Wireless Networks. 2010. N 11. P. 1337–1347. doi:10.1049
21. Hosek J., Ries M., Vajsar P., Nagy L., Sulc Z., Hais P., Penizek R. Mobile web QoE Study for Smartphones// 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Atlanta, December 9–13, 2013. P. 1157–1161.
22. Hosek J., Vajsar P., Nagy L., Ries M., Galinina O., Andreev S., Koucheryavy Y., Sulc Z., Hais P., Penizek R. Predicting user QoE Satisfaction in Current Mobile Networks// 2014 IEEE Intern. Conf. on Communications (ICC), Sydney, June 10–14, 2014. P. 1088–1093.
23. Chen Y. C., Chang J. W., Wei H. Y. A Multi-level QoE Framework for Smartphone Video Streaming Applications// 2014 Globecom Workshops (GC Wkshps), Austin, December 8–12, 2014. Moscow, 2014. P. 225–230.

UDC 621.391.1

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.75

Transmission and Quality-of-Experience Estimation for HTTP-based Video. A Survey

Pastushok I. A.^a, Assistant Professor, i.pastushok@vu.spb.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation

Introduction: The rise in the number of users and video traffic amount in modern telecommunication networks leads to the idea that the networks already available should be adapted to video transmission. The greatest amount of video traffic is transmitted using «Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH)» technology which is based on HTTP protocol. **Purpose:** Our goal is a survey of HTTP video transmission technologies and Quality-of-Experience estimations in order to choose a methodology of estimating Quality of Experience depending on the limited amount of the available objective characteristics. **Results:** On the base of a survey of HTTP-based video transmission technologies, we have proposed a three-component model which includes the models of a video content server, a network, and the user equipment. The survey has shown that DASH technology leads to a slight increase in the load on the network as compared to other video streaming technologies. However, the technology is invariant to the network structure due to the usage of HTTP and TCP protocols. DASH technology provides less severe network congestions because the video content is stored on the server in several sets of quality. This approach allows the user equipment to select a certain video quality for particular network conditions. **Practical relevance:** The obtained results provide a way for a software engineer to make decisions about the appropriateness of using DASH for specific network requirements, and for a network-engineer to estimate video user experience at intermediate network nodes. On the base of this estimation, you can organize control in order to improve the network performance.

Keywords — HTTP-based Video Transmission, DASH, HPD, HAS, Quality of Experience.

References

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016–2021 White Paper 2017. Available at: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html> (accessed 1 April 2017).
2. Makolkina M. A. Video Quality of Experience Evaluation Based on Emotions. *Elektrosvyaz*, 2015, no. 9, pp. 24–28 (In Russian). issn0013-577
3. ISO/IEC 23009-1:2014. Information Technology, Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH); Progressive Download and Dynamic Adaptive. ISO/IEC, 2014. 144 p.
4. 3GPP TS 26.247 v14.0.0. Transparent End-to-End Packet Switched Streaming Service (PSS); Progressive Download and Dynamic Adaptive Streaming Over HTTP (3GP-DASH). 3GPP, 2016. 104 p.
5. *Rekomenduemye nastroyki kodirovaniia* [Live Encoder Settings, Bitrates, and Resolutions]. Available at: <https://support.google.com/youtube/answer/1722171?hl=ru> (accessed 1 April 2017).
6. *Video as a Basic Service of LTE Networks: Mobile vMOS Defining Network Requirements*. Available at: <http://www.huawei.com/minisite/4-5g/en/industryjsdc-j.html> (accessed 1 April 2017).
7. Oyman O., Singh S. Quality of Experience for HTTP Adaptive Streaming Services. *IEEE Communication Magazine*, 2012, no. 4, pp. 20–27. doi:10.1109/issn0163-6804
8. Ameigeiras P., Ramos-Munoz J., Navarro-Ortiz J., Lopez-Soler J. M. Analysis and Modelling of YouTube Traffic. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2012, no. 23, pp. 360–377. doi:10.1002
9. *Dash Industry Forum*. Available at: <https://github.com/Dash-Industry-Forum/dash.js/wiki> (accessed 1 April 2017).
10. P.1201. Amendment 2, Parametric Non-intrusive Assessment of Audiovisual Media Streaming Quality Amendment 2: New Appendix III Use of ITU-T P.1201 for Non-adaptive, Progressive Download Type Media Streaming. ITU-T, 2013. 23 p.
11. *U-vMOS, Benchmarking Video Experience*. Available at: <http://www.huawei.com/minisite/ubbf2015/ppt/PPT-111-vMOS-Video%20Experience%20Standard%20-%20Ken%20Wang%20-%2020150908%20V1.pdf> (accessed 1 April 2017).
12. *U-vMOS SDK*. Available at: <http://developer.huawei.com/ru/ict/Products/TelecoSoftware/VideoExperienceCapability/U-vMOS/SDK> (accessed 1 April 2017).
13. Ramamurthi V., Oyman O. Video-QoE Aware Radio Resource Allocation for HTTP Adaptive Streaming. *IEEE ICC 2014 — Communication QoS, Reliability and Modeling Symp.*, Sydney, 2014, pp. 1076–1081.
14. Pastushok I., Turlikov A. Lower Bound and Optimal Scheduling for Mean user Rebuffering Percentage of HTTP Progressive Download Traffic in Cellular Networks. *2016 XV*

- Intern. Symp. Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY)*. Saint-Petersburg, 2016, pp. 105–111.
15. Bakin E., Evseev G., Turlikov A. Lower Bound of Mean user Waiting/Watching Time Ratio in Wireless Video Streaming Network. *2014 IEEE Global Communications Conf.*, Austin TX, 2014, pp. 1170–1175.
 16. Essaili A. E., Schroeder D., Staehle D., Shehada M., Kellerer W., Steinbach E. Quality-of-Experience Driven Adaptive HTTP Media Delivery. *IEEE ICC 2013 — Communication QoS, Reliability and Modeling Symp.*, Budapest, 2013, pp. 2480–2485.
 17. Borisovskaya A. V., Pastushok I. A. Overview of Heuristic Algorithm for Selecting Suboptimal Values of Characteristics of Video Stream and Parameters of MAC Scheduling Algorithm. *Sbornik докладov nauchnoi sessii GUAP* [Collection of Reports of the Scientific Session of SUAP]. Saint-Petersburg, 2015, pp. 209–219 (In Russian).
 18. Bui N., Valentin S., Widmer J. Anticipatory Quality-Resource Allocation for Multi-user Mobile Video Streaming. *2015 IEEE Conference on Computer Communications Work-shops (INFOCOM WKSHPs)*. Hong Kong, 2015, pp. 245–250.
 19. Pu W., Zou Z., Chen C. W. Video Adaptation Proxy for Wireless Dynamic Adaptive Streaming over HTTP. *Proc. of 19th Intern. Packet Video Workshop*, Munich, 2012, pp. 65–70.
 20. Khan A., Sun L., Jammeh E., Iteachor E. Quality of Experience-Driven Adaptation Scheme for Video Applications over Wireless Networks. *IET Communications*, 2010, no. 11, pp. 1337–1347. doi:10.1049
 21. Hosek J., Ries M., Vajsar P., Nagy L., Sulc Z., Hais P., Penizek R. Mobile web QoE Study for Smartphones. *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Atlanta, 2013, pp. 1157–1161.
 22. Hosek J., Vajsar P., Nagy L., Ries M., Galinina O., Andreev S., Koucheryavy Y., Sulc Z., Hais P., Penizek R. Predicting user QoE Satisfaction in Current Mobile Networks. *2014 IEEE Intern. Conf. on Communications (ICC)*, Sydney, 2014, pp. 1088–1093.
 23. Chen Y. C., Chang J. W., Wei H. Y. A Multi-level QoE Framework for Smartphone Video Streaming Applications. *2014 Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Austin TX, 2014, pp. 225–230.

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.doc); AdobeIllustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература — СИБИД РФ, References — один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»
Тел.: (812) 494-70-02
Эл. почта: i-us.spb@gmail.com
Сайт: www.i-us.ru

НЕЙРОСЕТЕВАЯ НАВИГАЦИОННАЯ ТРЕНАЖЕРНО-ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА

А. П. Григорьев^{а, б}, ассистент, начальник проектно-конструкторского сектора

С. Г. Бурлуцкий^а, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

^бАО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург, РФ

Введение: подготовка авиационных специалистов — это трудоемкий, дорогостоящий, циклический процесс, требующий промежуточного и итогового контроля. **Цель исследования:** разработка эффективной методики организации обучения авиационных специалистов на базе аксиолого-компетентностного подхода с применением обучающих систем и алгоритма ее организации при аудиторном и внеаудиторном обучении специальным дисциплинам. **Результаты:** сформулированы задачи, решаемые обучающей системой: контроль, диагностика, восстановление знаний и умений на теоретическом и практическом этапах обучения с учетом адаптации к индивидуальным особенностям работающих с системой (уровню подготовки и психофизиологическим характеристикам). Выявлено, что проектирование обучающих систем на основе искусственных нейронных сетей позволяет с заданной разработчиком точностью и достоверностью (без сбора и обработки полной статистической информации о группе обучаемых) осуществлять разработку отдельных модулей и обучающей системы в целом. Процесс обучения в обучающих системах рассматривается как контролируемая процедура решения адаптивных тестовых заданий с выдачей комментариев (диагностикой) и восстановлением знаний (компенсацией недополученных или же неувоенных знаний) посредством обращения к теоретическому материалу электронного учебного пособия. Предложена авторская архитектура нейросетевой навигационной тренажерно-обучающей системы для подготовки авиационных специалистов, основанная на: применении нейросетевого и нейронечеткого (использовании нейросетей и нечеткой логики) подхода к контролю знаний; графосемантическом описании предметной области изучаемой дисциплины; оценке и выводе каждого действия обучаемого при решении задачи на базе бинарных деревьев с последующим графосемантическим ранжированием сложности отдельных операций и анализом степени приближения к правильному ответу. Архитектура позволяет реализовать вариативность (произвольный выбор обучаемым порядка изучения учебного материала и этапов обучения) и адаптировать обучающий процесс к индивидуальным особенностям обучаемых. **Практическая значимость:** разработанная система позволяет сократить время обучения, интенсифицировать обучающий процесс, повысить степень усвоения знаний, а также проводить дистанционный контроль на всех этапах обучения.

Ключевые слова — подготовка авиационных специалистов, аксиологический подход, компетентностный подход, адаптивные обучающие системы, искусственные нейронные сети, искусственные нейронные сети в обучении, интеллектуальные обучающие системы, адаптивность к психофизиологическим особенностям обучаемого, латентные свойства нервной системы, модальность, темперамент, мобильность, динамичность.

Введение

Профессиональная подготовка оператора летательного аппарата — это трудоемкий и дорогостоящий процесс, складывающийся из курса теоретического обучения, практических тренажерной и летной подготовок. Между отдельными этапами подготовки летного состава имеет место разрыв. Компьютеризация теоретического обучения и внедрение автоматизированных обучающих систем предназначены для ликвидации этого разрыва.

Одно из основных требований к обучающим системам — адаптивность. Адаптивная обучающая система (АдОС) [1] позволяет не просто тренировать обучаемого и контролировать его знания, но и по результатам деятельности обучаемого может определить, какие знания недостаточны или ошибочны, и вернуть обучаемого на соответствующий раздел теории или практики либо дать дополнительные разъяснения, т. е. позволяет адаптировать процесс обучения под осо-

бенности каждого конкретного обучаемого, работающего с системой.

Важно отметить, что обучение оператора летательного аппарата необходимо рассматривать как управляемый и контролируемый процесс решения тестовых навигационных заданий. Определение свойств этих заданий и выдача комментариев по каждому из них должны осуществляться на основе идентификации знаний обучаемого на каждом шаге обучения. В процессе обучения должен соблюдаться принцип продвижения от простого учебного материала (УМ) к сложному, причем переход к новой теме осуществляется только в случае успешного усвоения предыдущего материала. Таким образом, реализуются основные принципы адаптивного обучения [1].

Обязательным элементом любой АдОС [1] является блок автоматизированной проверки знаний. В последнее время тестовый контроль [2] привлекает все большее внимание педагогов в самых разных сферах как наиболее универсальная форма контроля знаний.

Тестовый контроль отличается [2, 3] эффективностью при самостоятельной работе; объективностью в оценке знаний; экономией времени преподавателя; высокой степенью дифференциации тестируемых по уровню знаний; возможностью индивидуализировать процесс обучения; прогнозированием темпа и результата обучения; возможностью выявить структуру знаний каждого слушателя для дальнейшего изменения методики обучения. Разработка тестовых заданий и обработка результатов тестирования подробно изложены в работе [2], а известные модели тестирования — в статье [3]. Наиболее прогрессивными в настоящее время являются адаптивные модели тестирования, в которых сложность заданий меняется в зависимости от правильности ответов испытуемого. Применение в АдОС автоматизированной проверки знаний на базе адаптивного тестирования [3, 4] позволяет повысить эффективность обучения.

В рамках данной статьи предлагается рассмотреть проект нейросетевой навигационной тренажерно-обучающей системы (ННТОС) для изучения дисциплины «Бортовые вычислительные комплексы навигации и самолетовождения» (БВКНиСВ). Данная система представляет собой программную среду, устанавливаемую на автоматизированное рабочее место обучаемого или персональный компьютер.

Обобщенный алгоритм работы обучаемого с дистанционной ННТОС

Рассмотрим методику организации учебного процесса на базе аксиолого-компетентного подхода при непосредственной работе обучаемого с ННТОС в рамках изучения дисциплины БВКНиСВ.

Комбинированный аксиолого-компетентный подход направлен не только на выработку профессиональных качеств обучаемого, получение и (или) закрепление социотипических и личностно ориентированных компетенций, но и на индивидуализацию, адаптацию и интенсификацию процесса обучения. Данный подход характеризуется ценностным, гуманистическим отношением к обучаемому, что предполагает реализацию вариативности, адаптацию учебного процесса к степени подготовленности каждого отдельного субъекта обучения, причем не только с точки зрения сложности при изложении теоретического материала и контроля знаний, но и в плане учета индивидуальных психофизиологических характеристик (ПФХ).

Схема реализации алгоритма работы обучаемого с дистанционной ННТОС (ДННТОС) представлена на рис. 1.

Работа обучаемого с ДННТОС начинается с входного психофизиологического тестирова-

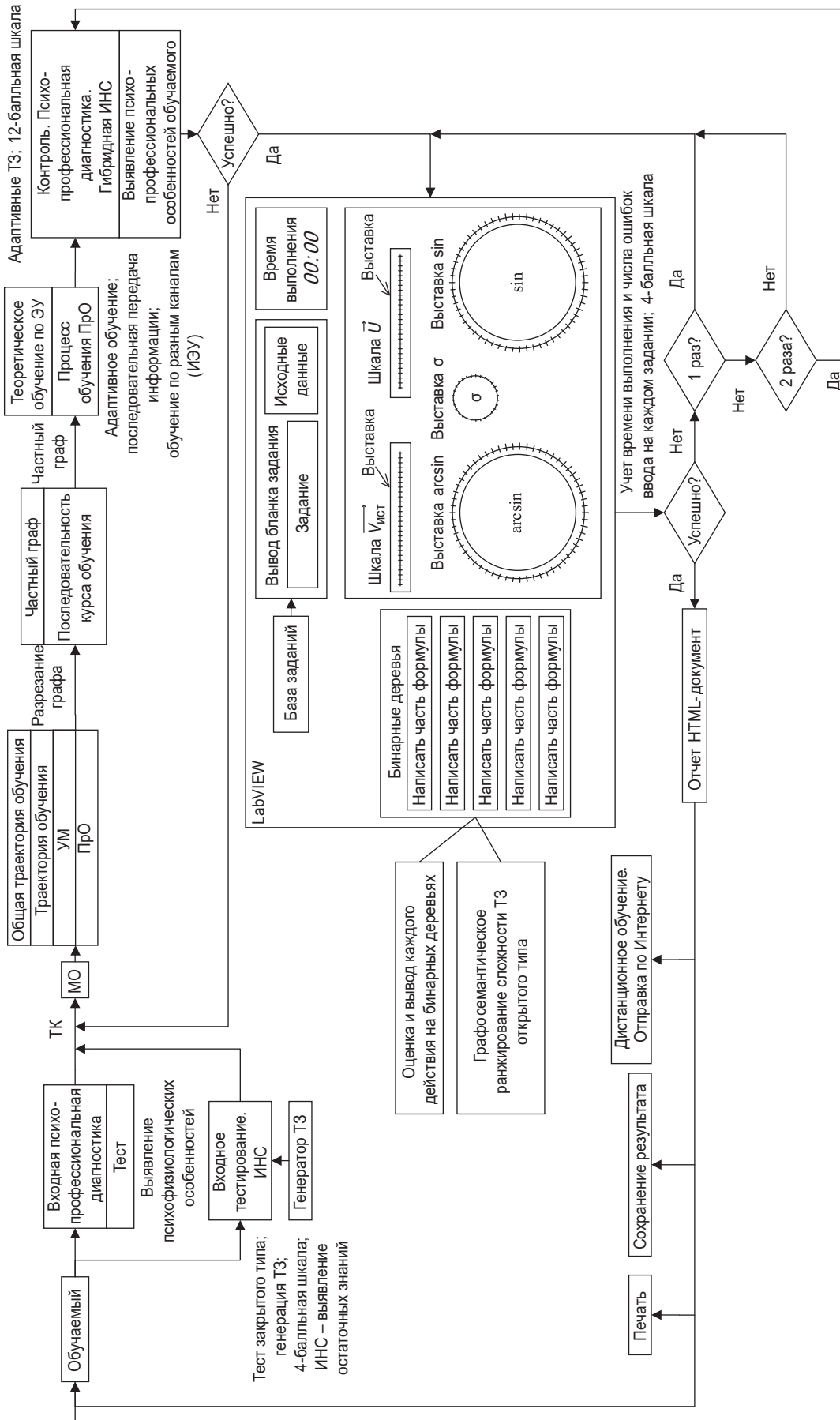
ния (ПФТ) и тестирования остаточных знаний. Основная задача этих тестов — получение данных об индивидуальных латентных ПФХ нервной системы (НС) обучаемого в целях повышения уровня адаптации системы (теоретический материал и тестовые задания обучаемому выдаются не только в зависимости от текущей успеваемости, но и исходя из индивидуальных особенностей) и выявления остаточных знаний по смежным дисциплинам, на которых базируется курс БВКНиСВ.

Для психофизиологической адаптации теоретического этапа по методикам С. В. Ефремцева и А. Н. Белова [5] реализован ПФТ, направленный на определение модальности (доминирующего канала восприятия информации — аудиальный, визуальный, кинестетический), а также темперамента (сангвиник, холерик, флегматик, меланхолик). Модальность характеризует скорость восприятия (освоения), а темперамент определяет скорость усвоения и забывания УМ (кривая Эббингауза) [5].

Для психофизиологической адаптации практического этапа по методикам О. П. Елисеева [6], Е. П. Ильина [7] и В. Д. Небылицына [8] реализован ПФТ для установления мобильности (лабильность/инертность) и динамичности (сила/слабость) НС.

Мобильность и динамичность характеризуют внимательность, моторную функцию обучаемого и работоспособность.

После прохождения ПФТ (исходя из вариативности учебного процесса, от данной процедуры обучаемый может отказаться, но это снизит общий уровень адаптации системы) обучаемому предлагается ответить на семь вопросов тестового задания (ТЗ) закрытого типа (выбрать правильный вариант ответа из предложенных), ориентированных на знание предметной области (ПрО) дисциплины (исходя из вариативности учебного процесса, от данной процедуры обучаемый может отказаться, что не обеспечит адаптацию с точки зрения передачи УМ и не позволит построить оптимальную траекторию изучения УМ). Ответы обучаемого анализируются электронным инструктором на базе искусственных нейронных сетей (ИНС). Нейронная сеть в данном случае рассматривается как эффективное средство автоматизации процесса выставления оценок и осуществляет входной контроль [9]. По завершении тестирования выставляется оценка в классической 4-балльной шкале [10], в результате чего генерируется некоторая модель обучения (МО) — «отличник», «хорошист» и т. д. На основе МО и результатов тестового контроля (ТК) строится траектория обучения, которая представляет собой семантический граф [11], построенный на базе УМ из ПрО [12].



■ Рис. 1. Обобщенный алгоритм работы обучаемого с дистанционной ИИТС

После изучения соответствующего УМ посредством электронного учебника (ЭУ) (или интеллектуального электронного учебника (ИЭУ)) обучаемый проходит адаптивный промежуточный ТК закрытого типа. Адаптивное промежуточное тестирование осуществляется на базе пакета графического программирования LabVEIW [13] и используется для рубежного контроля усвоения теоретического материала. Обучаемый проходит тестирование закрытого типа из N вопросов (количество варьируется и определяется по усмотрению преподавателя/инструктора). Все вопросы ТЗ отличаются по уровню сложности (ранжирование осуществляется с помощью графосемантического метода) [11]. На первом этапе из предварительно сформированной и проранжированной по сложности базы вопросов обучаемому задается ТЗ среднего уровня сложности, в зависимости от результата ответа (положительный/отрицательный) сложность последующего вопроса изменяется на более высокую или менее высокую соответственно. По серии из N вопросов обучаемому выставляется оценка в абсолютной шкале (% правильных ответов), которая также переводится в стандартную 4-балльную шкалу [10]. Результаты тестирования сохраняются в виде отчета в формате HTML-документа, впоследствии могут быть сохранены, распечатаны на принтере, размещены на информационном портале вуза в сети Интернет или же отправлены для отчета преподавателю по электронной почте.

Использование на этапе теоретического обучения входного нейросетевого тестирования с последующим рубежным адаптивным контролем закрытого типа позволяет:

- индивидуализировать процесс обучения (построить индивидуальную траекторию освоения УМ);

- адаптировать процесс усвоения УМ за счет перехода от «простого» УМ к «сложному»;

- осуществлять не только входной, текущий (рубежный) и итоговый контроль, но и диагностику с последующим восстановлением знаний (повторно изучается неусвоенный или недостаточно проработанный в процессе теоретической подготовки УМ);

- адаптировать ТЗ закрытого типа к успеваемости конкретного обучаемого при контроле знаний за счет ранжирования сложности вопросов и варьирования их трудности.

После завершения этапа теоретической подготовки проводится итоговое нейронечеткое (с применением гибридной нейронечеткой ИНС) [14–16] тестирование знаний закрытого типа [2]. Шкала оценивания — нечеткая, 12-балльная [10]; количество вопросов ТЗ — 7, каждый из которых ранжирован по сложности в соответствии с графосемантическим подходом [11].

По результатам итогового тестирования обучаемые разбиваются по группам в соответствии с текущей успеваемостью (табл. 1).

Не прошедшие итоговый контроль проходят процедуру восстановления знаний посредством повторной проработки неусвоенного теоретического материала из ПрО [12] с последующим повторным итоговым тестированием.

К выполнению практического задания (адаптивному тестированию умений на базе пакета графического программирования LabVEIW [13]) допускаются 4–12 групп обучаемых (см. табл. 1), успешно прошедших итоговое нейронечеткое тестирование знаний. В качестве практического задания предлагается решить одну из задач курса БВКНиСВ, например, осуществить расчет условного курса на следующий этап полета. Очевидно, что в соответствии с работой [12] поставленная задача решается в шесть действий, состав и последовательность математических операций задачи определяются в соответствии с методом вывода на бинарных деревьях. После представления бинарного дерева решения задачи в виде семантического графа появляется возможность ранжировать сложность каждого действия при расчете задачи,

■ Таблица 1. Соотношение процента правильных ответов обучаемого и оценки по 12- и 4-балльной шкалам

Процент правильных ответов	Группа	Оценка	Оценка по шкале	
			12-балльной	4-балльной
0–5	1	Нет знаний	2–	2
6–9	2	Неудовлетворительно	2	
10–19	3	Малоудовлетворительно	2+	3
20–29	4	Почти удовлетворительно	3–	
30–39	5	Удовлетворительно	3	4
40–49	6	Более чем удовлетворительно	3+	
50–59	7	Почти хорошо	4–	5
60–69	8	Хорошо	4	
70–79	9	Более чем хорошо	4+	5
80–89	10	Почти отлично	5–	
90–94	11	Отлично	5	5
95–100	12	Превосходно	5+	

■ **Таблица. 2.** Экспертные значения оценки качества выполнения задачи

Время, с	Количество ошибок, шт.			
	0	1	2	3
0–70	5	4	3	2
71–95	4	3	2	2
96–120	3	2	2	2
121...	2	2	2	2

что может быть учтено при выставлении итоговой оценки за выполнение.

Исходя из того, что оператор-навигатор функционирует в реальном масштабе времени, при решении задачи необходимо учитывать не только безошибочность действий, но и время ее выполнения.

Оценки в конкретном случае выставляются в соответствии с экспертными данными, представленными в табл. 2.

Время на выполнение задания ограничено и составляет 125 с. По истечении отведенного хронометража работа программы прекращается. В зависимости от итоговой успеваемости обучаемых (см. табл. 1) время, отведенное на выполнение задания, варьируется. Чем ниже успеваемость обучаемого, тем больше времени ему отводится на выполнение поставленной задачи. Шкала оценивания — классическая 4-балльная [10]. По завершении задания (как успешно выполненного, так и неудачного) программа генерирует отчет в формате HTML-документа, в котором указываются личные данные обучаемого (Ф. И. О. и № группы) и его итоговая оценка с временем выполнения задания. Если в процессе решения допускались ошибки, то информация об их количестве и о шаге, на котором они были допущены, также будет отражена в итоговом отчете.

Отчет о выполнении может быть сохранен, распечатан на принтере, размещен на информационном портале вуза в сети Интернет или же отправлен для отчета преподавателю по электронной почте.

Архитектура нейросетевой навигационной тренажерно-обучающей системы

Рассмотрим подробнее предложенную архитектуру ННТОС (рис. 2), состоящую из следующих автономных элементов: системы психофизиологической диагностики (ПФД), дистанционной адаптивной обучающей системы (ДАОС) (куда входит

ИЭУ), дистанционной адаптивной системы контроля знаний (ДАСКЗ) и АдОС.

Исходя из свойства вариативности, присущей аксиологическому подходу, осваивая курс дисциплины БВКНиСВ, обучаемый может самостоятельно выбирать, с какой из систем, входящих в состав ННТОС, и в какой последовательности работать. Так как, ввиду вариативности, отсутствует жесткий регламентированный алгоритм работы обучаемого с системой, то в рамках данной статьи описывается архитектура ННТОС и ее основные составные части.

Система ПФД представляет собой специальное алгоритмическо-программное обеспечение (набор самостоятельных алгоритмов и программ), разработанное на базе языков программирования Java [17]. Основным элементом ПФД является модуль управления ПФД, который организует взаимодействие между всеми остальными элементами системы. Также в состав данного модуля входит блок настроек.

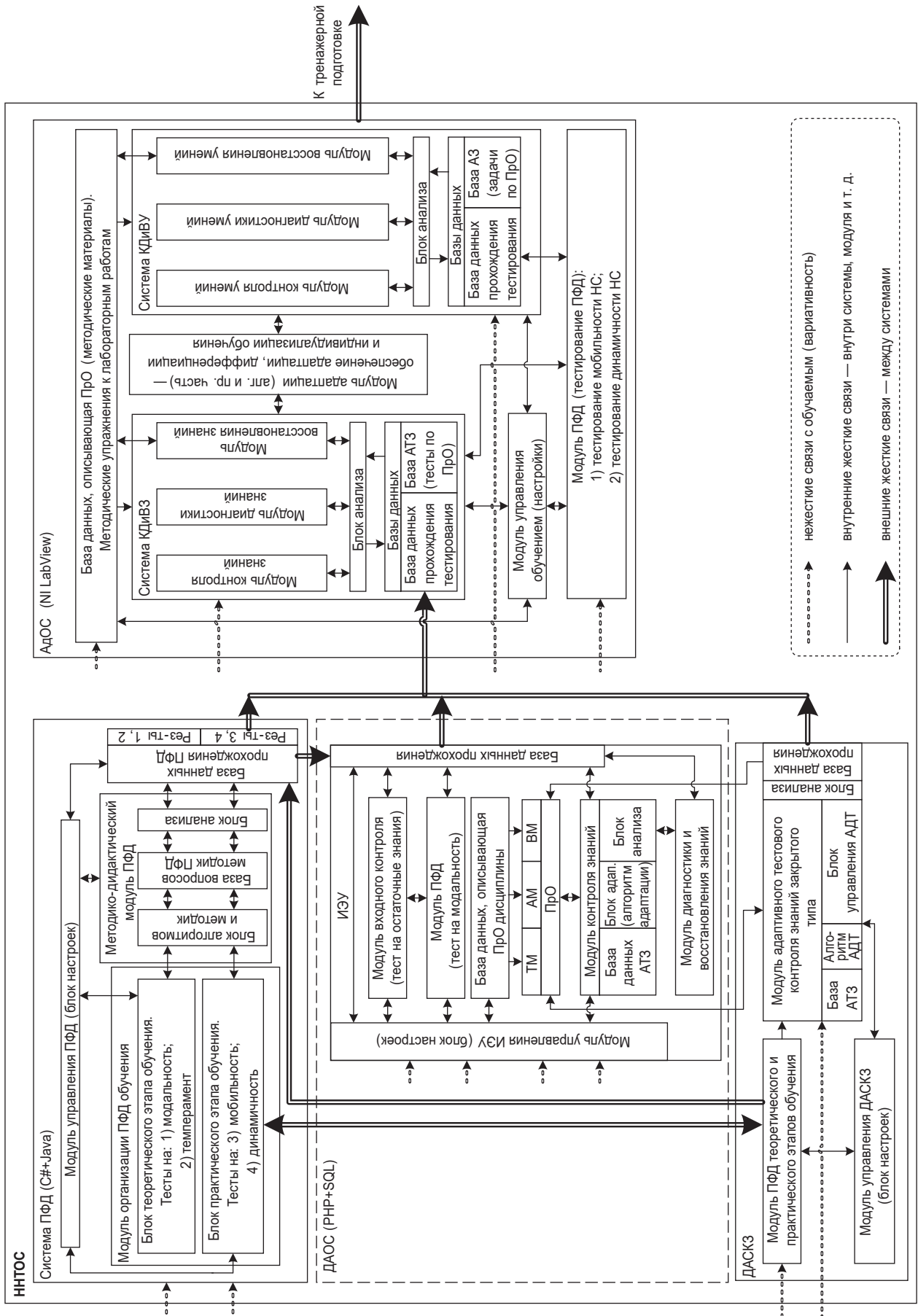
Обучаемый, проходя ПФД в целях адаптации процесса обучения на теоретическом и практическом этапах, проходит ПФД (тестирование), за реализацию которого отвечает модуль организации ПФД обучения, в состав которого входят блок ПФД теоретического этапа, реализующий ПФД на базе тестов, направленных на определение модальности (доминирующего канала восприятия информации), а также темперамента, и блок ПФД практического этапа для установления мобильности (лабильность/инертность) и динамичности (сила/слабость) НС.

Данный модуль, обращаясь к методико-дидактическому модулю ПФД, в состав которого входят блок алгоритмов и методик, база вопросов методик ПФД и блок анализа тестирования, за счет которых генерируются ТЗ на определение ПФХ обучаемых и анализируются результаты, которые впоследствии одновременно сохраняются в базе данных прохождения ПФД и передаются в базы данных прочих автономных элементов, таких как ДАОС и АдОС. Алгоритм функционирования, описания работы системы ПФД и методик диагностики, примеры ПФД и графический интерфейс приведены в работах [18, 19].

Данные о прохождении обучаемым ПФД, полученные системой ПФД, могут быть использованы ДАОС и АдОС, тем не менее ДАОС также имеет в своем составе независимый модуль ПФД.

Система представляет собой клиент-серверную организацию на базе специального алгоритмическо-программного обеспечения (набора самостоятельных алгоритмов и программ), разработанного средствами языков программирования PHP и СУБД SQL [20].

В состав ДАОС входит ИЭУ, предназначенный для адаптации и индивидуализации процесса



■ Рис. 2. Архитектура NNTOC

изучения обучаемым УМ из ПрО. Блок ДАСКЗ служит для оперативного адаптивного контроля качества усвоения теоретического материала.

При работе с ИЭУ модуль управления ИЭУ с блоком настроек обращается к модулю входного контроля и модулю ПФД, которые генерируют адаптивные ТЗ (АТЗ), ориентированные на входной ТК и ПФТ на определение ПФХ НС обучаемых соответственно.

Исходя из свойства вариативности, при изучении курса дисциплины БВКНиСВ обучаемый может отказаться от прохождения входного контроля и самостоятельно перейти к изучению теоретического материала из базы данных, описывающей ПрО дисциплины, определяя собственноручно последовательность работы и темп изучения УМ (при этом процедура адаптации теоретического материала для нужд данного пользователя не производится).

При прохождении входного тестирования обучаемому будет предложено пройти два теста (адаптивный ТК и ПФД). Первый, состоящий из АТЗ, — на определение остаточных знаний (входной контроль остаточных знаний) и второй — ориентированный на ПФД в целях определения модальности.

На этапе входного контроля знаний основные задачи адаптивного тестирования заключаются в выявлении остаточных знаний, установлении общего уровня подготовленности группы, для организации индивидуализации и (или) дифференциации процесса теоретического обучения, адаптации этапов теоретической подготовки (от более простого УМ к более сложному, начиная с тех учебных элементов, которые подавляющим большинством учебной группы не изучены). Менее важной, второстепенной задачей входного контроля является мотивация, направленная в первую очередь на «завлечение», «привитие» интереса к читаемой дисциплине. Стоит отметить, что оценка знаний на данном этапе является не самоцелью, а скорее средством получения некоторой полезной информации об учебной группе в целом и о каждом ее члене в частности.

В качестве теста, определяющего ПФХ обучаемых, выступает тест на модальность. Описание методики и внешний вид данного теста приведены в работе [5].

После прохождения входного АТЗ и ПФД данные обучаемых сохраняются в базе данных прохождения и передаются в базу данных, описывающую ПрО дисциплины, в целях адаптации теоретического материала к текущему уровню знаний и типу восприятия (аудиальный, визуальный, кинестетический) обучаемого. Теоретический материал базы данных, описывающей ПрО дисциплины, представлен в виде текстовых материалов (ТМ), аудиоматериалов (АМ)

и видеоматериалов (ВМ), размещаемых либо на сайте ИЭУ, либо в облачном хранилище преподавателя-эксперта (автономный вариант).

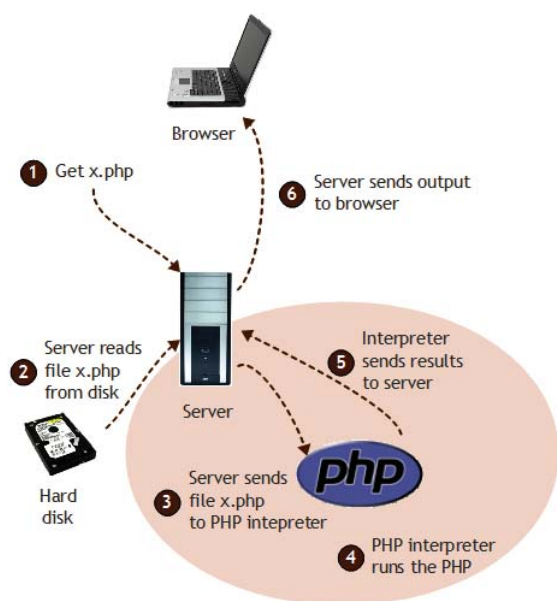
Независимо от факта прохождения/непрохождения входного тестирования (адаптивный ТК и ПФД) обучаемый получает доступ к определенным разделам УМ базы данных, описывающей ПрО дисциплины, после изучения которых проходит промежуточный (рубежный или тематический) контроль знаний, основной задачей которого является оценка усвоения знаний в течение обучения и после изучения определенной темы и (или) раздела дисциплины.

Генерируется данное тестирование закрытого типа модулем контроля знаний, в состав которого входит база данных АТЗ, где представлена полная номенклатура тестовых вопросов; блок адаптации, реализующий выдачу ТЗ в соответствии с алгоритмом адаптивного контроля, и блок анализа результатов тестирования, оценивающий текущую успеваемость обучаемого и определяющий необходимость реализации процедуры восстановления знаний.

В отличие от промежуточного контроля знаний, проводимого модулем (системой) контроля, диагностики и восстановления знаний в составе ИЭУ, ДАСКЗ предназначена для организации аудиторного и (или) удаленного мониторинга знаний в целях допуска обучаемого к практическому этапу. Система состоит из трех модулей: модуля ПФД теоретического и практического этапов обучения, модуля адаптивного тестового контроля знаний закрытого типа и модуля управления ДАСКЗ, в состав которого входит блок настройки.

Организует работу ДАСКЗ модуль управления, который автоматизирует и согласует работу остальных двух модулей, при этом модуль ПФД теоретического и практического этапов обучения предназначен для тестирования ПФХ обучаемых, работающих с системой, с целью адаптировать процесс контроля знаний к их индивидуальным латентным характеристикам НС, а модуль адаптивного тестового контроля знаний закрытого типа — для организации автоматизированного дистанционного адаптивного тестирования. В состав последнего модуля входят база АТЗ, из которой формируется с помощью алгоритма адаптивного теста (АДТ) под действием блока управления последовательность вопросов.

Результаты тестирования сохраняются в «Журнале прохождения» и могут быть доступны в любой момент времени как обучаемому, так и преподавателю-эксперту. Совокупность «Журналов прохождения» тестирования по каждому обучаемому и по группам обучаемых составляет базу данных прохождения (данная информация также передается в базу данных ПрО и базу данных прохож-



■ **Рис. 3.** Организация клиент-серверного взаимодействия

дения ИЭУ, а также поступает в соответствующие базы АдОС).

Схема клиент-серверного взаимодействия отдельных элементов ДАСКЗ представлена на рис. 3.

После прохождения итогового контроля знаний, завершающего теоретический этап подготовки, данные обучаемого (успеваемость и ПФХ) передаются в АдОС, а сам обучаемый переходит к практическому этапу обучения. АдОС состоит из двух систем, трех модулей и базы данных, описывающей ПрО.

Модуль ПФД предназначен для тестирования ПФХ НС обучаемого, характеризующих его моторные особенности работы (обучаемый может пройти данное тестирование и на теоретическом этапе обучения при работе с системами ПФД и ДАОС).

Модуль адаптации, в состав которого входит база алгоритмов адаптивного контроля, обеспечивает индивидуализацию, дифференциацию и адаптацию процедур контроля диагностики и восстановления знаний (КДиВЗ)/контроля диагностики и восстановления умений (КДиВУ).

Модуль управления обучением, в состав которого также входит блок настроек, обеспечивает синхронизацию и автоматизацию работы всех элементов АдОС.

База данных, описывающая ПрО, представляет собой набор методико-дидактических материалов для обеспечения практического этапа обучения (задачи, примеры, упражнения).

Самыми крупными структурными единицами АдОС являются системы КДиВЗ и КДиВУ (основная).

Система КДиВУ предназначена для контроля, диагностики и восстановления умений обучаемого. Из базы адаптивных заданий (АЗ) обучаемому предлагается решить практическую навигационную задачу. Решение предполагает реализацию некоторой последовательности действий и опирается на полученные ранее теоретические знания из УМ ПрО. Результат решения оценивается блоком анализа и сохраняется в базе данных прохождения.

В зависимости от успешности контроля обучаемый либо переходит к подготовке на процедурном компьютерном тренажере, либо проходит процедуру диагностики (направлена на указание и объяснение основных ошибок, допущенных при решении задачи) и восстановления умений (обращается к методическим материалам и упражнениям по решению навигационных задач). В КДиВУ для организации процедур контроля диагностики и восстановления присутствуют соответствующие модули.

После проведения процедуры восстановления умений система предлагает обучаемому вторично решить аналогичную задачу, при успешном решении он допускается к тренажерной подготовке, при повторной неудаче система КДиВУ выдает исходные данные в модуль управления обучением, который направляет обучаемого к работе с КДиВЗ в части прохождения тестирования знаний, ориентированного на проверку усвоения теоретического материала, на основании которого решается задача. Модуль управления, задействуя базу данных, описывающую ПрО, генерирует средствами модуля контроля знаний ТЗ закрытого типа. Результат тестирования оценивается блоком анализа и сохраняется в базе прохождения тестирования. При неудачном прохождении тестирования осуществляется процедура восстановления знаний за счет обращения к теоретическому материалу ПрО (обращение к ИЭУ). Только при удачном прохождении процедуры контроля знаний, организованной ДАСКЗ, обучаемый вновь допускается к практической части (повторному решению навигационной задачи).

Заключение

В заключение следует сказать, что разработанная ННТОС дает возможность оптимизировать процесс подготовки авиационных специалистов: осуществлять контроль, диагностику, восстановление знаний и умений на теоретическом и практическом этапах обучения с учетом адаптации к индивидуальным особенностям работающих с системой. Предложенная авторская архитектура ННТОС предоставляет обучающимся возможность самим выбирать порядок изучения учебного материала на всех этапах обу-

чения, позволяет сократить время обучения, интенсифицировать обучающий процесс, повысить степень усвоения знаний, а также проводить дистанционный контроль на всех этапах обучения. Компьютеризация теоретического обучения и внедрение автоматизированных обучающих систем приводит к повышению качества обучения.

Результатом является успешное использование практических разработок, описанных в данной статье, в учебном процессе:

1) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на кафедрах аэрокосмических приборов и измерительно-вычислительных комплексов, эксплуатации и управления аэрокосмическими системами;

2) Военного учебного научного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия имени Н. Г. Кузнецова» на кафедре морской авиации;

3) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского на кафедре навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полета летательных аппаратов;

4) муниципального бюджетного общеобразовательного учреждения «Пушкиногорская средняя общеобразовательная школа имени А. С. Пушкина».

Разработанная система также постоянно модернизируется и активно применяется в проектно-конструкторской деятельности «АО «Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. В. Фрунзе», тем самым подтверждая свою актуальность и значимость.

Литература

- Бессонов А. А., Мамаев В. Я., Парамонов П. П. Интеллектуальные обучающие системы: учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2016. — 172 с.
- Нейман Ю. М., Хлебников В. А. Введение в теорию моделирования и параметризации педагогических тестов. — М.: Прометей, 2000. — 168 с.
- Глова В. И., Дуплик С. В. Модели педагогического тестирования обучаемых // Вестник Казан. гос. тех. ун-та им. А. Н. Туполева. 2003. № 2. С. 74–79.
- Зайцева Л. В. Методы и модели адаптации к учащимся в системах компьютерного обучения // Образовательные технологии и общество. 2003. № 6 (4). С. 204–211.
- Эббингауз Г., Бен А. Ассоциативная психология. — М.: АСТ, 1998. — 528 с.
- Елисеев О. П. Практикум по психологии личности. — СПб.: Питер, 2001. — 560 с.
- Ильин Е. П. Психология индивидуальных различий. — СПб.: Питер, 2004. — 701 с.
- Небылицын В. Д. Основные свойства нервной системы. — М.: Просвещение, 1966. — 280 с.
- Григорьев А. П., Мамаев В. Я. Опыт использования нейронных сетей в анализе и структурном воссоздании предметных знаний специалиста // Научное приборостроение. 2016. № 4 (26). С. 85–93.
- Васильев В. И., Тягунова Т. Н., Хлебников В. А. Триадная сущность шкалы оценивания // Дистанционное образование. 2000. № 6. С. 19–25.
- Лаптев В. В. Модель предметной области и оценка ее сложности в обучающей системе по программированию // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.
- Управление, вычисл. техн. информ. 2010. № 2. С. 35–44.
- Мамаев В. Я., Синяков А. Н., Петров К. К., Горбунов Д. А. Воздушная навигация и элементы самолетовождения: учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2002. — 256 с.
- Батоврин В. К., Бессонов А. С., Мошкин В. В., Папуловский В. Ф. LabVIEW: практикум по основам измерительных технологий: учеб. пособие для вузов. — М.: ДМК Пресс, 2005. — 208 с.
- Рудинский И. Д. Модель нечеткого оценивания знаний как методологический базис автоматизации педагогического тестирования // Информационные технологии. 2003. № 9. С. 46–51.
- Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd ed. — Prentice-Hall, 1998. — 842 p.
- Григорьев А. П., Мамаев В. Я. О применении нейронных сетей в тестировании знаний // Научное приборостроение. 2016. № 4 (26). С. 77–84.
- Дунаев В. Самоучитель JavaScript. 2-е изд. — СПб.: Питер, 2005. — 395 с.
- Григорьев А. П., Орлов А. А. Адаптация АОС к психофизиологическим особенностям обучаемых // Сб. докл. научной сессии ГУАП. СПб.: ГУАП, 2014. С. 22–26.
- Григорьев А. П., Писаренко Е. С. Моделирование психофизиологического тестирования обучаемых высшей технической школы // Сб. докл. научной сессии ГУАП. СПб.: ГУАП, 2014. С. 26–29.
- Suehring S., Converse T., Park J. PHP 6 and MySQL 6 Bible. — Wiley Publ., 2009. — 912 p.

UDC 004.89

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.89

A Neuronet Navigational Training SystemGrigoryev A. P.^{a,b}, Assistant Professor, Head of Design and Engineering Sector, alexgrig-1986@mail.ruBurlutsky S. G.^a, PhD, Tech., Associate Professor, sergey_burluckiy@mail.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^bJSC «Arsenal Design Bureau named after Mikhail Vasil'evich Frunze», 1–3, Komsomola St., 195009, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Training of aviation specialists is a time-consuming and expensive cyclical process requiring intermediate and final control. **Purpose:** An effective methodology should be developed for the organization of training of aviation specialists on the basis of axiological-competence approach with the use of training systems. The organization algorithm should cover both classroom and extracurricular learning in the study of special subjects. **Results:** Problems for a training system have been formulated: control, diagnostics, restoration of knowledge and skills at the theoretical and practical stages of the training, taking into account the adaptation to individual characteristics of the people working with the system (their level of training and psychophysiological features). It has been found that the design of training systems based on artificial neural networks allows you to keep the accuracy and reliability specified by the developer (without collecting and processing full statistical information about a group of trainees) when developing individual modules and entire systems. The learning process in training systems is considered a controlled procedure of solving adaptive tests with issuance of comments (diagnostics) and restoration of knowledge (compensation of missing or unassigned knowledge) by references to the theoretic material from an electronic training manual. An author's architecture has been proposed for a neural network navigation simulator and training system for the training of aviation specialists, which is based on the neural-network and neuron-fuzzy approach (using neural networks and fuzzy logic) to knowledge control; graphosemantic description of the subject area of the discipline under study; evaluation and derivation of each student's action when solving a problem based on binary trees followed by graphosemantic ranking of the complexity of individual operations, as well as the analysis of how close an answer is to the correct one. The architecture makes it possible to provide variability (the learners can choose the order in which they study the material) and adapt the learning process to the individual traits of the trainees. **Practical relevance:** The developed system allows you to reduce the training time, to intensify the learning process, to improve mastering of knowledge, and to perform remote monitoring at all stages of the training.

Keywords — Training of Aviation Specialists, Axiological Approach, Competence Approach, Adaptive Training Systems, Artificial Neural Networks, Artificial Neural Networks in Education, Intelligent Training Systems, Adaptability to Psycho-Physiological Peculiarities of the Learner, Definition of Latent Properties of Nervous System, Modality, Temperament, Mobility, Dynamism.

References

- Bessonov A. A., Mamaev V. Ia., Paramonov P. P. *Intellektual'nye obuchaiushchie sistemy* [Intelligent Training Systems]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2016. 172 p. (In Russian).
- Neyman Yu. M., Khlebnikov V. A. *Vvedenie v teoriyu modelirovaniia i parametrizatsii pedagogicheskikh testov* [Introduction to the Theory of Modeling and Parameterization of Pedagogical Tests]. Moscow, Prometei Publ., 2000. 168 p. (In Russian).
- Glova V. I., Duplik S. V. Models for Pedagogical Testing of Students. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A. N. Tupoleva*, 2003, no. 2 (34), pp. 74–79 (In Russian).
- Zaytseva L. V. Methods and Models of Adaptation to Students in the Computer-Based Learning Systems. *Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo* [Educational Technology and Society], 2003, no. 4 (6), pp. 204–211 (In Russian).
- Ebbinghaus H., Ben A. *Assotsiativnaia psikhologiya* [Associative Psychology]. Moscow, AST Publ., 1998. 528 p. (In Russian).
- Yeliseyev O. P. *Praktikum po psikhologii lichnosti* [Practicum in Psychology of Personality]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2001. 560 p. (In Russian).
- Ilyin Ye. P. *Psikhologiya individual'nykh razlichii* [Psychology of Individual Differences]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2004. 701 p. (In Russian).
- Nebylitsyn V. D. *Osnovnye svoistva nervnoi sistemy* [Basic Properties of the Nervous System]. Moscow, Prosveshchenie Publ., 1966. 280 p. (In Russian).
- Grigoryev A. P., Mamaev V. Ia. Experience of Use of Neural Networks in the Analysis and the Structural Reconstruction of Subject Knowledge of the Specialist. *Nauchnoe priboroostroenie*, 2016, no. 4 (26), pp. 85–93 (In Russian).
- Vasil'ev V. I., Tiagunova T. N., Khlebnikov V. A. Triadic Nature of Assessment Scales. *Distantsionnoe obrazovanie*, 2000, no. 6, pp. 19–25 (In Russian).
- Laptev V. V. Domain Model and Estimation of Its Complexity in the Training System for Programming. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2010, no. 2, pp. 35–44 (In Russian).
- Mamayev V. Ya., Sinyakov A. N., Petrov K. K., Gorbunov D. A. *Vozdushnaia navigatsiia i elementy samoletovozhdeniia* [Air Navigation and Piloting Elements]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2002. 256 p. (In Russian).
- Batovrin V. K., Bessonov A. S., Moshkin V. V., Papulovskii V. F. *LabVIEW: praktikum po osnovam izmeritel'nykh tekhnologii* [LabVIEW: A Workshop on the Basics of Measurement Technology]. Moscow, DMK Press Publ., 2005. 208 p. (In Russian).
- Rudinskii I. D. Model of Fuzzy Evaluation of Knowledge as a Methodological Basis of Pedagogical Testing Automation. *Informatsionnye tekhnologii*, 2003, no. 9, pp. 46–51 (In Russian).
- Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd ed. Prentice-Hall, 1998. 842 p.
- Grigoryev A. P., Mamaev V. Ia. Application of Artificial Neural Networks in Knowledge Control. *Nauchnoe priboroostroenie*, 2016, no. 4 (26), pp. 77–84 (In Russian).
- Dunaev V. *Samouchitel' JavaScript*. 2nd ed. [JavaScript Tutorial]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2005. 395 p. (In Russian).
- Grigoryev A. P., Orlov A. A. Adaptation of Adaptive Training Systems to Psychophysiological Features of Trainees. *Sbornik dokladov nauchnoi sessii GUAP* [Collection of Presentations at the Scientific Session of the SUAI]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2014, pp. 22–26 (In Russian).
- Grigoryev A. P., Pisarenko Ye. S. Modeling of Psychophysiological Testing of Students of Higher Technical School. *Sbornik dokladov nauchnoi sessii GUAP* [Collection of Presentations at the Scientific Session of the SUAI]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2014, pp. 26–29 (In Russian).
- Suehring S., Converse T., Park J. *PHP 6 and MySQL 6 Bible*. Wiley Publ., 2009. 912 p.

ФОРМАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЧАСТНЫХ МЕТОДИК ПРОИЗВОДСТВА КОМПЬЮТЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

А. А. Шелупанов^а, доктор техн. наук, профессор

А. Р. Смолина^а, младший научный сотрудник

^аТомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, РФ

Введение: из-за быстрого устаревания методик, большого количества объектов исследования и широкого круга вопросов компьютерно-технической экспертизы значительную часть времени эксперты тратят на адаптацию и доработку общих методик под частные задачи экспертизы, что делает актуальной задачу автоматизации формирования частных методик производства компьютерно-технических экспертиз. **Цель исследования:** разработка подхода, позволяющего автоматизировать и упростить процесс формирования частных методик производства компьютерно-технических экспертиз. **Результаты:** разработан формализованный подход, основанный на теории графов, позволяющий автоматизировать и упростить процесс формирования частных методик производства компьютерно-технических экспертиз. В основе подхода лежит определение последовательности методов производства компьютерно-технической экспертизы, учитывающее две группы входных параметров: предмет экспертизы (категории задач, вопросы экспертизы, объекты исследования) и условия проведения экспертизы (временные, финансовые, человеческие ресурсы и т. д.). **Практическая значимость:** в результате внедрения предложенного авторами подхода в двух экспертных организациях Томской области отмечен следующий положительный эффект: сокращение сроков производства экспертизы от 15 до 25 %; сокращение сроков разработки частной методики компьютерно-технической экспертизы на 38 %; уменьшение затрат на производство экспертизы от 20 до 22 %, что однозначно свидетельствует о действенности такого подхода.

Ключевые слова — компьютерно-техническая экспертиза, система поддержки, формирование частных методик, информационная безопасность, расследование киберпреступлений.

Введение

Киберпреступления [1] занимают в настоящее время одно из первых мест по количеству и сумме ущерба, нанесенного юридическим и физическим лицам. Так, по информации Group-IB, в 2013 г. киберпреступники «заработали» в РФ и СНГ \$ 2,5 млрд [2]. А согласно сведениям, опубликованным информационным ресурсом «Ведомости» [3], только за 2014 г. правоохранительными органами было зарегистрировано 11 000 компьютерных преступлений в Российской Федерации.

Киберпреступления имеют высокую степень латентности (скрытности) — большая часть преступлений остается даже не зарегистрированной. Раскрываемость компьютерных преступлений составляет не более 5 % (по данным «Лаборатории Касперского»).

Противодействие правонарушениям в области технической защищенности систем, в том числе киберпреступлениям, является одной из задач информационной безопасности. Компьютерно-техническая экспертиза (КТЭ) [4] — это отдельное, строго регламентированное процессуальное действие, проводимое в ходе расследования подобных преступлений. КТЭ должна проводиться на основании методики, соответствующей современному уровню развития науки и техники, а также требованиям отечественного законодательства [5–10].

Целью КТЭ является получение ответа на вопросы, требующие специальных знаний в области форензики (компьютерной криминалистики) — сведений о методах поиска, закрепления и исследования цифровых доказательств по преступлениям, связанным с компьютерной информацией [11].

Расследование киберпреступлений, производство экспертиз по ним осложняется тем, что с постоянным развитием информационных технологий появляются объекты исследования, которых ранее просто не было, изменяются, модифицируются механизмы и методы совершения ранее известных видов преступлений, появляются абсолютно новые виды преступлений. Одновременно с развитием информационных технологий и информационных систем учеными проводятся исследования теории и практики противодействия киберпреступности, разрабатываются алгоритмы расследования инцидентов, анализируются уязвимости, вредоносное программное обеспечение. Весомый вклад в развитие работ этого направления внесли сотрудники компании Group-IB, «Лаборатории Касперского», Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники [12–16]. Не решенным остается вопрос упрощения поиска частных экспертных методик производства КТЭ [4].

Экспертам КТЭ для дачи полного, достоверного, научно обоснованного заключения необходимо

использовать соответствующие настоящему времени экспертные методики [4]. Появляющиеся методики КТЭ быстро устаревают и уже через несколько лет требуют доработки.

Эксперты КТЭ из-за быстрого устаревания методик, большого количества объектов исследования и широкого круга вопросов данного рода экспертизы значительную часть времени тратят на адаптацию и доработку общих методик под частные задачи экспертизы, поиск необходимых методов — разработку частных методик производства КТЭ. Сложность и длительность разработки частных методик КТЭ увеличиваются при наложении экспертной организацией ограничений на выбор методов производства экспертизы по ресурсам (срокам, стоимости экспертного программного обеспечения и др.). Вышеописанное подчеркивает актуальность задачи автоматизации формирования частных методик производства КТЭ.

Для автоматизации и упрощения процесса разработки частных методик КТЭ авторами предлагается система поддержки формирования частных методик производства компьютерно-технических экспертиз (СП ФОРЧМЕТ).

В статье раскрываются основы разрабатываемой СП ФОРЧМЕТ.

Для разработки СП ФОРЧМЕТ необходимо решить следующие задачи:

— классификации методик производства КТЭ (по параметрам: категории задач, вопросы экспертизы, объекты исследования);

— построения модели методики производства КТЭ;

— определения последовательности методов для каждой из стадий экспертизы с учетом условий (ограничений) ее проведения (временных, финансовых, человеческих ресурсов и др.).

Особое внимание в статье уделено подходу определения последовательности методов производства КТЭ.

Обобщенный алгоритм производства КТЭ

В общем смысле под частной методикой производства КТЭ понимается совокупность частных методов, примененных по определенному алгоритму. Обобщенная схема алгоритма представляет собой последовательность из шести стадий экспертизы (рисунок), описанных ниже [11].

Подготовительная стадия. В ходе подготовительной стадии экспертом КТЭ выполняются следующие действия:

— дается подписка о предупреждении об уголовной ответственности за дачу заведомо ложного заключения по ст. 307 Уголовного кодекса Российской Федерации (УК РФ) [10] или об адми-



■ Обобщенная схема алгоритма

нистративной ответственности по ст. 17.9 Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях (КоАП РФ) [17], а в необходимых случаях — по ст. 310 УК РФ за разглашение данных предварительного расследования;

— анализируется постановление/определение, рассматриваются поставленные вопросы;

— изучаются материалы дела;

— выполняются осмотр и описание объектов, предоставленных на экспертизу. При осмотре эксперт изучает общие признаки исследуемых объектов. Осмотр рекомендуется сопровождать фотосъемкой объектов при их поступлении в экспертное учреждение — в упаковке и без упаков-

ки в целях фиксации внешних признаков исследуемых объектов;

— после внешнего осмотра объектов проводится предварительный анализ информационного содержимого объектов в целях определения пригодности и достаточности объектов. Для ответа на вопросы экспертизы и определения методов исследования объекты подключаются к тестовому компьютеру эксперта.

Также составляется рабочий план выполнения исследования. На тестовом компьютере эксперта подготавливаются рабочие зоны. Под рабочими зонами будем понимать директории на тестовом компьютере эксперта, содержащие всю исследуемую информацию и информацию, имеющую доказательное значение в рамках дела.

Подготовка рабочих зон заключается в следующем: результаты предварительного исследования и регламентированная информация об эксперте, экспертном учреждении, экспертизе отражаются в вводной и частично исследовательской частях заключения.

Аналитическая стадия. На этой стадии проводится тщательное исследование объектов с использованием аппаратно-программных средств — экспертного инструментария.

Аналитическая стадия состоит из двух этапов: предварительного, направленного на получение общей информации об исследуемых объектах, и основного, на котором происходит детальный анализ в целях получения информации, имеющей значение для ответа на вопросы постановления/определения.

Эксперимент. Наличие стадии эксперимента зависит от каждой конкретной ситуации, его форма базируется на задачах и целях экспертного исследования. Место и состав эксперимента определяются экспертом. Эксперимент может быть проведен как в экспертном учреждении, так и вне его. Эксперимент включает в себя следующие этапы: проектирование; подготовку; проведение; подведение итогов.

Экспертный эксперимент проводится экспертом в целях выявления механизма взаимодействия объектов экспертного исследования и (или) механизма слефообразования, его отдельных параметров. В ходе экспертного эксперимента эксперт изучает интересующие его процессы и условия.

В исследовательской части заключения эксперт должен подробно описать условия проведения эксперимента и его результаты. Результаты эксперимента оформляются в виде предварительных выводов по данной стадии.

Синтезирующая стадия. Данная часть исследования представляет собой обобщение информации, полученной на предыдущих стадиях экспертизы. В зависимости от конкретных задач,

решение которых необходимо для ответа на поставленные вопросы, рассматриваются определенные артефакты.

Результативная стадия. На данной стадии происходит подведение итогов, оцениваются результаты проведенных исследований, выполняется окончательное оформление исследовательской (и, если требуется, вводной) части заключения.

Формирование выводов. Результатом этой стадии является оформление выводов в разделе заключения «*Выводы*». В нем должны быть обязательно отражены все вопросы экспертизы и ответы на них.

Вывод по каждому вопросу должен быть развернутым, желательно указание ссылок на информацию в исследовательской части заключения, исходя из которой сделаны выводы.

Описание подхода выбора методов КТЭ

Подход определения последовательности методов производства КТЭ основан на теории графов [18]. Он учитывает две группы входных параметров: предмет экспертизы (категории задач, вопросы экспертизы, объекты исследования); условия проведения экспертизы (временные ресурсы, финансовые ресурсы, человеческие ресурсы и т. д.). От данных параметров зависит последовательность методов, из которых состоит частная методика производства КТЭ.

Одни и те же методы могут быть использованы на разных стадиях экспертизы (например, наглядно-образный метод представления информации используется для фиксации результатов на всех стадиях исследования), т. е. существуют методы, общие для нескольких стадий экспертного исследования.

Первая группа входных параметров СП ФОРЧМЕТ определяет общую методику для вида КТЭ с учетом вопросов КТЭ и объектов. Вторая группа входных параметров (условия проведения экспертизы) уточняет общую методику до частной методики.

Методы, применяемые на каждой стадии КТЭ, должны соответствовать выбранной методике производства КТЭ, согласуясь с заданными входными параметрами первой группы [19]. Так как во многих методиках КТЭ одновременно описывается несколько методов, предоставляющих возможность провести всестороннее и полное исследование и направленных на решение одних и тех же задач, то авторы предлагают определение методов исследования для частной методики производства КТЭ исходя из потребностей экспертной организации. Потребности экспертной организации учитываются в СП ФОРЧМЕТ как

дополнительная группа входных параметров при формировании частной методики.

Авторами предлагается выбирать методы исследования с точки зрения оптимальности использования ресурсов (финансовых, временных, человеческих и т. д.). Поиск методов, обеспечивающих такое использование ресурсов, авторами предлагается выполнить, обратившись к теории графов, и решить данную задачу как типовую в теории графов — о поиске кратчайшего пути [20].

Введем следующие обозначения:

1) $R = \{r_0, r_{1,1}, r_{1,2}, \dots, r_{i,j}, r_e\}$ — множество вершин графа RR ; RE — множество дуг d_{ij} графа RR , упорядоченных пар вершин $r \in R$;

2) каждой дуге RE сопоставлен вес k_{ij} ;

3) вершина r_0 — начало производства КТЭ;

4) вершина r_e — завершение производства КТЭ;

5) вершина r_{ij} — метод этапа одной из стадий производства КТЭ;

6) i — количество альтернативных методов на определенной стадии производства КТЭ, $i \geq 1$;

7) j — количество стадий производства КТЭ, $j \geq 1$;

8) k_{ij} — вес дуги, обозначает длину дуги — неотрицательное число, характеризующее затраты ресурса (количество затрачиваемого времени, либо необходимое количество экспертов, либо финансовые затраты), по которому проводится определение методов.

Данная задача имеет следующие особенности:

— для определения последовательности методов используется ориентированный граф;

— в графе большое количество вершин;

— в графе нет ребер с отрицательным весом;

— все вершины, включенные в схему (методику), должны быть соединены с первой вершиной путями минимальной «длины»;

— в конечной схеме методов не может быть циклов;

— в конечную схему методов могут быть включены не все вершины графа;

— при построении сети методов необходимо знать не только «длину» кратчайшего пути до вершины, но и список вершин, через которые он проходит;

— на вес ребра могут влиять несколько несвязанных параметров (например, затраты на производство экспертизы и сроки производства экспертизы).

Поскольку задача имеет ряд особенностей, важным становится выбор алгоритма ее решения, учитывающего их. Из особенностей задачи следует, что алгоритм поиска кратчайшего пути

должен обладать определенными свойствами. Сравнение алгоритмов для решения задач с такими особенностями выполнено в рамках работы Р. А. Черных [21]. Основываясь на результатах данного сравнения, для решения задачи авторы выбрали алгоритм Дейкстры [22]. Алгоритм Дейкстры базируется на следующем тезисе Дейкстры: если кратчайший путь проходит через вершину r_{ij} , то длина части пути от r_0 до r_{ij} должна быть минимально возможной.

Таким образом, был разработан подход определения последовательности методов производства КТЭ, основанный на теории графов.

Заключение

Итак, в статье показана актуальность задачи автоматизации формирования частных методик производства КТЭ. Она обусловлена наличием больших временных затрат экспертов КТЭ на адаптацию и доработку общих методик под частные задачи экспертизы, поиск необходимых методов при разработке частных методик производства КТЭ. При этом сложность и длительность разработки частных методик КТЭ увеличиваются при наложении экспертной организацией ограничений на выбор методов производства экспертизы по ресурсам (срокам, стоимости экспертного программного обеспечения и др.).

Для решения вышеописанной задачи предложена система поддержки формирования частных методик производства КТЭ — СП ФОРЧМЕТ. В статье описывается подход к определению последовательности методов производства КТЭ. В качестве базового теоретического аппарата выбраны методы теории графов.

Предложенный подход к формированию частных методик, используемый в СП ФОРЧМЕТ, внедрен в двух экспертных организациях Томской области. В результате внедрения экспертными организациями отмечен следующий положительный эффект:

— сокращение сроков производства экспертизы от 15 до 25 %;

— сокращение сроков разработки частной методики КТЭ на 38 %;

— уменьшение затрат на производство экспертизы от 20 до 22 %.

Таким образом, благодаря использованию в СП ФОРЧМЕТ формального подхода, основанного на графовой модели, обеспечивается более действенное по сравнению с традиционными методами решение задачи формирования частных методик производства КТЭ.

Литература

1. Понятие киберпреступности. <http://elcomrevue.ru/kibeoprestupnost-chto-eto/> (дата обращения: 20.05.2016).
2. Threat Intelligence Report 2012–2013. <http://report2013.group-ib.ru/> (дата обращения: 02.05.2016).
3. МВД зарегистрировало около 11 000 киберпреступлений в 2014 г. <http://www.vedomosti.ru/technology/articles/2015/02/06/kiberprestupniki-v-spiskah-ne-znachatsya> (дата обращения: 02.05.2016).
4. Концептуальные основы судебной компьютерно-технической экспертизы. <http://www.dslib.net/kriminal-process/konceptualnye-osnovy-sudebnoj-kompjuterno-tehnicheskoy-jekspertizy.html> (дата обращения: 20.12.2015).
5. Федеральный закон «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации» (с изменениями на 8 марта 2015 года). <http://docs.cntd.ru/document/901788626> (дата обращения: 25.02.2016).
6. Гражданский процессуальный кодекс РФ (ГПК РФ 2015) (с изменениями на 30 декабря 2015 года). <http://docs.cntd.ru/document/grazhdanskij-processualnyj-kodeks-rf-gpk-rf> (дата обращения: 25.02.2016).
7. Уголовно-процессуальный кодекс РФ (УПК РФ) (с изменениями на 30 декабря 2015 года). <http://docs.cntd.ru/document/ugolovno-processualnyj-kodeks-rf-upk-rf> (дата обращения: 25.02.2016).
8. Арбитражный процессуальный кодекс РФ (АПК РФ 2015) (с изменениями на 30 декабря 2015 года). <http://docs.cntd.ru/document/arbitrazhnyj-processualnyj-kodeks-rf-ark-rf> (дата обращения: 25.02.2016).
9. Постановление Пленума Верховного суда Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. № 28 «О судебной экспертизе по уголовным делам». <http://docs.cntd.ru/document/902253012> (дата обращения: 25.02.2016).
10. Уголовный кодекс РФ (УК РФ 2015) (с изменениями на 30 декабря 2015 года). <http://docs.cntd.ru/document/ugolovnyj-kodeks-rf-uk-rf> (дата обращения: 25.02.2016).
11. Россинская Е. Р., Усов А. И. Судебная компьютерно-техническая экспертиза. — М.: Право и закон, 2001. — 416 с.
12. Мицель А. А., Шелупанов А. А., Ерохин С. С. Модель стратегического анализа информационной безопасности // Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2007. Т. 2. С. 34–41.
13. Епифанцев Б. Н., Шелупанов А. А., Белов Е. Б. Подход к оптимизации ресурсов для защиты информации в организационных системах // Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. С. 7–9.
14. Миронова В. Г., Шелупанов А. А. Методология формирования угроз безопасности конфиденциальной информации в неопределенных условиях их возникновения // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2012. № 12 (137). С. 39–45.
15. Шелупанов А. А., Смолина А. Р. Теоретические аспекты автоматизации формирования частных методик производства компьютерно-технической экспертизы // Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2016. Т. 19. № 2. С. 67–70.
16. Смолина А. Р. Проблемы методического обеспечения компьютерно-технической экспертизы // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 4. С. 96–98.
17. Кодекс РФ об административных правонарушениях (КоАП РФ 2015) (с изменениями на 15 февраля 2016 года). <http://docs.cntd.ru/document/kodeks-rf-ob-administrativnyh-pravonarushenijah-koap-rf> (дата обращения: 25.02.2016).
18. Дистель Р. Теория графов: пер. с англ. — Новосибирск: Издательство института математики, 2002. — 336 с.
19. Смолина А. Р., Шелупанов А. А. Классификация методик производства компьютерно-технической экспертизы с помощью подхода теории графов // Безопасность информационных технологий. 2016. № 2. С. 73–77.
20. Кратчайшие пути. http://life-prog.ru/1_23938_kratchayshie-puti.html (дата обращения: 02.05.2016).
21. Черных Р. А. Обоснование выбора алгоритма поиска кратчайшего пути для построения схемы сети лесовозных дорог. http://forest-culture.narod.ru/HBZ/Stat_11_1-2/chernih21.pdf (дата обращения: 29.05.2016).
22. Dijkstra's Algorithm. https://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s_algorithm (дата обращения: 02.05.2016).

UDC 004.056

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.99

Formal Foundation of Particular Methodology Design Support System for Computing Expertise

Shelupanov A. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, saa@tusur.ruSmolina A. R.^a, Junior Researcher, atoj@rambler.ru^aTomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Av., 634050, Tomsk, Russian Federation

Introduction: In computing expertise, techniques rapidly become obsolete, research objects are huge in number, and the range of issues is very broad. Therefore, the experts spend a lot of their time on adaptation and revision of general methods for particular problems. This makes it very important to automate the formation of particular computing expertise production methods. **Purpose:**

An approach should be developed which would allow you to automate and simplify the development of techniques for the production of computing expertise. **Results:** A formalized approach has been proposed, based on the graph theory, which allows you to automate and simplify the development of techniques for the production of computing expertise. Two groups of input parameters are considered in this approach. The first group contains the expertise objects (categories of problems, expertise issues, research objects). The second group includes the expertise conditions and constraints (temporal, financial, human, etc.). **Practical relevance:** The proposed approach has been introduced in two expert organizations of Tomsk region. As a result, the expert organizations have noted the following positive effects: the expertise now takes 15-25% less time; an individual technique of a computing expertise takes 38% less time to be developed; an expertise is 20-22% cheaper. The approach has proved itself to be efficient.

Keywords — Computing Expertise, Support System, Particular Methodology Design, Information Security, Cybercrime Investigation.

References

1. *Poniatie kiberprestupnosti* [The Concept of Cybercrime]. Available at: <http://elcomrevue.ru/kibeoprestupnost-cto-eto/> (accessed 20 May 2016).
2. *Threat Intelligence Report 2012–2013*. Available at: <http://report2013.group-ib.ru/> (accessed 20 May 2016).
3. *MVD zaregistrovalo okolo 11 000 kiberprestuplenii v 2014 g.* [The Interior Ministry Has Registered about 11000 of Cybercrime in 2014]. Available at: <http://www.vedomosti.ru/technology/articles/2015/02/06/kiberprestupniki-v-spiskah-ne-znachatsya> (accessed 20 May 2016).
4. *Kontseptualnye osnovy sudebnoi kompiuterno-tehnicheskoi ekspertizy* [The Conceptual Basis of The Computer Forensics]. Available at: <http://www.dslib.net/kriminal-process/kontseptualnye-osnovy-sudebnoj-kompiuterno-tehnicheskoi-jekspertizy.html> (accessed 20 May 2016).
5. *Federalnyi zakon "O gosudarstvennoi sudebno-ekspertnoi deiatelnosti v Rossiiskoi Federatsii" (s izmeneniiami na 8 marta 2015 goda)* [Federal Law "On State Forensic Activities in Russian Federation" (As Amended on March 8, 2015)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/901788626> (accessed 20 May 2016).
6. *Grazhdanskiy protsessualnyi kodeks RF (GPK RF 2015) (s izmeneniiami na 30 dekabria 2015 goda)* [Civil Procedural Code of Russian Federation (RF CPC 2015) (As Amended on December 30, 2015)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/grazhdanskiy-processualnyj-kodeks-rf-gpk-rf> (accessed 20 May 2016).
7. *Ugolovno-protsessualnyi kodeks RF (UPK RF) (s izmeneniiami na 30 dekabria 2015 goda)* [The Code of Criminal Procedure of Russian Federation (UPK the Russian Federation) (As Amended on December 30, 2015)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/ugolovno-processualnyj-kodeks-rf-upk-rf> (accessed 20 May 2016).
8. *Arbitrazhnyi protsessualnyi kodeks RF (APK RF 2015) (s izmeneniiami na 30 dekabria 2015 goda)* [Arbitration Procedural Code of Russian Federation (APC RF 2015) (As Amended on December 30, 2015)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/arbitrazhnyj-processualnyj-kodeks-rf-apk-rf> (accessed 20 May 2016).
9. *Postanovlenie Plenuma Verkhovnogo suda Rossiiskoi Federatsii ot 21 dekabria 2010 g. N 28 "O sudebnoi ekspertize po ugolovnym delam"* [The Resolution of Plenum of the Supreme Court of Russian Federation of 21 December 2010 N 28 "On Forensic Examination in Criminal Cases"]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902253012> (accessed 20 May 2016).
10. *Ugolovnyi kodeks RF (UK RF 2015) (s izmeneniiami na 30 dekabria 2015 goda)* [The Criminal Code (Criminal Code 2015) (As Amended on December 30, 2015)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/ugolovnyj-kodeks-rf-uk-rf> (accessed 20 May 2016).
11. Rossinskaia E. R., Usov A. I. *Sudebnaia kompiuterno-tehnicheskaja ekspertiza* [The Computer Forensics]. Moscow, Pravo i zakon Publ., 2001. 416 p. (In Russian).
12. Mitsel' A. A., Shelupanov A. A., Erokhin S. S. Model of Strategic Analysis of Information Security. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2007, vol. 2, pp. 34–41 (In Russian).
13. Epifantsev B. N., Shelupanov A. A., Belov E. B. Approach to Optimization of Resources for Information Protection in Organizational Systems. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 7–9 (In Russian).
14. Mironova V. G., Shelupanov A. A. Methodology of Formation of Threats of Safety of Confidential Information in Uncertain Conditions of their Emergence. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskaia nauka*, 2012, no. 12 (137), pp. 39–45 (In Russian).
15. Shelupanov A. A., Smolina A. R. Theoretical Aspects of Particular Methodologies Design Support System for Computer Forensics Provision. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2016, vol. 19, no. 2, pp. 67–70 (In Russian).
16. Smolina A. R. Problems of Methodical Ensuring Computer Technical Expertize. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2014, no. 4, pp. 96–98 (In Russian).
17. *Kodeks RF ob administrativnykh pravonarusheniakh (KoAP RF 2015) (s izmeneniiami na 15 fevralia 2016 goda)* [The Code of Administrative Offences (Cao RF 2015) (As Amended on February 15, 2016)] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/kodeks-rf-ob-administrativnykh-pravonarushenijah-koap-rf> (accessed 20 May 2016).
18. Diestel R. *Graph Theory, Electronic Edition*. New York, Springer-Verlag, 2005. 422 p.
19. Smolina A. R., Shelupanov A. A. Classification of Methods of Production of Computer Forensic by Usage Approach of Graph Theory. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii*, 2016, no. 2, pp. 73–77 (In Russian).
20. *Kratchaishe puti* [The Shortest Way] Available at: http://life-prog.ru/1_23938_kratchayshie-puti.html, (accessed 20 May 2016).
21. Chernykh R. A. *Obosnovanie vybora algoritma poiska kratchaishego puti dlia postroeniia skhemy seti lesovoznykh dorog* [The Rationale for the Selection of the Algorithm to Find the Shortest Path to Construct a Network Diagram Logging Roads]. Available at: http://forest-culture.narod.ru/HBZ/Stat_11_1-2/chernih21.pdf (accessed 20 May 2016).
22. *Dijkstra's Algorithm*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s_algorithm (accessed 20 May 2016).

РАЗМЕТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ МАССОВОГО МЕРОПРИЯТИЯ ЕГО УЧАСТНИКАМИ НА ОСНОВЕ НЕМОНЕТАРНОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ

А. В. Пономарев^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

Введение: растущая информатизация и распространение глобальных сетей позволяют использовать естественные когнитивные способности людей, координируемых с помощью современных информационно-коммуникационных технологий, для ряда задач, автоматическое решение которых на данный момент не позволяет достигнуть необходимого качества результатов. **Цель:** анализ возможности использования скоординированных усилий сообщества людей, действующих на основе немонетарного стимулирования, для разметки изображений на примере разметки фотографий легкоатлетических пробегов номерами изображенных на них участников в целях облегчения поиска фотографий. **Результаты:** разработан интернет-сервис для совместной разметки изображений. Проведенные эксперименты, в которых приняли участие несколько сотен человек, показали, что «внутреннее» немонетарное стимулирование, связанное с облегчением поиска фотографий, оказывается достаточным для привлечения необходимого количества участников сообщества к разметке, а качество получаемой разметки сопоставимо с качеством, достигаемым с помощью платформы краудсорсинга Amazon Mechanical Turk при использовании монетарного стимулирования. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при разработке различных систем, основанных на скоординированных усилиях сообщества на базе немонетарного стимулирования.

Ключевые слова — краудсорсинг, крауд-вычисления, обработка изображений, коллективный интеллект, социальные сети.

Введение

Несмотря на успехи компьютерных наук, по-прежнему существуют задачи обработки информации, полностью автоматические решения которых не всегда возможны или не обеспечивают требуемый уровень качества получаемых результатов. Одной из таких задач является распознавание изображений. И хотя современные системы распознавания изображений проделали длинный путь и во многих важных с практической точки зрения приложениях прекрасно справляются со своей задачей (например, при распознавании напечатанного текста), в ряде сложных ситуаций (неравномерная освещенность, наличие искажений) качество распознавания может существенно снижаться.

Одним из способов решения этой проблемы, продиктованным растущей информатизацией и распространением глобальных сетей, является использование естественных когнитивных способностей людей, координируемых посредством современных информационно-коммуникационных технологий. Данный способ получил название крауд-вычисления (или, в более общем смысле, краудсорсинг).

Однако вовлечение человека в процесс обработки информации неизбежно требует учета ряда факторов: ограниченной его производительности, необходимости мотивации и возможности ошибки или даже целенаправленного искажения информации. Это все предъявляет специфиче-

ские требования к проектированию и построению систем крауд-вычислений.

Одной из практических задач, демонстрирующих подобные сложные для современных систем распознавания условия, является распознавание на фотографиях номеров участников легкоатлетических пробегов. Любительские легкоатлетические пробеги являются популярным видом досуга, причем количество как самих пробегов, так и их участников растет с каждым годом и в России, и за рубежом [1–4]. Учитывая широкое распространение цифровых фотокамер, пробеги, как правило, фиксируются как любителями, так и профессиональными фотографами, многие из которых публикуют фотографии в открытом доступе. Участники пробега, в свою очередь, часто бывают заинтересованы в получении собственных фотографий — либо в качестве сувенира, либо для анализа техники бега. Однако поиск фотографий является трудоемкой задачей, поскольку количество опубликованных в социальных медиа фотографий с мероприятия среднего уровня может исчисляться тысячами. К счастью, организация большинства пробегов предполагает, что участники прикрепляют нагрудные номера (являющиеся их уникальными идентификаторами в рамках пробега), что теоретически позволяет передать задачу поиска от самого заинтересованного участника любому, кто в состоянии распознавать номера на фотографиях. Существует несколько работ, в которых для решения этой задачи предлагаются системы, использующие технологии компью-

терного зрения [5, 6], однако в силу того, что нагрудные номера являются гибкими (следовательно, могут быть искажены) и на фотографии могут быть частично закрыты (руками участника или другими участниками пробега), полностью автоматические решения зачастую не обеспечивают желаемого качества распознавания.

Настоящая статья посвящена исследованию возможности использовать скоординированные усилия сообщества для решения задачи разметки фотографий пробега нагрудными номерами изображенных на них участников в целях последующего облегчения поиска фотографий заданного участника. Сообщество это формируется (преимущественно) из самих участников пробега, а основным предполагаемым стимулом к участию в разметке является сокращение времени, затрачиваемого на поиск фотографий.

Разметка (и аннотирование) изображений является одним из наиболее используемых и хорошо изученных применений краудсорсинга [7–10]. Однако решаемая в рамках данной статьи задача имеет существенные отличия от рассмотренных ранее в литературе:

1) участники пробега, как правило, более заинтересованы в просмотре фотографий (с эмоциональной точки зрения), чем случайные исполнители (*workers*) коммерческой платформы краудсорсинга (например, Amazon Mechanical Turk — АМТ [11]);

2) использование желания участников найти свои фотографии с наименьшими усилиями создает немонетарный стимул, позволяющий при определенных условиях выполнить трудоемкую задачу без финансовых затрат (что может быть полезно администрации пробега).

Для исследования такой возможности автором статьи был разработан интернет-сервис *Bibtaggers* [12], позволяющий координировать разметку изображений участниками сообщества, а также проведен ряд экспериментов, целью которых был поиск ответа на следующие вопросы.

1. Является ли разметка фотографий нагрудными номерами участников разумным подходом к решению более общей задачи — разметки фотографий идентификаторами участников?

2. Как влияет на качество результата использование при разметке *контекста изображения*, т. е. дополнительной информации, не содержащейся непосредственно на изображении. В частности, насколько полезным оказывается исследование соседних фотографий (сделанных до и после данной)?

3. Является ли немонетарное стимулирование, основанное на облегчении поиска, достаточным для привлечения к разметке необходимого количества участников сообщества?

4. Каково ожидаемое качество разметки, осуществленной участниками сообщества?

5. Как соотносится качество разметки, осуществленной участниками сообщества на основе «внутреннего», немонетарного стимулирования, и разметки, полученной с помощью АМТ при использовании монетарного стимулирования?

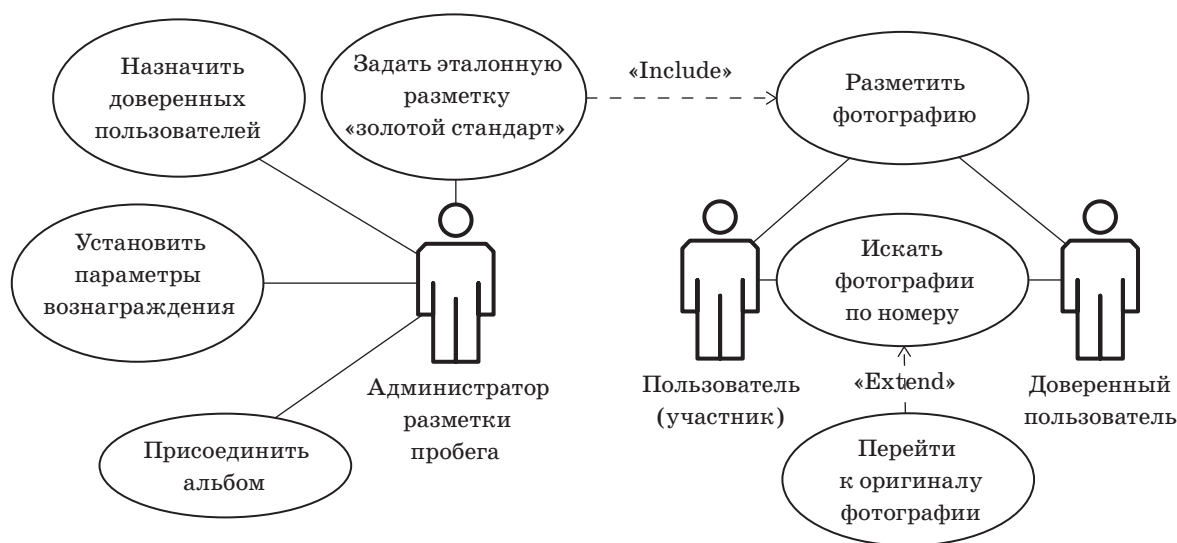
Структура и принцип работы интернет-сервиса

Основные положения

Необходимым условием функционирования любой системы обработки информации, включающей операции, выполняемые человеком, является создание заинтересованности человека в выполнении этих операций. Применительно к крауд-вычислениям подобное создание заинтересованности получило в англоязычной литературе название *incentivization* (или стимулирование). При разработке интернет-сервиса предполагалось, что основным мотивом к участию является снижение времени и трудоемкости поиска собственных фотографий, поэтому выбрана функциональная стратегия стимулирования, ставящая доступность нужных пользователю функций (в частности, поиска фотографий по номеру) в зависимость от вклада, который пользователь внес в разметку фотографий. Выделено два вида «вознаграждения» пользователя: возможность поиска фотографий по номеру участника (при этом найденные фотографии отображаются в небольшом разрешении, достаточном для того, чтобы проверить, что участник действительно присутствует на фотографии, но недостаточном для того, чтобы распечатать фотографию или опубликовать в социальных сетях) и возможность перехода к полноразмерным оригиналам найденных фотографий. Каждой из таких «функций-наград» поставлен в соответствие порог, задающий, при каком количестве обработанных пользователем фотографий должна активироваться соответствующая функция. Значения порога выбираются для каждого пробега отдельно в зависимости от количества фотографий и предполагаемого количества участников разметки.

Упрощенная диаграмма вариантов использования интернет-сервиса представлена на рис. 1. Выделены три типа акторов: администратор разметки пробега, пользователь (участвующий в разметке) и доверенный пользователь («эксперт»).

Администратор разметки пробега осуществляет конфигурирование различных параметров, связанных с разметкой. В частности, он может присоединять к пробегу альбомы, опубликованные различными фотографами на внешних сервисах обмена фотографиями (например, Яндекс.Фотки [13]); устанавливать значения параметров, влияющих на распределение вознаграждения; назначать доверенных пользователей и задавать



■ Рис. 1. Диаграмма вариантов использования веб-приложения

эталонную разметку фотографий («золотой стандарт»), используемую для контроля качества.

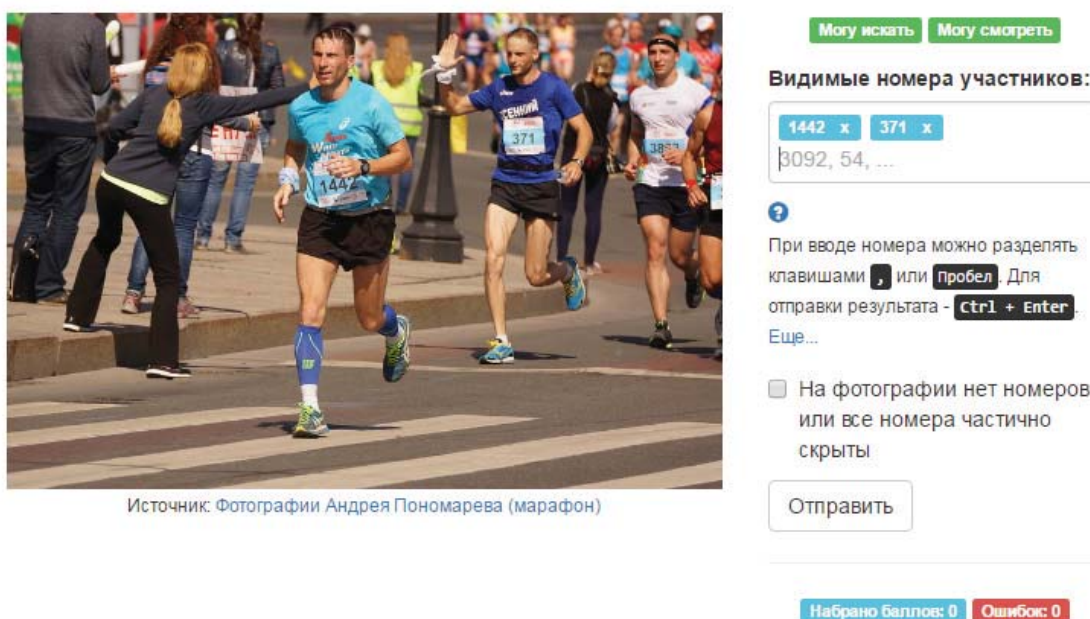
Пользователь (участник) может действовать по двум основным направлениям: просмотреть предложенные интернет-сервисом фотографии и указать видимые на них номера участников; искать фотографии по номеру участника. Первый сценарий доступен любому пользователю (зарегистрированному в системе или анонимному), а второй, как правило, требует внесения определенного вклада в разметку, размер которого устанавливается администратором пробега. Вклад вычисляется как разница между количеством обработанных пользователем фотографий и ко-

личеством ошибок на эталонных фотографиях (см. п. «Защита от мошенничества»).

Доверенный пользователь с точки зрения основных сценариев использования идентичен обычному пользователю, однако разметка, полученная от такого пользователя, считается надежной и не требует проверки, в отличие от разметки обычного пользователя. Перечень доверенных пользователей назначается администратором пробега.

Пользовательский интерфейс

Пользовательский интерфейс сервиса состоит из нескольких страниц, основной из которых является страница разметки (рис. 2), содержащая фото-



Источник: Фотографии Андрея Пономарева (марафон)

■ Рис. 2. Интерфейс страницы разметки

графию пробега, поле ввода списка видимых номеров участников, отдельное (бинарное) поле ввода для идентификации того, что на демонстрируемой фотографии не видно ни одного номера, и кнопку для отправки формы. Помимо перечисленных обязательных элементов, страница разметки может содержать ссылки на предыдущую и последующую фотографии в серии (это может быть полезно для распознавания частично заслоненного номера) и бинарное поле ввода для указания того, что данный список номеров должен восприниматься как эталонный (поле отображается только администратору пробега). Роль отдельного бинарного поля ввода для выделения фотографий, не содержащих номеров, заключается в дополнительной проверке целостности ввода пользователя. Наличие этого бинарного поля делает невозможным отправку незаполненной формы; участник должен обязательно совершить какое-либо действие: либо перечислить видимые номера, либо явно указать, что их нет.

Задания

В рамках сервиса принято следующее разграничение понятий «задача» и «задание». Под «задачей» понимается потребность получения множества номеров участников, видимых на некоторой фотографии. Решение такой задачи, как правило, подразумевает выполнение нескольких «заданий», каждое из которых предъявляется одному участнику разметки и требует от него выполнения определенных действий. Задание может иметь определенные требования к участникам, которым оно может быть предъявлено. Так, некоторые задания могут предъявляться всем участникам, а некоторые — только доверенным участникам (как правило, такие задания используются для согласования противоречивых результатов).

Стратегия планирования

Под планированием понимается процесс определения результата задачи на основе имеющихся результатов соответствующих заданий и, если это оказывается необходимым, потребность в выполнении дополнительных заданий. Реализованная стратегия планирования использует основанный на избыточности контроль качества с ослабленным консенсусом. В первую очередь определяются результаты выполнения двух заданий; если они оказываются схожими (подробнее о формальном определении сходства ниже), то результат задачи определяется как объединение результатов заданий. В противном случае создается третье задание. Если среди результатов выполнения трех заданий присутствуют два схожих, то результат задачи вычисляется как объединение двух наиболее схожих, иначе создается доверенное задание, и итоговым решением задачи станет результат, предоставленный доверенным пользователем. Степень сходства

между результатами выполнения заданий определяется как индекс Жаккара [14]:

$$J = |R_i \cap R_j| / |R_i \cup R_j|,$$

где R_i и R_j — это множества номеров, указанные в результатах заданий i и j соответственно. Результаты считаются схожими, если индекс превышает некоторый порог (обычно 0,6).

Защита от мошенничества

Под мошенничеством в данном контексте понимается получение вознаграждения через предоставление заведомо низкокачественных результатов (пустых или сформированных с минимальными усилиями, случайных, не имеющих отношения к изображению фотографии). Для ограничения возможностей мошенничества используется два метода: эталонная разметка («золотой стандарт») и контроль времени.

«Золотой стандарт» представляет собой несколько фотографий, размеченных администратором пробега. Такие фотографии показываются участнику обязательно в начале каждой сессии и затем в ее ходе с некоторой вероятностью, зависящей от количества правильно размеченных фотографий «золотого стандарта». Неправильная разметка таких фотографий отодвигает момент активации вознаграждения, в чем участник не заинтересован. Продолжить процесс разметки можно, только дав правильный (эталонный) ответ; об ошибке участник оповещается.

Контроль времени позволяет выявить слишком быстрые ответы, как правило, отправленные пользователем, не предпринявшим должных усилий по анализу представленного ему изображения и заполнению полей формы. При выявлении таких действий пользователю отображается соответствующее предупреждение.

Эти меры могут быть полезны не только для борьбы с мошенничеством в обозначенном выше смысле, но также помогают ограничить вред от умышленного искажения разметки. Если пользователь систематически заявляет, что на фотографии изображены номера, которые на ней не изображены (или наоборот), и исправляет ввод при попадании на фотографию «золотого стандарта», то через несколько фотографий вероятность показа ему только фотографий «золотого стандарта» будет близка к 1, что существенно уменьшит его влияние на общее качество разметки.

Определение качества разметки

Разметка фотографий номерами участников, основанная на визуальном анализе самой фотографии, — это лишь один из способов достичь более общей цели, а именно разметки фотографий

идентификаторами людей, на ней изображенных. Визуальная разметка номерами участников имеет несколько принципиальных ограничений, в частности, участник может быть виден на фотографии, однако его номер может быть полностью или частично заслонен. Другие подходы к разметке, например, основанные на распознавании лиц или на применении радиомаячков, могут в этой ситуации оказаться успешными. Таким образом, необходимы способы оценки качества решения задачи, которые могут быть использованы как для сравнения различных схем стимулирования при разметке фотографий усилиями сообщества, так и для оценки ограничений, связанных в принципе с разметкой, основанной на визуальном анализе номеров участников. Использование существующих наборов данных («бенчмарков») осложняется тем, что при разметке усилиями сообщества его участники не заинтересованы в разметке фотографий таких публичных наборов данных, в отличие от исполнителей краудсорсинговой платформы, действующих на базе монетарного стимулирования, поэтому для оценки качества разметки подготовлено несколько наборов данных [15].

DS0 — набор данных, содержащий разметку фотографий номерами участников, причем единственной информацией, доступной эксперту-составителю набора, была сама размечаемая фотография. Другими словами, фотография в *DS0* имеет ассоциированный с ней номер, если эксперт видит участника с этим номером на фотографии. Если эксперт не в состоянии непротиворечиво определить номер, то он не должен указывать его вообще (т. е. он не должен указывать все возможные варианты). Целью этого набора данных является измерение качества разметки, полученной от участников сообщества, по сравнению с качеством разметки, полученной от эксперта.

DS1 — набор данных, в котором эксперту разрешается при разметке использовать минимальный контекст, т. е. дополнительную информацию — помимо размечаемой фотографии, просматривать одну фотографию, сделанную непосредственно до, и одну фотографию, сделанную непосредственно после данной, для выяснения нечетко видных фрагментов номера. Целью данного набора является измерение качества разметки участниками сообщества по сравнению с разметкой экспертом при возможности использования минимального контекста.

*DS** — набор данных, содержащий идеальную разметку фотографий идентификаторами участников (в действительности, содержащий разметку, лишь близкую к идеальной). В строгом смысле, идеальная разметка фотографии включала бы идентификаторы (в простейшем случае — номера) всех участников, видимых на фотографии. Очевидно, для ряда фотографий (на-

пример, панорамных) такую разметку построить невозможно. Поэтому при построении *DS** критерий был смягчен, и фотография в *DS** размечена номером участника, если номер видим или если изображение участника хорошо различимо на фотографии. При этом, если номер не видим, то для участника случайным образом генерировался уникальный идентификатор, и фотография помечалась этим идентификатором. Целью этого набора данных было проанализировать, как разметка, основанная на анализе изображений, соотносится с эталонной разметкой.

Все три набора данных построены на одном и том же множестве из 100 фотографий, случайным образом выбранных из 4447 фотографий одного пробега, сделанных независимо двумя фотографами.

Пример того, как одна и та же фотография размечена в разных наборах, приведен на рис. 3. Номер 1010 хорошо различим на фотографии, поэтому содержится в *DS0*. Анализ предыдущего изображения позволяет восстановить номер крайней слева участницы (это 1004). Наконец, третий и четвертый участники хорошо видимы, но их номера не различимы, поэтому в *DS** им сопоставлены уникальные метки.

Частичные ответы на некоторые вопросы, касающиеся сопоставления различных способов разметки, могут быть получены без экспериментов с сообществом только за счет сопоставления подготовленных наборов.

Первый вопрос такого рода заключается в оценке того, насколько эффективна разметка фотографий номерами участников на основе анализа изображения в качестве решения более общей задачи — разметки фотографий идентификаторами участников. Для ответа на этот вопрос следует сопоставить наборы данных, содержащие только номера участников (*DS0*, *DS1*) и набор данных *DS**, содержащий помимо номеров уникальные идентификаторы для тех участников пробега, номера которых оказались не видны.

В целях сопоставления каждый набор данных представлен в виде множества пар, состоящих из идентификатора фотографии и номера (идентификатора) участника. Если в наборе данных фотография размечена несколькими номерами, то такой фотографии будет соответствовать несколько пар. Для измерения степени соответствия наборов данных использованы меры точность (*precision*) и полнота (*recall*), широко используемые в информационном поиске (например, см. [16]). Точность соответствует доле элементов «испытываемого» набора, присутствующих в эталонном наборе, а полнота, наоборот, доле элементов эталонного набора, вошедших в испытываемый.

Результаты вычисления точности и полноты *DS0* и *DS1* по отношению к *DS**, рассматриваемо-



Ленинградская область, г. Сестрорецк
Сестрорецкий полумарафон

15 мая 2016 г.
Фото: Шалимов Владимир, <http://nabegu.spb.ru> & bibtaggers.ru

DS0:
1010
DS1:
1010, 1004
DS:*
1010, 1004,
_GREY,
_BLUE

■ **Рис. 3.** Иллюстрация соотношения тестовых наборов

му в качестве эталона, представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что показатель точности для обоих наборов равен 1,0 — это следствие способа конструирования DS^* и соотношения $DS0 \subseteq DS1 \subseteq DS^*$ между содержимым наборов. Полнота же показывает, что для случайным образом выбранного изображения участника на фотографии вероятность того, что этот факт будет зафиксирован экспертом, исследующим только изображение, оценивается как 0,65 ($DS0$). Если же эксперту разрешается обращаться к соседним фотографиям, то вероятность повышается до 0,803 ($DS1$), поскольку соседние фотографии могут быть использованы для установления неразличимых на данной фотографии номеров.

Позволяет табл. 1 оценить также эффект анализа соседних фотографий в серии. Видно, что на исследуемом наборе фотографий прирост полноты составил около 23,5 %.

В определенном смысле полнота $DS1$ устанавливает теоретический максимум, который может быть достигнут при разметке силами сообщества, когда участникам доступен минимальный

контекст, т. е. разрешается «заглядывать» на соседние изображения. Существуют и другие типы контекста, которые могут оказаться полезными для увеличения полноты разметки (например, с привлечением информации протоколов пробега), но увеличение количества исследуемых типов контекста увеличивает и количество времени и усилий, которые потенциально будут затрачиваться на их анализ, одновременно снижая шансы того, что участники сообщества, действующие на основе немонетарного стимулирования, будут активно использовать эти возможности.

Экспериментальное исследование

Целью проведенного экспериментального исследования был анализ поведения участников сообщества и оценка качества разметки, выполненной с их помощью.

Статистика использования интернет-сервиса

Сервис был использован для разметки фотографий пяти спортивных мероприятий (обозначенных E1–E5). Некоторые данные об использовании сервиса в ходе этих мероприятий приведены в табл. 2.

Фотографии трех пробегов (E1, E4 и E5) были размечены полностью. Видно также, что в разметке фотографий этих трех пробегов приняли участие несколько сотен человек. Принципиальное отличие E1, E4 и E5 от E2 и E3 в том, что в первую группу входят более крупные мероприятия, собравшие значительно большее число участни-

■ **Таблица 1.** Сопоставление наборов данных

Набор данных	Точность	Полнота	Прирост полноты
$DS0$	1,0	0,65	—
$DS1$	1,0	0,803	23,5%

■ Таблица 2. Данные об использовании сервиса

Показатель	E1	E2	E3	E4	E5
Количество участников пробега	~1500	~400	~700	~1300	~7300
Количество фотографий	2770	821	563	4447	7126
Количество фотографов	1	1	1	2	3
Количество пользователей, принявших участие в разметке фотографий	~228	~7	~15	~155	~379
Все фотографии обработаны	+	-	-	+	+
Приблизительное время обработки, ч	32	-	-	65	34
Количество найденных номеров (подтвержденных)	1223	201	118	1088	4902
Количество номеров, по которым были поисковые запросы	639	27	32	529	3197
Настройки порогов активации вознаграждения					
Порог активации поиска	25	30	20	30	20
Порог активации перехода к оригиналам	30	35	25	40	30
Статистика по выполнению заданий					
Выполнено заданий:	7181	902	595	9861	16 476
анонимными пользователями	3622	450	378	5195	7784
зарегистрированными пользователями	3559	452	217	4666	8692
Зарегистрированных пользователей	~72	4	4	62	160
Анонимных сессий	156	3	11	93	219

ков и хорошо представленные в социальных сетях. Ссылки на страницы соответствующих пробега были опубликованы в соответствующих тематических группах, и большинство участников разметки пришло именно по этим ссылкам. События E2 и E4 также были достаточно многочисленными, но значительно слабее освещены в социальных сетях, соответственно, значительно меньше участников пробега знали о возможности разметки и последующего поиска фотографий по номеру. Это объяснение подтверждается и статистикой поисков. В пробегах E1, E4 и E5 поисковые запросы в течение первой недели после мероприятия были осуществлены для 42, 40 и 44 % номеров участников соответственно. Таким образом, приблизительно 40 % участников пробега заинтересованы в поиске своих фотографий (этот процент может быть еще больше, поскольку не все участники используют социальные сети). Для E2 и E3 только 5 % участников пробега искали свои фотографии, что говорит либо о совершенно другом сообществе (с другими приоритетами), либо о недостатке информированности о такой возможности. Положительный результат для пробега E1, E4 и E5 позволяет сделать вывод о достаточности немонетарного стимулирования для привлечения участников к решению задачи.

Качество разметки

Для оценки качества разметки был применен тот же подход, что и при сравнении наборов данных, составленных экспертами. А именно, собранный набор был представлен в виде множества пар, и затем были оценены точность и полнота этого набора относительно эталонных наборов. Помимо точности и полноты, для простоты сопоставления различных вариантов разметки вычислялась также интегральная мера $F1$ [16]:

$$F1 = 2PR / (P + R),$$

где P — точность, а R — полнота.

Результаты сведены в табл. 3. Можно заметить, что разметка, полученная силами сообщества, ближе всего к $DS0$ и существенно отличается

■ Таблица 3. Данные об использовании сервиса

Эталонный набор данных	Точность	Полнота	$F1$
$DS0$	0,925	0,912	0,919
$DS1$	0,957	0,763	0,849
DS^*	0,957	0,613	0,747

■ Таблица 4. Качество разметки участниками АМТ

Эталонный набор данных	\$ 0,05			\$ 0,02		
	Точность	Полнота	F1	Точность	Полнота	F1
DS0	0,858	0,958	0,905	0,906	0,923	0,914
DS1	0,879	0,794	0,835	0,925	0,763	0,836
DS*	0,879	0,639	0,740	0,925	0,614	0,738

ся от *DS1* и *DS**. Поскольку точность достаточно высока, участники сообщества в подавляющем большинстве случаев указывали только те номера, которые действительно присутствовали на изображении. Однако полнота оказалась не очень высокой, что свидетельствует о том, что члены сообщества приложили в целом меньше усилий к указанию всех видимых на фотографиях участников пробега, нежели составители эталонного набора. Низкая полнота на наборе *DS** может быть объяснена частично внутренними ограничениями разметки, основанной только на анализе изображений, а частично следует из низкой полноты на *DS1*. Последняя, в свою очередь, показывает, что очень немногие члены сообщества в действительности пытались использовать соседние снимки для выяснения (частично) скрытых номеров. Практическим следствием этого является необходимость модификации используемой системы стимулирования таким образом, чтобы повысить привлекательность использования соседних снимков (и, как следствие, повысить общее качество разметки).

Сравнение с монетарным стимулированием на платформе АМТ

Важным вопросом, возникающим в связи с разметкой фотографий с помощью участников сообщества, является то, как соотносится ожидаемое качество разметки с качеством разметки, получаемом при решении аналогичной задачи людьми за вознаграждение. Для ответа на этот вопрос были проведены два эксперимента, в ходе которых исполнителям, сотрудничающим с коммерческой краудсорсинговой платформой АМТ, были предложены фотографии из эталонного набора данных (следует подчеркнуть, что данные исполнители не были частью сообщества участников пробега, они назначены с помощью внутренних механизмов платформы АМТ и выполняли задания только за счет монетарного стимулирования). По каждой фотографии было собрано три ответа, которые были обобщены с помощью того же алгоритма, что использован в разработанном интернет-сервисе *Bibtaggers*. Разница заключалась в том, что в первом эксперименте за выполнение задания исполнитель получал \$ 0,05, а во втором — \$ 0,02. Размер вознаграждения выбран

в соответствии с исследованием [17]. Результаты оценки качества представлены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, разница в размере вознаграждения почти не оказала влияния на качество получаемого результата (в смысле точности, полноты и значения меры *F1*), однако время разметки (не указано в таблице) при стоимости \$ 0,02 было несколько больше, в то же время количество намеренно некачественных результатов было больше при стоимости \$ 0,05. Это согласуется с существующими исследованиями АМТ [18, 19]. Сопоставление данных табл. 3 и 4 позволяет сделать вывод, что разметка силами сообщества на основе немонетарного стимулирования по интегральному показателю качества не уступает разметке на основе монетарного стимулирования. При этом суммарная стоимость разметки составила \$ 15 (для эксперимента с вознаграждением \$ 0,05 за фотографию) и \$ 6 (для эксперимента с вознаграждением \$ 0,02 за фотографию). Полная разметка фотографий, полученных, например, на мероприятии *E5*, стоила бы \$ 1068 и 427 соответственно, не отличаясь существенно по качеству от результатов, полученных усилиями сообщества, действующего на основе немонетарного стимулирования.

Заключение

В ходе проведения исследования разработан интернет-сервис для разметки фотографий номерами участников с помощью сообщества самих участников пробега. Практическая оценка сервиса показала, что немонетарное стимулирование, связанное с облегчением поиска размеченных таким образом фотографий, оказывается адекватным, и участники с готовностью включаются в разметку, будучи информированы о такой возможности. Эксперименты позволили выявить еще один источник мотивации, не очевидный в ходе проектирования и реализации системы. Этот источник сводится к ценности ощущения включенности в цепочку общественно-полезных действий, выполняемых на некоммерческой основе, своего рода «благодарность» за труд фотографа, который осуществлял съемку и бесплатно сделал фотографии доступными для сообщества. За счет этого вклад некоторых членов сообщества

значительно превысил необходимый для активации возможности поиска.

Сравнение результатов разметки со специальным образом подготовленными эталонными наборами показало, что качество разметки, проведенной усилиями членов сообщества, сопоставимо с «поверхностной» разметкой, при которой определяются только явно видимые номера и не делаются попытки проанализировать контекст в виде хронологически соседних фотографий (хотя реализованный сервис допускает такую возможность). Вместе с тем при активизации этой возможности полнота разметки может вырасти достаточно существенно (около 20 %).

Сопоставление результатов разметки, полученных с применением различных видов стимулирования, показало, что качество разметки от-

личается несущественно. При значительно меньших финансовых затратах разметка усилиями сообщества является более привлекательной.

Среди дальнейших планов — исследование влияния других немонетарных механизмов стимулирования (например, геймификации) на характер участия пользователей в системе и качество получаемых результатов, разработка механизмов стимулирования для использования дополнительной контекстной информации при разметке и, как следствие, повышение ее качества, а также применение проблемно ориентированных мер качества, фиксирующих тот факт, что с точки зрения конечного пользователя полнота поисковой выдачи (в данной задаче) оказывается важнее точности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-37-60107).

Литература

1. Московский марафон. https://ru.wikipedia.org/wiki/Московский_марафон (дата обращения: 09.02.2017).
2. Белые ночи (марафон). [https://ru.wikipedia.org/wiki/Белые_ночи_\(марафон\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Белые_ночи_(марафон)) (дата обращения: 09.02.2017).
3. RunRepeat.com Marathon Performance Across Nations. <http://runrepeat.com/research-marathon-performance-across-nations> (дата обращения: 09.02.2017).
4. Scheerder J., Breedveld K. Running Across Europe: The Rise and Size of One of the Largest Sport Markets. — Palgrave Macmillan, 2015. — 297 p. doi:10.1057/9781137446374
5. Roy S., Shivakumara P., Mondal P., Raghavendra R., Pal U., Lu T. A New Multi-modal Technique for Bib Number/Text Detection in Natural Images // Advances in Multimedia Information Processing: Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9314. P. 483–494. doi:10.1007/978-3-319-24075-6_47
6. Ben-Ami I., Basha T., Avidan S. Racing Bib Numbers Recognition // British Machine Vision Conf. (BMVC). 2012. <http://people.csail.mit.edu/talidekel/papers/RBNR.pdf> (дата обращения: 09.02.2017).
7. Muhammadi J., Rabiee H.R., Hosseini A. Crowd Labeling a Survey // ArXiv. 2013. <http://arxiv.org/abs/1301.2774> (дата обращения: 09.02.2017).
8. Kara Y., Genc G., Aran O., Akarun L. Modeling Annotator Behaviors for Crowd Labeling // Neurocomputing. 2015. Vol. 160. P. 141–156. doi:10.1016/j.neucom.2014.10.082
9. Yang Y., Zhu B., Guo R., Yang L., Li S., Yu N. A Comprehensive Human Computation Framework — with Application to Image Labeling // Proc. of the 16th ACM Intern. Conf. on Multimedia Pages. 2008. P. 479–488. doi:10.1145/1459359.1459423
10. Ahn L. von, Blum M., Langford J. Telling Humans and Computers Apart Automatically // Communications of the ACM. 2004. Vol. 47. N 2. P. 57–60. doi:10.1145/966389.966390
11. Платформа краудсорсинга Amazon Mechanical Turk. <https://www.mturk.com/mturk/welcome> (дата обращения: 07.03.2017).
12. Интернет-сервис разметки фотографий пробегов Bibtaggers. <http://bibtaggers.ru> (дата обращения: 07.03.2017).
13. Интернет-сервис для хранения фотографий Яндекс.Фотки. <https://fotki.yandex.ru/> (дата обращения: 07.03.2017).
14. Levandowsky M., Winter D. Distance Between Sets // Nature. 1970. Vol. 234. P. 34–35. doi:10.1038/234034a0
15. Наборы данных для оценки качества разметки. <http://bibtaggers.ru/static/datasets.html> (дата обращения: 07.03.2017).
16. Manning C., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval. — Cambridge University Press, 2008. — 506 p.
17. Mason W., Suri S. Conducting Behavioral Research on Amazon's Mechanical Turk // Behavior Research Methods. 2012. N 1 (44). P. 1–23. doi:10.3758/s13428-011-0124-6
18. Marge M., Banerjee S., Rudnicky A. I. Using the Amazon Mechanical Turk for Transcription of Spoken Language // Proc. of the 2010 IEEE Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. 2010. P. 5270–5273.
19. Mason W. A., Watts D. J. Financial Incentives and the Performance of Crowds // Proc. of the ACM SIGKDD Workshop on Human Computation. 2009. P. 77–85.

UDC 004.9

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.105

Tagging Public Event Images based on Non-Monetary Incentives

Ponomarev A. V.^a, PhD, Senior Researcher, ponomarev@iiias.spb.su^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Informatization and the spread of global networks lead to using natural cognitive abilities of people coordinated by modern information and communication technologies (crowd computing) as a way to solve a number of information processing problems whose fully automated solution at the moment does not provide the required quality of the results. **Purpose:** The goal is to analyze the possibility of using coordinated community efforts driven by non-monetary incentives in order to solve the problem of tagging running race photos with bib numbers of the visible race participants. **Results:** An internet service has been developed for collaborative tagging of images. Experiments with several hundreds of participants have shown that "internal" non-monetary incentives given by the facilitation of the search for photos is sufficient to attract race participants to take part in the tagging. The tagging quality is comparable with the quality obtained with the help of the crowdsourcing platform Amazon Mechanical Turk by using monetary incentive. **Practical relevance:** The obtained results can be used for developing various systems based on coordinated efforts of community on the basis of non-monetary incentives.

Keywords — Crowdsourcing, Crowd Computing, Image Processing, Collective Intelligence, Social Networks.

References

1. *Moskovskii marafon* [Moscow Marathon]. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Moscow_Marathon (accessed 09 February 2017).
2. *Belye nochi (marafon)* [White Nights (Marathon)]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Белые_ночи_\(марафон\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Белые_ночи_(марафон)) (accessed 09 February 2017).
3. *RunRepeat.com Marathon Performance Across Nations*. Available at: <http://runrepeat.com/research-marathon-performance-across-nations> (accessed 09 February 2017).
4. Scheerder J., Breedveld K. (eds.) *Running Across Europe: The Rise and Size of One of the Largest Sport Markets*. Palgrave Macmillan, 2015. doi:10.1057/9781137446374
5. Roy S., Shivakumara P., Mondal P., Raghavendra R., Pal U., Lu T. A New Multi-modal Technique for Bib Number/Text Detection in Natural Images. *Lecture Notes in Computer Science "Advances in Multimedia Information Processing"*, 2015, vol. 9314, pp. 483–494. doi:10.1007/978-3-319-24075-6_47
6. Ben-Ami I., Basha T., Avidan S. Racing Bib Numbers Recognition. *British Machine Vision Conf. (BMVC)*, 2012. Available at: <http://people.csail.mit.edu/talidekel/papers/RBNR.pdf> (accessed 09 February 2017).
7. Muhammadi J., Rabiee H.R., Hosseini A. Crowd Labeling a Survey. *ArXiv*, 2013. Available at: <http://arxiv.org/abs/1301.2774> (accessed 09 February 2017).
8. Kara Y., Genc G., Aran O., Akarun L. Modeling Annotator Behaviors for Crowd Labeling. *Neurocomputing*, 2015, vol. 160, pp.141–156. doi:10.1016/j.neucom.2014.10.082
9. Yang Y., Zhu B., Guo R., Yang L., Li S., Yu N. A Comprehensive Human Computation Framework — with Application to Image Labeling. *Proc. of the 16th ACM Intern. Conf. on Multimedia Pages*, 2008, pp. 479–488. doi:10.1145/1459359.1459423
10. Ahn L. von, Blum M., Langford J. Telling Humans and Computers Apart Automatically. *Communications of the ACM*, 2004, vol. 47, no. 2, pp. 57–60. doi:10.1145/966389.966390
11. *Platforma kraudsorsinga Amazon Mechanical Turk* [Crowdsourcing Platform Amazon Mechanical Turk]. Available at: <https://www.mturk.com/mturk/welcome> (accessed 07 March 2017).
12. *Internet-servis razmethi fotografii probegov Bibtaggers* [Bibtaggers — Internet Service for Race Bib Number Tagging]. Available at: <http://bibtaggers.ru> (accessed 07 March 2017).
13. *Internet-servis dlia khraneniia fotografii Iandeks.Fotki* [Photo Sharing Site Yandex.Fotki]. Available at: <https://fotki.yandex.ru/> (accessed 07 March 2017).
14. Levandowsky M., Winter D. Distance between Sets. *Nature*, 1970, vol. 234, pp. 34–35. doi:10.1038/234034a0
15. *Nabory dannykh dlia otsenki kachestva razmethi* [Datasets to Evaluate Tagging Quality]. Available at: <http://bibtaggers.ru/static/datasets.html> (accessed 07 March 2017).
16. Manning C., Raghavan P., Schütze H. *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge University Press, 2008. 506 p.
17. Mason W., Suri S. Conducting Behavioral Research on Amazon's Mechanical Turk. *Behavior Research Methods*, 2012, no. 1(44), pp. 1–23. doi:10.3758/s13428-011-0124-6
18. Marge M., Banerjee S., Rudnicky A. I. Using the Amazon Mechanical Turk for Transcription of Spoken Language. *Proc. of the 2010 IEEE Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2010, pp. 5270–5273.
19. Mason W. A., Watts D. J. Financial Incentives and the Performance of Crowds. *Proc. of the ACM SIGKDD Workshop on Human Computation*, 2009, pp. 77–85.

**БЕЛИМ
Сергей
Викторович**



Профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского. В 1996 году окончил Омский государственный университет по специальности «Физика». В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором 118 научных публикаций. Область научных интересов — модели безопасности компьютерных систем, интеллектуальные системы защиты информации. Эл. адрес: sbelim@mail.ru

**ВОРОНИН
Дмитрий
Юрьевич**



Доцент кафедры информационных технологий и компьютерных систем Севастопольского государственного университета. В 2007 году окончил Севастопольский национальный технический университет по специальности «Компьютерные системы и сети». В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — системный анализ, имитационное моделирование, распределенные вычислительные системы, системы поддержки принятия решений. Эл. адрес: dima@voronins.com

**ЕГОРОВ
Игорь
Валерьевич**



Аспирант кафедры компьютерных систем и программных технологий Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого. В 2012 году окончил с отличием факультет технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по специальности «Информатика и вычислительная техника». Является автором четырех научных публикаций. Область научных интересов — надежность вычислительных систем, программная инженерия, проектирование вычислительных систем. Эл. адрес: iegorov@kspt.icc.spbstu.ru

**БУРЛУЦКИЙ
Сергей
Геннадьевич**



Заместитель заведующего кафедрой управления и эксплуатации аэрокосмических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил Вильнюсское высшее командное училище радиоэлектроники ПВО по специальности «Командная, тактическая, автоматизированные системы управления», в 1994 году — Гуманитарную академию Вооруженных Сил. В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 27 научных публикаций и восьми патентов на изобретения. Область научных интересов — управление аэрокосмическими системами. Эл. адрес: sergey_burluckiy@mail.ru

**ГРИГОРЬЕВ
Александр
Павлович**



Ассистент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, начальник проектно-конструкторского сектора АО «Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург. В 2011 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Измерительные информационные технологии». Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — автоматизированные, адаптивные и интеллектуальные тренажерно-обучающие системы, теория нечетких (размытых) множеств и др. Эл. адрес: alexgrig-1986@mail.ru

**КЛЮЧАРЕВ
Александр
Анатольевич**



Доцент кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1971 году окончил Севастопольский приборостроительный институт по специальности «Общая радиотехника». В 1982 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций и 10 изобретений. Область научных интересов — обработка экспериментальных данных, системы автоматизации натурного эксперимента, информационно-измерительные системы. Эл. адрес: ak@aanet.ru

КРАСИЛЬНИКОВ
Николай
Николаевич



Профессор кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, заслуженный деятель науки и техники РФ. В 1950 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Техническая физика». В 1963 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 240 научных публикаций, в том числе пяти монографий. Область научных интересов — цифровая обработка изображений, статистическая теория передачи и восприятия изображений, математическое моделирование процессов обработки информации зрительной системой человека. Эл. адрес: NNKrasilnikov@yandex.ru

КОРОЛЕВ
Михаил
Викторович



Доцент, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел. В 2002 году окончил Академию Федерального агентства правительственной связи и информации при Президенте Российской Федерации по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более десяти научных публикаций и пяти патентов на изобретения и полезные модели. Область научных интересов — обработка и кодирование речевых сигналов, защита информации, повышение надежности систем. Эл. адрес: korol80@list.ru

ЛЕСНЯК
Денис
Александрович



Старший преподаватель кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2001 году окончил Военный инженерно-космический университет им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы». В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций. Область научных интересов — защита информации, информационная безопасность. Эл. адрес: denislesnyk@mail.ru

КРАСИЛЬНИКОВА
Ольга
Ивановна



Доцент кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1978 году окончила Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиотехника». В 1991 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 90 научных публикаций и семи учебных пособий. Область научных интересов — цифровая обработка изображений. Эл. адрес: OIKrasilnikova@yandex.ru

ЛАРИОНОВ
Станислав
Борисович



Аспирант кафедры информационной безопасности Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского. В 2014 году окончил Омский государственный университет по специальности «Информационная безопасность». Область научных интересов — цифровая обработка изображений. Эл. адрес: me@stas-larionov.ru

МАЛЬЦЕВ
Георгий
Николаевич



Профессор кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского. В 1980 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиотехнические системы комплексов». В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 300 научных публикаций и 27 патентов на изобретения. Область научных интересов — обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных информационных системах и др. Эл. адрес: georgy_maltsev@mail.ru

МАРТЫНОВА
Любовь
Александровна



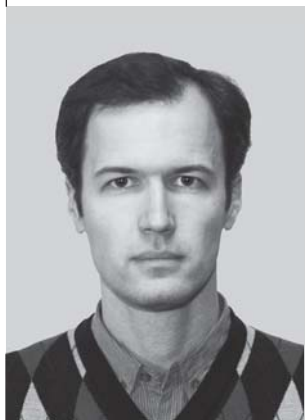
Старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Системы освещения обстановки» АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург. В 1985 году окончила Ленинградский кораблестроительный институт по специальности «Прикладная математика». В 2013 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 90 научных публикаций. Область научных интересов — системный анализ, математическое моделирование, оценка эффективности, обработка разнородной информации. Эл. адрес: martynowa999@bk.ru

НОСОВ
Максим
Васильевич



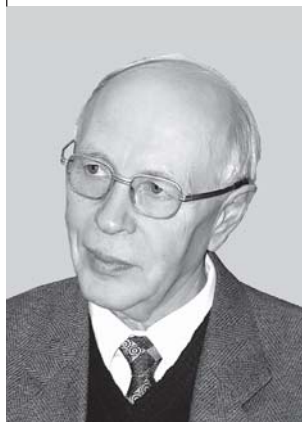
Сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел. В 2003 году окончил Академию Федерального агентства правительственной связи и информации при Президенте Российской Федерации по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы». В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором пяти научных публикаций и двух патентов на изобретения и полезные модели. Область научных интересов — обработка и кодирование речевых сигналов, распределение производственно-технологических ресурсов. Эл. адрес: nosovm@mail.ru

ПОНОМАРЕВ
Андрей
Васильевич



Старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 2003 году окончил Тюменский государственный нефтегазовый университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 30 научных публикаций. Область научных интересов — крауд-вычисления и краудсорсинг, рекомендуемые системы, машинное обучение, системы поддержки принятия решений. Эл. адрес: ponomarev@iiias.spb.ru

МЕЛЕХИН
Виктор
Федорович



Профессор кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, заслуженный работник высшей школы РФ. В 1960 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматика и телемеханика». В 1984 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 230 научных публикаций, 52 изобретений, 23 патентов, четырех монографий, шести учебников и 14 учебных пособий. Область научных интересов — теория и технология проектирования вычислительных систем и устройств. Эл. адрес: melekhin@kspt.icc.spbstu.ru

ПАСТУШОК
Игорь
Анатольевич



Ассистент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2014 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Комплексная защита объектов информатизации». Является автором девяти научных публикаций. Область научных интересов — математическая оптимизация, беспроводные сети, алгоритмы распределения ресурсов, теория вероятности, имитационное моделирование. Эл. адрес: i.pastushok@vu.spb.ru

РОЗЕНГАУЗ
Михаил
Борисович



Старший научный сотрудник АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург. В 1972 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Системы автоматического управления». В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 37 научных публикаций. Область научных интересов — теория надежности, техническая диагностика. Эл. адрес: rozengauz@hotmail.com

**САВИН
Леонид
Олегович**



Сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел.
В 2009 году окончил Рязанский военный автомобильный институт имени генерала армии В. П. Дубынина по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство».
Область научных интересов — модели и алгоритмы оценивания технического состояния автомобильной техники, удаленное диагностирование, информационные технологии.
Эл. адрес: leonidys77@yandex.ru

**СКАТКОВ
Александр
Владимирович**



Профессор кафедры информационных технологий и компьютерных систем Севастопольского государственного университета, эксперт РАН, заслуженный работник образования Автономной Республики Крым.
В 1969 году окончил Севастопольский приборостроительный институт по специальности «Математические и счетно-решающие приборы и устройства».
В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 300 научных публикаций.
Область научных интересов — системный анализ, исследование операций, прикладная математика, моделирование, численные методы, распределенные вычислительные системы, автоматизированные системы управления.
Эл. адрес: kvt.sevntu@gmail.com

**СМОЛИНА
Анна
Равильевна**



Младший научный сотрудник Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.
В 2010 году окончила Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники по специальности «Сервис».
Является автором десяти научных публикаций.
Область научных интересов — информационная безопасность, форензика, информационные технологии.
Эл. адрес: atoj@rambler.ru

**ФОМИЧЕВА
Светлана
Григорьевна**



Профессор, заведующая кафедрой информационных систем и технологий Норильского государственного индустриального института, почетный работник высшего профессионального образования РФ.
В 1986 году окончила Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Автоматизированные системы управления».
В 1990 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором 129 научных публикаций, пяти авторских свидетельств и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.
Область научных интересов — интеллектуальные информационно-телекоммуникационные системы и др.
Эл. адрес: levikha@rambler.ru

**ШЕВЧЕНКО
Виктория
Игоревна**



Доцент кафедры информационных технологий и компьютерных систем Севастопольского государственного университета.
В 1994 году окончила Севастопольский приборостроительный институт по специальности «Вычислительные комплексы, системы и сети».
В 2014 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором 57 научных публикаций.
Область научных интересов — распределенные вычислительные системы, управление качеством ИТ-сервисов в бизнес-критических системах, имитационное моделирование.
Эл. адрес: VIShevchenko@sevsu.u

**ШЕЛУПАНОВ
Александр
Александрович**



Профессор, ректор, заведующий кафедрой комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем, руководитель Центра технологической безопасности Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.
В 1976 году окончил Томский государственный университет по специальностям «Прикладная математика» и «Механика».
В 1996 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 400 научных публикаций.
Область научных интересов — фундаментальные и прикладные основы проектирования и разработки комплексных систем обеспечения информационной безопасности, защита информации.
Эл. адрес: saa@tusur.ru