

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

4(89)/2017

4(89)/2017

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

**Founder**  
«Information and Control Systems», Ltd.

**Publisher**  
Saint-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, Moscow, 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: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.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

**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL**

- Khafizov R. G., Yaranceva T. V.** Estimation of Geometrical Distortions of Lip  
Contours in Visual Input Systems 2
- Lashkov I. B.** Driver's Behavior Analysis with Smartphone Front Camera 7

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

- Britov G. S.** Terminal Diagnostics of Discrete Dynamic Systems 18
- Burakov M. V., Kononov A. S.** Modification of Smith Predictor  
for a Linear Plant with Changeable Parameters 25
- Muromtsev D. Y., Gribkov A. N., Shamkin V. N., Kurkin I. A.** Complete  
Analysis of Energy-Saving Control Problem for Dynamic Modes  
of a Tumble Dryer 35

**SYSTEM AND PROCESS MODELING**

- Sazonov A. M., Sokolov A. V.** Mathematical Model of Optimal Memory  
Management for Custom Queue of Two Consecutive Cyclic FIFOs in Shared  
Memory 44
- Bestugin A. R., Ivanov A. I., Kirshina I. A., Sannikov V. A., Filin A. D.**  
Simulation Model of an Adaptive Training Complex for Aviation  
Management Specialists 51

**HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES**

- Nikiforov V. V., Podkorytov S. A.** Algorithms for Checking Applicability  
of Resource Access Protocols in Real-Time Systems 59

**INFORMATION SECURITY**

- Lipatnikov V. A., Shevchenko A. A., Yatskin A. D., Semenova E. G.**  
Information Security Management of Integrated Structure Organization  
based on a Dedicated Server with Container Virtualization 67

**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM**

- Martynova L. A.** Differential Method of Positioning a Standalone  
Unmanned Submersible in Seismic Exploration 77
- Ermakov P. I., Monakov A. A.** Cross-Correlation Function of Signals  
and Wind Speed Estimation in Weather Radar Networks 86

**INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION**

- Grigoryev A. P., Burlutsky S. G., Chernelevsky A. O.** Adaptive System  
for Navigational Knowledge Control 95

**CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS**

- Mikhailov V. V.** Modeling the Dynamics of Nutrient Loading in Assessing  
the Effectiveness of Replenishment of Biological Resources 103

**BRIEF SCIENTIFIC REPORTS**

- Ziatdinov S. I., Sokolova Y. V.** Impulse Characteristics of Complex Filters 111

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

115

Submitted for publication 30.06.17. Passed for printing 21.08.17. Format 60x84<sub>1/8</sub>.  
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, Russia

The 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.

4(89)/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., Москва, 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, РФ  
В. Н. Козлов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
К. Кристодолу,  
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США  
Б. Мейер,  
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария  
Ю. Ф. Подоплёкин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. В. Симаков,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ  
Л. Фортуна,  
д-р наук, проф., Катания, Италия  
А. Л. Фрадков,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Л. 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. Г. 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, Израиль  
А. Н. Дудин,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь  
И. И. Думер,  
д-р наук, проф., Риверсайд, США  
А. И. Зейфман,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ  
Г. Н. Мальцев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Г. Г. Матвиенко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ  
В. Ф. Мелехин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. В. Смирнов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. И. Хименко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. А. Шальто,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. А. Шелупанов,  
д-р техн. наук, проф., Томск, РФ  
А. 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

## ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

- Хафизов Р. Г., Яранцева Т. В.** Оценка геометрических искажений контуров изображений губ в системах визуального ввода информации 2
- Лашков И. Б.** Анализ поведения водителя при управлении транспортным средством с использованием фронтальной камеры смартфона 7

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Бритов Г. С.** Терминальное диагностирование дискретных динамических систем 18
- Бураков М. В., Коновалов А. С.** Модификация предиктора Смита для линейного объекта с переменными параметрами 25
- Муромцев Д. Ю., Грибков А. Н., Шамкин В. Н., Куркин И. А.** Полный анализ задачи энергосберегающего управления динамическими режимами барабанной сушильной установки 35

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

- Сазонов А. М., Соколов А. В.** Математическая модель оптимального управления настраиваемой очередью из двух последовательных циклических FIFO-очереди в общей памяти 44
- Бестугин А. Р., Иванов А. Ю., Киршина И. А., Санников В. А., Филин А. Д.** Имитационная модель адаптивного тренажерно-моделирующего комплекса специалистов управления авиацией 51

## ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

- Никифоров В. В., Подкорытов С. А.** Алгоритмы проверки применимости протоколов доступа к ресурсам в системах реального времени 59

## ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

- Липатников В. А., Шевченко А. А., Яцкин А. Д., Семенова Е. Г.** Управление информационной безопасностью организации интегрированной структуры на основе выделенного сервера с контейнерной виртуализацией 67

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

- Мартынова Л. А.** Дифференциальный метод позиционирования автономного необитаемого подводного аппарата при ведении сейсмозащитки 77
- Ермаков П. И., Монаков А. А.** Взаимокорреляционная функция сигналов и оценка скорости ветра в многопозиционных метеорадиолокационных системах 86

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ

- Григорьев А. П., Бурлуцкий С. Г., Чернелевский А. О.** Адаптивная система контроля навигационных знаний 95

## УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

- Михайлов В. В., Переварюха А. Ю.** Моделирование динамики биогенной нагрузки при оценке эффективности восполнения биоресурсов 103

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Зиятдинов С. И., Соколова Ю. В.** Импульсные характеристики комплексных фильтров 111

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

115

Сдано в набор 30.06.17. Подписано в печать 21.08.17. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 14,1. Уч.-изд. л. 19,7. Тираж 1000 экз (1-й завод 140 экз). Заказ 371.

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.

## ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГУБ В СИСТЕМАХ ВИЗУАЛЬНОГО ВВОДА ИНФОРМАЦИИ

Р. Г. Хафизов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

Т. В. Яранцева<sup>а</sup>, аспирант

<sup>а</sup>Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, РФ

**Постановка проблемы:** чтение по губам является одним из способов извлечения данных о речи из видеоинформации. Существующие системы распознавания речи по изображениям губ достаточно эффективно работают при фронтальном расположении говорящего к видеокамере, т. е. когда на изображениях наблюдаются только линейные искажения, не приводящие к изменению формы губ. При расположении говорящего к видеокамере под углом наблюдаются нелинейные искажения. Форма губ при этом изменяется. Вопросы компенсации нелинейных искажений практически не рассмотрены. **Цель:** разработка алгоритма оценки геометрических искажений контуров губ говорящего, который позволит усовершенствовать существующие системы ввода речевой информации из видеоданных. **Результаты:** предложена методика оценки геометрических искажений контуров губ в системах визуального ввода информации. Оценка параметра геометрического искажения производится по результатам вычисления нормированного скалярного произведения наблюдаемого контура изображения губ говорящего с преобразованными контурами при варьировании параметра искажения. **Практическая значимость:** предложенный алгоритм оценки вида и параметра искажения контура позволяет повысить эффективность распознавания искаженных контуров изображений губ говорящего в системах визуального ввода речевой информации из видеоданных.

**Ключевые слова** — контур, математическая модель, геометрические искажения, распознавание речи.

### Введение

Система визуального ввода информации, являющаяся важным направлением усовершенствования человеко-машинных интерфейсов, позволяет упростить и автоматизировать речевой ввод [1]. При этом одним из основных способов извлечения данных о речи из видеоинформации является чтение по губам, основанное на распознавании контуров губ [2, 3]. Контурный анализ подразумевает такой способ обработки изображений, при котором обработка подвергается лишь контур изображения, в то время как обработка каждой точки изображения не требуется. Такой подход позволяет не рассматривать внутренние точки изображения и тем самым значительно сократить объем обрабатываемой информации [4].

В настоящее время предложены различные подходы к выделению изображения лица человека и контура его губ. Так, в работе [2] предложен способ формирования сообщений на основе детектирования движения губ. С помощью метода активного контура строится геометрическая модель лица человека. Для устранения неинвариантности дескрипторов изображений рта авторами предложен алгоритм предварительной обработки изображений, состоящий в масштабировании исходных размеров изображения с переходом к стандартной величине по ширине или высоте. В работе [3] для решения задачи распознавания контуров губ в видеопотоке используются цветные изображения, и цвет выбран в качестве

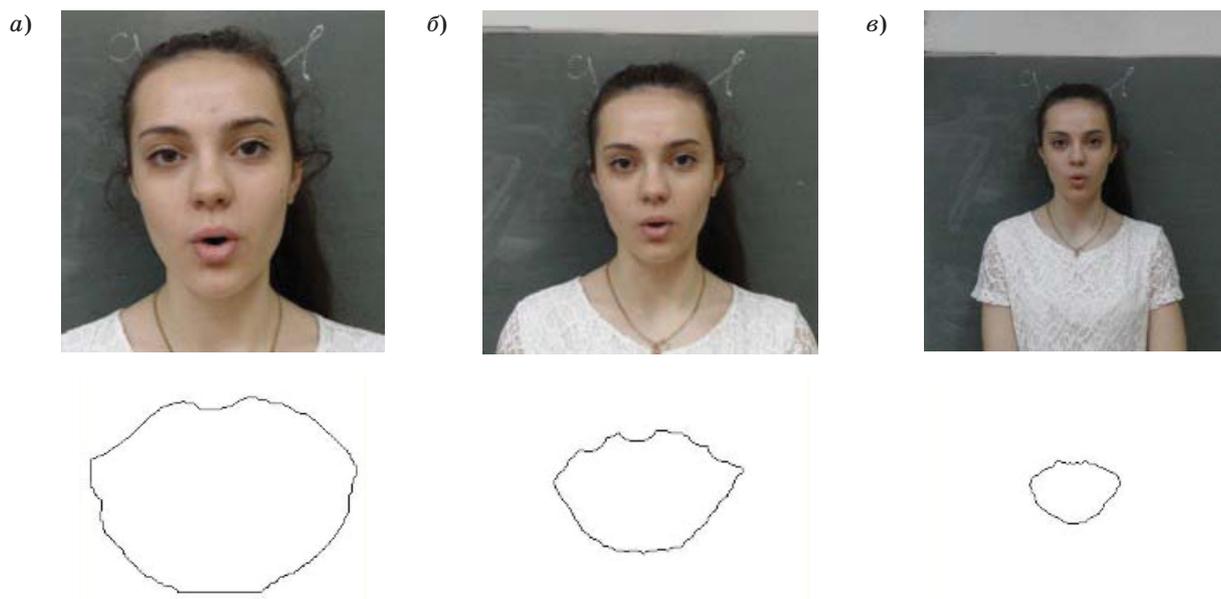
главного источника информации при выделении контура губ. В работе [5] предложено рассматривать контуры изображений губ как совокупность возможных реализаций некоторой случайной функции и для их анализа использовать теорию случайного контура [6, 7].

Существующие системы распознавания речи по изображениям губ достаточно эффективно работают при фронтальном расположении говорящего к видеокамере, т. е. когда на изображениях наблюдаются только линейные искажения, не приводящие к изменению формы губ (изменение масштаба и угла поворота в плоскости кадра). Вопросы же компенсации нелинейных искажений, при которых форма губ изменяется, практически не рассмотрены.

### Математическая модель контура изображения губ

Контур задается как комплексная случайная функция неслучайного аргумента  $l$ :  $X(l) = \text{Re}X(l) + i\text{Im}X(l)$ . Случайный контур  $X(l)$  рассматривается как совокупность его возможных реализаций  $\chi_1(l), \chi_2(l), \dots, \chi_n(l)$ , где  $n$  — количество реализаций [6]. Контур-реализация  $\chi_k(l)$  случайного контура  $X(l)$  представляет собой периодическую последовательность элементарных векторов, заданных в виде комплексных чисел:  $\chi_k(l) = \text{Re}\chi_k(l) + i\text{Im}\chi_k(l)$ .

Для случайного контура  $X(l)$  введены понятия математического ожидания и дисперсии.



■ **Рис. 1.** Пример линейного искажения в виде изменения масштаба:  $a - \mu > 1$ ;  $b - \mu = 1$ ;  $v - \mu < 1$

■ **Fig. 1.** The example of linear distortion in the form of change of scale:  $a - \mu > 1$ ;  $b - \mu = 1$ ;  $v - \mu < 1$

При этом математическое ожидание случайного контура  $X(l)$  графически истолковывается как «усредненный контур», около которого расположены другие контуры-реализации  $\chi_1(l), \chi_2(l), \dots, \chi_n(l)$ . Дисперсия характеризует степень рассеяния контуров-реализаций  $\chi_1(l), \chi_2(l), \dots, \chi_n(l)$  вокруг математического ожидания случайного контура  $X(l)$  [6]. Также заданы корреляционная  $K_X(l_1, l_2)$  и взаимная корреляционная  $K_{XY}(l_1, l_2)$  функции случайного контура  $X(l)$ .

Для формирования модели контуров изображений губ говорящего необходимо зафиксировать изображения губ при произнесении различных слов. Выделив контуры изображений губ, получим выборки, содержащие контуры-реализации изображений губ при произнесении разных звуков.

В работе [4] показано, что применение комплекснозначного описания кода контура позволяет получить инвариантность величины модуля нормированного скалярного произведения к линейным искажениям контура типа масштабирование и поворот. При этом под поворотом контура на угол  $\varphi$  понимается линейное преобразование, в результате которого на этот угол поворачивается каждый элементарный вектор контура. Аналогично изменение масштаба контура в  $\mu$  раз заключается в растяжении каждого элемента контура в  $\mu$  раз. На рис. 1,  $a-v$  приведены изображения лица и контуры губ при изменении расстояния до камеры.

Значение нормированного скалярного произведения между любой парой контуров, пред-

ставленных на рис. 1, постоянно и близко к единице. Таким образом, линейное искажение типа масштабирование практически не влияет на качество распознавания контуров губ говорящего в системах визуального ввода информации.

### Оценка геометрического искажения контура изображения губ

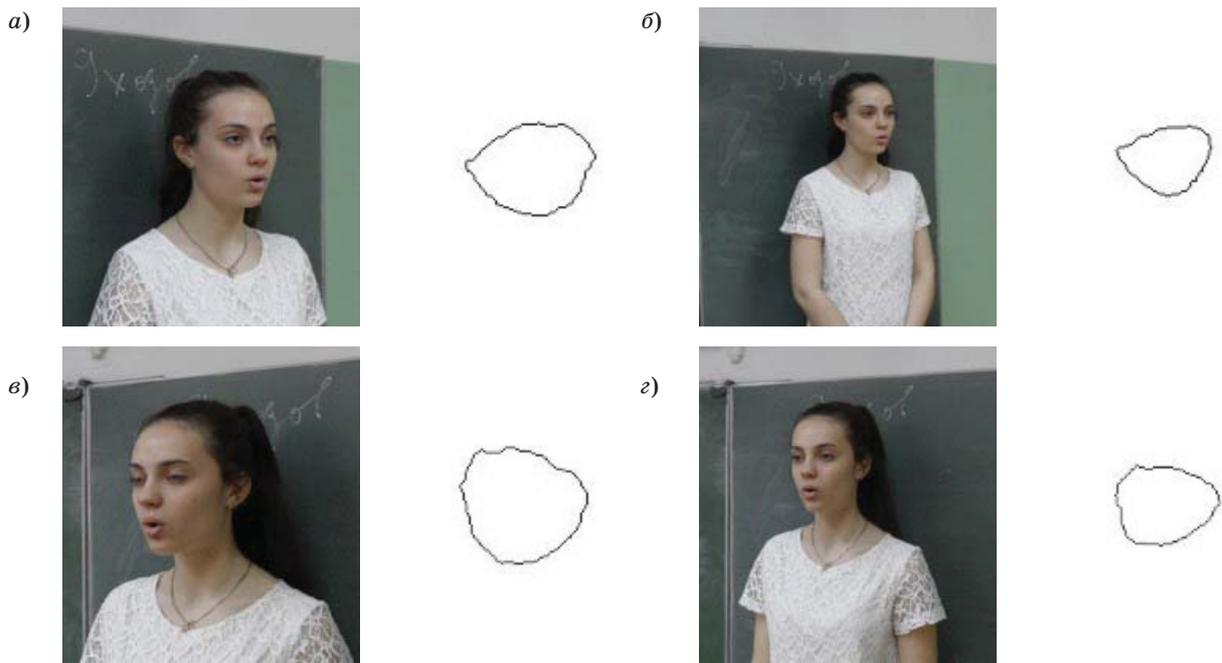
Геометрическое искажение контура изображения губ можно наблюдать, например, при расположении говорящего к видеокамере под некоторым углом (рис. 2,  $a-z$ ). Характер искажения в этом примере относится к так называемым трапецидальным искажениям.

В работе [8] представлена модель контура, подвергнутого трапецидальному искажению:

$$v(n) = \gamma(n) + iA \exp\left(i \frac{2\pi}{s} 2n\right), \quad n = 0, 1, \dots, s-1,$$

где  $v(n)$  — код контура искаженного изображения;  $\gamma(n)$  — код контура исходного изображения;  $A$  — коэффициент искажения;  $s$  — длина контура. Показано, что при трапецидальном искажении к спектру исходного контура добавляется одна гармоника, уровень которой определяется параметром  $A$ . В зависимости от того, является эта гармоника чисто вещественной или мнимой, определяется характер трапецидального искажения.

Применение предложенных [8] моделей контуров искаженных изображений позволяет моде-



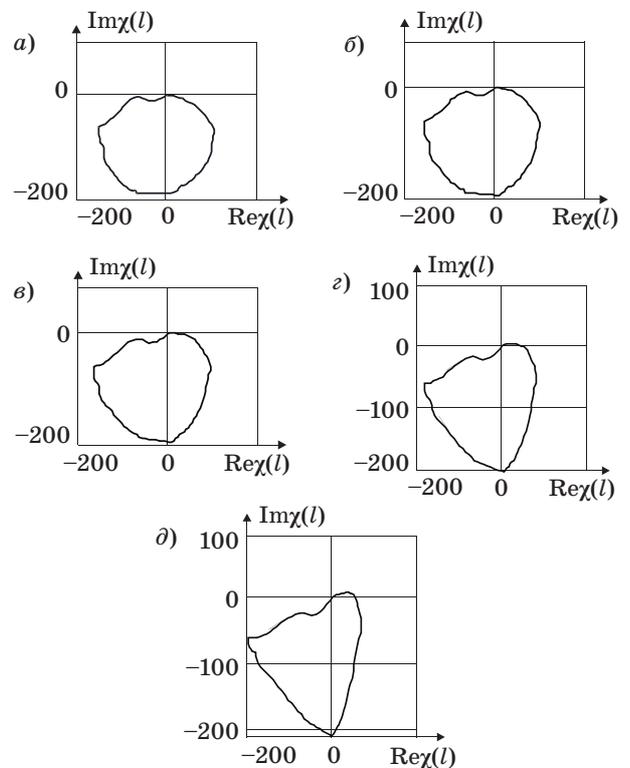
■ **Рис. 2.** Примеры трапецидальных искажений, возникающих при расположении говорящего к видеокамере: *a, б* — справа; *в, г* — слева

■ **Fig. 2.** The examples of the trapezoidal distortions arising at an arrangement of the speaker to the video camera: *a, б* — on the right; *в, г* — at the left

лизовать эталонные контуры для сравнения их с наблюдаемыми и производить оценку параметров и вида искажений. На рис. 3, *a-d* представлен пример преобразованного контура изображения губ при изменении параметра  $A$  для трапецидального искажения.

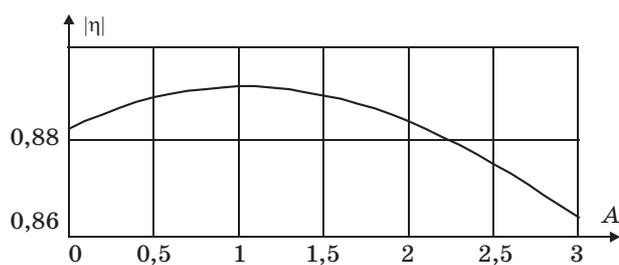
Оценка параметра  $A$  трапецидального искажения может быть найдена по результатам вычисления нормированного скалярного произведения  $\eta = (N, \Gamma_A)$  наблюдаемого контура  $N$  изображения губ говорящего (см. рис. 2) с искаженными контурами  $\Gamma_A$  при изменении параметра искажения  $A$  (см. рис. 3). Наблюдаемый контур  $N$  представляет собой последовательность элементарных векторов  $v(n)$ , заданных в виде комплексных чисел  $N = \{v(n)\}$ , где  $v(n) = \text{Re}v(n) + i\text{Im}v(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, s - 1$ . Искаженный контур  $\Gamma_A$  также представляет собой последовательность комплексных чисел  $\gamma_A(n) = \text{Re}\gamma_A(n) + i\text{Im}\gamma_A(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, s - 1$ . При этом совокупность контуров  $\Gamma_A$  формируется из эталонного контура  $\Gamma$  с помощью преобразования «трапецидальное искажение» при изменении параметра искажения  $A$ . Нормированное скалярное произведение вычисляется следующим образом:

$$\eta = (N, \Gamma_A) = \frac{\sum_{n=0}^{s-1} v(n)\gamma_A^*(n)}{\|N\| \|\Gamma_A\|}.$$

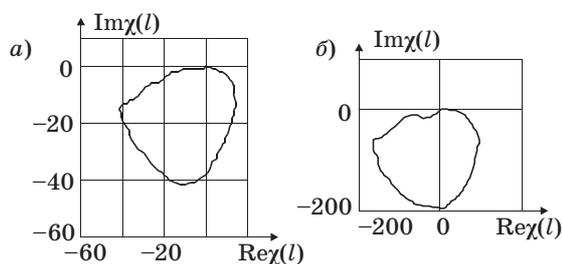


■ **Рис. 3.** Вид искаженного контура изображения губ при изменении параметра  $A$ : *a* — 0; *б* — 0,5; *в* — 1; *г* — 2; *д* — 3

■ **Fig. 3.** The type of the distorted contour of the image of lips at change of parameter  $A$ : *a* — 0; *б* — 0,5; *в* — 1; *г* — 2; *д* — 3



■ **Рис. 4.** Зависимость модуля нормированного скалярного произведения от параметра  $A$   
 ■ **Fig. 4.** The dependence of the module of the normalized scalar product from the parameter  $A$



■ **Рис. 5.** Наблюдаемый контур изображения губ (а) и результат моделирования с оценкой параметра  $A$  (б)  
 ■ **Fig. 5.** The observed contour of the image of the lips (а) and the result of modeling with an estimate of the parameter  $A$  (б)

На рис. 4 представлена зависимость модуля нормированного скалярного произведения наблюдаемого контура  $N$ , показанного на рис. 2, б, и искаженного контура изображения губ от параметра  $A$  (см. рис. 3).

### Литература

1. Калиновский И. А., Спицин В. Г. Обзор и тестирование детекторов фронтальных лиц // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 1. С. 99–111. doi:10.18287/2412-6179-2016-40-1-99-111
2. Ковшов Е. Е., Завистовская Т. А. Система обработки движения губ человека для речевого ввода информации // Cloud of Science. 2014. Т. 1. № 2. С. 279–291.
3. Солдатов С. А. Чтение по губам: распознавание контуров губ // Лаборатория компьютерной графики. <http://www.ict.edu.ru/ft/002415/loi2002sss.pdf> (дата обращения: 10.01.2017).
4. Фурман Я. А., Кревецкий А. В., Передреев А. К. и др. Введение в контурный анализ и его приложение к обработке изображений и сигналов / под ред. Я. А. Фурмана. — М.: Физматлит, 2002. — 592 с.

Результаты исследования зависимости модуля нормированного скалярного произведения  $\eta$  от параметра  $A$  позволяют произвести оценку параметра искажения  $A$  и получить модель наблюдаемого контура изображения губ говорящего (рис. 5, а и б). При этом выбирается то значение параметра искажения  $A$ , при котором величина модуля нормированного скалярного произведения  $\eta$  достигает максимума. В примере, представленном на рис. 4, оценка величины  $A$ , при которой модуль нормированного скалярного произведения  $\eta$  достигает максимума, равна 1.

Таким образом, применение моделей контуров искаженных изображений позволяет формировать эталонные контуры для сравнения их с наблюдаемыми и производить оценку параметров и вида искажений. Учет этих данных может быть применен для усовершенствования существующих систем ввода речевой информации из видеоданных, основанных на распознавании контуров изображений губ говорящего.

### Заключение

В работе для решения задачи распознавания изображений губ говорящего предложен подход на основе методов контурного анализа. Эти методы используют информацию, имеющуюся в контурах изображений, и инвариантны к параметрам линейных преобразований. Показана возможность применения теории случайного контура для реализации системы распознавания речи по контурам изображений губ. Учет моделей контуров искаженных изображений способствует усовершенствованию существующих человеко-машинных интерфейсов ввода речевой информации из видеоданных.

5. Хафизов Р. Г., Яранцева Т. В., Охотников С. А. Система распознавания речи по контурам изображения губ // Проектирование и технология электронных средств. 2016. № 2. С. 13–17.
6. Хафизов Р. Г. Модель контура изображения со случайной формой // Компьютерная оптика. 2014. № 1. С. 127–130.
7. Хафизов Р. Г., Роженцов А. А., Хафизов Д. Г., Охотников С. А. Основы теории обработки непрерывных контуров изображений: монография / под общ. ред. Р. Г. Хафизова. — Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. — 172 с.
8. Хафизов Р. Г., Охотников С. А., Яранцева Т. В. Модели контуров изображений объектов при наличии геометрических искажений // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 3. С. 415–420. doi:10.18287/2412-6179-2016-40-3-415-420

UDC 621.391

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.2

## Estimation of Geometrical Distortions of Lip Contours in Visual Input Systems

Khafizov R. G.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, HafizovRG@volgatech.netYaranceva T. V.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, fiza08@rambler.ru<sup>a</sup>Volga State University of Technology, 3, Lenin Sq., 424000, Yoshkar-Ola, Russian Federation

**Introduction:** Lip reading is a method of extracting speech data from video information. The existing lip-image speech recognition systems are sufficiently powerful when the speaker is located en face in front of the camera, i.e. when the images are observed with only linear distortions, not causing any change in the shape of the lips. When the speaker is located at an angle, nonlinear distortions come out, and the shape of the lips changes. The problems of compensating the nonlinear distortions have almost never been discussed.

**Purpose:** The goal is to develop an algorithm for estimating the geometric distortions of the lip contours which would make it possible to improve the existing systems of retrieving voice information from video data. **Results:** A technique has been proposed for estimating geometrical distortions of lip contours in visual information input systems. The geometric distortion parameter is estimated by the results of calculating the normalized scalar product of the observed contour of the speaker's lips and the transformed contours, as the distortion parameter is changing. **Practical relevance:** The proposed algorithm for the estimation of the type and parameter of a contour distortion allows you to promote the efficiency of recognizing distorted contours of lip images in systems of visual input of speech information from video data.

**Keywords** — Contour, Mathematical Model, Geometrical Distortions, Speech Recognition.

## References

1. Kalinovskii I. A., Spitsyn V. G. Review and Testing of Frontal Face Detectors. *Komp'iuternaia optika* [Computer Optics], 2016, vol. 40, no. 1, pp. 99–111 (In Russian). doi:10.18287/2412-6179-2016-40-1-99-111
2. Kovshov E. E., Zavistovskaya T. A. Development of Software for Testing Algorithms Design Information Structures. *Cloud of Science*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 279–291 (In Russian).
3. Soldatov S. A. Lip Reading: Lip Contour Recognition. *Laboratoriia komp'iuternoii grafiki*. Available at: <http://www.ict.edu.ru/ft/002415/loi2002sss.pdf> (accessed 10 January 2017) (In Russian).
4. Furman Ya. A., Krevetsky A. V., Predreyev A. K., et al. *Vvedenie v konturnyi analiz i ego prilozhenie k obrabotke izobrazhenii i signalov* [Contour Analysis Introduction and its Image and Signal Processing Application]. Ed. by Ya. A. Furman. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 592 p. (In Russian).
5. Khafizov R. G., Yaranceva T. V., Okhotnikov S. A. Speech Recognition System for Image Contours Lips. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and Technoigy of Electronic Means], 2016, no. 2, pp. 13–17 (In Russian).
6. Khafizov R. G. Model of the Contour of the Image with a Random Shape. *Komp'iuternaia optika* [Computer Optics], 2014, no. 38(1), pp. 127–130 (In Russian).
7. Khafizov R. G., Rozhentsov A. A., Khafizov D. G., Okhotnikov S. A. *Osnovy teorii obrabotki nepreryvnykh konturov izobrazhenii* [Basics of Continuous Image Processing Circuits Theory]. Ed. by R. G. Khafizov. Yoshkar-Ola, Povolzhskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet Publ., 2015. 172 p. (In Russian).
8. Khafizov R. G., Okhotnikov S. A., Yaranceva T. V. Models of the Image of Object Contours with Geometrical Distortions. *Komp'iuternaia optika* [Computer Optics], 2016, no. 40(3), pp. 415–420 (In Russian). doi:10.18287/2412-6179-2016-40-3-415-420

## 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.

# АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ВОДИТЕЛЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРОНТАЛЬНОЙ КАМЕРЫ СМАРТФОНА

И. Б. Лашков<sup>а, б, 1</sup>, аспирант

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** многие водители за рулем транспортного средства оказываются в состоянии усталости и при этом даже не подозревают о том, что находятся в таком состоянии. Отслеживание опасного поведения за рулем может помочь обратить внимание водителей на стиль своего вождения и связанные с этим риски, тем самым снизить процент неосторожного вождения, улучшить навыки безопасного поведения на дороге, таким образом уменьшив количество дорожно-транспортных происшествий на дорогах общего пользования. На сегодняшний день большую популярность приобретают системы автоматизированной поддержки водителей, призванные помочь им избежать дорожно-транспортных происшествий или смягчить их последствия, заранее предупреждая водителя об опасности звуковым или световым сигналом. **Цель исследования:** разработка концептуальной модели для анализа поведения водителя при управлении транспортным средством с использованием фронтальной камеры смартфона. **Результаты:** разработана концептуальная модель для распознавания небезопасного поведения водителя при помощи фронтальной камеры смартфона; представлен алгоритм определения признаков усталости и ослабленного внимания водителя; разработана онтологическая модель поведения водителя для определения опасных состояний при управлении транспортным средством; разработан прототип мобильного приложения для слежения за водителем при помощи фронтальной камеры смартфона и обнаружения признаков сонливости и ослабленного внимания в процессе управления им транспортным средством. **Практическая значимость:** разработанное мобильное приложение, задействующее алгоритм определения признаков сонливости и ослабленного внимания, позволяет распознавать небезопасное поведение водителя за рулем автомобиля и предупреждать о наступлении аварийной ситуации в процессе движения.

**Ключевые слова** — современные системы содействия водителю, транспортные системы, онтологии.

## Введение

Количество несчастных случаев, вызванных засыпанием водителя за рулем транспортного средства (ТС), с каждым годом уносит все больше жизней и приводит к травматизму среди населения как в России, так и в мире. Вождение в состоянии ослабленного внимания настолько же опасно, как и вождение в состоянии алкогольного опьянения, о чем свидетельствует анализ числа смертей и травм, полученных при вождении. Заснул ли водитель за рулем, или же у него замедлилась скорость реакции — все это в равной мере может привести к опасным последствиям.

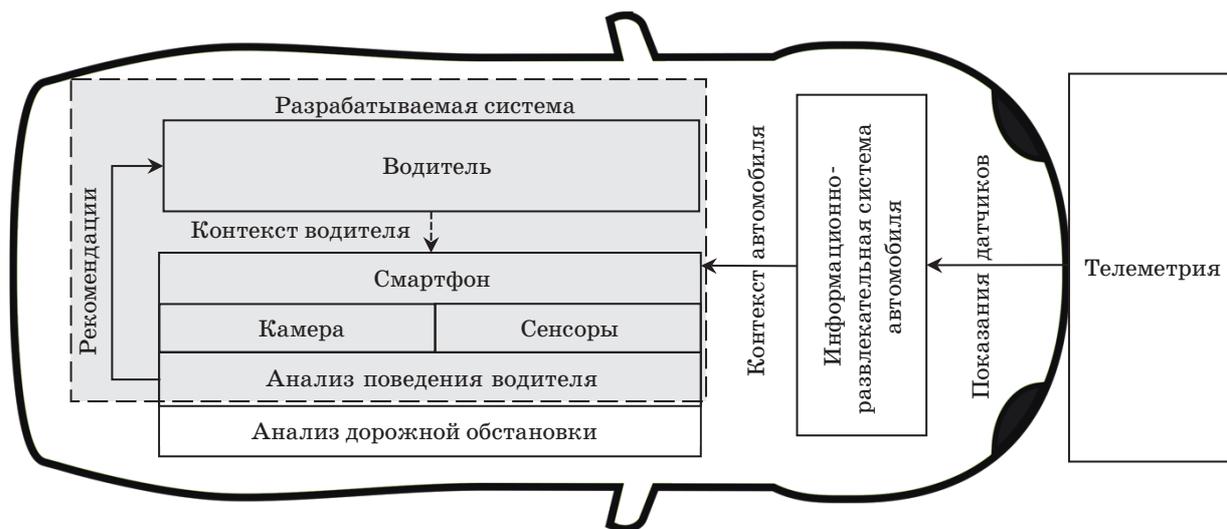
На сегодняшний день безопасность на дороге определяется не только техническим состоянием ТС, дорожными условиями и соблюдением правил дорожного движения, но также навыками, физическим состоянием, способностью концентрироваться и соблюдением мер безопасности водителями.

В целях повышения уровня безопасности на дорогах мировыми производителями легковых и

грузовых автомобилей разрабатываются и встраиваются в автомобили современные системы содействия водителю (СССВ). Данные системы призваны помочь водителям предотвратить дорожно-транспортное происшествие (ДТП) или смягчить его последствия. Согласно прогнозу McKinsey Global Institute [1], среднегодовые темпы роста рынка систем помощи водителю до 2020 г. могут составить более \$ 11 млрд.

В настоящий момент проводится достаточно много исследований в области компьютерного зрения (например, [2–5]). В СССР невербальное выражение водителем ТС внутреннего состояния анализируется при помощи видеокamеры за счет наблюдения за его головой и лицом, которые предоставляют достаточно точные характеристики, по которым можно определить физиологические особенности водителя. Предупреждающие сигналы подаются такими системами для стимулирования бдительности водителя, а также для предупреждения его о необходимости своевременных действий в ситуациях, когда существует риск возникновения ДТП. Так, например, управление автомобилем требует от водителя полной сосредоточенности внимания, хорошей реакции и адекватного восприятия дорожной обстановки. Существует большое количество отвлекающих внимание водителя факторов, таких как теле-

<sup>1</sup> Научный руководитель — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН А. М. Кашевник.



■ *Рис. 1.* Общая схема CCCB  
 ■ *Fig. 1.* General scheme of ADAS

фонные звонки, SMS-сообщения, мультимедиа и навигационные системы. Если водитель отвлекается от дорожной ситуации во время движения ТС, CCCB проинформирует водителя о наступлении опасной ситуации и существующем риске возникновения ДТП. В этом случае у водителя появляется время для совершения необходимого маневра с целью избежать ДТП.

Технологии, составляющие CCCB, можно условно разделить по виду контекста на те, которые осуществляют мониторинг окружающей обстановки (дорожной обстановки), и те, которые направлены на слежение за поведением водителя внутри кабины ТС. Под контекстом понимается любая информация, которая может быть использована для описания ситуации, в которой находится в определенный момент времени некоторый объект (водитель ТС). Упрощенная схема CCCB, интегрированной в автомобиль и использующей оба вида контекста, представлена на рис. 1.

Получая и используя показания с телеметрии ТС (встроенных в автомобиль видеокамер, радаров, лазеров, датчиков, сенсоров), CCCB осуществляет сбор информации о дорожной обстановке (контексте автомобиля) и наблюдение за поведением водителя внутри кабины ТС (контексте водителя). Непрерывно анализируя опасные ситуации в процессе движения, при наступлении аварийной ситуации данная система способна принять управление ТС на себя или же выработать рекомендации водителю, оповестив его о них через информационно-развлекательную систему ТС.

Основной целью статьи является разработка прототипа мобильного приложения для предот-

ращения ДТП, основанного на использовании контекста внутри кабины ТС с применением фронтальной камеры и сенсоров смартфона и разработанной онтологии водителя. В статье описана реализация мобильного приложения для смартфонов на базе платформы Android, задачей которого является отслеживание физического состояния водителя и предупреждение его о риске наступления аварийной ситуации.

### Аналитический обзор решений в области CCCB

Автопроизводители все активнее встраивают передовые системы помощи водителю, помогающие избежать аварии или уменьшить ее последствия. Можно выделить следующие наиболее встречающиеся: система контроля слепых зон (Blind Spot Detection — BSD), система контроля рядности движения (Lane Departure Warning — LDW), система обнаружения пешеходов и велосипедистов (Pedestrian Collision Warning — PCW), функция распознавания дорожных знаков (Traffic Sign Recognition — TSR), функция предупреждения о переднем столкновении и смягчении неизбежной аварии (Forward Collision Warning — FCW), система шоссейного мониторинга и предупреждения (Headway Monitoring and Warning — HMW).

Все CCCB можно условно разделить по форме представления на две категории:

— внешние камеры, сенсоры, датчики, чипы и т. д. вместе с программными средствами, встраиваемые в автомобили на заводах-изготовителях или устанавливаемые в качестве дополнительного оборудования уже самим водителем;

— мобильные приложения, устанавливаемые водителем на смартфон из магазина приложений Google Play (магазин приложений, игр, книг, музыки и фильмов компании Google и других компаний) или App Store (магазин приложений, раздел онлайн-магазина iTunes Store компании Apple, предлагающий iOS-приложения).

В настоящее время существует достаточно большое количество производителей, разрабатывающих и интегрирующих интеллектуальные системы помощи водителю. Одной из ведущих компаний в области проектирования и разработки систем безопасности и помощи водителю является Mobileye (Израиль). Данная компания предоставляет интеллектуальную систему помощи водителю, встраиваемую в ТС некоторыми заводами-изготовителями. При этом существует возможность покупки водителем видекамеры, устанавливаемой под лобовым стеклом автомобиля, с интегрированным программным обеспечением. Примерами опасных ситуаций, определяемых такой системой, являются: наезд на пешехода, несоблюдение дистанции до движущегося впереди ТС, непреднамеренный съезд с полосы движения, а также превышение разрешенной скорости движения на данном участке. Как можно заметить, в целях предотвращения ДТП CCCB осуществляют визуальную оценку окружающей обстановки вокруг автомобиля, а поведение водителя и обстановка внутри кабины не учитываются. Стоит также заметить, что на данный момент интегрируемые в ТС CCCB в основном доступны в виде дополнительной опции для автомобилей класса премиум и выше, а сама стоимость такого оборудования остается достаточно высокой.

Другой категорией CCCB являются мобильные приложения, представленные в основном на платформах iOS и Android и являющиеся пассивными системами содействия водителю.

Мобильное приложение использует встроенные в смартфон тыловую камеру, сенсоры и датчики для обнаружения впереди идущих автомобилей и предупреждения водителя в случае опасности. Такое приложение распознает объекты впереди водителя в реальном времени, вычисляет текущую скорость автомобиля, и при надвигающейся опасности система воспроизводит звуковое и визуальное предупреждение, уведомляя водителя о необходимости своевременной реакции для предотвращения ДТП. Существующие мобильные приложения сфокусированы на обработке изображений, получаемых из видеоряда тыловой камеры смартфона, направленной на слежение за дорожной обстановкой впереди автомобиля. Обработывая и анализируя изображения, мобильные приложения способны распознавать небезопасную дистанцию до впереди идущих ТС, съезд с выбранной полосы движения, дорожные знаки и т. п. Сравнение мобильных CCCB-приложений по набору технологий, часто встречающихся в подобных системах (LDW, FCW, CLC, LW, HWM, SLI/TSR, PCW), а также системах распознавания сонливости (Drowsiness Driving — DD) и ослабленного внимания (Inattentive Driving — ID) водителя представлено в табл. 1.

Несмотря на небольшие размеры современных смартфонов, в них встроено большое количество различных сенсоров и датчиков, среди которых к часто встречающимся можно отнести фронтальную и тыловую камеры, GPS, акселерометр (G-сенсор), гироскоп, микрофон. Сравнение мобильных CCCB-приложений по использованию доступных сенсоров смартфонов представлено в табл. 2.

Одним из наиболее популярных мобильных приложений среди CCCB, предназначенных для повышения безопасности вождения ТС, является мобильное приложение дополненной реальности iOnRoad, доступное на платформах iOS

■ Таблица 1. Сравнение мобильных CCCB-приложений по наличию функций

■ Table 1. Comparison of mobile ADAS application functions

Приложение	Платформа		Технология								
	iOS	Android	LDW	FCW	CLC	LW	HMW	DD	ID	SLI/TSR	PCW
iOnRoad	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
CarSafe	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-
DriveSafe	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+
Augmented Driving	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-
Nexar — AI Dashcam	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
NightDrive	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-

- **Таблица 2.** Сравнение мобильных CCCB-приложений по использованию встроенных камер и сенсоров смартфона
- **Table 2.** Comparison of mobile ADAS applications by employing the built-in cameras and smartphone sensors

Приложение	Устройство					
	Фронтальная камера	Тыловая камера	GPS	Акселерометр	Гироскоп	Микрофон
iOnRoad	–	+	+	+	+	–
CarSafe	+	+	+	+	+	+
DriveSafe	–	–	+	+	+	–
Augmented Driving	+	–	–	+	+	–
Nexar — AI Dashcam	–	+	–	+	+	+
NightDrive	+	–	–	–	–	–

и Android, задействующее тыловую камеру, сенсоры и датчики смартфона. При аварийной ситуации приложение выводит звуковое и графическое предупреждение о риске столкновения. Другим приложением помощи водителю является мобильное приложение CarSafe [6], использующее алгоритмы компьютерного зрения и машинного обучения для отслеживания усталости и ослабленного внимания водителя при помощи фронтальной камеры смартфона и в то же время для слежения за дорожной обстановкой при помощи тыловой камеры. Однако на данный момент приложение CarSafe не доступно для тестирования. Другой мобильной CCCB является приложение дополненной реальности Augmented Driving [7], использующее исключительно тыловую камеру смартфона для отслеживания дорожной обстановки и предупреждения водителя о возможном наступлении ДТП при помощи звуковых уведомлений. Данное приложение предлагает такие функции для водителя, как уведомление о несоблюдении дистанции до впереди идущего ТС, слежение за дорожной разметкой и уведомление о превышении скорости ТС. Приложение NightDrive [8] является единственным мобильным решением, которое непрерывно следит за открытостью/закрытостью глаз водителя и предупреждает его в случае определения состояния ослабленного внимания. В том случае, если глаза водителя закрыты две секунды и более, приложение проигрывает звуковой сигнал до тех пор, пока водитель не выйдет из этого состояния. Стоит отметить, что у приложения имеется режим «ночного видения». Изменяя яркость экрана телефона, приложение способно подстраиваться под условия слабой освещенности в кабине водителя ТС и тем самым повышать качество и яркость изображений, получаемых

с фронтальной камеры смартфона и используемых при выявлении опасных ситуаций. Данное приложение, опубликованное ранее в магазине приложений App Store, на текущий момент недоступно. Другим помощником водителя может служить мобильное приложение Driver Guard [9], осуществляющее слежение за обстановкой, помогая поддерживать безопасную дистанцию до впереди идущего ТС, и предупреждающее водителя о наступлении опасного состояния. Данное приложение доступно только на платформе Android. Приложение Nexar — AI Dashcam [10] доступно на платформах iOS и Android и работает как видеорегистратор, сохраняющий информацию о поездке в удаленном хранилище: время, координаты и скорость автомобиля и запись ДТП. Nexar ведет запись видеопотока одновременно с фронтальной и тыловой камер смартфона, сохраняет номерные знаки ТС, нарушающих правила дорожного движения, чтобы впоследствии при появлении нарушителя в зоне видимости камеры смартфона предупредить водителя при помощи текстовых и звуковых оповещений.

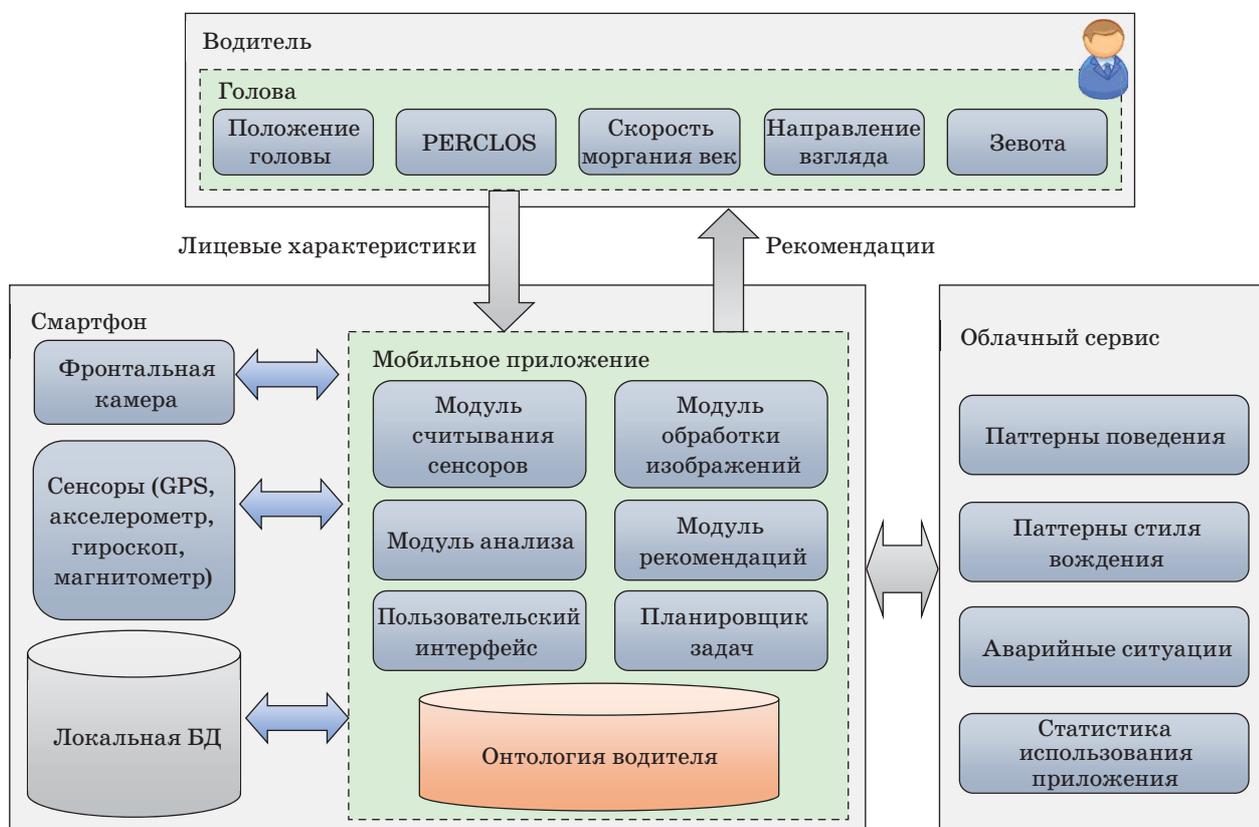
К сожалению, проанализированные приложения учитывают не весь спектр небезопасных дорожных ситуаций, с которыми может столкнуться водитель ТС. Рассмотренные мобильные приложения сфокусированы на анализе окружающей дорожной обстановки, не учитывая в полной мере контекст внутри кабины ТС. Существующие приложения не подстраиваются под конкретного водителя, не осуществляют дополнительную калибровку всей системы, пренебрегая прошлым опытом водителя, его поведением за рулем ТС и паттернами вождения при анализе небезопасного состояния водителя, тем самым уменьшается точность распознавания небезопасных ситуаций при работе систем помощи водителю.

### Концептуальная модель предложенной CCCB

Концептуальная модель предложенной мобильной системы, реализующей функции CCCB, представлена на рис. 2. Модель состоит из трех основных компонентов: водителя, смартфона и облачного сервиса. Устанавливаемое на смартфон мобильное приложение задействует фронтальную камеру и сенсоры (GPS, акселерометр, гироскоп, магнетометр) телефона для получения изображений водителя и параметров поездки (скорости, ускорения, торможения, поворота налево/направо и текущей геопозиции ТС). Для поиска и извлечения характеристик лица водителя (положения головы; доли времени, когда глаза закрыты — PERCLOS — PERcentage of eye CLOSure [11]; скорости моргания век; направления взгляда; зевоты) его исходное изображение, поступающее на вход модуля обработки изображений, обрабатывается методами компьютерного зрения. Используя онтологию водителя, характеристики его лица и показания сенсоров смартфона, модуль анализа выявляет опасные состояния и аварийные ситуации, в которые может попасть водитель ТС. На основе выявленной аварийной ситуации и

контекста, в котором находятся водитель и ТС, модуль рекомендаций вырабатывает рекомендации, следование которым позволяет снизить вероятность наступления ДТП. Планировщик задач осуществляет распределение ресурсоемких, затратных по распознаванию объектов на изображении, вычислительных и сетевых задач, что позволяет воспользоваться возможностями многоядерных процессоров современных смартфонов, переключая потоки на исполнение.

Большое количество информации, получаемой и генерируемой в процессе работы с фронтальной камерой и многочисленными сенсорами смартфона, накапливается системой помощи водителю при отслеживании его поведения за рулем автомобиля. Хранение, управление, анализ и генерирование новых данных осуществляется при помощи технологической связи в виде локальной базы данных (БД), хранящейся в приложении на смартфоне водителя и облачном сервисе, доступном удаленно для каждого пользователя в любой момент времени. Локальная БД используется для хранения временных пользовательских данных и подготовки их в целях дальнейшей синхронизации, отправки в облачный сервис. Использование локальной БД может быть также оправдано в от-



■ **Рис. 2.** Концептуальная модель разрабатываемой CCCB  
 ■ **Fig. 2.** Reference model of the developed ADAS

сутствие соединения с сетью Интернет, когда запись событий и их характеристик продолжится в память устройства при обрыве связи. Облачный сервис получает от приложения такие данные, как характеристика вождения водителя (ускорение, торможение, плавность хода, перестроение, путь следования и т. д.), опасные состояния и аварийные ситуации в процессе движения и статистика использования приложения. На основе данных, собираемых с мобильного устройства водителя, выделяются и формируются паттерны его поведения, уникальный стиль (манера) вождения. В дальнейшем система помощи водителю продолжает обучаться и подстраиваться под текущего водителя с учетом особенностей его поведения за рулем и стиля вождения.

Последним компонентом мобильного приложения является интуитивный пользовательский интерфейс, предоставляющий удобное взаимодействие водителя с приложением.

### Анализ поведения водителя

Рассмотрим предлагаемую схему распознавания аварийных ситуаций, наблюдаемых внутри кабины ТС (рис. 3). На вход поступает изображение из видеоряда с фронтальной камеры смартфона. Осуществляя поиск и локализацию объектов лица водителя (положение головы, угол поворота головы, глаз, рта) при помощи алгоритмов компьютерного зрения, на каждом кадре оценивается физическое состояние водителя при движении ТС в момент времени (состояние глаз — открытость и закрытость, скорость моргания век, выражение лица, направление взгляда, поворот головы). Распознанные параметры позволяют выявить аварийные ситуации (состояние сонливости [12], ослабленного внимания [13]), оказывающие влияние на безопасность водителя при управлении ТС.

Под сонливостью понимается чувство усталости и «слипания глаз», являющееся следствием нарушения сна и сопровождающееся постоянным или периодическим желанием уснуть во время, не предназначенное для сна. Скорость реакции замедляется, затрудняется принятие решений, понижаются внимание, память, страдает координация движений. Стоит отметить, что водители сами зачастую не осознают, что находятся в состоянии сонливости.

Существующие на данный момент научные исследования показали, что параметр PERCLOS является проверенным и надежным критерием определения сонливости водителя. Параметр PERCLOS характеризуется долей времени, в течение которого веки водителя закрыты более чем на 80 % по оценкам наблюдателя или соответствующей прикладной программы. Если показатель PERCLOS наблюдается более 28 % [14]

времени в течение одной минуты, то человек считается дремлющим.

При развитии состояния усталости или сонливости моргание глаз может стать более продолжительным и более медленным, и (или) частота моргания может варьироваться, и (или) при моргании веки могут начать опускаться с небольшой амплитудой, например, пока глаза не начинают закрываться до краткосрочных «микроснов», т. е. состояний сна, которые длятся в течение приблизительно 3–5 с или дольше, или до продолжительного сна.

Дополнительным критерием определения сонливости служит скорость моргания глаз. Безопасный для водителя интервал, в течение которого допускается моргание глаза, равен от 0,5 до 0,8 с [15].

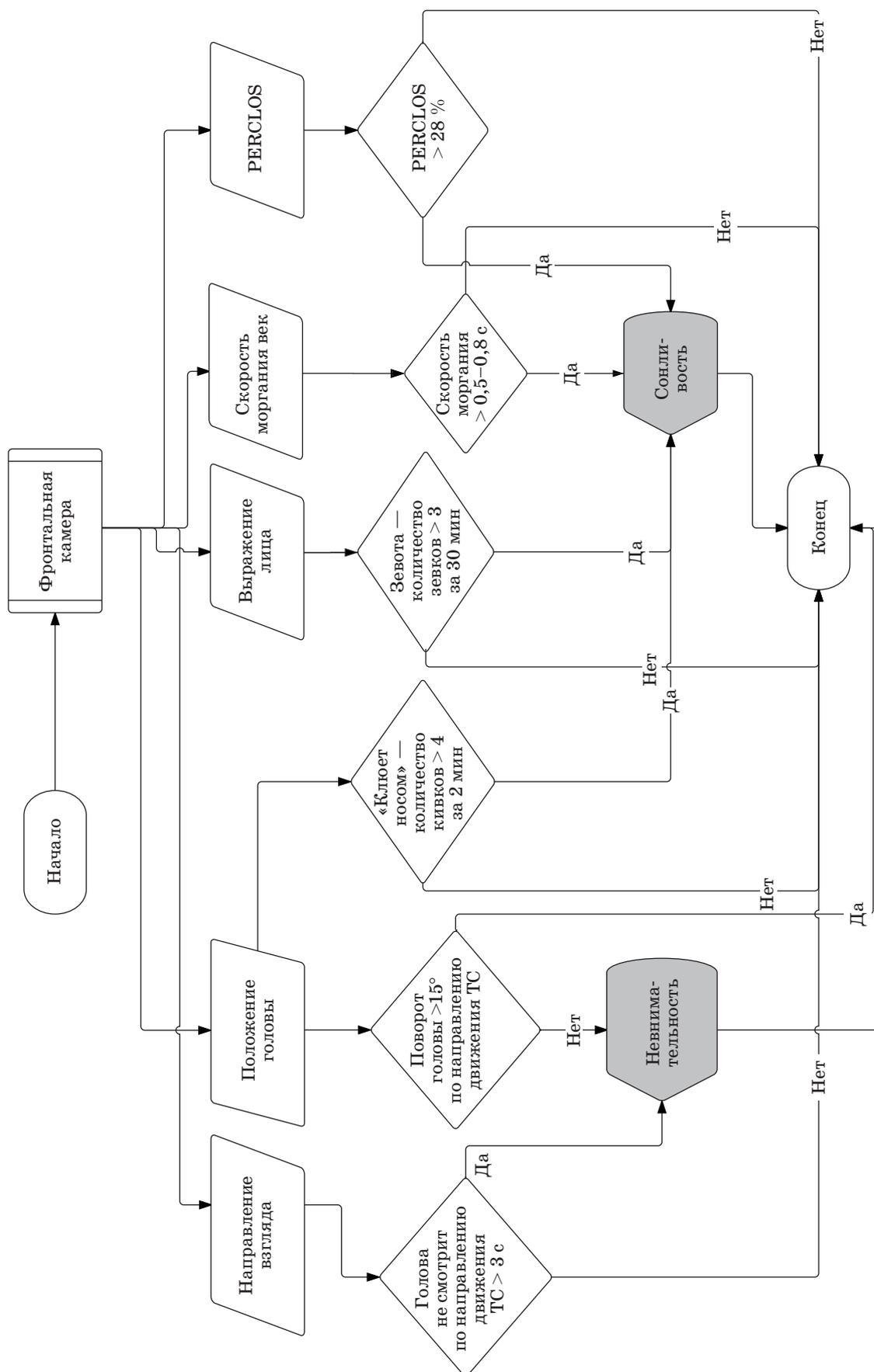
Другим индикатором определения состояния сонливости является зевота [16]. Считаем, что у водителя присутствуют признаки сонливости, если при управлении ТС он совершает более трех зевков в течение 30 мин.

Одним из заметных признаков сонливости является момент, когда водитель «клюет носом», т. е. ему трудно удерживать голову в обычном положении [17]. Если приложение обнаруживает, что водитель совершил более двух кивков головой в течение 2 мин, фиксируется обнаружение опасного состояния.

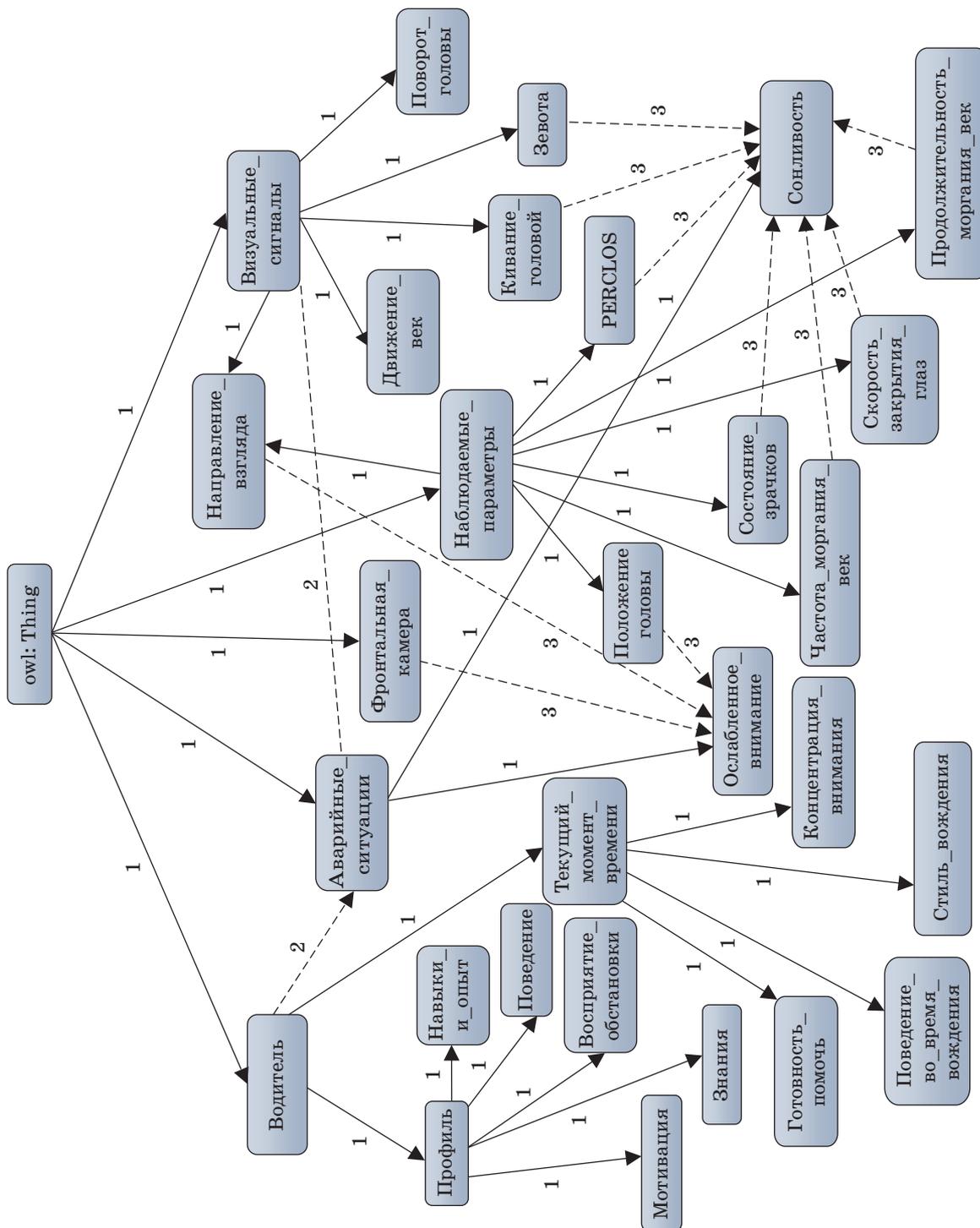
В результате исследований авторов работы [18] было установлено, что постоянное управление транспортом на протяжении 4 ч понижает скорость реагирования автомобилиста на изменение дорожной обстановки в 2 раза, а в течение 8 ч — до 5–7 раз. Термин «невнимательное вождение» подразумевает под собой управление ТС, при котором водитель не полностью сосредоточен на дорожных условиях. Были выявлены следующие три варианта невнимательного вождения.

При выявлении состояния ослабленного внимания водителя применяется классификация положения его головы относительно туловища. В первом варианте рассматривается ситуация, при которой голова водителя должна быть направлена прямо по направлению движения ТС. У водителя фиксируется ослабленное внимание, если его голова опущена более 3 с (направление скорости фиксируется акселерометром смартфона) или же она не направлена в сторону поворота (определяется по данным с гироскопа) ТС.

Во втором варианте осуществляется наблюдение за прохождением водителем поворотов налево и направо путем отслеживания направления движения ТС и фиксации его поворотов налево или направо. Предполагается, что у водителя ослаблено внимание, если угол поворота его головы при повороте ТС составляет менее 15° по направлению движения ТС или попросту отсутствует.



■ Рис. 3. Схема распознавания небезопасных состояний внутри кабины ТС  
 ■ Fig. 3. Unsafe events recognition scheme inside the vehicle



■ Рис. 4. Онтологическая модель водителя: 1 — является; 2 — влияет на; 3 — используется

■ Fig. 4. Ontological model of the driver: 1 — is; 2 — affects; 3 — is used

И, наконец, в третьем варианте контролируется процесс перестроения ТС в соседнюю полосу движения (водитель должен убедиться в безопасности маневра, проверив наличие автомобилей при помощи боковых зеркал).

### Онтологическая модель водителя для определения опасных состояний при управлении ТС

Для описания разрабатываемой СССВ, осуществляющей выявление опасных состояний водителя и генерирование рекомендаций по предотвращению ДТП, используется онтологическая модель водителя ТС (рис. 4) [19], построенная на основе знаний об объектах (водителе, ТС, дорожной обстановке, смартфоне), составляющих предметную область. Онтологическая модель позволяет сопоставить сигналы поведения водителя и опасные состояния, с которыми он может столкнуться при управлении ТС.

Разработанная онтологическая модель водителя состоит из следующих пяти основных классов: «Фронтальная\_камера» (фронтальная камера смартфона), «Наблюдаемые\_параметры» (наблюдаемые параметры, характеризующие текущее физическое состояние водителя), «Визуальные\_сигналы» (визуальные сигналы, использующиеся при обнаружении аварийных ситуаций), «Аварийные\_ситуации» (аварийные ситуации, с которыми может столкнуться водитель) и «Водитель» (профиль водителя, отражающий биографические данные и характеристики водителя, наблюдаемые в текущий момент времени). Профиль водителя состоит из таких компонентов, как «Навыки\_и\_опыт», «Поведение\_за\_рулем», «Восприятие\_обстановки», «Мотивация» и «Знания». Визуальные сигналы, формируемые наблюдаемыми параметрами, влияют на обнаружение аварийных ситуаций в кабине ТС. «Визуальные\_сигналы» и «Наблюдаемые\_параметры» позволяют определить опасное поведение водителя, характеризующееся такими аварийными ситуациями, как «Ослабленное\_внимание» и «Сонливость».

### Реализация мобильного приложения

Мобильное приложение разработано для смартфонов на платформе операционной системы Android 4.0.3 и выше на языке Java в среде программирования Android Studio. Для обработки изображений был использован фреймворк компьютерного зрения Mobile Vision (фреймворк для поиска и локализации объектов на фото и изображениях), разработанный компанией Google, предоставляющий удобный интерфейс для поиска и локализации объектов (лиц, глаз, рта) на изображении и видео в режиме реального времени.



■ *Рис. 5.* Приложением установлено нормальное поведение водителя (а) и обнаружены признаки сонливости (б)  
 ■ *Fig. 5.* Detected normal state of the driver (a) and drowsiness state of the driver (b)

Фреймворк позволяет фиксировать следующие характеристики водителя: направление взгляда, поворот головы, кивок головой, скорость и продолжительность закрытия глаз. Приложение осуществляет непрерывное наблюдение за поведением водителя и фиксирует опасные состояния водителя (усталость, состояние ослабленного внимания). Пример работающего приложения, функционирующего совместно с привычной навигационной системой водителя, приведен на рис. 5, а и б, где в первом случае приложением зафиксировано нормальное поведение водителя за рулем ТС, не вызывающее опасений (отсутствие иконок на изображении с фронтальной камеры), а во втором распознаны признаки сонливости водителя (пиктограмма в правом нижнем углу окна приложения).

### Заключение

В статье представлен анализ поведения водителя ТС с использованием онтологии водителя и фронтальной камеры смартфона. Данный подход основан на распознавании усталости и состояния ослабленного внимания водителя ТС. Осуществляя непрерывное наблюдение за физическим состоянием водителя при помощи фронтальной камеры смартфона, предложенная СССВ фиксирует характеристики головы и лица человека и

их отклонения. На основе анализа этих характеристик система выявляет опасные состояния водителя и генерирует рекомендации по предотвращению ДТП. Разработано мобильное приложение на платформе ОС Android, предупреждающее водителя о возможности столкновения при помощи звукового и визуального уведомления, позволяя водителю вовремя затормозить и предотвратить аварийную ситуацию. Разработанный подход дает возможность не только смягчать последствия аварий, но и помогать водителю избегать их, своевременно обращая его внимание на возника-

ющие опасности, если надлежащая реакция со стороны водителя недостаточна или отсутствует. Полученные результаты могут найти применение в построении комплексных СССВ-решений, учитывающих большой спектр дорожных ситуаций.

Представленные результаты исследований являются частью проекта № 17-29-03284, финансируемого Российским фондом фундаментальных исследований и бюджетной темой №0073-2014-0005. Работа выполнена также при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

## Литература

- McKinsey Global Institute. <http://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/advanced-driver-assistance-systems-challenges-and-opportunities-ahead> (дата обращения: 02.06.2017).
- Mustafa M. Alrjebi, Nadith Pathirage, Wanquan Liu, Ling Li. Face Recognition Against Occlusions via Colour Fusion using 2D-MCF Model and SRC // Pattern Recognition Letters. 2017. Vol. 95. P. 14–21. doi:10.1016/j.patrec.2017.05.013
- Фурсов В. А., Бибииков С. А., Якимов П. Ю. Локализация контуров объектов на изображениях при вариациях масштаба с использованием преобразования Хафа // Компьютерная оптика. 2013. № 37(4). С. 496–502. doi:http://dx.doi.org/10.18287/0134-2452-2013-37-4-496-502
- Небаба С. Г., Захарова А. А. Алгоритм построения деформируемых 3D моделей лица и обоснование его применимости в системах распознавания личности // Тр. СПИИРАН. 2017. Вып. 52. С. 157–179. doi:http://dx.doi.org/10.15622/sp.52.8
- Чиров Д. С., Чертова О. Г., Потапчук Т. Н. Методика обоснования требований к системе технического зрения робототехнического комплекса // Тр. СПИИРАН. 2017. Вып. 51. С. 152–176. doi:http://dx.doi.org/10.15622/sp.51.7
- You C.-W., Lane N. D., Chen F., Wang R., Chen Z., Bao T. J., Montes-de-Oca M., Cheng Y., Lin M., Torresani L., Campbell A. T. CarSafe App: Alerting Drowsy and Distracted Drivers using Dual Cameras on Smartphones // Proc. of MobiSys'13. 2013. P. 461–462. doi:https://doi.org/10.1145/2462456.2466711
- Augmented Driving. <http://www.imaginzyze.com/Site/Welcome.html> (дата обращения: 02.06.2017).
- NightDrive. <https://appadvice.com/app/nightdrive/902703316> (дата обращения: 02.06.2017).
- Driver Guard. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.badrit.cv.vehicledetect> (дата обращения: 02.06.2017).
- Nexar — AI Dashcam. <https://www.getnexar.com> (дата обращения: 02.06.2017).
- Dinges D., Grace R. PERCLOS: A Valid Psychophysiological Measure of Alertness as Assessed by Psycho-
- motor Vigilance/ US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-MCRT-98-006. USA, October 1998. — 4 p.
- Wierwille W. W. Overview of Research on Driver Drowsiness Definition and Driver Drowsiness Detection// Proc. of the 14th Intern. Technical Conf. on Enhanced Safety of Vehicles/ National Highway Traffic Safety Administration. Munich, Germany. 1995. P. 462–468.
- Dinges D. F., Mallis M., Maislin G., Powell J. W. Evaluation of Techniques for Ocular Measurement as an Index of Fatigue and the Basis for Alertness Management: Tech. Rep. 808 762/Department of Transportation Highway Safety Publication. Washington, DC, USA, April 1998. — 113 p.
- Wierwille W. W., Wreggit S. S., Kirn C. L., Ellsworth L. A., Fairbanks R. J. Research on Vehicle-based Driver Status/Performance Monitoring: Development, Validation, and Refinement of Algorithms for Detection of Driver Drowsiness: Tech. Rep. DOT-HS-808-247 / National Highway Traffic Safety Administration, 1994. — 247 p.
- Priyanka N. L., Krutika S., Admane, Mrunali G. Driver's Face Monitoring System for Detecting Hypo Vigilance // A Review. Intern. Journal of Research. 2015. N 4. P. 553–559.
- Saini V., Saini R. Driver Drowsiness Detection System and Techniques // A Review. Intern. Journal of Computer Science and Information Technologies. 2014. Vol. 5 (3). P. 4245–4249.
- Eskandarian A., Sayed R., Delaigue P., Mortazavi A., Blum J. Advanced Driver Fatigue Research: Tech. Rep. FMCSA-RRR-07-001 / U.S. Department of Transportation, April 2007. — 210 p.
- Anon. Proximity Array Sensing System: Head Position Monitor / Metric: Tech. Rep. NM87504 / Advanced Safety Concepts. Sante Fe, 1998.
- Lashkov I., Smirnov A., Kashevnik A., Parfenov V. Ontology-based Approach and Implementation of ADAS System for Mobile Device use While Driving // 6th Intern. Conf. on Knowledge Engineering and Semantic Web, Moscow, 2015. CCIS 518. P. 117–131. doi: 10.1007/978-3-319-24543-0\_9

UDC 004

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.7

**Driver's Behavior Analysis with Smartphone Front Camera**Lashkov I. B.<sup>a,b</sup>, Post-Graduate Student, igor-lashkov@ya.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** From time to time people drive while being tired or drowsy and, according to experts, many drivers fail to recognize that they are in a fatigue state. Monitoring dangerous driving behavior can help drivers pay attention to their driving style and the associated risks, thereby reducing the occurrences of careless driving and improving the safe driving skills. Advanced driver assistance systems are becoming popular nowadays. They can help drivers avoid road accidents, producing a warning signal by light or sound. **Purpose:** The goal was to develop a conceptual model for analyzing a driver's behavior using a front-facing camera. **Results:** A conceptual model has been developed for recognizing a dangerous behavior of a driver using the front-facing camera of a smartphone. An algorithm for determining the visual cues of driver's drowsiness and distraction is presented. An ontological model has been developed which detects the driver's dangerous behavior. Processing the video stream from a front-facing camera and a variety of onboard smartphone sensors, the application attempts to recognize the driver's behavior accurately, anticipating dangerous events caused by drowsiness or tiredness and producing an immediate alert with audible or visual signals. **Practical relevance:** The proposed mobile application can recognize unsafe behavior of a driver and give a warning about a possible emergency.

**Keywords** — Advanced Driver Assistance Systems, Transportation Systems, Ontologies.

**References**

1. *McKinsey Global Institute*. Available at: <http://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/advanced-driver-assistance-systems-challenges-and-opportunities-ahead> (accessed 2 June 2017).
2. Mustafa M. Alrjebi, Nadith Pathirage, Wanquan Liu, Ling Li. Face Recognition Against Occlusions via Colour Fusion using 2D-MCF Model and SRC. *Pattern Recognition Letters*, 2017. doi: 10.1016/j.patrec.2017.05.013
3. Fursov V. A., Bibikov S. A., Yakimov P. Y. Localization of Objects Contours with Different Scales in Images using Hough Transform. *Komp'iuternaia optika*, 2013, no. 37(4), pp. 496–502 (In Russian). doi:<http://dx.doi.org/10.18287/0134-2452-2013-37-4-496-502>
4. Nebaba S. G., Zakharova A. A. An Algorithm for Building Deformable 3D Human Face Models and Justification of its Applicability for Recognition Systems. *Trudy SPIIRAN*, 2017, iss. 3(52), pp. 157–179 (In Russian). doi:<http://dx.doi.org/10.15622/sp.52.8>
5. Chirov D. S., Chertova O. G., Potapchuk T. N. Methods of Study Requirements for the Complex Robotic Vision System. *Trudy SPIIRAN*, 2017, iss. 51, pp. 152–176 (In Russian). doi:<http://dx.doi.org/10.15622/sp.51.7>
6. You C.-W., Lane N. D., Chen F., Wang R., Chen Z., Bao T. J., Montes-de-Oca M., Cheng Y., Lin M., Torresani L., Campbell A. T. CarSafe App: Alerting Drowsy and Distracted Drivers using Dual Cameras on Smartphones. *Proc. of MobiSys'13*, 2013, pp. 461–462. doi:<https://doi.org/10.1145/2462456.2466711>
7. *Augmented Driving*. Available at: <http://www.imaginyze.com/Site/Welcome.html> (accessed 2 June 2017).
8. *NightDrive*. Available at: <https://appadvice.com/app/night-drive/902703316> (accessed 2 June 2017).
9. *Driver Guard*. Available at: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.badrit.cv.vehicledetect> (accessed 2 June 2017).
10. *Nexar — AI Dashcam*. Available at: <https://www.getnexas.com> (accessed 2 June 2017).
11. Dinges D., Grace R. PERCLOS: A Valid Psychophysiological Measure of Alertness as Assessed by Psychomotor Vigilance. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-MCRT-98-006, USA, October 1998. 4 p.
12. Wierville W. W. Overview of Research on Driver Drowsiness Definition and Driver Drowsiness Detection. *Proc. of the 14th Intern. Technical Conf. on Enhanced Safety of Vehicles*, National Highway Traffic Safety Administration, Munich, Germany, 1995, pp. 462–468.
13. Dinges D. F., Mallis M., Maislin G., Powel J. W. Evaluation of Techniques for Ocular Measurement as an Index of Fatigue and the Basis for Alertness Management. *Tech. Rep. 808 762*, Department of Transportation Highway Safety Publication, Washington, DC, USA, April 1998. 113 p.
14. Wierwille W. W., Wreggit S. S., Kirn C. L., Ellsworth L. A., Fairbanks R. J. Research on Vehicle-based Driver Status / Performance Monitoring: Development, Validation, and Refinement of Algorithms for Detection of Driver Drowsiness. *Tech. Rep. DOT-HS-808-247*, National Highway Traffic Safety Administration, 1994. 247 p.
15. Priyanka N. L., Krutika S., Admane, Mrunali G. Driver's Face Monitoring System for Detecting Hypo Vigilance. *A Review. Intern. Journal of Research*, 2015, no. 4, pp. 553–559.
16. Saini V., Saini R. Driver Drowsiness Detection System and Techniques. *A Review. Intern. Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2014, vol. 5 (3), pp. 4245–4249.
17. Eskandarian A., Sayed R., Delaigue P., Mortazavi A., Blum J. Advanced Driver Fatigue Research. *Tech. Rep. FMCSA-RRR-07-001*, U.S. Department of Transportation, April 2007. 210 p.
18. Anon. Proximity Array Sensing System: Head Position Monitor/Metric: *Tech. Rep. NM87504*, Sante Fe, Advanced Safety Concepts, 1998.
19. Lashkov I., Smirnov A., Kashevnik A., Parfenov V. Ontology-Based Approach and Implementation of ADAS System for Mobile Device use While Driving. *6th Intern. Conf. on Knowledge Engineering and Semantic Web*, Moscow, 2015, CCIS 518, pp. 117–131. doi:10.1007/978-3-319-24543-0\_9

## ТЕРМИНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г. С. Бритов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** в известных работах по тестовому диагностированию динамических систем описаны методы диагностирования на основе специальных, тестовых сигналов. Однако эти методы оказываются достаточно сложными или небезопасными (дельта-функции, скачки), поэтому стоит задача разработать метод тестового диагностирования динамических систем, обеспечивающий естественное тестовое движение системы, например, в заданных границах. Такое движение системы осуществляется с помощью терминального управления, а организуемое при этом диагностирование можно назвать терминальным. **Цель:** рассмотреть процесс тестового диагностирования линейных дискретных динамических систем, используя в качестве тестового сигнала заранее рассчитанное терминальное управление. **Методы:** использована теория управления дискретными системами, позволившая построить формулы получения управления для движения системы в заданных границах. **Результаты:** разработан метод тестового диагностирования дискретных динамических систем, суть которого в том, что с помощью рассчитанного терминального управления система приходит в состояние с заданными выходами. Благодаря этому диагностические признаки достаточно просты: необходимо проверить получение требуемых выходов. Результаты позволяют осуществить тестовое диагностирование дискретных динамических систем, отличающееся от известных методов тем, что тестовое движение оказывается естественным движением системы в заданных границах.

**Ключевые слова** — модель движения системы, линейная дискретная система, границы движения, терминальное управление, терминальное диагностирование.

### Введение

Системы технического диагностирования могут быть тестовыми и функциональными. Тестовые системы проверяют исправность объекта диагностирования в специальном режиме, а функциональные системы в рабочем режиме контролируют правильность его функционирования. Методы диагностирования зависят от вида объекта диагностирования. В статье рассматривается система тестового диагностирования дискретных динамических систем, использующая в качестве специального тестового режима движение под действием терминального управления. Тестирование линейных динамических систем подробно описано в целом ряде работ [1–10]. Обычно применяемые методы основаны на формировании диагностических признаков, по которым принимается решение об исправности системы. Диагностические признаки, основанные на таких важных характеристиках линейных динамических систем, как нули и операторные нормы, приведены в работах [8, 9], а использование математических моделей — в работах [2–4]. Организация тестирования линейных динамических систем на основе их передаточных функций представлена в работах [1, 10]. Следует отметить методы тестирования на основе специальных входных сигналов системы. Так, в работе [6] рассчитывается комплементарный сигнал, обеспечивающий переход системы за заданное время из нулевых начальных условий опять в нулевые, ко-

нечные условия. А в работе [7] предлагается подавать на вход системы аннулирующий сигнал, на который отсутствует выходная реакция системы. Классическим примером такого сигнала является гармонический сигнал, частота которого равна передаточному нулю системы.

На XII Всероссийском совещании по проблемам управления (Москва, 2014 г.) был предложен метод тестирования управляемых динамических систем на основе использования их передаточных функций. Этот метод приводит к новому понятию структурного диагностирования [11].

Терминальное диагностирование было описано в работе [12]. Приведенная классификация показывает, что линейная дискретная система может быть продиагностирована с помощью импульсного или сингулярного терминального управления при нулевых или различных границах движения системы. Организация терминального диагностирования динамических систем предполагает расчет терминального управления, обеспечение требуемого движения системы в заданных границах и проверку диагностических признаков. Последние определяются отклонением конечного состояния от заданной конечной границы движения системы.

Целью настоящей статьи является описание предлагаемой системы тестового диагностирования линейных дискретных динамических систем на основе движения объекта диагностирования под действием рассчитанного терминального управления.

**Модели движения дискретной динамической системы**

Терминальное диагностирование предполагает движение динамической системы в заданных границах. Это движение определяется математической моделью системы. Рассмотрим ряд таких моделей.

Достаточно широко распространено описание системы уравнениями состояния. Для дискретной многомерной системы такое описание имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t), \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \mathbf{x}(k) = \mathbf{x}_k; \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t); \\ \mathbf{x}(t) &\in R^n, \mathbf{y}(t) \in R^s, \mathbf{u}(t) \in R^m. \end{aligned}$$

Вектор  $\mathbf{x}(t)$  определяет движение системы в пространстве состояний системы. Оно осуществляется от известных начальных условий  $\mathbf{x}_0$  к конечным условиям  $\mathbf{x}_k$ . Однако движение системы в пространстве состояний недоступно для наблюдения. Его можно наблюдать только с помощью вектора  $\mathbf{y}(t)$ . Поэтому для расчета вектора  $\mathbf{u}(t)$  терминального управления вместо недоступных векторов состояний будут использованы доступные векторы  $\mathbf{y}(0)$  и  $\mathbf{y}(k)$ .

Система четвертого порядка может быть описана уравнениями состояния строковой управляемой канонической формы:

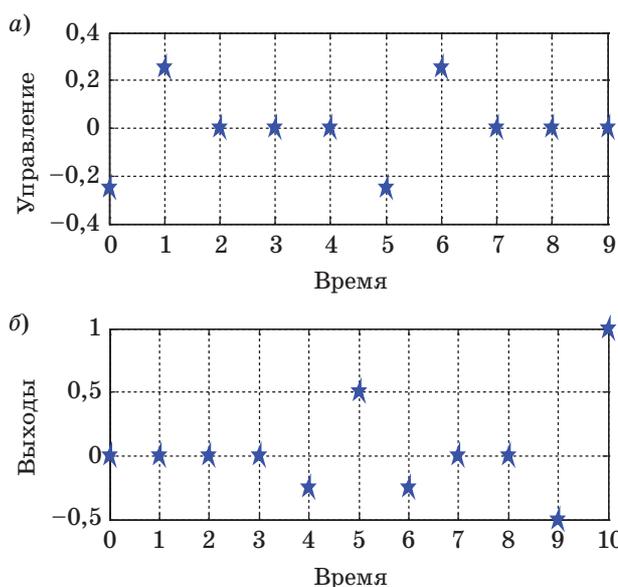
$$\begin{aligned} x_1(t+1) &= x_2(t), x_1(0) = x_{10}, x_1(k) = x_{1k}; \\ x_2(t+1) &= x_3(t), x_2(0) = x_{20}, x_2(k) = x_{2k}; \\ x_3(t+1) &= x_4(t), x_3(0) = x_{30}, x_3(k) = x_{3k}; \\ x_4(t+1) &= -x_1(t) - x_2(t) - x_3(t) - x_4(t) + u(t), \\ x_4(0) &= x_{40}, x_4(k) = x_{4k}; \\ y(t) &= x_1(t). \end{aligned}$$

Матрицы системы будут следующими:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Наблюдаемое движение системы от известных нулевых начальных условий к требуемому единичному конечному условию при  $k = 10$  показано на рис. 1, а и б в виде решетчатых функций. Конечный выход равен 1, что соответствует принятому при расчете терминального управления значению.

Таким образом, описание многомерных систем с помощью уравнений состояния представляет собой удобный инструмент для исследования управляемого движения системы.



■ **Рис. 1.** Управляемое наблюдаемое движение системы четвертого порядка: а — терминальное управление в интервале времени от 0 до 9; б — выходы системы в интервале времени от 0 до 10

■ **Fig. 1.** Controlled the observed movement of the system of the fourth order: а — terminal in the time interval from 0 to 9; б — outputs of the system in the time interval from 0 to 10

Скалярные системы чаще всего описываются рекуррентным уравнением высокого порядка

$$\begin{aligned} y(t+n) + a_{n-1} \cdot y(t+n-1) + \dots + a_0 \cdot y(t) &= \\ = b_{n-1} \cdot u(t+n-1) + \dots + b_0 \cdot u(t); \\ y(0) = y_0, y(1) = y_1, \dots, y(n-1) = y_{n-1}. \end{aligned}$$

Движение системы от известных начальных условий под действием управления  $u(t)$  к требуемому конечному условию  $y(k)$  определяется функцией времени  $y(t)$ .

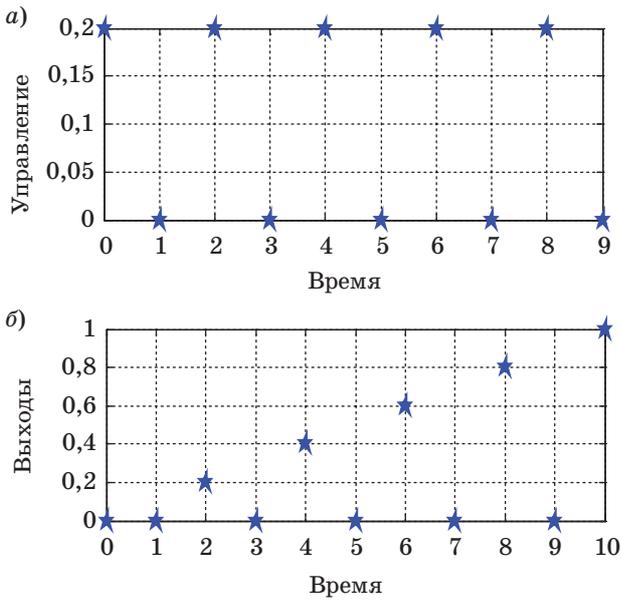
Если все коэффициенты левой части уравнения равны 1, а коэффициенты правой части равны 0, кроме последнего коэффициента, равного 1, то движение такой скалярной системы будет таким же, как на рис. 1.

Многоканальные системы с  $m$  входами и  $s$  выходами имеют  $ms$  каналов:  $u_i \rightarrow y_j$ . Их можно задать полиномиально-матричным описанием

$$\mathbf{A}(z) \cdot \mathbf{y}(z) = \mathbf{B}(z) \cdot \mathbf{u}(z).$$

Здесь  $z$  — оператор  $z$ -преобразования;  $\mathbf{A}(z)$ ,  $\mathbf{B}(z)$  — полиномиальные матрицы, элементами которых служат полиномы от  $z$ . Для исследования моноканальной системы построим матричную передаточную функцию

$$\mathbf{W}(z) = \mathbf{A}^{-1}(z) \cdot \mathbf{B}(z).$$



■ **Рис. 2.** Управляемое движение канала  $u_1 \rightarrow y_1$ : *a* — терминальное управление; *b* — выходы системы четвертого порядка  
 ■ **Fig. 2.** The controlled movement of a channel  $u_1 \rightarrow y_1$ : of the four-channel system: *a* — terminal control; *b* — output of the system of the fourth order

Исследование будет проходить при нулевых начальных условиях для всех каналов системы. Для четырехканальной системы полиномиально-матричное описание может иметь вид

$$\begin{bmatrix} z & 1 \\ z+1 & z+1 \\ 1 & 1 \\ z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(z) \\ y_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ z & 1 \\ 1 & 1/z \\ z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(z) \\ u_2(z) \end{bmatrix}.$$

Расчет матричной передаточной функции дает следующий результат:

$$W(z) = \begin{bmatrix} \frac{1}{(z^2-1)} & \frac{(z^2+z-1)}{(z^2-1)} \\ \frac{(z^3-z-1)}{(z^2-1)z} & \frac{-1}{(z^2-1)} \end{bmatrix}.$$

Управляемое движение канала  $u_1 \rightarrow y_1$  при нулевых начальных условиях и единичном конечном условии показано на рис. 2, *a* и *b*. Здесь движение начинается при нулевом выходе и заканчивается при расчетном значении 1.

Таким образом, рассмотренные модели движения линейных дискретных динамических систем позволяют провести детальное их исследование и выполнить расчет терминального управления.

### Расчет терминального управления

В работе [11] приведены расчеты сингулярного и импульсного терминальных управлений дискретными системами. Все расчеты терминального управления для рассмотренных моделей движения системы основаны на использовании матрицы марковских параметров

$$M = [C \cdot B, C \cdot A \cdot B, \dots, C \cdot A^{k-1} \cdot B] = [M_0, M_1, \dots, M_{k-1}].$$

Если  $kt > n$  и пара  $(A, B)$  управляема, то существует бесконечное множество терминальных управлений. Рассмотрим методы расчета некоторых видов терминального управления.

Метод расчета на основе псевдообращения матрицы марковских параметров предполагает сначала оценку состояний в начальный момент времени по свободному движению исправной наблюдаемой системы:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= A \cdot x(t), x(0); \\ y(t) &= C \cdot x(t); \\ k_0 &\geq n/s; \end{aligned}$$

$$H = [C^T, A^T \cdot C^T, \dots, (A^T)^{k_0-1} \cdot C^T] /$$

$$\hat{x}(0) = (H^T)^+ \cdot y(0, k_0 - 1),$$

где символ «+» означает псевдообращение матрицы.

Затем выполняется непосредственный расчет терминального управления:

$$\begin{aligned} y(1) &= C \cdot A \cdot \hat{x}(0) + C \cdot B \cdot u(0); \\ y(2) &= C \cdot A \cdot x(1) + C \cdot B \cdot u(1) = \\ &= C \cdot A^2 \cdot \hat{x}(0) + C \cdot A \cdot B \cdot u(0) + C \cdot B \cdot u(1); \\ &\dots \end{aligned}$$

$$y(k) = C \cdot A^k \cdot \hat{x}(0) + C \cdot A^{k-1} \cdot B \cdot u(0) + \dots + C \cdot B \cdot u(k-1) = y_k;$$

$$M \cdot u(k-1, 0) = y(0, k), M = [C \cdot B, C \cdot A \cdot B, \dots, C \cdot A^{k-1} \cdot B], y(0, k) = y_k - C \cdot A^k \cdot \hat{x}(0);$$

$$\begin{aligned} u(k-1, 0) &= M^+ \cdot y(0, k); \\ u(k-1, 0) &\rightarrow u(0, k-1). \end{aligned}$$

Результатом предлагаемого расчета является  $kt$ -мерный вектор программы терминального управления  $u(0, k-1)$ .

Метод расчета сингулярного терминального управления следует выполнять тогда, когда вектор  $y(0, k)$  оказывается нулевым. Псевдообращение матрицы марковских параметров здесь заменяется получением сингулярного вектора для нулевого

сингулярного числа матрицы марковских параметров:

$$\begin{aligned} y(0, k) &= 0; \\ M \cdot u(k-1, 0) &= 0; \\ u(k-1, 0) &= v; \\ u(k-1, 0) &\rightarrow u(0, k-1). \end{aligned}$$

Вектор  $v$  является искомым вектором в расчете программы терминального управления. Следует отметить, что рассмотренный метод расчета сингулярного терминального управления применяется всегда, когда и начальные, и конечные границы движения нулевые.

Импульсное управление также может осуществлять движение системы в заданных границах. Двухимпульсное терминальное управление, осуществляющее движение системы между нулевыми границами, имеет следующий вид:

$$u(0, k) = [u(0); 0; \dots; 0; u(k-1)].$$

Первый импульс  $u(0)$  задается, исходя из конкретной ситуации, а второй импульс  $u(k-1)$  рассчитывается как решение уравнения

$$y(k) = C \cdot A^{k-1} \cdot B \cdot u(0) + C \cdot B \cdot u(k-1) = 0.$$

Отсюда, полагая, что число выходов меньше числа входов ( $s < m$ ), получим значение второго импульса

$$u(k-1) = -(C \cdot B)^+ \cdot C \cdot A^{k-1} \cdot B \cdot u(0).$$

Рассчитанное двухимпульсное терминальное управление создает движение, начинающееся в нуле, и обязательно возвращается в нуль.

При ступенчатом управлении может осуществляться движение в заданных границах. Будем полагать, что указанные ступеньки начинаются в нуле, продолжаются с увеличением на единицу и заканчиваются расчетом последней ступеньки, которая возвращает систему в состояние с нулевым выходом. Расчет такого ступенчатого терминального управления следующий:

$$\begin{aligned} y(k) &= C \cdot A^k \cdot \hat{x}(0) + M \cdot u(k-1, 0) = y_k; \\ u(0, k-1) &= [0, 1, 2, \dots, (k-2), M_0^+ \cdot (y_k - y_0)]; \\ y_0 &= C \cdot A^k \cdot \hat{x}(0). \end{aligned}$$

Управление приводит систему в заданное значение выхода системы, начинаясь в заданном начальном значении.

Предложенный вариант терминального управления, основанный на псевдообращении матрицы марковских параметров тестируемой системы, характеризуется тем, что каждый  $m$ -мерный блок

$km$ -мерного вектора терминального управления  $u(0, k-1)$  имеет минимальную евклидову норму. Поэтому такое терминальное управление является единственным управлением.

Двухимпульсное и ступенчатое управления не являются единственными, так как и в первом, и во втором случаях произвольно задается один параметр: либо величина начального импульса, либо размер ступеньки.

### Терминальное диагностирование

Терминальное диагностирование линейных дискретных динамических систем целесообразно выполнять при нулевых границах их движения. В этом случае диагностические признаки будут очень простыми: потребуется проверять приход системы в нулевые значения выходов. При организации терминального диагностирования необходимо задавать число шагов тестирования. Выбирать его следует, исходя из динамики системы, определяемой ее собственным движением. Подробно этот вопрос в статье не рассматривается.

Предложение выполнять диагностирование при нулевых границах требует использования сингулярного терминального управления. Покажем расчет такого управления для системы четвертого порядка с помощью математического пакета MatLab:

```

Вводи...
Матрица коэффициентов = [0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 1; -1 -1 -1 -1]
A = 0 1 0 0
    0 0 1 0
    0 0 0 1
    -1 -1 -1 -1
Матрица входов = [0 0 0 1]'
B = 0
    0
    0
    1
Матрица выходов = [1 1 1 1]
C = 1 1 1 1
Конечное время = 10
Конечные условия выходов = 0
y_k = 0
Ошибка = 0
Готов ввод
Считаю...
Реальные, неизвестные НУ = [0;0;0;0]
x_0 = 0
    0
    0
    0
s = -0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
5.5279 5.5279 14.4721 14.4721
Номер нулевого сингулярного числа = 1
Готов счет
    
```

Смотри...

Конечные диагностические признаки:

**2.2204e-16**

Готово

Графики терминального управления и выходов системы без дефекта показаны на рис. 3, а и б.

Увеличение из-за дефекта всех коэффициентов последней строки матрицы **A** на 0,1 приводит к ненулевому диагностическому признаку:

>>  $e = 0.1;$

>> *sctuvx4*

Считаю...

Готов счет

Смотри...

Конечные диагностические признаки:

**-0.0260**

Готово

Характер движения системы при этом почти не меняется (см. рис. 3).

При терминальном диагностировании с нулевыми границами движения можно использовать не только сингулярное, но и импульсное управление. Для скалярной системы пятого порядка вида

$$y(t+5) + y(t+3) + y(t) = u(t+4) + u(t);$$

$$y(0) = 1, y(1) = 1, y(2) = 0, y(3) = 1, y(4) = 0$$

выполним расчет импульсного терминального управления:

Вводи...

Коэффициенты левой части без старшей  $1 = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$

Коэффициенты правой части без старшего  $= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$

Начальные условия выхода и его сдвигов  $= [1; 1; 0; 1; 0]$

Конечное время = 20

Конечное условие выхода = 0

Ошибка = 0

Готов ввод

Считаю...

Готов счет

Смотри...

Конечный диагностический признак = **0**

Готово

Конец

Графики терминального управления и выходов скалярной системы без дефекта показаны на рис. 4, а и б.

Увеличение из-за дефекта всех коэффициентов левой части рекуррентного уравнения на 0,1 приводит к ненулевому диагностическому признаку:

>>  $e = 0.1;$

>> *sctuvx4*

Считаю...

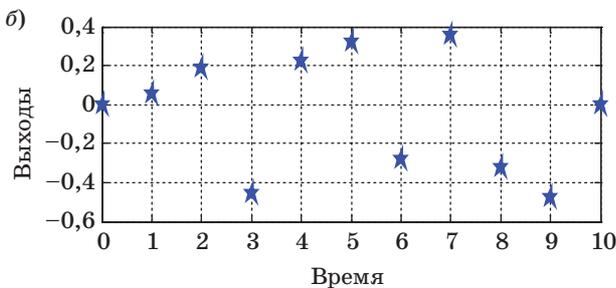
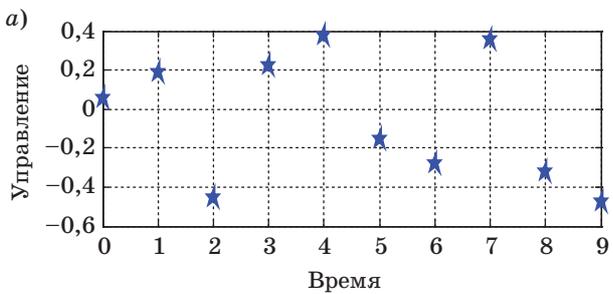
Готов счет

Смотри...

Конечный диагностический признак = **0.441264**

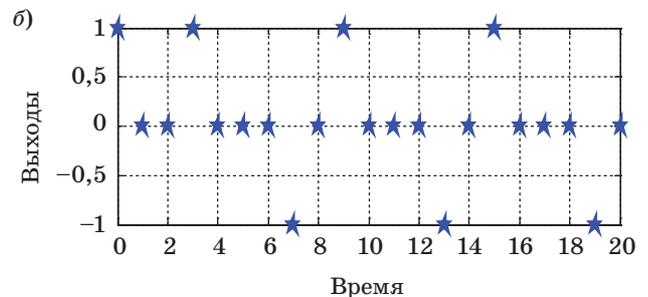
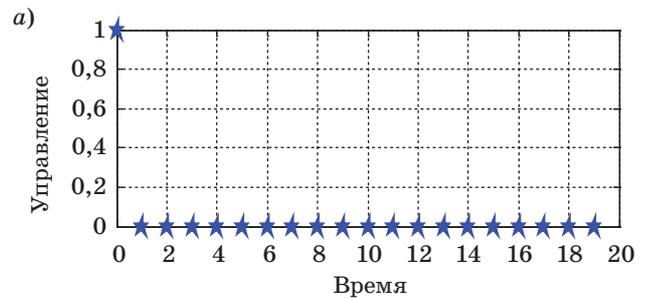
Готово

Конец



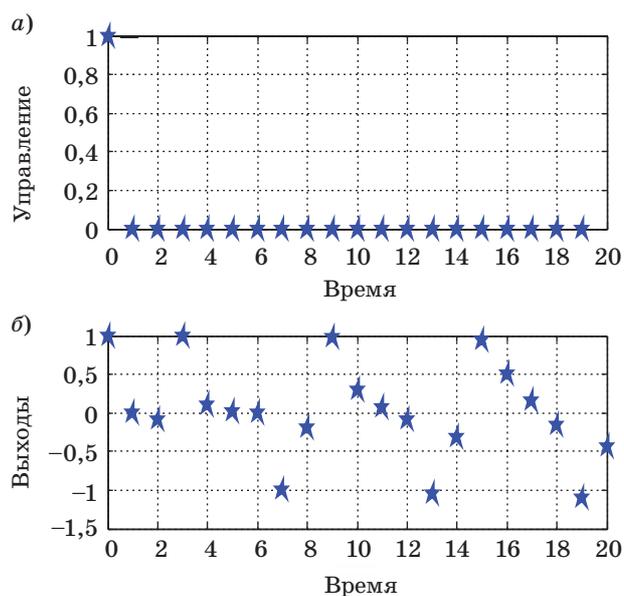
■ **Рис. 3.** Управляемое движение системы без дефекта: а — терминальное управление; б — выходы системы

■ **Fig. 3.** Controlled motion system without defect: а — terminal control; б — output of the system



■ **Рис. 4.** Управляемое движение скалярной системы без дефекта: а — терминальное управление; б — выходы системы

■ **Fig. 4.** Controlled motion of a scalar system without defect: а — terminal control; б — output of the system



■ **Рис. 5.** Управляемое движение скалярной системы с дефектом: *a* — терминальное управление; *b* — выходы системы

■ **Fig. 5.** Controlled motion of the scalar defect system: *a* — terminal control; *b* — output of the system

Графики терминального управления и выходов скалярной системы с дефектом показаны на рис. 5, *a* и *b*.

Аналогичным образом рассчитывается с помощью математического пакета MatLab ступенчатое терминальное управление. Применение его для четырехканальной системы дает для каждого канала такие же результаты, как и в случае скалярной системы.

Чувствительность терминального диагностирования определяется величиной конечного диагностического признака. В идеальном случае он должен быть равным нулю. Но наличие погрешностей в работе реальной системы приводит к тому, что должен быть назначен допуск на величину конечного диагностического признака. Подробно эта задача рассматривалась в работах по функциональному диагностированию.

Таким образом, терминальное диагностирование, примененное к различным динамическим системам, обеспечивает обнаружение дефектов

за счет появления ошибок в известных моделях движения системы.

## Заключение

Терминальное диагностирование является новым методом в технической диагностике. Оно позволяет тестировать динамические системы в естественном режиме движения их в заданных границах. Тестовым сигналом в данном случае является рассчитанное заранее терминальное управление. Предлагается выбирать границы движения системы нулевыми. Тогда диагностические признаки оказываются достаточно простыми. Необходимо проверить достижение системой в процессе тестового движения нулевых выходных сигналов. Приведенные в статье расчеты диагностического терминального управления относятся к дискретным системам. Поэтому расчетные формулы получились алгебраически простыми. Псевдообращение матриц реализуется с помощью математического пакета MatLab.

Рассмотренное терминальное диагностирование конкретных систем ограничивалось контролем, с помощью которого обнаруживался факт появления дефекта. Более сложной является задача локализации дефекта. Поскольку в основу терминальной диагностики положены математические модели проверяемых систем, то и локализацию дефектов целесообразно проводить с точностью до элементов этих моделей. Так, при использовании уравнений состояния многомерной системы можно выполнить локализацию дефекта с точностью до одной из матриц этих уравнений. При использовании передаточной функции скалярной системы дефект локализуется либо в числителе, либо в знаменателе этой функции. Что касается полиномиально-матричного описания многоканальной системы, то здесь дефект локализуется с точностью до канала системы.

Другой метод локализации дефекта рассмотрен в работах по функциональному диагностированию и связан с использованием принципа диагностирования по годографам дефектов. Этот принцип требует большой подготовительной работы по созданию годографов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-08-00244.

## Литература

1. Бритов Г. С. Метод тестового диагностирования линейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 77–85. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.77
2. Бритов Г. С. Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 75–83.

3. Воронин В. В., Шалобанов С. С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом пробных отклонений параметров модели // Информатика и системы управления. 2010. № 1(23). С. 121–127.
4. Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Расчет тестового режима линейных систем управления // Приборы

и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 11. С. 44–49.

5. Мироновский Л. А. Тестовый контроль линейных систем управления // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2005. № 5. С. 3–8.
6. Мироновский Л. А. Диагностирование линейных систем методом комплементарного сигнала // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 5. С. 52–57.
7. Мироновский Л. А. Диагностирование систем управления методом аннулирующего сигнала // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2001. № 5. С. 3–7.
8. Егоров А. Н., Мироновский Л. А. Использование нулей динамических систем в задачах технической диагностики // Электронное моделирование. 1996. № 6. С. 34–42.
9. Архангельский О. И., Мироновский Л. А. Диагностирование динамических систем с помощью операторных норм // Электронное моделирование. 1995. № 5. С. 40–49.
10. Мироновский Л. А. Тестовый контроль передаточных функций стационарных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 1984. № 10. С. 22–26.
11. Мироновский Л. А., Соловьева Т. Н. Структурное диагностирование управляемых динамических систем // Тр. XII Всерос. совещания по проблемам управления. М.: ИПУ РАН, 2014. С. 7640–7647.
12. Бритов Г. С. Диагностирование динамических систем на основе терминального управления // Системный анализ и логистика. 2016. Вып. 13. С. 3–12.

UDC 621.38

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.18

#### Terminal Diagnostics of Discrete Dynamic Systems

Britov G. S.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, britovgs@gmail.com

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The known works on test diagnostics of dynamic systems discuss the methods of diagnostics based on special test signals. However, these methods are often too complicated or unsafe (delta functions, jumps, etc). The challenge is to develop a method for testing dynamic systems which would provide a natural test motion of the system, for example, within specified bounds. Such a movement uses terminal control, so the diagnostics can be called terminal. **Purpose:** The goal is to examine the test diagnostics of linear discrete dynamic systems, using predefined terminal control as a test signal. **Methods:** We used the discrete system control theory which allowed us to build formulas for obtaining control of the system motion within given bounds. **Results:** We have developed a method for test diagnostics of discrete dynamic systems. The essence of the method is that using the calculated terminal control, the system comes into a state with the desired output signals. Due to this, the diagnostic criteria are rather simple: you just need to check the required output signals. The obtained results allow you to perform test diagnostics of discrete dynamic systems, which differs from the known methods because the test motion is a natural motion of the system within the given bounds.

**Keywords** — Motion System Model, Linear Discrete System, Motion Bounds, Terminal Control, Terminal Diagnostics.

#### References

1. Britov G. S. A Method for Testing Linear Dynamic Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 1, pp. 77–85 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.77
2. Britov G. S. Verification, Validation and Testing of Computer Models of Linear Dynamic Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 2, pp. 75–83 (In Russian).
3. Voronin V. V., Shalobanov S. S. Diagnosing Continuous Dynamic Systems by the Method of Test Deviations of Parameters of the Model. *Informatika i sistemy upravleniia*, 2010, no. 1(23), pp. 121–127 (In Russian).
4. Britov G. S., Mironovskii L. A. Estimation Testing Procedure of Linear Control Systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2006, no. 11, pp. 44–49 (In Russian).
5. Mironovskii L. A. Test Checking of Linear Control Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy na zheleznodorozhnom transporte*, 2005, no. 5, pp. 3–8 (In Russian).
6. Mironovskii L. A. Diagnosis of Linear Systems by Complementary Signal Method. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2002, no. 5, pp. 52–57 (In Russian).
7. Mironovskii L. A. Diagnosis Control Systems by Invalidating Signal Method. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy na zheleznodorozhnom transporte*, 2001, no. 5, pp. 3–7 (In Russian).
8. Egorov A. N., Mironovskii L. A. Using Nulls of Dynamic Systems in Technical Diagnostic Tasks. *Elektronnoe modelirovanie*, 1996, no. 6, pp. 34–42 (In Russian).
9. Arkhangel'skii O. I., Mironovskii L. A. Diagnosis Dynamic Systems by Operator Norms. *Elektronnoe modelirovanie*, 1995, no. 5, pp. 40–49 (In Russian).
10. Mironovskii L. A. Test Checking of Transfer Functions of Stationary Objects. *Izvestiia vuzov. Priborostronnie*, 1989, no. 10, pp. 22–26 (In Russian).
11. Mironovskii L. A., Solov'eva T. N. Structural Diagnosis of Controlled Dynamic Systems. *Trudy XII Vserossiiskogo soveshchaniia po problemam upravleniia* [Proc. of the 12th All-Russian Meeting on Governance], Moscow, 2014, pp. 7640–7647 (In Russian).
12. Britov G. S. Diagnostics of Dynamic Systems Based on Terminal Management. *Sistemnyi analiz i logistika*, 2016, iss. 13, pp. 3–12 (In Russian).

УДК 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.25

# МОДИФИКАЦИЯ ПРЕДИКТОРА СМИТА ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

**М. В. Бураков<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, доцент

**А. С. Коновалов<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** предиктор Смита является эффективным инструментом для управления системами с запаздыванием, однако его использование требует точной оценки параметров объекта управления. Таким образом, для объектов с переменными параметрами требуется введение в структуру предиктора Смита дополнительного контура адаптации. **Цель исследования:** разработка модификации предиктора Смита, которая позволяет работать в условиях изменения коэффициента усиления объекта управления, описываемого передаточной функцией. **Результаты:** рассмотрены различные варианты организации контура адаптации предиктора Смита: на основании правила МПТ, функций Ляпунова, на базе линейного ПИД-регулятора и адаптивного регулятора с эталонной моделью, использующей функции чувствительности замкнутой системы относительно параметров ПИД-регулятора. На основании компьютерных экспериментов обоснован выбор контура адаптации, обеспечивающего работу предиктора Смита в условиях изменения передаточной функции объекта управления. **Практическая значимость:** алгоритм адаптации предиктора Смита, предложенный в данной работе, перспективен для реализации в системах управления объектами с запаздыванием.

**Ключевые слова** — предиктор Смита, адаптивная система, ПИД-регулятор, генетический алгоритм.

## Введение

Предиктор Смита [1, 2] в комбинации с ПИД-регулятором часто используется при управлении объектами с запаздыванием, в том числе в химической, металлургической промышленности и топливно-энергетическом комплексе. Работа этого устройства основана на использовании точной модели объекта управления в виде передаточной функции и звена запаздывания. Если же параметры модели отличаются от параметров объекта или объект имеет переменные параметры, то в системе с предиктором Смита возможно ухудшение качества переходных процессов или потеря устойчивости. Поэтому существующие классические подходы управления линейными системами с запаздыванием в последние годы совершенствуются на базе методов адаптивного управления [3–5].

В работе [6] была рассмотрена задача адаптации системы с предиктором Смита для объекта с переменным запаздыванием, а в данной работе рассматривается задача управления линейным динамическим объектом с запаздыванием и переменными параметрами. При этом запаздывание полагается постоянным, но требуется коррекция параметров ПИД-регулятора, который должен поддерживать заданные показатели качества переходного процесса. Одним из вариантов адаптации «в малом» здесь является переход от линейного ПИД-регулятора к нечеткому регулятору ПИД-типа [7, 8] или нейроПИД-регулятору [9].

В более общей постановке задача может быть решена с использованием адаптивного управления с эталонной моделью [10, 11] или супервизорного управления ПИД-регулятором на базе нечеткой логики [12–14] или нейросетевых технологий [15, 16].

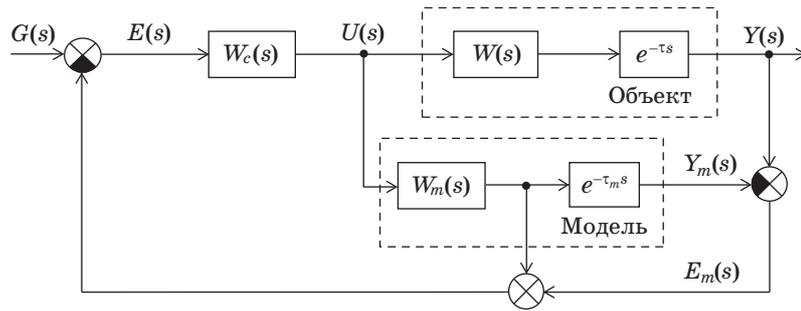
В настоящей работе анализируется организация блока адаптации предиктора Смита для двух вариантов: с изменением только коэффициента усиления объекта и когда меняется и коэффициент усиления, и параметры передаточной функции объекта. Для настройки параметров блока адаптации при первом варианте задачи используется генетический алгоритм [17, 18]. При второй постановке задачи используется принцип адаптации с эталонной моделью. Качество работы адаптивного предиктора Смита исследуется с помощью компьютерного моделирования.

## Предиктор Смита и его модификации

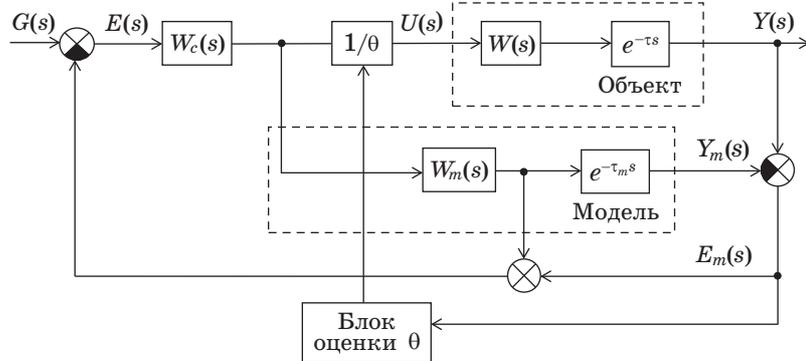
Линейной системе с запаздыванием, замкнутой единичной обратной связью, соответствует передаточная функция (ПФ) вида

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{W_c(s)W(s)e^{-\tau s}}{1 + W_c(s)W(s)e^{-\tau s}}, \quad (1)$$

где  $Y(s)$  и  $R(s)$  — выход и вход системы;  $W_c(s)$  — ПФ регулятора (ПИД-регулятора);  $W(s)e^{-\tau s}$  — ПФ объекта управления.



■ **Рис. 1.** Вариант описания предиктора Смита:  $E(s)$  — ошибка управления;  $U(s)$  — сигнал управления;  $G(s)$  — задающее воздействие  
 ■ **Fig. 1.** Variant of the description of Smith predictor:  $E(s)$  — error;  $U(s)$  — control signal;  $G(s)$  — reference input



■ **Рис. 2.** Предиктор Смита с контуром адаптации  
 ■ **Fig. 2.** The Smith predictor with adaptation circuit

В предикторе Смита для предсказания используется модель объекта управления, состоящая из ПФ  $W_m(s)$  и транспортной задержки  $\tau_m$  (рис. 1).

При равенстве параметров объекта и модели ( $W_m(s) = W(s)$  и  $\tau_m = \tau$ ) выполняется условие

$$E_m(s) = Y(s) - Y_m(s) = 0$$

и ПФ системы с предиктором Смита приобретает вид

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{W_c(s)W(s)e^{-\tau s}}{1 + W_c(s)W(s)}. \quad (2)$$

Очевидно, характеристический полином (2), в отличие от (1), не зависит от задержки. Однако коэффициент усиления объекта может отличаться от коэффициента усиления модели:

$$W(s) = \theta W_m(s). \quad (3)$$

В этом случае

$$E_m(s) = U(s)e^{-\tau s}(W(s) - \theta W_m(s)).$$

Ошибка оказывается равна нулю при выполнении условия (3).

Передаточную функцию ПИД-регулятора можно переписать в виде

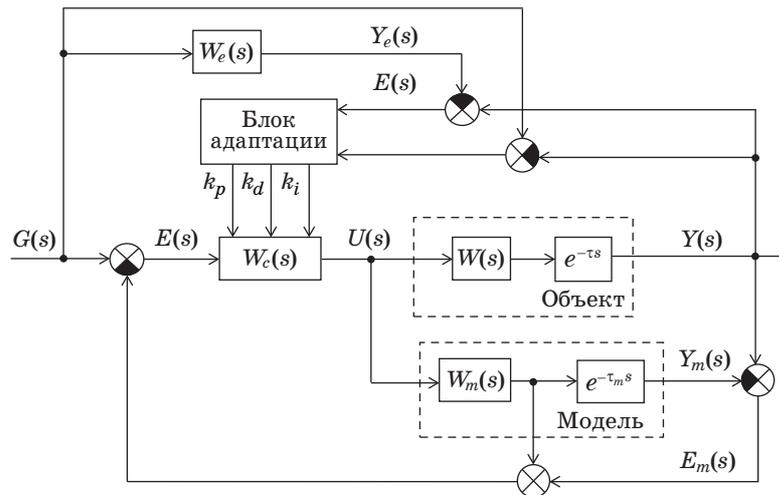
$$W_c(s) = k_p \left( 1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right), \quad (4)$$

где коэффициенты  $k_p$ ,  $T_d$  и  $T_i$  рассчитываются однократно при номинальных параметрах модели.

Исходя из (4), для обеспечения постоянных параметров переходного процесса необходимо изменять пропорциональный коэффициент по закону

$$k(t) = \frac{k_p}{\theta(t)}. \quad (5)$$

Таким образом, возникает задача адаптации коэффициента усиления. На основании (3) и (5) структура адаптивного предиктора Смита приобретает вид, показанный на рис. 2.



■ **Рис. 3.** Адаптивный предиктор Смита с эталонной моделью  
 ■ **Fig. 3.** Adaptive Smith predictor with a reference model

Рассмотрим далее вариант, когда меняется не только коэффициент усиления объекта управления, но и его ПФ в целом. Если считать, что величина задержки при этом неизменна, то возникает задача коррекции параметров ПИД-регулятора для улучшения качества переходного процесса. Для управления коэффициентами ПИД-регулятора может быть использован принцип адаптации с эталонной моделью (рис. 3).

Эталонная модель с ПФ  $W_e(s)$  описывает желаемую реакцию объекта управления. Выбор эталонной модели является частью процедуры проектирования. Модель выдает желаемый выход системы  $Y_m$  в ответ на входное воздействие  $G$ . Параметры регулятора изменяются в соответствии с ошибкой управления так, чтобы приблизить реальный выход объекта к желаемому выходу.

**Адаптация коэффициента усиления**

Для организации контура адаптации возможны различные подходы.

Рассмотрим простой алгоритм адаптации, использующий так называемое правило MIT (Massachusetts Institute of Technology) [10, 11].

Определим целевую функцию, подлежащую минимизации, в виде

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2(\theta).$$

Такая целевая функция всегда положительна, и уменьшение  $J(\theta)$  означает уменьшение  $e$ .

Правило MIT предполагает изменение настраиваемого параметра в направлении отрицательного градиента  $J$ :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma \left( e \frac{\partial e}{\partial \theta} \right).$$

Частная производная ошибки по параметру  $\theta$  описывает чувствительность ошибки к изменению параметра. Правило MIT можно объяснить следующим образом. Если параметры  $\theta$  изменяются значительно медленнее, чем состояние системы, тогда для того, чтобы сделать квадрат ошибки малым, нужно изменять параметры в направлении отрицательного градиента.

Коэффициент адаптации  $\gamma$  определяет длину шага в процессе минимизации (адаптации).

В соответствии с (3)

$$Y(s) = \theta W_m(s) e^{-\tau s} U(s);$$

$$Y_m(s) = W_m(s) e^{-\tau s} U(s).$$

Тогда ошибка будет равна

$$E(s) = Y(s) - Y_m(s) = (\theta W_m(s) - W_m(s)) e^{-\tau s} U(s);$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = W_m e^{-\tau s} U(s) = y_m.$$

В соответствии с правилом MIT

$$\frac{d\theta}{dt} = -k \left( e \frac{\partial e}{\partial \theta} \right) = -k e y_m;$$

$$\theta(t) = -k \int e(t) y_m(t) dt + \theta_0. \tag{6}$$

В рассматриваемой задаче начальное значение  $\theta_0 = 1$ .

Для описания закона изменения  $\theta$  может быть также использован аппарат функций Ляпунова.

Пусть объект управления без запаздывания описывается ПФ 1-го порядка

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\theta k}{Ts+1};$$

$$Y(s)(Ts+1) = kU(s) \Rightarrow \dot{y}(t) = -\frac{1}{T}y(t) + \frac{\theta k}{T}u(t).$$

Аналогично при  $k = k_m$  и  $T = T_m$  для модели

$$Y(s)(Ts+1) = kU(s) \Rightarrow \dot{y}(t) = -\frac{1}{T}y(t) + \frac{k}{T}u(t).$$

Рассмотрим производную ошибки выхода:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{y}(t) - \dot{y}_m(t) = -\frac{1}{T}y(t) + \frac{\theta(t)k}{T}u(t) + \\ &+ \frac{1}{T}y_m(t) - \frac{k}{T}u(t) = -\frac{1}{T}e(t) + \frac{1}{T}(\theta(t)k - k)u(t). \end{aligned}$$

Функцию Ляпунова можно определить следующим образом ( $\lambda > 0$ ):

$$V(e, \theta) = \frac{1}{2} \left( Te^2(t) + \frac{1}{\lambda} (\theta(t)k - k)^2 \right).$$

Производная функции Ляпунова

$$\begin{aligned} \dot{V}(e, \theta) &= \frac{\partial V}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \\ &= Te(t) \left( -\frac{1}{T}e(t) + \frac{1}{T}(\theta(t)k - k)u(t) \right) - \frac{1}{\lambda} (\theta(t)k - k) \dot{\theta}(t) = \\ &= -e^2(t) + e(t)(\theta(t)k - k)u(t) - \frac{1}{\lambda} (\theta(t)k - k) \dot{\theta}(t) = \\ &= -e_y^2(t) + (\theta(t)k - k) \left( e(t)u(t) - \frac{1}{\lambda} \dot{\theta}(t) \right). \end{aligned}$$

Для того чтобы производная  $V$  всегда была отрицательной, можно потребовать выполнения условия

$$-\frac{1}{\lambda} \dot{\theta}(t) = e(t)u(t) = 0 \Rightarrow \dot{\theta}(t) = -\lambda e(t)u(t).$$

Таким образом:

$$\theta = -\lambda \int e(t)u(t)dt + \theta_0. \quad (7)$$

Хотя выражение (7) получено для объекта 1-го порядка, оно использует только ошибку выхода и может быть применено для объекта любого порядка.

Коэффициенты  $k$  в (6) и  $\lambda$  в (7) оказывают влияние на скорость процесса адаптации.

Произведение  $ke(t)$  в (6) или  $\lambda e(t)$  в (7) может рассматриваться как сигнал пропорционального регулятора. Можно предположить, что качество управления улучшится при усложнении закона управления:

$$\theta(t) = -\int \left( k_p e(t) + k_d \frac{de}{dt} + k_i \int e dt \right) y_m(t) dt + \theta_0. \quad (8)$$

Задача выбора постоянного значения  $k$  или  $\lambda$ , входящего в (6) и (7), достаточно проста, она решается методом проб и ошибок. Использование (8) требует предварительной фазы обучения в режиме офлайн, с этой целью может быть использован генетический алгоритм [18].

### Адаптивная коррекция параметров ПИД-регулятора

Правило МПТ, определяемое формулами (6) и (7), может быть использовано и для коррекции коэффициентов ПИД-регулятора.

Пусть объект управления описывается ПФ 3-го порядка:

$$W(s) = \frac{1}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3}.$$

Передаточная функция ПИД-регулятора

$$W_{pid}(s) = \frac{k_p s + k_d s^2 + k_i}{s}.$$

Тогда ПФ замкнутой системы имеет вид

$$W(s) = \frac{Y(s)}{G(s)} = \frac{k_p s + k_d s^2 + k_i}{s^4 + a_1 s^3 + (a_2 + k_d) s^2 + (a_3 + k_p) s + k_i}.$$

В соответствии с рис. 3  $e(t) = y(t) - y_e(t)$ , следовательно:

$$\frac{dk_p}{dt} = -\gamma_p \frac{\partial J}{\partial k_p} = -\gamma_p \left( \frac{\partial J}{\partial e} \right) \left( \frac{\partial e}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial k_p} \right) = -\gamma_p e \left( \frac{\partial y}{\partial k_p} \right);$$

$$\frac{dk_i}{dt} = -\gamma_i \frac{\partial J}{\partial k_i} = -\gamma_i \left( \frac{\partial J}{\partial e} \right) \left( \frac{\partial e}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial k_i} \right) = -\gamma_i e \left( \frac{\partial y}{\partial k_i} \right);$$

$$\frac{dk_d}{dt} = -\gamma_d \frac{\partial J}{\partial k_d} = -\gamma_d \left( \frac{\partial J}{\partial e} \right) \left( \frac{\partial e}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial k_d} \right) = -\gamma_d e \left( \frac{\partial y}{\partial k_d} \right),$$

где  $\gamma_p$ ,  $\gamma_d$  и  $\gamma_i$  — коэффициенты скорости адаптации, которые могут быть различными.

Рассмотрим выходной сигнал объекта

$$Y(s) = \frac{k_p s + k_d s^2 + k_i}{s^4 + a_1 s^3 + (a_2 + k_d) s^2 + (a_3 + k_p) s + k_i} G(s).$$

Таким образом, получаем описание закона изменения коэффициентов ПИД-регулятора в виде

$$\begin{aligned} \frac{dk_p}{dt} &= -\gamma_p e \left( \frac{\partial y}{\partial k_p} \right) = \\ &= -\gamma_p e \left( \frac{s(G(s) - Y(s))}{s^4 + a_1 s^3 + (a_2 + k_d)s^2 + (a_3 + k_p)s + k_i} \right); \\ \frac{dk_i}{dt} &= -\gamma_i e \left( \frac{\partial y}{\partial k_i} \right) = \\ &= -\gamma_i e \left( \frac{(U(s) - Y_p(s))}{s^4 + a_1 s^3 + (a_2 + k_d)s^2 + (a_3 + k_p)s + k_i} \right); \\ \frac{dk_d}{dt} &= -\gamma_d e \left( \frac{\partial y}{\partial k_d} \right) = \\ &= -\gamma_d e \left( \frac{s^2(G(s) - Y(s))}{s^4 + a_1 s^3 + (a_2 + k_d)s^2 + (a_3 + k_p)s + k_i} \right). \end{aligned}$$

На основании этих формул можно построить контур адаптации для объекта с переменными параметрами.

### Результаты моделирования

При моделировании рассматривался объект управления, заданный ПФ

$$W(s) = \frac{1}{s^3 + 5s^2 + 11s + 15}.$$

Параметры ПИД-регулятора были синтезированы с помощью генетического алгоритма для желаемой ПФ вида

$$W(s) = \frac{1}{0,5s^2 + s + 1}.$$

Модель предиктора Смита для этого объекта и регулятора приведена на рис. 4.

Переходные процессы в системе с предиктором Смита представлены на рис. 5.

При моделировании закон изменения коэффициента усиления описывался формулой

$$\theta(t) = 0,5 \sin(0,1t) + 1. \quad (9)$$

На первом этапе исследовалась адаптация по правилу MIT (6). На рис. 6 показана реализация предиктора Смита с контуром адаптации. На рис. 7 приведены графики переходных процессов при различных коэффициентах скорости адаптации. Качество управления в целом оказалось неудовлетворительным. Аналогичный результат был получен при адаптации по методу функций Ляпунова (7). Система с постоянным коэффициентом скорости адаптации здесь не обеспечивает приемлемого качества управления.

На втором этапе работы исследовалось применение формулы (8) в контуре адаптации. На рис. 8 показана структура дискретного ПИД-регулятора, который использовался в контуре адаптации, на рис. 9 и 10 — переходные процессы в системе.

Как показывает рис. 10, контур адаптации достаточно точно отслеживает изменение коэффициента усиления объекта, обеспечивая приемлемое качество переходного процесса.

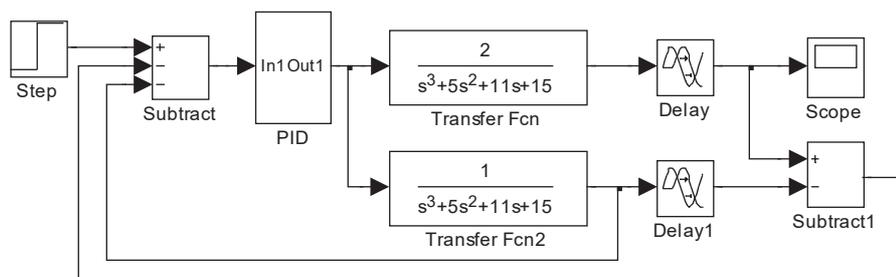
Рассмотрим далее вариант, когда изменяется не только коэффициент усиления, но и другие коэффициенты ПФ объекта. Например, пусть коэффициент усиления объекта описывается выражением (9), а сама ПФ имеет вид

$$W(s) = \frac{1}{s^3 + 7s^2 + 7s + 7}.$$

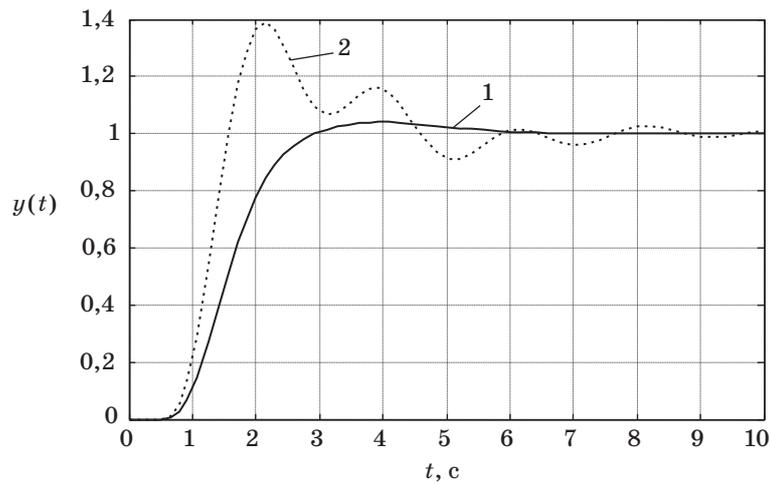
Пусть ПФ модели имеет вид

$$W(s) = \frac{2}{s^3 + 5s^2 + 11s + 15}.$$

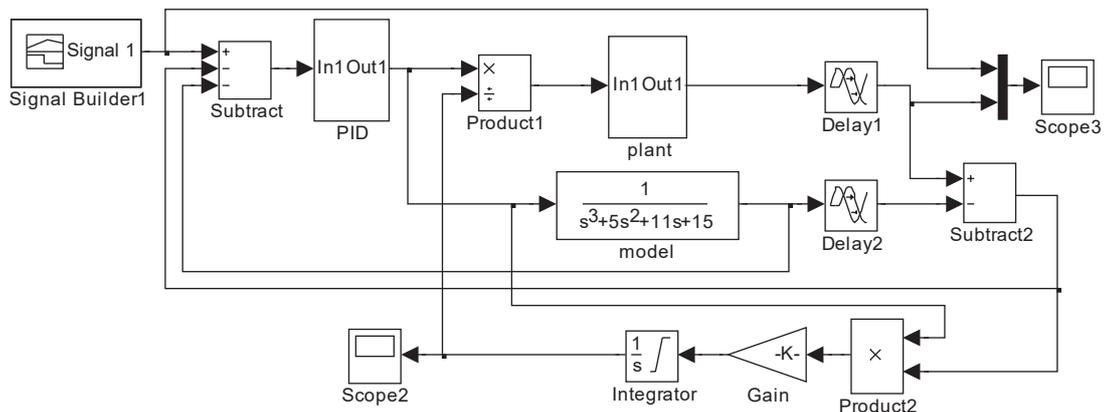
Качество переходного процесса на выходе предиктора Смита неудовлетворительно (рис. 11).



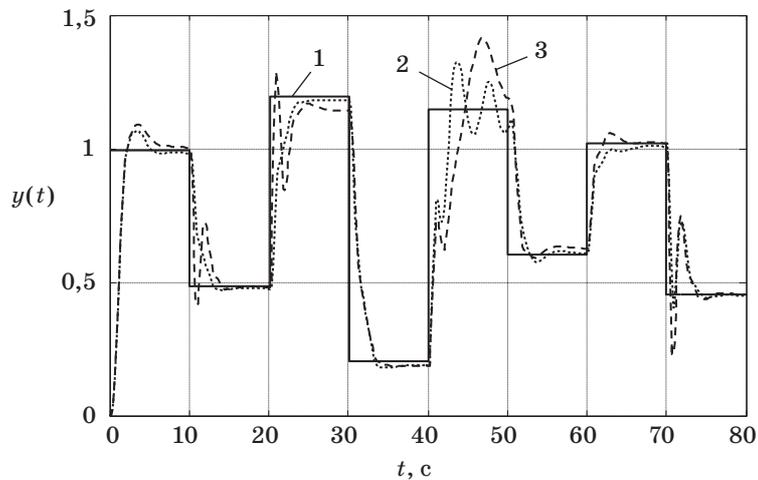
■ **Рис. 4.** Блок-схема предиктора Смита в Simulink MatLab  
 ■ **Fig. 4.** Block diagram of Smith predictor in Simulink MatLab



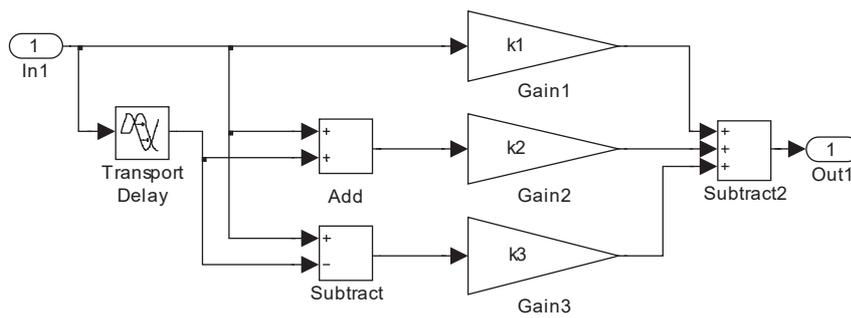
■ *Рис. 5.* Переходный процесс при номинальных параметрах (1) и при увеличении коэффициента усиления объекта (2)  
 ■ *Fig. 5.* Transient process with nominal parameters (1) and with increasing the gain of the plant (2)



■ *Рис. 6.* Блок-схема адаптации по правилу MIT  
 ■ *Fig. 6.* Adaptation scheme according to MIT rule

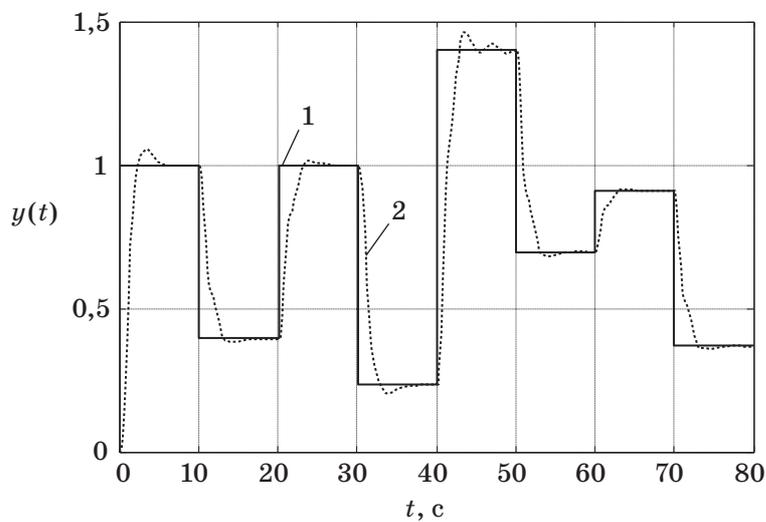


■ *Рис. 7.* Переходные процессы при адаптации по правилу MIT: задающее воздействие (1); выход объекта при  $k = 0,1$  (2); выход объекта при  $k = 0,5$  (3)  
 ■ *Fig. 7.* Transient processes in the adaptation according to the MIT rule: the setting action (1); the output of the plant at  $k = 0,1$  (2); the output of the plant at  $k = 0,5$  (3)



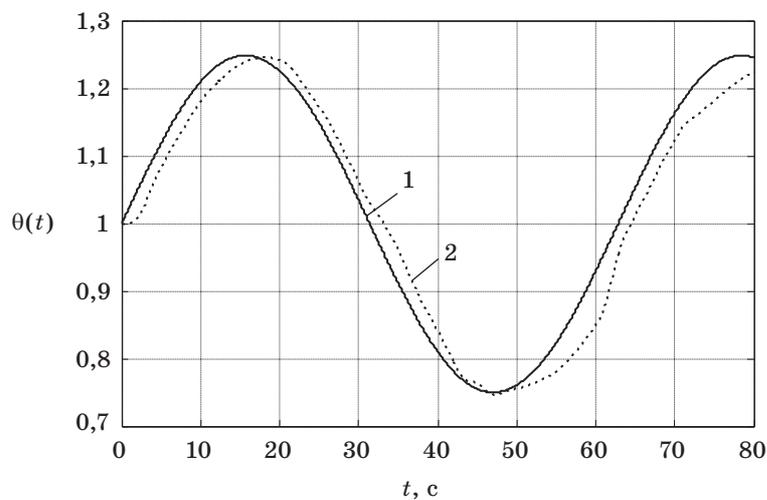
■ *Рис. 8.* Блок-схема дискретного ПИД-регулятора

■ *Fig. 8.* Block diagram of a discrete PID controller



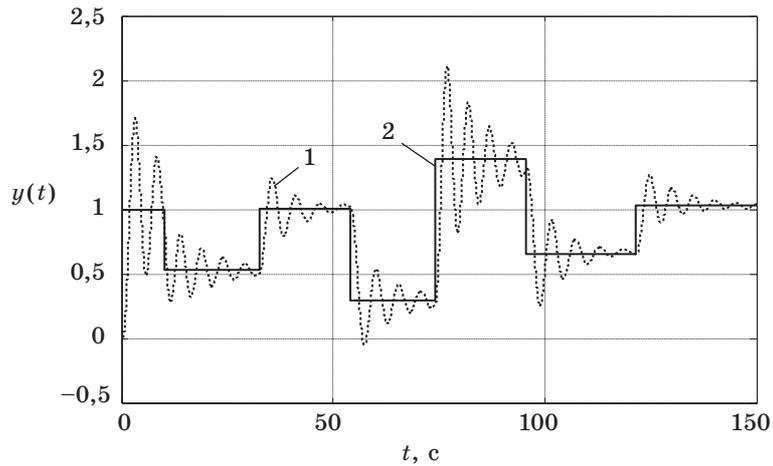
■ *Рис. 9.* Переходные процессы при адаптации с ПИД-регулятором: задающее воздействие (1); выход объекта (2)

■ *Fig. 9.* Transient processes during adaptation with a PID controller: the setting action (1); the output of the plant (2)

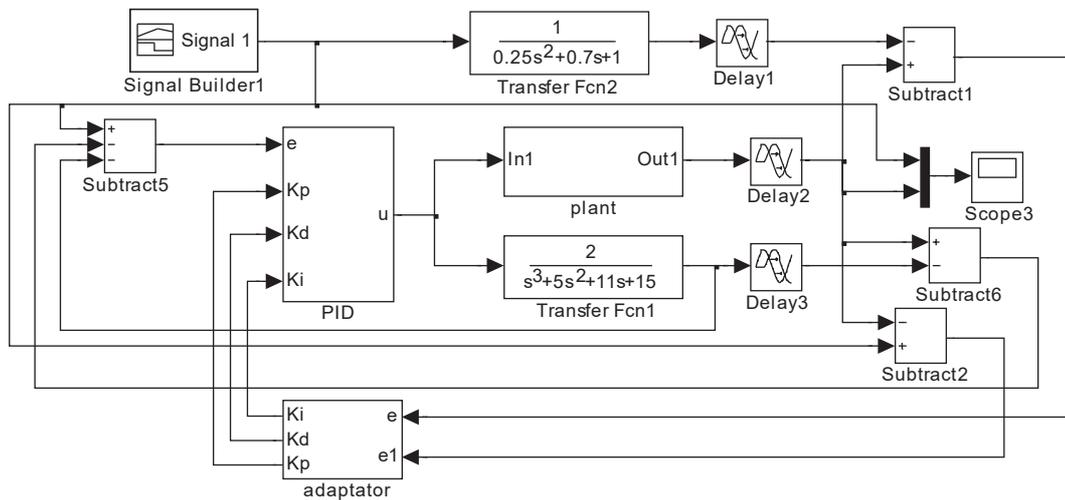


■ *Рис. 10.* Изменение параметра  $\theta$  (1) и его оценки (2) во время моделирования

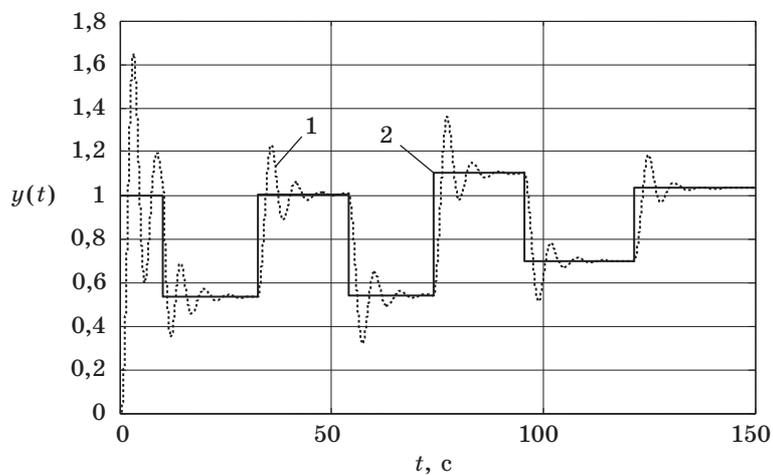
■ *Fig. 10.* Change in the parameter  $\theta$  (1) and its estimate (2) during simulation



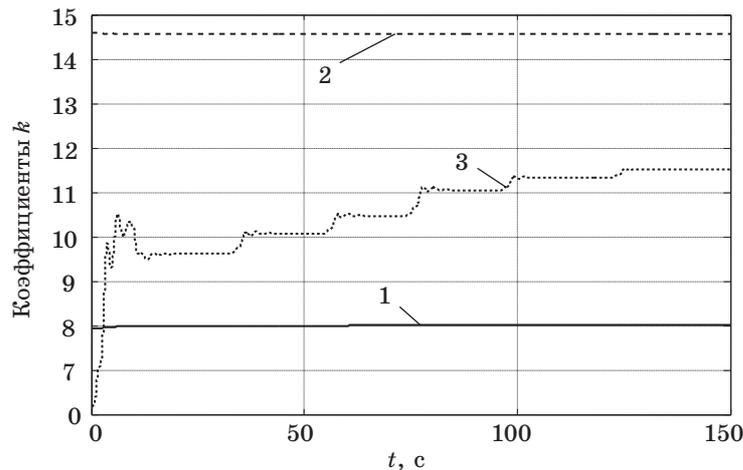
■ *Рис. 11.* Реакция объекта (1) на тестовый входной сигнал (2)  
 ■ *Fig. 11.* The reaction of the plant (1) to the test input signal (2)



■ *Рис. 12.* Адаптивный предиктор Смита  
 ■ *Fig. 12.* Adaptive Smith predictor



■ *Рис. 13.* Реакция адаптивного предиктора Смита (1) на тестовый входной сигнал (2)  
 ■ *Fig. 13.* The response of the adaptive Smith predictor (1) to the test input signal (2)



■ *Рис. 14.* Изменение коэффициентов ПИД-регулятора во время переходного процесса: 1 —  $k_p$ ; 2 —  $k_i$ ; 3 —  $k_d$   
 ■ *Fig. 14.* Change of PID-regulator coefficients during the transient process: 1 —  $k_p$ ; 2 —  $k_i$ ; 3 —  $k_d$

Блок-схема адаптивного предиктора Смита с эталонной моделью приведена на рис. 12. Использованное значение задержки 0,3 с.

Переходный процесс на выходе адаптивного предиктора Смита показан на рис. 13, на рис. 14 — динамика изменения коэффициентов ПИД-регулятора.

Как показывает сравнение рис. 11 и 13, введение контура адаптации значительно улучшает качество переходного процесса.

### Заключение

В статье рассмотрены варианты организации контура адаптации предиктора Смита для объекта с переменными параметрами и постоянной задержкой на выходе. Показано, что при изменении

коэффициента усиления объекта управления эффективным может быть использование в контуре адаптации линейного ПИД-регулятора, который обеспечивает лучшие оценки неизвестного параметра, чем варианты на основании правила МГТ или функций Ляпунова.

В более общем случае при изменении динамики объекта управления может быть применена адаптивная система с эталонной моделью, использующая функции чувствительности замкнутой системы относительно параметров ПИД-регулятора. Сделанные выводы подтверждены компьютерным моделированием.

Рассмотренные варианты организации контура адаптации предиктора Смита могут быть использованы при управлении широким кругом динамических объектов с запаздыванием.

### Литература

1. Smith O. J. M. Close Control of Loops with Dead Time // Chemical Engineering Progress. 1957. Vol. 53. P. 217–235.
2. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. — М.: Машиностроение, 1973. — 328 с.
3. Фуртат И. Б., Цыкунов А. М. Адаптивное управление объектами с запаздыванием по выходу // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. № 7. С. 15–19.
4. Бобцов А. А. Стабилизация нелинейных систем по выходу в условиях запаздывания // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2008. № 2. С. 21–28.
5. Бобцов А. А., Пыркин А. А. Адаптивное и робастное управление с компенсацией неопределенностей. — СПб.: НИУ ИТМО, 2013. — 135 с.
6. Бураков М. В., Шишлаков В. Ф. Модифицированный предиктор Смита для объекта с переменной задержкой // Тр. СПИИРАН. 2017. Вып. 2(51). С. 60–77.
7. Burakov M. V., Kurbanov V. G. Fuzzy PID Controller for Nonlinear Plant // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. N 9. P. 5745–5748.
8. Бураков М. В., Коновалов А. С. Нечеткое управление автомобильной антиблокировочной системой // Информационно-управляющие системы. 2016. № 2. С. 35–41. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.35
9. Burakov M. V., Kurbanov V. G. Neuro-PID Control for Nonlinear Plants with Variable Parameters // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. N 4. P. 1226–1229.
10. Astrom K. J., Wittenmark B. Adaptive Control. — Addison-Wesley, Reading, MA. 1995. — 572 p.
11. Astrom K. J., Hagglund T. Advanced PID Control. — ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. — 460 p.

12. Deng J. The Smith-PID Control of Three-Tank-System based on Fuzzy Theory // *Journal of Computers*. 2011. Vol. 6. N 3. P. 514–523.
13. Wei Q., Wang W. Research on Fuzzy Self-adaptive PI-Smith Control in Long Time-delay System // *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*. 2011. N 18(5). P. 114–117.
14. Abuzaid O. M., Emheisen M. A., Ammar A. A. Design of Fuzzy Self-adaptive PI-Smith Predictor Process Controller // *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016. Vol. 31. N 1. P. 18–21.
15. Wang P. G., Feng H. P., Zong X. P. Smith Predictive Control Based on NN // *Proc. of 2005 Intern. Conf. on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, China, 2005. P. 4179–4183.
16. Hao Chen, Zoubir Zouaoui, Zheng Chen. A Modified Smith Predictive Scheme based Back-propagation Neural Network Approach for FOPDT Processes Control // *Journal of Process Control*. 2013. N 23. P. 1261–1269.
17. Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика. — СПб.: ГУАП, 2008. — 164 с.
18. Бураков М. В., Коновалов А. С., Яковец О. Б. Эволюционный синтез нечетких регуляторов // *Информационно-управляющие системы*. 2015. № 6. С. 28–33. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.28

UDC 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.25

**Modification of Smith Predictor for a Linear Plant with Changeable Parameters**Burakov M. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, bmv@sknt.ruKonovalov A. S.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, ask@aanet.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The Smith predictor is an effective tool for the control over systems with delays, but its use requires an accurate evaluation of the parameters of the controlled plant. For plants with changeable parameters, an additional adaptation loop should be introduced into the structure of the Smith predictor. **Purpose:** The goal of this study is to develop a modification of the Smith predictor that allows you to operate with a changeable gain ratio of the controlled plant described by its transfer function. **Results:** Various options have been considered in order to build a Smith predictor adaptation loop: based on the MIT rule, on Lyapunov functions, or on a linear PID controller and an adaptive controller with a reference model which uses the closed system sensitivity functions relative to the PID parameters. On the base of computer experiments, we have substantiated the choice of an adaptation loop which would ensure Smith predictor operation when the transfer function of the controlled plant is changing. **Practical relevance:** The Smith predictor adaptation algorithm proposed in this paper can be implemented in control systems for objects with delays.

**Keywords** — Smith Predictor, Adaptive System, PID Controller, Genetic Algorithm.

**References**

1. Smith O. J. M. Close Control of Loops with Dead Time. *Chemical Engineering Progress*, 1957, vol. 53, pp. 217–235.
2. Guretskij Kh. *Analiz i sintez sistem upravleniya s zapazdyvaniem* [Analysis and Synthesis of Control Systems with Delay]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 328 p. (In Russian).
3. Furtat I. B., Tsykunov A. M. Adaptive Control of Plants with Delayed Output. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2005, no. 7, pp. 15–19 (In Russian).
4. Bobtsov A. A. Stabilization of Nonlinear Systems by Output in Terms of Delay. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2008, no. 2, pp. 21–28 (In Russian).
5. Bobtsov A. A., Pyrkin A. A. *Adaptivnoe i robustnoe upravlenie s kompensatsiey neopredelennostey* [Adaptive and Robust Control with Uncertainty Compensation]. Saint-Petersburg, NIU ITMO Publ., 2013. 135 p. (In Russian).
6. Burakov M. V., Shishlakov V. F. Modified Smith Predictor for Control of Systems with Time-varying Delay. *Trudy SPIIRAN*, 2017, no. 2(51), pp. 60–77 (In Russian).
7. Burakov M. V., Kurbanov V. G. Fuzzy PID Controller for Nonlinear Plant. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11, no. 9, pp. 5745–5748.
8. Burakov M. V., Konovalov A. S. Fuzzy Control for Anti-Lock Automobile Brake Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 2, pp. 35–41 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.35
9. Burakov M. V., Kurbanov V. G. Neuro-PID Control for Non-linear Plants with Variable Parameters. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 1226–1229.
10. Astrom K. J., Wittenmark B. *Adaptive Control*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1995. 572 p.
11. Astrom K. J., Hagglund T. *Advanced PID Control*. ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. 460 p.
12. Deng J. The Smith-PID Control of Three-Tank-System based on Fuzzy Theory. *Journal of Computers*, 2011, vol. 6, no. 3, pp. 514–523.
13. Wei Q., Wang W. Research on Fuzzy Self-adaptive PI-Smith Control in Long Time-delay System. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2011, no. 18(5), pp. 114–117.
14. Abuzaid O. M., Emheisen M. A., Ammar A. A. Design of Fuzzy Self-adaptive PI-Smith Predictor Process Controller. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 2016, vol. 31, no. 1, pp. 18–21.
15. Wang P. G., Feng H. P., Zong X. P. Smith Predictive Control Based on NN. *Proc. of 2005 Intern. Conf. on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, China, 2005, pp. 4179–4183.
16. Hao Chen, Zoubir Zouaoui, Zheng Chen. A Modified Smith Predictive Scheme based Back-propagation Neural Network Approach for FOPDT Processes Control. *Journal of Process Control*, 2013, no. 23, pp. 1261–1269.
17. Burakov M. V. *Geneticheskij algoritm: teoriya i praktika* [Genetic Algorithms: Theory and Practice]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2008. 164 p. (In Russian).
18. Burakov M. V., Konovalov A. S., Yakovets O. B. Evolutionary Design of Fuzzy Controllers. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 28–33 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.28

# ПОЛНЫЙ АНАЛИЗ ЗАДАЧИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ БАРАБАННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Д. Ю. Муромцев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

А. Н. Грибков<sup>а</sup>, доктор техн. наук, доцент

В. Н. Шамкин<sup>а</sup>, доктор техн. наук, доцент

И. А. Куркин<sup>б</sup>, канд. техн. наук

<sup>а</sup>Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, РФ

<sup>б</sup>ООО «Аналитические технологии», Рязань, РФ

**Постановка проблемы:** разработка и практическое применение систем энергосберегающего управления сложными технологическими объектами является в настоящее время актуальной задачей, поскольку позволяет не только повысить качество выпускаемой продукции, но и существенно снизить затраты энергоресурсов. Одним из наиболее сложных и трудоемких этапов разработки системы энергосберегающего управления является создание ее алгоритмического обеспечения, так как разрабатываемые модели и алгоритмы должны учитывать все специфические особенности объекта управления и обеспечивать требуемые характеристики точности и быстродействия. **Цель исследования:** анализ задачи энергосберегающего управления, позволяющий определить условия существования ее решения, а также возможные виды и параметры функций оптимального управления. **Результаты:** проведен полный анализ задачи энергосберегающего управления динамическими режимами барабанной сушильной установки. Выполнена формализация задачи энергосберегающего управления динамическими режимами технологического процесса сушки послеспиртовой барды. Приведен алгоритм определения возможности существования решения задачи оптимального управления. Определены виды функций оптимального управления и соотношения для расчета их параметров для функционалов «минимум расхода топлива» и «минимум затрат энергии». Сравнение полученных видов функций показало, что они обеспечивают одинаковое значение функционала, но в ряде случаев более предпочтительным является вид функции оптимального управления, полученный для функционала «минимум затрат энергии». **Практическая значимость:** результаты полного анализа задачи энергосберегающего управления позволяют разработать алгоритмы оперативного синтеза управляющих воздействий для системы энергосберегающего управления динамическими режимами барабанной сушильной установки.

**Ключевые слова** — система энергосберегающего управления, алгоритмическое обеспечение, оптимальное управление, барабанная сушильная установка.

## Введение

Одной из актуальных задач современной промышленности является снижение энергопотребления и повышение энергетической эффективности применяемых на производстве технологических установок. Поэтому в настоящее время значительное внимание уделяется разработке современных систем энергосберегающего управления (СЭУ), позволяющих не только существенно снизить затраты энергоресурсов, но и повысить качество выпускаемой продукции.

Важным и достаточно сложным этапом создания СЭУ является разработка ее алгоритмического обеспечения, так как оно должно учитывать все особенности объекта управления и соблюдать требуемые характеристики точности и быстродействия. При разработке алгоритмического обеспечения СЭУ необходимо учитывать результаты полного анализа задачи энергосберегающего управления, позволяющего определить условия существования решения задачи, возможные виды и параметры функций оптимального управления (ОУ) и т. д.

В данной статье рассматриваются вопросы анализа задачи энергосберегающего управления динамическими режимами сложного технологического объекта на примере барабанной сушильной установки (БСУ), применяемой для сушки послеспиртовой барды.

## Формализация задачи энергосберегающего управления динамическими режимами барабанной сушильной установки

В качестве объекта управления рассматривается БСУ торговой марки Vetter, используемая для сушки послеспиртовой барды на ОАО «Талвис» (Тамбовская область). На технологический процесс сушки барды накладываются ограничения по температуре материала, которая в процессе сушки не должна превышать 120 °С, иначе качество конечного продукта будет очень низким. Массовая доля сухой барды может варьироваться в зависимости от области применения и составлять  $90 \pm 1$ ,  $93 \pm 2$  или  $(96 \pm 1) \%$  [1].

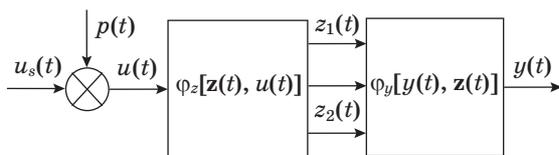
Несмотря на то, что целевым показателем качества конечного продукта является влажность сухой барды, ее измерение осуществляется в лабораторных условиях с большой временной задержкой, что делает невозможным использование значения влажности при синтезе управляющих воздействий в режиме реального времени. Мониторинг технологического процесса сушки производится путем контролирования температуры воздуха внутри сушильной установки (конвекционная часть сушки), температуры отводимого пара (контактная часть сушки) и температуры выходного материала (чтобы не допустить перегрева барды). Управление процессом сушки осуществляется при помощи регулировки подачи пара. При этом температура пара находится в пределах 160–180 °С при давлении 5–7 атм.

На практике для обеспечения максимальной производительности сушильной установки в качестве управляющего воздействия используется степень открытия паровой головки. Однако само открытие паровой головки не является управляющим воздействием — оно лишь регулирует количество пара, поступающего в сушильную установку, а количество тепла зависит от температуры и давления пара.

Структурная схема БСУ как объекта управления представлена на рис. 1.

В качестве управляющих воздействий рассматриваются: управление подачей пара  $u(t) = p(t) \times u_s(t)$ , где  $p(t)$  — давление пара;  $u_s(t)$  — степень открытия паровой головки, изменяющееся в пределах от нуля до 100 %. Вектор фазовых координат  $z(t)$  включает три компонента:  $z_1(t)$  — температуру выходного материала;  $z_2(t)$  — температуру отводимого пара;  $z_3(t)$  — температуру воздуха в сушильной установке. Выходной переменной является конечная влажность барды  $y(t)$ . Для решения задачи анализа оптимального управления (ЗОУ) рассматривается модель функции перехода  $\varphi_z[z(t), u(t)]$ , поскольку определить выходное отображение  $\varphi_y[y(t), z(t)]$  не представляется возможным.

Математическую постановку задачи энергосберегающего управления динамическими режимами БСУ можно записать в следующем виде:



■ **Рис. 1.** Структурная схема сушильной установки как объекта управления

■ **Fig. 1.** Structural scheme of the drying unit as a control object

$$\dot{z}(t) = \mathbf{A}z(t) + \mathbf{B}u(t); \quad (1)$$

$$z(t_0) = z^0 \rightarrow z(t_K) = z^K; \quad (2)$$

$$\forall t \in [t_0; t_K]: u(t) \in [u^H; u^B]; \quad (3)$$

$$J = \int_{t_0}^{t_K} f(u(t)) dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  — матрицы параметров объекта управления;  $u^H, u^B$  — граничные значения управляющего воздействия;  $z^0, z^K$  — векторы начальных и конечных значений фазовых координат;  $[t_0, t_K]$  — временной интервал управления.

Объект, описываемый моделью (1), необходимо перевести из начального состояния в конечное (2) с учетом ограничений на управляющее воздействие в каждый момент времени (3) с минимумом функционала (4).

Для численного решения задачи (1)–(4) задается массив исходных данных

$$\mathbf{R} = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, u^H, u^B, z^0, z^K, t_0, t_K). \quad (5)$$

Идентификация моделей динамики объекта управления производилась путем перебора всех возможных вариантов линейных моделей в виде систем дифференциальных уравнений для трех фазовых координат и одного управляющего воздействия.

В результате идентификации была получена следующая математическая модель динамических режимов БСУ [1]:

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = -2,16 \cdot 10^{-4} z_1(t) - 1,42 \cdot 10^{-4} z_2(t) + \\ + 2,86 \cdot 10^{-4} u(t) \\ \dot{z}_2(t) = -3 \cdot 10^{-5} z_2(t) + 1,17 \cdot 10^{-6} u(t) \\ \dot{z}_3(t) = -4,1 \cdot 10^{-6} z_1(t) + 3,08 \cdot 10^{-5} u(t) \end{cases} \quad (6)$$

Максимальные значения относительной ошибки модели составили 2,72 % для  $z_1(t)$ , 4,34 % для  $z_2(t)$  и 0,88 % для  $z_3(t)$ .

### Анализ задачи энергосберегающего управления

Анализ ЗОУ включает в себя исследование вопросов существования ее решения, определения видов и параметров функций ОУ и т. д. Очень эффективным является подход к решению задач анализа с использованием математического аппарата принципа максимума Л. С. Понтрягина [2] и метода синтезирующих переменных [3].

Математическая модель динамики объекта (6), записанная в векторно-матричной форме, будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1(t) \\ \dot{z}_2(t) \\ \dot{z}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & 0 \\ 0 & a_3 & 0 \\ a_4 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ z_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} u(t). \quad (7)$$

Решение (7), согласно уравнению Коши:

$$\begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ z_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{(t-t_0)a_1} & \frac{(e^{(t-t_0)a_3} - e^{(t-t_0)a_1})a_2}{a_3 - a_1} & 0 \\ 0 & e^{(t-t_0)a_3} & 0 \\ \frac{a_4(e^{(t-t_0)a_1} - 1)}{a_1} & \frac{a_2a_4(a_1e^{(t-t_0)a_3} - a_3e^{(t-t_0)a_1} - a_1 + a_3)}{a_1a_3(a_3 - a_1)} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1(t_0) \\ z_2(t_0) \\ z_3(t_0) \end{pmatrix} + \int_{t_0}^t \begin{pmatrix} e^{(t-s)a_1} & \frac{(e^{(t-s)a_3} - e^{(t-s)a_1})a_2}{a_3 - a_1} & 0 \\ 0 & e^{(t-s)a_3} & 0 \\ \frac{a_4(e^{(t-s)a_1} - 1)}{a_1} & \frac{a_2a_4(a_1e^{(t-s)a_3} - a_3e^{(t-s)a_1} - a_1 + a_3)}{a_1a_3(a_3 - a_1)} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} u(s) ds.$$

Траектории фазовых координат:

$$\begin{aligned} z_1(t) &= e^{(t-t_0)a_1} z_1(t_0) + \frac{(e^{(t-t_0)a_3} - e^{(t-t_0)a_1})a_2}{a_3 - a_1} z_2(t_0) + b_1 \int_{t_0}^t e^{(t-s)a_1} u(s) ds + \\ &+ \frac{b_2a_2}{a_3 - a_1} \int_{t_0}^t (e^{(t-s)a_3} - e^{(t-s)a_1}) u(s) ds; \\ z_2(t) &= e^{(t-t_0)a_3} z_2(t_0) + b_2 \int_{t_0}^t e^{(t-s)a_3} u(s) ds; \\ z_3(t) &= \frac{a_4}{a_1} (e^{(t-t_0)a_1} - 1) z_1(t_0) + \frac{a_2a_4(a_1e^{(t-t_0)a_3} - a_3e^{(t-t_0)a_1} - a_1 + a_3)}{a_1a_3(a_3 - a_1)} z_2(t_0) + z_3(t_0) + \\ &+ \int_{t_0}^t \left( b_1 \frac{a_4(e^{(t-s)a_1} - 1)}{a_1} + b_2 \frac{a_2a_4(a_1e^{(t-s)a_3} - a_3e^{(t-s)a_1} - a_1 + a_3)}{a_1a_3(a_3 - a_1)} + b_3 \right) u(s) ds. \end{aligned}$$

Формулы для вычисления значений синтезирующих переменных:

$$\begin{aligned} L_1(\mathbf{R}) &= z_1(t) - e^{(t-t_0)a_1} z_1(t_0) - \frac{(e^{(t-t_0)a_3} - e^{(t-t_0)a_1})a_2}{a_3 - a_1} z_2(t_0); \\ L_1(u) &= b_1 \int_{t_0}^t e^{(t-s)a_1} u(s) ds + \frac{b_2a_2}{a_3 - a_1} \int_{t_0}^t (e^{(t-s)a_3} - e^{(t-s)a_1}) u(s) ds; \end{aligned}$$

$$L_2(\mathbf{R}) = \frac{z_2(t) - e^{(t-t_0)a_3} z_2(t_0)}{b_2}; L_2(u) = \int_{t_0}^t e^{(t-s)a_3} u(s) ds;$$

$$L_3(\mathbf{R}) = z_3(t) - \frac{a_4}{a_1} \left( e^{(t-t_0)a_1} - 1 \right) z_1(t_0) - \frac{a_2 a_4 \left( a_1 e^{(t-t_0)a_3} - a_3 e^{(t-t_0)a_1} - a_1 + a_3 \right)}{a_1 a_3 (a_3 - a_1)} z_2(t_0) - z_3(t_0);$$

$$L_3(u) = \int_{t_0}^t \left( b_1 \frac{a_4 \left( e^{(t-s)a_1} - 1 \right)}{a_1} + b_2 \frac{a_2 a_4 \left( a_1 e^{(t-s)a_3} - a_3 e^{(t-s)a_1} - a_1 + a_3 \right)}{a_1 a_3 (a_3 - a_1)} + b_3 \right) u(s) ds;$$

$$L_i(\mathbf{R}) = L_i(u), \quad i = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Поскольку управляющее воздействие  $u(t)$  зависит от давления пара  $p(t)$ , которое может изменяться в диапазоне 5÷7 атм, то ограничение на управляющее воздействие имеет специфический вид, так как имеется ограничение на степень открытия парового клапана  $u_3(t) \in [0; 100]$ , и, соответственно, управляющее воздействие может меняться в диапазоне от  $u(t) \in [0; 500]$  до  $u(t) \in [0; 700]$ .

Для дальнейшего рассмотрения предлагается разбить пространство синтезирующих переменных на три области:  $S_\Gamma$  — область гарантированного существования решения ЗОУ при  $u(t) \in [0; 500]$ ;  $S_B$  — область возможного существования решения ЗОУ при  $u(t) \in [0; 700]$ ;  $S_0$  — область, в которой решения ЗОУ не существует [4].

Для определения границ областей введем граничные виды функций управления, имеющие точки переключения:

$$u_l(s) = \begin{cases} 0, & s < T_l, \\ 500, & s \geq T_l; \end{cases} \quad u_h(s) = \begin{cases} 500, & s < T_h, \\ 0, & s \geq T_h, \end{cases}$$

где  $T_l$  и  $T_h$  — времена переключения.

Подставив  $u_l(s)$  и  $u_h(s)$  в уравнения для расчета синтезирующих переменных, получим аналитические выражения, с помощью которых можно определить границы поверхностей, ограничивающих области  $S_\Gamma$ ,  $S_B$  и  $S_0$ :

$$L_1^{u_l}(T_l) = b_1 \int_{T_l}^{t_k} e^{(t_k-s)a_1} 500 ds + \frac{b_2 a_2}{a_3 - a_1} \int_{T_l}^{t_k} \left( e^{(t_k-s)a_3} - e^{(t_k-s)a_1} \right) 500 ds =$$

$$= \frac{500}{a_1} \left( b_1 \left( e^{-(T_l-t_k)a_1} - 1 \right) - \frac{b_2 a_2 \left( a_3 e^{-(T_l-t_k)a_1} - a_1 e^{-(T_l-t_k)a_3} + a_1 - a_3 \right)}{(a_3 - a_1) a_3} \right);$$

$$L_2^{u_l}(T_l) = 500 \int_{T_l}^{t_k} e^{(t_k-s)a_3} ds = \frac{500}{a_3} \left( e^{-(T_l-t_k)a_3} - 1 \right);$$

$$L_3^{u_l}(T_l) = \int_{T_l}^{t_k} \left( b_1 \frac{a_4 \left( e^{(t_k-s)a_1} - 1 \right)}{a_1} + b_2 \frac{a_2 a_4 \left( a_1 e^{(t_k-s)a_3} - a_3 e^{(t_k-s)a_1} - a_1 + a_3 \right)}{a_1 a_3 (a_3 - a_1)} + b_3 \right) 500 ds =$$

$$= \frac{500 a_4}{a_1^2} b_1 \left( a_1 T_l - a_1 t_k + e^{-(T_l-t_k)a_1} - 1 \right) + 500 b_3 (t_k - T_l) +$$

$$+ \frac{500 b_2 a_2 a_4}{a_1^2 a_3^2 (a_1 - a_3)} \left( a_3^2 T_l a_1 - a_1^2 T_l a_3 + a_1^2 t_k a_3 - a_3^2 t_k a_1 + a_3^2 e^{-(T_l-t_k)a_1} - a_1^2 e^{-(T_l-t_k)a_3} + a_1^2 - a_3^2 \right);$$

$$L_1^{u_h}(T_h) = b_1 \int_{t_0}^{T_h} e^{(t_k-s)a_1} 500 ds + \frac{b_2 a_2}{a_3 - a_1} \int_{t_0}^{T_h} \left( e^{(t_k-s)a_3} - e^{(t_k-s)a_1} \right) 500 ds =$$

$$= \frac{500}{a_1} \left( b_1 \left( e^{(t_k-t_0)a_1} - e^{-(T_h-t_k)a_1} \right) - \frac{b_2 a_2 \left( a_3 e^{(t_k-t_0)a_1} - a_3 e^{-(T_h-t_k)a_1} + a_1 e^{-(T_h-t_k)a_3} - a_1 e^{(t_k-t_0)a_1} \right)}{(a_3 - a_1) a_3} \right);$$

$$L_2^{u_h}(T_h) = 500 \int_{t_0}^{T_h} e^{(t_k-s)a_3} ds = -\frac{500}{a_3} \left( e^{-(T_h-t_k)a_3} - e^{-(t_k-t_0)a_3} \right);$$

$$L_3^{u_h}(T_h) = \int_{t_0}^{T_h} \left( b_1 \frac{a_4 \left( e^{(t_k-s)a_1} - 1 \right)}{a_1} + b_2 \frac{a_2 a_4 \left( a_1 e^{(t_k-s)a_3} - a_3 e^{(t_k-s)a_1} - a_1 + a_3 \right)}{a_1 a_3 (a_3 - a_1)} + b_3 \right) 500 ds =$$

$$= \frac{500 a_4}{a_1^2} b_1 \left( a_1 t_0 - a_1 T_h + e^{(t_k-t_0)a_1} - e^{-(T_h-t_k)a_1} \right) + 500 b_3 (T_h - t_0) +$$

$$+ \frac{500 b_2 a_2 a_4}{a_1^2 a_3^2 (a_1 - a_3)} \left( a_1^2 a_3 (T_h - t_0) + a_3^2 a_1 (t_0 - T_h) + a_1^2 \left( e^{-(T_h-t_k)a_3} - e^{-(t_0-t_k)a_3} \right) - a_3^2 \left( e^{-(T_h-t_k)a_3} + e^{-(t_0-t_k)a_1} \right) \right).$$

Применительно к модели (6) получим следующие расчетные формулы:

$$L_1^{u_l}(T_l) = -680,96 e^{0,0002164(T_l-t_k)} + 532,12 + 148,84 e^{0,00002997(T_l-t_k)};$$

$$L_2^{u_l}(T_l) = -1,668 \cdot 10^7 \left( e^{0,00002997(T_l-t_k)} - 1 \right);$$

$$L_3^{u_l}(T_l) = -12,91 e^{0,0002164(T_l-t_k)} - 0,01319(T_l - t_k) + 20,377 e^{0,00002997(T_l-t_k)} - 7,465;$$

$$L_1^{u_h}(T_h) = -680,96 \left( e^{0,0002164(t_0-t_k)} - e^{0,0002164(T_h-t_k)} \right) + 148,84 \left( e^{0,00002997(t_0-t_k)} - e^{0,00002997(T_h-t_k)} \right);$$

$$L_2^{u_h}(T_h) = -1,668 \cdot 10^7 \left( e^{0,00002997(t_0-t_k)} - e^{0,00002997(T_h-t_k)} \right);$$

$$L_3^{u_h}(T_h) = -12,91 \left( e^{0,0002164(t_0-t_k)} - e^{0,0002164(T_h-t_k)} \right) - 0,01319(t_0 - T_h) +$$

$$+ 20,377 \left( e^{0,00002997(t_0-t_k)} - e^{0,00002997(T_h-t_k)} \right).$$

Области  $S_\Gamma, S_B$  и  $S_0$  ограничиваются поверхностями  $[L_1^{u_l}(T_l), L_2^{u_l}(T_l), L_3^{u_l}(T_l)]$  и  $[L_1^{u_h}(T_h), L_2^{u_h}(T_h), L_3^{u_h}(T_h)]$

при  $T_l \in [t_0; t_k], T_h \in [t_0; t_k]$ . При этом  $S_\Gamma$  ограничивается двумя поверхностями с учетом ограничения  $u(t) \in [0; 500]$ ;  $S_B$  ограничивается четырьмя поверхностями с учетом ограничений  $u(t) \in [0; 500]$  и  $u(t) \in (500; 700)$ ;  $S_0$  находится за границами областей  $S_\Gamma$  и  $S_B$ .

Алгоритм определения возможности существования решения ЗОУ включает следующие этапы.

1. Расчет значений синтезирующих переменных на основе массива исходных данных ЗОУ  $L_1(\mathbf{R}), L_2(\mathbf{R}), L_3(\mathbf{R})$  с использованием соотношений (8).
2. Рассмотрение сечения области существования решения ЗОУ в пространстве синтезирующих переменных с зафиксированным значением одной из координат, например  $L_3$ .
3. Определение времен переключения  $T_l$  и  $T_h$  с использованием соотношений (8).

4. Определение условий гарантированного существования решения ЗОУ: если система неравенств

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [L_1^{u_l}(T_l), L_1^{u_h}(T_h)] \leq L_1(R) \leq \\ \leq \max [L_1^{u_l}(T_l), L_1^{u_h}(T_h)] \\ \min [L_2^{u_l}(T_l), L_2^{u_h}(T_h)] \leq L_2(R) \leq \\ \leq \max [L_2^{u_l}(T_l), L_2^{u_h}(T_h)] \end{array} \right. \quad (9)$$

выполняется при  $u(t) \in [0; 500]$ , то решение ЗОУ гарантированно существует. При этом точка с координатами  $(L_1(\mathbf{R}), L_2(\mathbf{R}), L_3(\mathbf{R})) \in S_r$ .

5. Определение условий вероятного существования решения ЗОУ: если система неравенств (9) при  $u(t) \in [0; 500]$  не выполняется, но выполняется при  $u(t) \in [0; 700]$ , то имеется ненулевая вероятность существования решения ЗОУ. При этом точка с координатами  $(L_1(\mathbf{R}), L_2(\mathbf{R}), L_3(\mathbf{R})) \in S_B$ .

6. Если система неравенств (9) не выполняется при  $u(t) \in [0; 700]$ , то решения ЗОУ не существует. При этом точка с координатами  $(L_1(\mathbf{R}), L_2(\mathbf{R}), L_3(\mathbf{R})) \in S_o$ .

При анализе ЗОУ, помимо исследования условий существования решения задачи, не менее важным этапом является определение возможных видов функций ОУ и получение соотношений для расчета их параметров.

Рассмотрим получение видов функций ОУ для задачи (1)–(4) с помощью принципа максимума Л. С. Понтрягина. В качестве модели динамики (1) будем использовать модель динамического режима БСУ (6). Помимо этого, для дальнейшего анализа необходимо задать конкретный вид минимизируемого функционала (4). Для рассматриваемого промышленного объекта управление осуществляется подачей пара, т. е. критерием оптимальности с точки зрения энергосбережения будет являться функционал вида «минимум расхода топлива»

$$J_T = \int_{t_0}^{t_k} |u(t)| dt \rightarrow \min. \quad (10)$$

Учитывая вид критерия оптимальности (10) и модель динамики (6), гамильтониан запишется в следующей форме:

$$H = -|u(t)| + \psi_1(t)[a_1 z_1(t) + a_2 z_2(t) + b_1 u(t)] + \psi_2(t)[a_3 z_2(t) + b_2 u(t)] + \psi_3(t)[a_4 z_1(t) + b_3 u(t)].$$

Исходя из условия  $\frac{\partial \psi_i}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial z_i(t)}$ , получим

$$\psi_1(t) = \frac{c_2 e^{-a_1 t} - c_3 a_4}{a_1};$$

$$\psi_2(t) =$$

$$= \left( \frac{a_2}{a_1} \left( \frac{a_4}{a_3} c_3 e^{-a_3 t} + \frac{a_1}{a_3 - a_1} c_2 e^{(a_3 - a_1)t} \right) + c_1 \right) e^{-a_3 t};$$

$$\psi_3(t) = c_3, \quad (11)$$

где  $c_1, c_2, c_3$  — константы.

Выделив в гамильтониане слагаемые, зависящие от  $u(t)$ , и отбросив слагаемые, не зависящие от  $u(t)$ , получим выражение, которое необходимо максимизировать:

$$H_u = -|u(t)| + (\psi_1(t)b_1 + \psi_2(t)b_2 + \psi_3(t)b_3)u(t).$$

Введя на основании (11) дополнительное обозначение

$$\varphi(t) = \frac{c_2 e^{-a_1 t} a_1 - c_3 a_4 b_1}{a_1} + \left( \frac{a_2}{a_1} \left( \frac{a_4}{a_3} c_3 e^{-a_3 t} + \frac{a_1}{a_3 - a_1} c_2 e^{(a_3 - a_1)t} \right) + c_1 \right) \times e^{-a_3 t} b_2 + c_3 b_3,$$

получим

$$H_u = -|u(t)| + \varphi(t)u(t).$$

Данное выражение для гамильтониана принимает максимальное значение, если

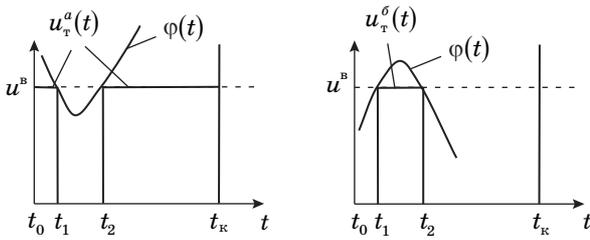
$$u(t) = u_T(t) = \begin{cases} u^B & \text{при } \varphi(t) \geq 1; \\ 0 & \text{при } |\varphi(t)| < 1; \\ u^H & \text{при } \varphi(t) < -1. \end{cases}$$

В рассматриваемом примере управляющее воздействие не может принимать отрицательные значения, а максимальная степень открытия парового клапана составляет 100 %, поэтому

$$u_T(t) = \begin{cases} 100 p(t) & \text{при } \varphi(t) \geq 1; \\ 0 & \text{при } |\varphi(t)| < 1. \end{cases}$$

После упрощения функция  $\varphi(t)$  примет вид

$$\varphi(t) = \left( b_1 - \frac{b_2 a_2}{a_3 - a_1} \right) c_2 e^{-a_1 t} + b_2 c_1 e^{-a_3 t} + \left( \frac{b_2 a_2 a_4}{a_1 a_3} - \frac{b_1 a_4}{a_1} + b_3 \right) c_3 = k_1 e^{-a_1 t} + k_2 e^{-a_3 t} + k_3.$$



■ **Рис. 2.** Основные виды функций оптимального управления

■ **Fig. 2.** Principal functions of optimal control

Функция  $\varphi(t)$  содержит две экспоненты и аддитивную составляющую, соответственно, она имеет не более одной точки экстремума. В зависимости от значений коэффициентов может быть два основных вида функций ОУ:

$$u_T^a(t) = \begin{cases} u^B & \text{при } t \in [t_0, t_1]; \\ 0 & \text{при } t \in [t_1, t_2]; \\ u^B & \text{при } t \in [t_2, t_k]; \end{cases}$$

$$u_T^\sigma(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \in [t_0, t_1]; \\ u^B & \text{при } t \in [t_1, t_2]; \\ 0 & \text{при } t \in [t_2, t_k]. \end{cases}$$

Данные виды функций графически показаны на рис. 2. Остальные виды функций ОУ будут являться вырожденными.

В обоих случаях имеется два неизвестных времени переключения  $t_1$  и  $t_2$ , которые рассчитываются с использованием трех уравнений синтезирующих переменных, т. е. система переопределена, что приводит к сужению области существования решения ЗОУ.

Для расширения области существования решения ЗОУ предлагается заменить критерий оптимальности (10) на функционал вида «минимум затрат энергии»

$$J_\varepsilon = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \rightarrow \min. \quad (12)$$

С точки зрения теории применение данного функционала в ЗОУ динамическими режимами БСУ требует дополнительного рассмотрения и обоснования. На практике виды функций ОУ, полученные для функционала (12), позволяют более плавно изменять режимы работы устройств управления, а также обеспечат расширение области существования решения ЗОУ.

Для критерия оптимальности (12) гамильтониан и часть гамильтониана, зависящая от управления, примут вид

$$H = -\frac{u^2(t)}{2} + \psi_1(t)b_1u(t) + \psi_2(t)b_2u(t) + \psi_3(t)b_3u(t) + \psi_1(t)[a_1z_1(t) + a_2z_2(t)] + \psi_2(t)a_3z_2(t) + \psi_3(t)a_4z_1(t);$$

$$H_u = -\frac{u(t)}{2} + \psi_1(t)b_1 + \psi_2(t)b_2 + \psi_3(t)b_3.$$

Исходя из условия экстремальности, в точке максимума

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial H_u}{\partial u} = 0,$$

управляющее воздействие примет вид

$$u(t) = u_\varepsilon(t) = \psi_1(t)b_1 + \psi_2(t)b_2 + \psi_3(t)b_3 = \left( b_1 - \frac{b_2a_2}{a_3 - a_1} \right) c_2 e^{-a_1 t} + b_2 c_1 e^{-a_3 t} + \left( \frac{b_2a_2a_4}{a_1a_3} - \frac{b_1a_4}{a_1} + b_3 \right) c_3.$$

Введя дополнительные обозначения, получим

$$u_\varepsilon(t) = d_1 e^{-a_1 t} + d_2 e^{-a_3 t} + d_3,$$

где  $d_1, d_2, d_3$  — параметры функции ОУ, определяемые при помощи формул (8).

Проведем сравнение рассмотренных видов функций ОУ  $u_T(t)$  и  $u_\varepsilon(t)$  на примере ЗОУ (1)–(4) с моделью (6) и следующими значениями компонентов массива исходных данных ЗОУ:  $t_0 = 0; t_k = 300; \mathbf{z}_0 = (z_1^0 = 80, z_2^0 = 76, z_3^0 = 105); \mathbf{z}_k = (z_1^k = 105, z_2^k = 77, z_3^k = 109)$ . Давление пара  $p(t)$  на протяжении всего интервала времени управления примем равным 5,5 атм.

В этом случае значения синтезирующих переменных будут равны

$$L_1(\mathbf{R}) = 33,31; L_2(\mathbf{R}) = 1,2 \cdot 10^5; L_3(\mathbf{R}) = 3,68.$$

Аналитические выражения для расчета управляющих воздействий  $u_T(t)$  и  $u_\varepsilon(t)$  примут вид

$$u_T(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 42; \\ 550 & \text{при } t \in [42, 261]; \\ 0 & \text{при } t > 261; \end{cases}$$

$$u_3(t) = \begin{cases} -9,57 \cdot 10^5 e^{0,00022t} + 7,11 \cdot 10^6 e^{0,00003t} - \\ -6,15 \cdot 10^6 \text{ при } t < 144; \\ 550 \text{ при } t \in [144, 153]; \\ -9,57 \cdot 10^5 e^{0,00022t} + 7,11 \cdot 10^6 e^{0,00003t} - \\ -6,15 \cdot 10^6 \text{ при } t > 153. \end{cases}$$

Значения функционалов расхода топлива и затрат энергии будут равны

$$J_T = J_3 \approx 1,2 \cdot 10^5.$$

Таким образом, управляющие воздействия, рассчитанные для различных видов функционалов, обеспечивают один и тот же расход пара. Однако практически для всех аналогичных исходных данных ЗОУ система уравнений для синтезирующих переменных — несовместна, и решить ЗОУ с управлением  $u_1(t)$  в ряде случаев не представляется возможным, в то время как для управления  $u_3(t)$  решение ЗОУ существует.

## Литература

1. Грибков А. Н., Куркин И. А. Идентификация математических моделей динамики барабанной сушильной установки на множестве состояний функционирования // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. 2014. № 52. С. 32–36.
2. Понтягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Физматгиз, 1969. — 384 с.
3. Муромцев Ю. Л., Ляпин Л. Н., Сатина Е. В. Метод синтезирующих переменных при оптимальном управлении линейными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 1993. № 11–12. С. 19–25.

## Заключение

В статье рассмотрены особенности анализа задачи энергосберегающего управления динамическими режимами БСУ, применяемой для сушки послеспиртовой барды. Приведен алгоритм исследования области существования решения ЗОУ, получены условия гарантированно и возможного существования решения ЗОУ. Определены виды и соотношения для расчета параметров функций ОУ по критериям «минимум расхода топлива» и «минимум затрат энергии». По результатам полного анализа задачи энергосберегающего управления разработаны алгоритмы оперативного синтеза управляющих воздействий для системы энергосберегающего управления динамическими режимами БСУ [5].

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-08-00457-а.

4. Грибков А. Н., Артемова С. В., Куркин И. А., Подхватилин П. А. Метод исследования области существования решения задачи оптимального управления при наличии случайных возмущений // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2012. Т. 18. № 2. С. 345–349.
5. Грибков А. Н., Куркин И. А. Информационно-управляющая система динамическими режимами сушильной установки // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах: тез. докл. 2-й Междунар. конф. с элементами научной школы, Тамбов, 22–24 апреля 2015 г. Тамбов, 2015. С. 77–78.

UDC 681.5.011

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.35

## Complete Analysis of Energy-Saving Control Problem for Dynamic Modes of a Tumble Dryer

Muromtsev D. Yu.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, creams@crems.jesby.tstu.ru

Gribkov A. N.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, GribkovAlexey@yandex.ru

Shamkin V. N.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, shamkin-v@mail.ru

Kurkin I. A.<sup>b</sup>, PhD, Tech., allodsl@mail.ru

<sup>a</sup>Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya St., 392000, Tambov, Russian Federation

<sup>b</sup>LLC «Analytical technologies», 53v, Novaya St., 390023, Ryazan, Russian Federation

**Introduction:** Development and practical application of energy-saving control systems for complex technological objects is a pressing problem because it allows you not only to improve the product quality but also to significantly reduce the energy costs. One of the most difficult stages in the development of an energy-saving control system is developing its algorithmic support, as the models and algorithms should take into account all the specific features of the controlled object and provide the required characteristics of accuracy and performance. **Purpose:** We analyze the energy-saving control problem in order to determine the conditions under which it can have a solution, and to specify the possible types and parameters of the optimal control functions. **Results:** A complete analysis of the energy-saving control problem is presented for the dynamic modes of a tumble dryer. The energy-saving control problem is formalized for the dynamic modes of the technological process of drying DDGS. An algorithm is shown which finds out whether the optimal control problem can have a solution. The types are defined for the functions of optimum control, along with the ratios for calculating their

parameters for the functionals “minimum fuel consumption” and “minimum energy expenditure”. The comparison of the obtained functions has shown that they provide the same value of the functional, but in some cases “minimum energy expenditure” should be preferred. **Practical relevance:** The obtained results allow you to develop operational algorithms of synthesizing control actions for energy-saving dynamic mode control system of a tumble dryer.

**Keywords** — Energy-Saving Control System, Algorithmic Support, Optimal Control, Tumble Dryer.

## References

1. Gribkov A. N., Kurkin I. A. Identification of Dynamic Mathematical Models for Tumble Dryer on a Set of Operation States. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki*, Universitet im. V. I. Vernadskogo, 2014, no. 52, pp. 32–36 (In Russian).
2. Pontriagin L. S., Boltianskii V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical Theory of Optimal Processes]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1969. 384 p. (In Russian).
3. Muromtsev Iu. L., Liapin L. N., Satina E. V. Method of Synthesizing Variables in the Optimal Control Linear Objects. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 1993, no. 11–12, pp. 19–25 (In Russian).
4. Gribkov A. N., Artemova S. V., Kurkin I. A., Podkhvatilin P. A. Research Method for Existence Domain of a Solution to an Optimal Control Problem under Random Perturbances. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 345–349 (In Russian).
5. Gribkov A. N., Kurkin I. A. Information-Control System for Dynamic Modes of the Dryer. *Tezisy докладov 2-i Mezhdunarodnoi konferentsii s elementami nauchnoi shkoly “Aktual'nye problemy energosberezheniia i energoeffektivnosti v tekhnicheskikh sistemakh”* [Abstracts of the 2nd Intern. Conf. with Elements of the Scientific School “Actual Problems of Energy Saving and Energy Efficiency in Technical Systems”], Tambov, 2015, pp. 77–78 (In Russian).

**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](mailto:press@crp.spb.ru), [zajavka@crp.spb.ru](mailto: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](mailto:export@periodicals.ru), сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: [podpiska@delpress.ru](mailto: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](mailto: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>

«ВТЛ» (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/>

[journal/n/informatsionno-upravlyayushiesistemy](http://journal/n/informatsionno-upravlyayushiesistemy)).

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАСТРАИВАЕМОЙ ОЧЕРЕДЬЮ ИЗ ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ FIFO-ОЧЕРЕДЕЙ В ОБЩЕЙ ПАМЯТИ

А. М. Сазонов<sup>а</sup>, магистрант

А. В. Соколов<sup>б</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор

<sup>а</sup>Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, РФ

<sup>б</sup>Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра  
Российской академии наук, Петрозаводск, РФ

**Введение:** при разработке многих аппаратных и программных приложений применяют структуру данных «настраиваемая очередь» (Custom Queuing). В различных сетевых устройствах и встроенных операционных системах настраиваемая очередь представлена в виде нескольких последовательных циклических FIFO-очереди, расположенных в общем пространстве памяти. **Цель:** построить и проанализировать математическую модель процесса работы с настраиваемой очередью, представленной в виде двух последовательных циклических FIFO-очереди, в целях повышения стабильности работы системы. **Результаты:** построена математическая модель процесса работы с настраиваемой очередью, в которой на каждом шаге дискретного времени происходят операции включения и исключения элементов в одну из очередей. Математическая модель представлена в виде случайного блуждания по двумерной целочисленной решетке, для которой строится соответствующая регулярная однородная цепь Маркова. Критерием оптимальности является минимальная средняя доля потерянных при переполнении элементов очередей. Проведены численные эксперименты, основывающиеся на теоретических данных. **Практическая значимость:** с помощью разработанной модели можно найти оптимальное назначение весов каждой FIFO-очереди для повышения стабильности работы системы. Предложенные модели, алгоритмы и разработанный программный комплекс могут применяться при проектировании сетевых устройств, например маршрутизаторов, где потери пакетов являются допустимой, но нежелательной ситуацией. Назначая веса для очередей оптимально, мы теряем меньше пакетов, и, как следствие, данные доставляются быстрее.

**Ключевые слова** — структуры данных, настраиваемая очередь (Custom Queue), случайные блуждания, регулярные цепи Маркова.

## Введение

Во многих приложениях, например при разработке различных сетевых устройств и встроенных операционных систем, требуется работа с несколькими очередями, расположенными в общем пространстве памяти. Механизм страничной виртуальной памяти здесь не используется, и вся работа происходит в нескольких пулах оперативной памяти. Существует несколько дисциплин обслуживания очередей в сетевых устройствах: FIFO, приоритетные, настраиваемые и др. Существуют и комбинированные схемы работы с очередями, например, одна очередь приоритетная, а остальные обслуживаются по схеме настраиваемых очередей.

Для представления FIFO-очереди применяют различные программные или аппаратные решения [1–5].

Модели последовательного, связанного и страничного способов представления нескольких FIFO-очереди в памяти одного уровня описаны в работах [6–12]; решаются задачи оптимального управления приоритетными очередями [13] и решается задача оптимального разбиения общей памяти для настраиваемой очереди, представ-

ленной в виде двух очередей в случае их последовательного циклического представления [14].

В этих моделях предполагается, что на каждом шаге дискретного времени происходят некоторые операции со структурами данных (с заданными вероятностями). Так как время выполнения операций не случайная величина, а константа, фиксированным является и шаг времени. Первоначально такие модели в виде случайного блуждания в треугольнике [15–19] были построены для решения задачи анализа процесса работы с двумя стеками, растущими навстречу друг другу [4].

## Обзор некоторых методов работы с очередями в сетевых устройствах

Одна из распространенных стратегий обслуживания — это настраиваемые очереди (Custom Queuing [3]), или взвешенные очереди в другой терминологии [2]. Механизм настраиваемых очередей разработан для того, чтобы можно было предоставить всем классам трафика какой-то минимум пропускной способности. Под весом данного класса понимается процент предоставляемой классу трафика пропускной способности

от полной пропускной способности выходного интерфейса.

При взвешенном обслуживании, так же, как и при приоритетном, трафик делится на несколько классов, и для каждого класса ведется отдельная очередь пакетов. Но каждой очереди назначается не приоритет, а доля пропускной способности ресурса, предоставляемая данному классу трафика при его перегрузках. Для входного потока таким ресурсом может быть процессор, а для выходного — выходной интерфейс. Custom Queuing обрабатывает трафик, ориентируясь на количество пакетов или байтов, которые надо отправить. Очереди обслуживаются по алгоритму round-robin — часть пакетов обрабатывается и пересылается для каждой очереди.

В данной работе мы предлагаем математическую модель и решаем задачу нахождения оптимального назначения весов каждой FIFO-очереди для повышения стабильности работы системы.

На каждом шаге дискретного времени происходят операции включения или исключения элементов в одну из очередей с заданными вероятностями. Исключение элементов происходит одновременно из обеих очередей во время так называемого цикла просмотра очередей. Количество исключаемых элементов из первой очереди —  $c_1$ , из второй —  $c_2$ . Заметим, что в этой задаче мы не можем выбирать параметры  $c_1$  и  $c_2$  произвольно, так как они зависят от цикла просмотра очередей в рассматриваемом сетевом устройстве  $t$  и скорости выходного трафика  $v$  ( $c_1 + c_2 = vt$ ). Например, если  $t = 2$  с, а  $v = 100$  Мбит/с, то  $c_1 + c_2 = 200$  Мбит. Это значит, что в зависимости от вероятностных характеристик очередей мы можем менять веса очередей, но их сумма определяется характеристиками сети и устройства. На практике в большинстве сетевых протоколов данные выбираются из очереди пакетами, а не битами, и реальное распределение ресурса между классами трафика несколько отличается от планируемого. Чем больше время цикла, тем точнее соблюдаются требуемые веса классов трафика. Но, с другой стороны, большой цикл приводит к большим задержкам времени нахождения пакетов в сетевом устройстве. Поэтому при выборе времени цикла нужно удерживать баланс между точностью соблюдения весов классов и стремлением к уменьшению задержки.

В данной статье мы рассматриваем модель настраиваемой очереди для двух очередей, входящих в настраиваемую очередь, и считаем, что пакеты (элементы очередей) имеют одинаковую длину. На практике существуют сетевые протоколы, например, многие годы широко использовалась в компьютерных сетях технология АТМ, в которых длина пакета фиксирована. В АТМ она была равна 53 Б. Такие размеры позволяли сетям АТМ качественно передавать видео- и аудиотра-

фики. Причины снижения популярности этой технологии заключены в ее сложности, влиянии конкурирующих технологий и др. [2]. Можно привести много аргументов в пользу применения пакетов фиксированной или переменной длины в компьютерных сетях. Так как история развития компьютерных сетей имеет относительно небольшой период, трудно предсказать, какие длины пакетов будут использоваться в будущем, и сейчас представляется, что нужно анализировать оба этих подхода к выбору длин пакетов.

Построение моделей, аналогичных приведенной в данной статье, в случае пакетов разных длин будет существенно сложнее. В работах, где близкие к предлагаемой модели строятся на основе теории массового обслуживания, обычно также рассматриваются пакеты фиксированной длины [20–22]. Можно выделить работу [23], где строится модель для пакетов случайной длины, но задачи оптимизации не рассматриваются. Пакеты разных длин могут использоваться, например, в случае последовательного циклического представления FIFO-очереди, но потребуются некоторые изменения метода представления, так как при достижении конца буфера, выделенного для очереди, нужно будет предусмотреть механизм, который позволит выделить для нового пакета достаточный блок свободной памяти в начале буфера.

Модели систем с групповым поступлением заявок не являются моделями работы с очередями с пакетами разных длин, так как в этих моделях группы заявок, принятые в очередь для ожидания обслуживания, поступают на прибор в порядке поступления, а на обслуживание заявка из группы выбирается случайным образом. Модели работы с очередями с пакетами разных длин должны, в отличие от моделей систем с групповым поступлением заявок, удалять из очереди пакеты переменной длины целиком. В моделях процесса буферизации данных в потоковых одноранговых сетях под порцией данных понимается минимальный неделимый фрагмент потоковых данных фиксированного размера от 16 до 4096 кБ в зависимости от разновидности протокола потоковой сети Р2Р.

Отметим также, что случай двух очередей важен не только как первый шаг к построению общей модели, но у него есть и свое независимое значение.

Так, в работе [2, с. 476] приводятся следующие пояснения по поводу возможности разбиения всего трафика на две очереди: «В приложении G стандарта 802.1 D-2004 даются рекомендации по разделению всего трафика локальных сетей на семь классов. <...>

Коммутатор обычно поддерживает некоторое максимальное количество очередей, которое мо-

жет оказаться меньше, чем требуемое число классов трафика. В этой ситуации несколько классов будут обслуживаться одной очередью, то есть фактически сольются в один класс. Стандарт 802.1D-2004 дает рекомендации в отношении того, какие классы трафика нужно реализовывать в сети в условиях ограниченного количества очередей в коммутаторах.

При существовании только одной очереди в сети все классы трафика обслуживаются этой очередью. <...>

Две очереди дают возможность дифференцированно обслуживать группы классов трафика — менее требовательные классы Bk, BE и EE в одной очереди, а более требовательные классы VO, CL, VI, NC — в другой.

Дальнейшее увеличение количества очередей позволяет более дифференцированно обслуживать трафик, вплоть до рекомендуемых семи классов».

Здесь также можно сослаться на опыт в области построения многоядерных процессоров. Среди многоядерных архитектур есть такие, в которых отсутствует кэш-память. Для примера, в архитектуре AsAP-II каждое ядро имеет два FIFO-буфера, а в архитектуре SEAforth — два стека (для хранения данных и адресов возврата) [5]. Очереди и стеки реализованы циклически и отделены друг от друга, также допускается потеря элементов при переполнении.

Эти процессоры используются в системах, где потеря элементов очередей, как и в сетевых приложениях, является допустимой, но нежелательной ситуацией (например, цифровая обработка сигналов, работа с мультимедийными приложениями и др.). Настраиваемые очереди могут быть реализованы аппаратно, по такому же принципу. Тогда важной задачей является исследование оптимального управления двумя очередями. В случае произвольного количества очередей можно конструировать требуемые микросхемы из микросхем, состоящих из двух очередей.

В качестве критерия оптимальности рассмотрена минимальная средняя доля потерянных при переполнении элементов на бесконечном времени работы. Этот критерий оптимальности стоит рассматривать, если переполнение очереди является стандартной ситуацией. Когда размер очереди превышает размер предоставленной ей памяти, все поступающие в нее элементы отбрасываются до тех пор, пока не появится свободный участок памяти (этот участок появится только после исключения элемента из очереди). Сетевые маршрутизаторы [2, 3] работают по этой схеме. Такие потери элементов приводят к нежелательному результату. Например, в некоторых сетевых протоколах отброшенные пакеты будут посылаться снова, что приведет к замедлению работы

системы. Поэтому число таких ситуаций необходимо свести к минимуму.

В данной работе целью ставится минимизация вероятности потерь в системе в целом. Если же нужно оптимизировать показатели каждого класса трафика в отдельности с учетом требований QoS, то критерий оптимальности в модели следует изменить (мы сейчас предполагаем, что требования QoS касаются только потерь данных). Нужно будет учитывать средние доли потерянных пакетов при переполнении размера очереди каждого класса трафика и минимизировать потери с учетом весов, заявленных требованиями QoS.

Например, во второй строке таблицы (см. ниже)  $P_{loss} = 0,0171815474618332$ . Это означает, что из тысячи пакетов в среднем будет теряться 17 пакетов, и нам не важно, пакеты какого класса трафика теряются. Другими словами, мы считаем, что требования QoS установлены таким образом, что показатели важности всех классов трафика равны. Если же важность первого класса трафика в два раза больше, то мы должны оптимизировать обработку пакетов так, чтобы из потерянных 17 пакетов шесть пакетов были первого класса, а 11 пакетов — второго. То есть пакеты первого класса будут теряться примерно в два раза реже. Модель и алгоритм для решения задачи с таким критерием останутся такими же. Также нужно будет решать задачу целочисленного нелинейного программирования, где функция критерия оптимальности задается алгоритмически. Эта задача в наших работах решается численно, а аналитические результаты удалось получить только в некоторых случаях задач для FIFO-очередей [7, 10].

В будущем будет интересно рассмотреть задачи оптимального управления памятью для настраиваемой очереди для такого критерия, а также задачи, когда в качестве управляемого параметра выступают не только доли пропускной способности ресурса, предоставляемого каждому классу трафика при его перегрузках, но и размеры очередей каждого класса трафика, как это было в задачах оптимального управления несколькими FIFO-очередями в общей памяти [6–12].

### Математическая модель

Пусть в памяти размера  $n$  единиц мы работаем с двумя настраиваемыми очередями и каждой очереди выделен размер памяти  $k = n/2$ . Будем искать такие  $c_1, c_2$ , чтобы вероятность потери в стационарном режиме в обеих очередях  $P_{loss}$  была минимальной.

Пусть  $p_1$  и  $p_2$  — вероятности включения элемента в первую и вторую очереди соответственно,  $q$  — вероятность исключения элементов из первой и второй очередей.

Поскольку построенная на основе такой постановки задачи марковская цепь не будет являться регулярной и однородной, шаги цикла просмотра очередей, во время которого происходят исключения элементов, объединяем в один, а также вводим вероятность операции, не изменяющей длины очередей (например, чтение),  $r$ . Соответственно:  $p_1 + p_2 + q + r = 1$ .

Тогда состояние на каждом шаге определяется наступлением одного из следующих событий:

— включения в первую очередь с вероятностью  $p_1$ ;

— включения во вторую очередь с вероятностью  $p_2$ ;

— исключения из первой очереди  $c_1$  и из второй очереди  $c_2$  элементов с вероятностью  $q$ ;

— операции, не изменяющей длину очереди, с вероятностью  $r$ ,

— где сумма всех вероятностей равна 1.

Предполагается, что в очередях хранятся данные фиксированного размера. При исключении информации из пустой очереди не происходит завершения работы.

Обозначим через  $x$  и  $y$  текущие длины очередей. Пусть  $(x, y)$  — текущее состояние процесса, тогда блуждание по прямоугольной решетке можно описать следующим образом:

$$(x, y) \xrightarrow{r} (x, y);$$

$$(x, y) \xrightarrow{p_1} (x', y') = \begin{cases} (x+1, y), & x < k \\ (x, y), & x = k \end{cases};$$

$$(x, y) \xrightarrow{p_2} (x', y') = \begin{cases} (x, y+1), & y < k \\ (x, y), & y = k \end{cases};$$

$$(x, y) \xrightarrow{q} (x', y') = \begin{cases} (x - c_1, y - c_2), & c_1 + 1 \leq x \leq k, c_2 + 1 \leq y \leq k \\ (0, y - c_2 - (c_1 - x)), & x \leq c_1, c_1 + c_2 - x + 1 \leq y \leq k \\ (x - c_1 - (c_2 - y), 0), & c_1 + c_2 - y + 1 \leq x \leq k, y \leq c_2 \\ (0, 0), & \text{иначе} \end{cases}$$

Случайное блуждание рассматриваем в виде регулярной конечной цепи Маркова с переходной матрицей  $\mathbf{P}$ .

Нумерацию начинаем с нуля, общее количество состояний в цепи будет

$$N = (k+1)(k+1).$$

Далее, согласно введенной нумерации состояний и вышеуказанной схеме переходов, составляем матрицу переходных вероятностей  $\mathbf{P}$ . В данном

исследовании был установлен вид матрицы  $\mathbf{P}$  для произвольных значений параметра ОВ  $C_1, C_2$ . При составлении матрицы для каждого конкретного состояния определяем те состояния, в которые процесс переходит при выполнении допустимых операций, и вычисляем соответствующие вероятности переходов. Данный процесс был автоматизирован с помощью программы на языке C++.

Следующим шагом является решение уравнения  $\alpha\mathbf{P} = \alpha$ , где  $\alpha$  — предельный вектор для полученной марковской цепи.

Элемент вектора  $\alpha_i$  — это средняя доля времени, которое процесс проводит в состоянии  $i$  [24]. Поскольку моменты прихода не зависят от числа элементов в очереди, для вычисления предельной вероятности потери нужно просуммировать элементы вектора  $\alpha$ , соответствующие состояниям, когда первая очередь максимально заполнена, умножив их на  $p_1$ , и элементы вектора  $\alpha$ , соответствующие состояниям, когда вторая очередь максимально заполнена, умножив их на  $p_2$ . При введенной нумерации это будут элементы с номерами  $k + (k + 1)j$ ,  $j = 0, \dots, k$  и последние  $k$  элементов вектора.

Оценка сложности алгоритма:

$$O(((k+1)(k+1))^3).$$

*Некоторые примеры численного анализа.* В таблице приведены оптимальные значения  $c_1, c_2$  для  $n = 40, v = 8, t = 1$  при различных вероятностных характеристиках.

Исходя из численного анализа, можно отметить, что из очереди с большим значением вероятности прихода  $p_i$  во время цикла просмотра оп-

- Оптимальные значения  $c_1, c_2$
- Optimal values  $c_1, c_2$

Вероятностные характеристики				$c_1$	$c_2$	$P_{loss}$
$q$	$p_1$	$p_2$	$r$			
0,1	0,2	0,1	0,6	7	1	0,0000845502396969
0,1	0,2	0,4	0,3	2	6	0,0171815474618332
0,1	0,2	0,5	0,2	1	7	0,0463256286690630
0,1	0,3	0,2	0,4	6	2	0,0041560682040080
0,1	0,3	0,3	0,3	4	4	0,0144698437336146
0,1	0,3	0,4	0,2	3	5	0,0415428932630922
0,1	0,3	0,5	0,1	3	5	0,0895292282853496
0,1	0,4	0,1	0,4	7	1	0,0095622291753297
0,1	0,4	0,3	0,2	5	3	0,0415428932630900
0,2	0,2	0,4	0,2	1	7	0,0001691004793931
0,2	0,3	0,4	0,1	3	5	0,0003374480688416
0,3	0,1	0,2	0,4	1	7	0,000000022263685
0,3	0,3	0,2	0,2	7	1	0,0000003189925640
0,3	0,3	0,3	0,1	4	4	0,0000009211925787

тимально исключать больше элементов (т. е. соответствующее значение  $c_i$  большее). Кроме того, с увеличением вероятности исключения увеличивается разница между значениями  $c_1$  и  $c_2$ , поскольку вероятность потери в очереди с меньшей вероятностью прихода снизится за счет более частого исключения элементов. Данные выводы совпадают с интуитивными предположениями.

## Заключение

В статье предложена и проанализирована математическая модель, которая описывает способ управления работой двумя параллельными настраиваемыми очередями в общей памяти. Данная модель может быть полезна при разработке различных технических систем, в архитектуре которых необходим именно такой способ управления.

Несмотря на то, что в настоящее время память становится все больше и дешевле, есть устройства, где ее размер ограничен архитектурой, и имеющийся ресурс необходимо использовать эффективно. Примером могут служить различные

сетевые устройства, такие как маршрутизаторы. В них размер памяти ограничен, поскольку при больших размерах очередей значительно увеличивается время обработки элементов. Вследствие этого возникает проблема: сетевые протоколы устроены так, что при большом времени обработки пакеты считаются потерянными, и их посылают снова, тем самым увеличивая загрузку сети [25]. Механизм настраиваемых очередей используется в маршрутизаторах системы Cisco [3].

Кроме того, к устройствам с ограниченным размером памяти относятся микросхемы и микропроцессоры, которые используются в системах, где потеря элементов очередей является допустимой, но нежелательной ситуацией (например, цифровая обработка сигналов или работа с мультимедийными приложениями [5]).

Приносим благодарность рецензентам статьи за полезные критические замечания, которые, как мы надеемся, приведут к решению новых задач оптимизации показателей каждого класса трафика в отдельности с учетом требований QoS.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-01-03404-а.

## Литература

1. Sedgewick R. Algorithms in C++. Parts 1–4. — Addison-Wesley Professional, 1998. — 752 p.
2. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. — СПб.: Питер, 2010. — 944 с.
3. Bollapragada V., Murphy C., White R. Inside Cisco IOS Software Architecture. — Cisco Press, 2000. — 240 p.
4. Knuth D. The Art of Computer Programming. Vol. 1. — Addison-Wesley Professional, 1997. — 672 p.
5. Калачев А. В. Многоядерные процессоры. — М.: БИНОМ, 2014. — 247 с.
6. Соколов А. В. Математические модели и алгоритмы оптимального управления динамическими структурами данных. — Петрозаводск: ПетрГУ, 2002. — 216 с.
7. Аксенова Е. А., Драц А. В., Соколов А. В. Оптимальное управление  $n$  FIFO-очередями на бесконечном времени // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6. С. 46–54.
8. Aksenova E. A., Sokolov A. V. The Optimal Implementation of Two FIFO-Queues in Single-Level Memory // Applied Mathematics. 2011. Vol. 2. P. 1297–1302.
9. Sokolov A. V., Drac A. V. The Linked List Representation of  $n$  LIFO-Stacks and/or FIFO-Queues in the Single-Level Memory // Information Processing Letters. 2013. Vol. 13. P. 832–835.
10. Соколов А. В., Сазонов А. М., Морозов Е. В., Некрасова Р. С., Разумчик Р. В. Математические модели и алгоритмы оптимального управления FIFO-очередями в общей памяти // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Математическое моделирование и информационные технологии. 2016. № 8. С. 98–107. doi:10.17076/mat396
11. Соколов А. В., Барковский Е. А. Оптимальное управление двумя параллельными FIFO-очередями на бесконечном времени // Информационно-управляющие системы. 2015. № 5. С. 65–71. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.65
12. Sokolov A. V., Barkovsky E. A. Some Problems of Optimal Control of Two Parallel FIFO-queues // International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics: Proc. 12th Intern. Conf., Rhodes, 18–22 Sept. 2014. AIP Publishing, 2015. Vol. 1648. P. 520003.
13. Драц А. В., Соколов А. В. Оптимальное управление приоритетной очередью в памяти одного уровня // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 2. С. 103–110.
14. Барковский Е. А. Оптимальное управление двумя очередями, работающими по принципу настраиваемых очередей // Стохастическая оптимизация в информатике. 2016. Т. 12. Вып. 2. С. 1–14. http://www.math.spbu.ru/user/gran/optstoch.htm
15. Соколов А. В. О распределении памяти для двух стеков // Автоматизация эксперимента и обработки данных. — Петрозаводск: Изд-во Карельского филиала АН СССР, 1980. — С. 65–71.
16. Yao A. C. An Analysis of a Memory Allocation Scheme for Implementing Stacks // SIAM Journal on Computing. 1981. Vol. 10. P. 398–403.
17. Flajolet P. The Evolution of Two Stacks in Bounded Space and Random Walks in a Triangle // Lecture Notes in Computer Science. 1986. Vol. 223. P. 325–340.

18. Louchard G., Schott R., Tolley M., Zimmermann P. Random Walks, Heat Equation and Distributed Algorithms // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1994. N 53. P. 243–274.
19. Maier R. S. Colliding Stacks: A Large Deviations Analysis // *Random Structures and Algorithms*. 1991. N 2. P. 379–421.
20. Ozel O., Uysal-Biyikoglu E., and Girici T. Optimal Buffer Partitioning on a Multiuser Wireless Link// *Proc. of Information Theory and Applications Workshop*, UCSD, San Diego, CA, Jan. 31–Feb. 5, 2010. doi:10.1109/ITA.2010.5454079
21. Гайдамака Ю. В., Самуйлов А. К. Анализ стратегий заполнения буфера обслуживания пользователя при предоставлении услуги потокового видео в одноранговой сети // *Т-Comm — Телекоммуникации и Транспорт*. 2013. № 11. С. 77–81.
22. Gaidamaka Yu., Shorgin S., Samouylov K., Etezov Sh. Polling System with Threshold Control for Modeling of SIP Server under Overload / J. Swiatek et al. (Eds.) // *Advances in Systems Science, AISC 240*. 2014. P. 97–107. doi:10.1007/978-3-319-01857-7\_10
23. Morozov E., Nekrasova R., Potakhina L., Tikhonenko O. Asymptotic Analysis of Queueing Systems with Finite Buffer Space // *Communications in Computer and Information Science: Proc. 21st Intern. Conf.*, CN 2014, Brunów, Poland, June 23–27, 2014. Vol. 431. P. 223–232.
24. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова. — М.: Наука, 1970. — 272 с.
25. Танненбаум Э., Узеролл В. Компьютерные сети. 5-е изд. — СПб.: Питер, 2012. — 960 с.

UDC 004.942

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.44

**Mathematical Model of Optimal Memory Management for Custom Queue of Two Consecutive Cyclic FIFOs in Shared Memory**

Sazonov A. M.<sup>a</sup>, Master Student, sazontb@mail.ru

Sokolov A. V.<sup>b</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, avs@krc.karelia.ru

<sup>a</sup>Petrozavodsk State University, 33, Lenin St., 185910, Petrozavodsk, Russian Federation

<sup>b</sup>Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences, 11, Pushkinskaya St., 185910, Petrozavodsk, Russian Federation

**Introduction:** Custom queue is a data structure used in many hardware and software applications. In various network devices and embedded operating systems, a custom queue is implemented as several successive cyclic FIFO queues located in a shared memory space. **Purpose:** In order to increase the system stability, we need to build and analyze a mathematical model of the custom queue operation process, represented as two consecutive cyclic FIFO queues. **Results:** A mathematical model has been built for a custom queue. At each step of discrete time, it performs operations of element insertion into and deletion from one of the queues. The mathematical model is a random walk on a two-dimensional integer lattice with reflecting screens, i.e. we deal with a regular uniform Markov chain. The optimality criterion is the lowest average fraction of the queue elements lost due to overflow. Numerical experiments based on theoretical data have been performed. **Practical relevance:** Using the developed model, you can find the optimal assignment of weights for each FIFO queue and increase the system stability. The proposed models, algorithms and software can be used in the design of network devices like routers where a packet loss is enabled but unwanted. When weights are assigned to the queues in the optimal way, you lose fewer packets, and, consequently, data is delivered quicker.

**Keywords** — Data Structures, Custom Queue, Random Walks, Regular Markov Chain.

**References**

- Sedgewick R. *Algorithms in C++*. Parts 1–4. Addison-Wesley Professional, 1998. 752 p.
- Olifer V. G., Olifer N. A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Networks. Principles, Technologies, Protocols]. 4th ed. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2010. 944 p.
- Bollapragada V., Murphy C., White R. *Inside Cisco IOS Software Architecture*. Cisco Press, 2000. 240 p.
- Knuth D. *The Art of Computer Programming*. Vol. 1. Addison-Wesley Professional, 1997. 672 p.
- Kalachev A. V. *Mnogojadernye protsessory* [Multicore Architectures]. Moscow, BINOM Publ., 2014. 247 p. (In Russian).
- Sokolov A. V. *Matematicheskie modeli i algoritmy optimal'nogo upravleniya dinamicheskimi strukturami dannykh* [Mathematical Models and Algorithms of Optimal Control of Dynamic Data Structures]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2002. 216 p. (In Russian).
- Aksenova E. A., Drac A. V., Sokolov A. V. Optimal Control of the N FIFO-Queues for Infinity Time. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2009, no. 6, pp. 46–54 (In Russian).
- Aksenova E. A., Sokolov A. V. The Optimal Implementation of Two FIFO-Queues in Single-Level Memory. *Applied Mathematics*, 2011, vol. 2, pp. 1297–1302.
- Sokolov A. V., Drac A. V. The Linked List Representation of n LIFO-Stacks and/or FIFO-Queues in the Single-Level Memory. *Information Processing Letters*, 2013, vol. 13, pp. 832–835.
- Sokolov A. V., Sazonov A. M., Morozov E. V., Nekrasova R. S., Razumchik R. V. Mathematical Models and Algorithms for the Optimal Control of FIFO-Queues in Shared Memory. *Trudy KarNTs RAN. Ser. Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii* [Proc. of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences. Ser. Mathematical Modeling and Information Technology], 2016, no. 8, pp. 98–107 (In Russian). doi:10.17076/mat396
- Barkovsky E. A., Sokolov A. V. Optimal Control of Two Parallel FIFO Queues on an Infinite Time. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 5, pp. 65–71 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.65
- Sokolov A. V., Barkovsky E. A. Some Problems of Optimal Control of Two Parallel FIFO-queues. *Proc. 12th Intern.*

- Conf. Numerical Analysis and Applied Mathematics*”, AIP Publishing, 2015, vol. 1648, pp. 520003.
13. Drac A. V., Sokolov A. V. Optimum Control of Queue with Prioritys in one Level Memory. *Trudy KarNC RAN*, 2011, no. 2, pp. 103–110 (In Russian).
  14. Barkovsky E. A. Optimal Control of two Custom Queues. *Stokhasticheskaia optimizatsiia v informatike*, 2016, vol. 12, iss. 2, pp. 1–14 (In Russian).
  15. Sokolov A. V. About Memory Distribution for Two Stacks. In: *Avtomatizatsiia eksperimenta i obrabotki dannykh*. Petrozavodsk, Karelskii filial AN SSSR Publ., 1980. Pp. 65–71 (In Russian).
  16. Yao A. C. An Analysis of a Memory Allocation Scheme for Implementing Stacks. *SIAM Journal on Computing*, 1981, vol. 10, pp. 398–403.
  17. Flajolet P. The Evolution of Two Stacks in Bounded Space and Random Walks in a Triangle. *Lecture Notes in Computer Science*, 1986, vol. 223, pp. 325–340.
  18. Louchard G., Schott R., Tolley M., Zimmermann P. Random Walks, Heat Equation and Distributed Algorithms. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1994, no. 53, pp. 243–274.
  19. Maier R. S. Colliding Stacks: A Large Deviations Analysis. *Random Structures and Algorithms*, 1991, no. 2, pp. 379–421.
  20. Ozel O., Uysal-Biyikoglu E., and Girici T. Optimal Buffer Partitioning on a Multiuser Wireless Link. *Proc. of Information Theory and Applications Workshop*, UCSD, San Diego, CA, Jan. 31–Feb. 5, 2010. doi:10.1109/ITA.2010.5454079
  21. Gaidamaka Yu., Samouylov K. Analysis of Strategies to Fill the user Equipment Buffer when Providing a Streaming Video Service in a Peer-To-Peer Network. *T-Comm — Telekommunikatsii i Transport*, 2013, no. 11, pp. 77–81 (In Russian).
  22. Gaidamaka Yu., Shorgin S., Samouylov K., Etezov Sh. Polling System with Threshold Control for Modeling of SIP Server under Overload. J. Swiatek et al. (Eds.). *Advances in Systems Science*, AISC 240, Springer Int. Publishing Switzerland, 2014, pp. 97–107. doi:10.1007/978-3-319-01857-7\_10
  23. Morozov E., Nekrasova R., Potakhina L., Tikhonenko O. Asymptotic Analysis of Queueing Systems with Finite Buffer Space. *Proc. of 21st Intern. Conf. “Communications in Computer and Information Science”*, CN 2014, Brunów, Poland, June 23–27, 2014, vol. 431, pp. 223–232.
  24. Kemeny J. G., Snell J. L. *Finite Markov Chains*. Van Nostrand, 1969. 210 p.
  25. Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. *Computer Networks*. 5th ed. Pearson Education, 2011. 933 p.
- 

---

### 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.*

---

# ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ТРЕНАЖНО-МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА СПЕЦИАЛИСТОВ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИЕЙ

**А. Р. Бестугин<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

**А. Ю. Иванов<sup>а</sup>**, аспирант

**И. А. Киршина<sup>а</sup>**, канд. экон. наук, доцент

**В. А. Санников<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, доцент

**А. Д. Филин<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** постоянное увеличение интенсивности воздушного движения, ужесточение требований к безопасности полетов требуют планомерного совершенствования учебно-тренировочных средств для роста профессионального уровня специалистов управления авиацией. Поэтому разработка теории синтеза адаптивного тренажно-моделирующего комплекса с обликом экспертной системы является актуальной задачей. Интерес в данной проблеме связан с нахождением новых способов повышения эффективности функционирования тренажных комплексов за счет внедрения когнитивных технологий в структуру управления функционирования учебно-тренировочных средств. **Цель исследования:** создание имитационной модели адаптивного тренажно-моделирующего комплекса специалистов управления авиацией; разработка структуры управления процессом обучения, описывающей изменение состояния обучаемого в формализованном математическом представлении. **Результаты:** разработана структура имитационной модели адаптивного тренажно-моделирующего комплекса специалистов управления авиацией в виде совокупности подсистемы оценки. Модель обеспечивает получение объективных критериев соответствия знаний и навыков обучаемого требуемому уровню и формирование корректировочных воздействий, влияющих на текущий тематический раздел программы подготовки специалистов службы движения и подсистемы обучения, в которой в силу корректирующих действий формируется программа прохождения заданного тематического раздела в соответствии с индивидуальными особенностями обучаемых. Получен алгоритм вычисления комплексных оценок уровня подготовки по совокупности контролируемых параметров, в основу которого положено нахождение оценок по результатам выполнения тестовых упражнений из курсов специальной подготовки авиационных специалистов. В качестве обобщающей оценки параметров, обладающих различной природой, предлагаются усредняющие критерии безошибочности и быстродействия. Представленный метод позволяет получать оценки эффективности адаптивных тренажно-моделирующих комплексов с элементами экспертной системы. **Практическая значимость:** разработанная когнитивная структура системы управления процессом обучения и полученный алгоритм нахождения комплексных оценок уровня подготовленности специалистов управления авиацией определяют переход к созданию нового поколения эффективных тренажных комплексов, внедрение которых позволит поднять уровень безопасности полетов за счет повышения профессиональной подготовки авиационных специалистов.

**Ключевые слова** — имитационная модель, оценка эффективности, тренажно-моделирующий комплекс, адаптивное управление, экспертная система.

## Введение

Усложнение процессов управления воздушным движением (УВД), внедрение новой техники и технологий процессов управления авиацией предъявляют все более высокие требования к уровню обучаемости и квалификации специалистов УВД, что в свою очередь обуславливает постоянное совершенствование системы их подготовки и переподготовки [1–3]. Вопросы оценки эффективности уровня подготовки требуют эволюционирования математического аппарата в соответствии с тенденциями развития сферы подготовки диспетчерского состава [4].

В качестве одного из перспективных направлений исследований системы подготовки диспетчеров УВД все более широкое применение находят методы теории адаптивного управления [4–7] и построения на их базе тренажных комплексов,

обеспечивающих практическую подготовку соответствующих специалистов. При рассмотрении процессов подготовки специалистов УВД в виде системы управления объектом управления будет являться обучаемый  $S$ . Если в качестве определяющих характеристик обучаемого принять уровень обученности  $S_{\Pi}$  и совокупность параметров, характеризующих его индивидуальные особенности  $L_{\Pi}$ , то реализацию процесса обучения можно выразить в виде преобразования объекта управления из исходного состояния, соответствующего его начальному уровню подготовки, в заданное конечное:  $S_{start} \Rightarrow S_{\Pi max}, L_{start} \Rightarrow L_{\Pi max}$ .

Уровень подготовленности обучаемого  $S_{\Pi}$  является основным показателем, используемым при анализе процесса обучения, и представляет собой способность диспетчера УВД выполнять заданную программу действий в соответствии с нормативными значениями показателей, с по-

мощью которых определяется степень развития той или иной группы профессиональных навыков [1, 8–10]. Параметры  $L_{\Pi}$  условно можно разделить на две группы:

1) индивидуального развития, относящиеся к профессионально важным качествам (внимание, память, скорость реакции и т. д.);

2) личной заинтересованности (уровень мотивации), а также психофизиологическое состояние обучаемого.

Не менее важным показателем эффективности обучения является время  $T_{\Pi \max}$ , представляющее собой суммарное значение времени, затраченного на всех этапах обучения:

$$T_{\Pi \max} = \sum_{\Pi=1}^{\Pi \max} T_{\Pi} = \sum_{\Pi=1}^{\Pi \max} (t_{\Pi}^{n \max} - t_{\Pi}^0),$$

где  $t_{\Pi}^0$  — время начала выполнения обучающих заданий, относящихся к подразделу программы обучения  $\Pi$ ;  $t_{\Pi}^{n \max}$  — время окончания выполнения обучаемым обучающих заданий с учетом всех повторений  $n$ , вызванных корректировками программы обучения, связанными с психофизическими особенностями обучаемого.

Таким образом, для анализа системы подготовки по завершении обучаемым программы обучения  $\Pi_{\max}$  можно использовать оценки совокупности параметров, характеризующих конечный теоретический уровень подготовленности диспетчера УВД  $S_{\Pi \max}$  и улучшение его профессиональных навыков  $L_{\Pi \max}$ , а также величину интервала времени  $T_{\Pi \max}$ , затраченного на подготовку.

### Предлагаемый подход к моделированию системы управления процессом обучения

Система управления процессом подготовки диспетчера УВД является замкнутой и может быть отнесена к классу самонастраиваемых систем [11, 12]. Для реализации алгоритма обучения может быть применена адаптивная обучающая подсистема, задачей которой является выбор программы обучения и стратегии взаимодействия с обучаемым. В обобщенном виде предлагаемую обучающую адаптивную систему подготовки специалистов службы движения можно рассматривать в виде совокупности двух подсистем: 1) подсистемы оценки *Stage A*, в рамках которой производится оценка соответствия знаний и навыков обучаемого уровню  $P_{\Pi}$  и формирование корректировочных воздействий, влияющих на текущий тематический раздел программы подготовки специалистов службы движения ( $\Pi$ ); 2) подсистемы обучения *Stage B*, в рамках которой под действием корректировки формируется программа прохождения заданного тематического раздела в соответствии с индивиду-

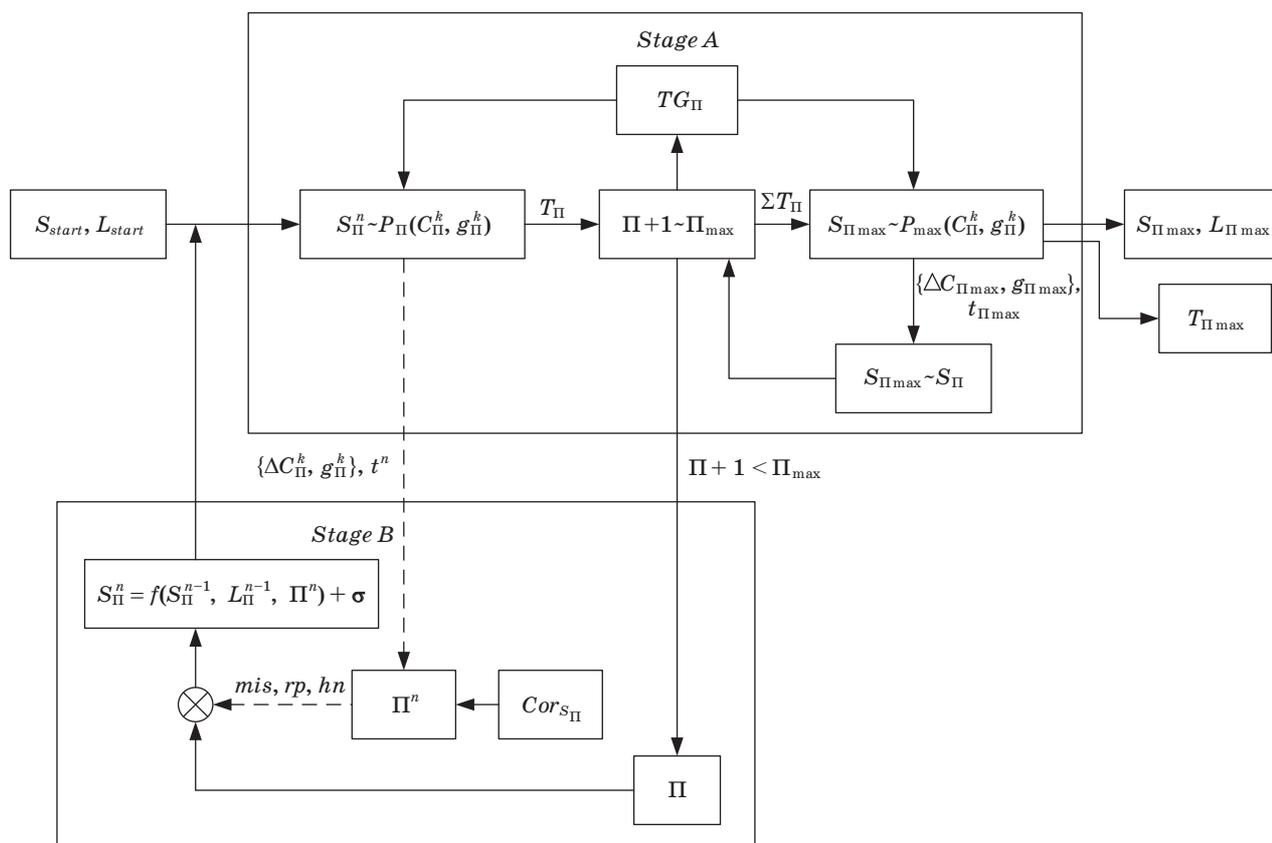
альными особенностями обучаемого. Структурная схема системы управления обучением специалистов управления авиацией представлена на рис. 1.

Блок *Stage A* содержит совокупность задач, ранжированных по степени сложности и упорядоченных в соответствии с выбранным тематическим разделом. Общепринятой методикой оценивания уровня подготовленности (обученности) является выполнение тестовых заданий. В качестве тестовых заданий можно использовать наборы упражнений из специальных курсов подготовки авиационного персонала при их соответствующей ранжировке. Оценка уровня подготовленности по завершении откорректированной программы обучения  $\Pi^n$  производится на основе выполнения тестовых упражнений, вырабатываемых генератором тестовых заданий  $TG_{\Pi}$ . Для оценки степени обученности диспетчера УВД по какой-либо одной (или нескольким) группам навыков, характеризующих качество усвоения обучаемым тематического раздела  $\Pi$ , используется промежуточный тест-контроль  $S_{\Pi}^n \sim P_{\Pi}$ . При неудовлетворительном результате прохождения промежуточного тест-контроля допускается повторное прохождение обучающей программы соответствующего тематического раздела  $\Pi$ . Окончание полного курса обучения  $\Pi_{\max}$  завершает итоговый тест-контроль ( $S_{\Pi \max} \sim P_{\Pi \max}$ ), целью которого является всесторонняя оценка уровня подготовленности обучаемого  $S_{\Pi \max}$ . При неудовлетворительных результатах итогового тестового задания обучаемого возвращают к изучению соответствующего тематического раздела  $\Pi$ .

Блок *Stage B* представлен в виде двух контуров управления. Большой контур символизирует переход между тематическими разделами  $\Pi$ . В соответствии с результатами тренажа при  $S_{\Pi}^n > P_{\Pi}$  здесь осуществляется переход к изучению следующего тематического раздела ( $\Pi + 1$ ). В свою очередь малый контур  $\Pi^n$  предназначен для корректировки процесса обучения в рамках прохождения программы тематического раздела. При  $S_{\Pi} < P_{\Pi}$ , в зависимости от характера допущенных ошибок, а также под влиянием психологических особенностей обучаемого, первоначальный перечень задач заданного тематического раздела подвергается корректировке.

Связь между описанными подсистемами осуществляется за счет канала информирования о допущенных ошибках и времени, затраченном на выполнение тестового задания, служащими для выбора или корректировки программы тематического раздела обучения  $\Pi$ . Для хранения и передачи между уровнями *Stage A*  $\rightarrow$  *Stage B* информации об особенностях прохождения тестовых заданий применяется совокупность величин:

$\{\Delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\}$  — меры несоответствия результатов



■ **Рис. 1.** Структурная схема системы управления процессом обучения специалистов службы движения  
 ■ **Fig. 1.** Block diagram of a control system of process of training of experts of a traffic department

промежуточного тестирования  $S_{\Pi}^n$  цели обучения  $P_{\Pi}$ ;  $t_{\Pi}$  — времени, затраченного на прохождение тестового задания. В число факторов, оказывающих влияние на формирование корректирующих воздействий на заданный тематический раздел, также входят психологические особенности обучаемого ( $Cor_{S_{\Pi}}$ ). К этим факторам целесообразно отнести совокупность значений пропускной способности обучаемого по восприятию и переработке учебной информации, пороги утомляемости, а также набор параметров, характеризующих особенности организации учебного процесса (количество занятий, их продолжительность, техническую базу). Используя данные обученности и значения индивидуальных навыков обучаемого, достигнутые в результате прохождения скорректированной программы изучения тематического раздела  $\Pi^{n-1}$ , можно представить изменение обученности диспетчера УВД с уровня  $n - 1$  до уровня  $n$  в виде формулы

$$S_{\Pi}^n = f(S_{\Pi}^{n-1}, L_{\Pi}^{n-1}, \Pi^n) + \sigma, \quad (*)$$

где  $S_{\Pi}^{n-1}$  — уровень подготовки обучаемого программе тематического раздела  $\Pi$  на  $(n - 1)$ -м шаге коррекции индивидуальной программы;  $L_{\Pi}^{n-1}$  —

значения индивидуальных навыков обучаемого, получивших развитие на  $(n - 1)$ -м шаге корректировки программы заданного тематического раздела;  $\sigma$  — вектор внешних возмущающих воздействий.

Получение оценки результатов обучения тематического раздела  $\Pi$  обуславливает необходимость осознания целей обучения  $P_{\Pi}$ . Формирование целей обучения  $P_{\Pi}$  осуществляется исходя из состава требований к уровню профессиональной подготовки специалистов службы движения, предъявляемых к каждому разделу  $\Pi$  полного курса обучения. Вследствие существования большого количества взаимозависимых составляющих, совокупность которых и образует  $P_{\Pi}$ , уровень подготовленности диспетчера УВД при формировании отдельных групп навыков целесообразно оценивать с помощью комплексного критерия, представленного в виде взвешенной суммы нормированных частных показателей [8]:

$$P_{\Pi} = \sum_1^k (C_{\Pi}^k g_{\Pi}^k),$$

где  $C_{\Pi}^k$  — частный нормативный показатель, характеризующий степень владения диспетчера

УВД навыком  $k$ ;  $g_{\Pi}^k$  — весовой коэффициент, характеризующий меру значимости тематического раздела  $\Pi$  с учетом специфики применения навыка  $k$ .

Следует отметить, что  $P_{\Pi}$  может быть использована для определения уровня подготовки диспетчера УВД — как одного, так и нескольких групп профессиональных навыков.

Цель обучения  $P_{\Pi}$  позволяет рассчитать величину вектора рассогласования  $\{\Delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\}$ , которая является одной из величин, определяющих изменение стратегии процесса обучения  $\Pi^n$ . Значение  $\{\Delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\}$  вычисляется в результате сравнения достигнутого уровня подготовленности обучаемого  $S_{\Pi}^n$  и соответствующего нормативного значения показателя  $P_{\Pi}$ . Кроме различия между фактическим и требуемым уровнем обученности,  $\{\Delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\}$  содержит также дополнительную информацию, включающую характер и частоту ошибок, допущенных в процессе обучения. Таким образом, в совокупности с временными параметрами деятельности диспетчера УВД  $t^n$   $\{\Delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\}$  включает исходные данные, достаточные для получения индивидуальных параметров обучаемого. Если в качестве величины, устанавливающей допустимую границу уровня обученности, по достижении которой обучение в соответствии с тематическим разделом  $\Pi$  считается завершенным, принять  $\{\delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\}$ , то условие изменения стратегии изучения тематического раздела  $\Pi + 1$  можно записать в виде

$$\{\delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\} = P_{\Pi} - S_{\Pi}^n \text{ при } \{\delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\} \leq \{\Delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\}.$$

В случае  $\{\delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\} > \{\Delta C_{\Pi}^k, g_{\Pi}^k\}$  принимается решение о проведении  $(n + 1)$ -й коррекции программы обучения. В качестве корректирующих воздействий используются повторения отдельных элементов программы  $rp$ , подсказки  $hn$ , а также непосредственные указания ошибки  $mis$ .

При всей своей гибкости формула (\*) не позволяет судить о процедуре вычисления значения оценки уровня обученности  $S_{\Pi}^1$ . Для решения данного вопроса можно воспользоваться аналогией со способом получения комплексной оценки уровня подготовки диспетчерского состава  $S_{\Pi}$  по совокупности контролируемых параметров, рассмотренным в работе [13], где предложена методика вычисления величины обученности по результатам выполнения обучаемым тестовых упражнений из курсов специальной подготовки авиационных специалистов. В качестве обобщающей оценки параметров, обладающих различной природой, предлагается брать усредняющие критерии безошибочности или быстрействия.

Показатель, характеризующий быстрействие диспетчера, можно рассчитать следующим образом:

$$C\tau_{\Pi}^k = \Theta\tau_{\Pi}^k / \tau_{\Pi}^k,$$

где  $\Theta\tau_{\Pi}^k$ ,  $\tau_{\Pi}^k$  — нормативное и среднее значение времени выполнения тематического раздела  $\Pi$  с учетом специфики применения навыка  $k$ .

При этом целесообразно вводить ограничение

$$\tau_{\Pi}^{k'} = \begin{cases} M[\tau_{\Pi}^{k'}], & \text{если } M[\tau_{\Pi}^{k'}] > \Theta\tau_{\Pi}^k \\ \Theta\tau_{\Pi}^k, & \text{если } M[\tau_{\Pi}^{k'}] \leq \Theta\tau_{\Pi}^k \end{cases},$$

где  $M[\tau_{\Pi}^{k'}]$  — математическое ожидание фактического времени выполнения тематического раздела  $\Pi$  с учетом специфики применения навыка  $k$ .

Показатель безошибочности работы диспетчера можно рассчитать следующим образом:

$$Cu_{\Pi}^k = \Theta u_{\Pi}^k / u_{\Pi}^k,$$

где  $\Theta u_{\Pi}^k$  — максимально допустимое количество ошибок тематического раздела  $\Pi$  с учетом специфики применения навыка  $k$ ;  $u_{\Pi}^{k'}$  — относительное количество ошибок, допущенных обучаемым при выполнении тематического раздела  $\Pi$  с учетом специфики применения навыка  $k$ :

$$u_{\Pi}^{k'} = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{\eta} \omega_i \beta_i.$$

Здесь  $D$  — общее количество операций, по которым производится оценка безошибочности;  $\omega_i$  — коэффициент важности (цена) ошибки;  $\beta_i$  — количество совершенных ошибок  $i$ -го типа.

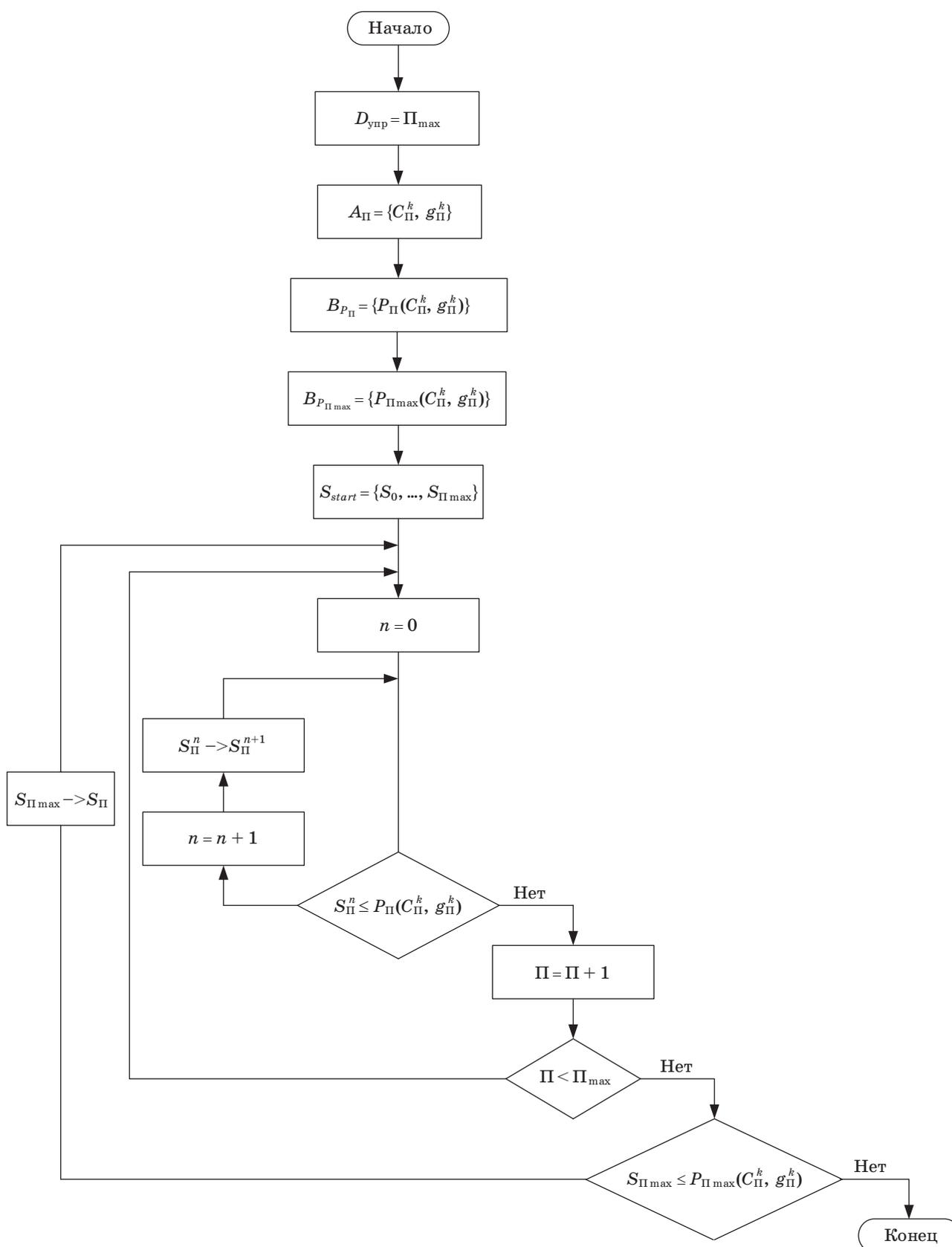
При расчете показателя безошибочности также необходимо ввести ограничение

$$u_{\Pi}^{k'} = \begin{cases} U_{\Pi}^{k'}, & \text{если } U_{\Pi}^{k'} > \Theta u_{\Pi}^k \\ \Theta u_{\Pi}^k, & \text{если } 0 \leq U_{\Pi}^{k'} \leq \Theta u_{\Pi}^k \end{cases},$$

где  $U_{\Pi}^{k'}$  — фактическое число ошибок, допущенных при выполнении тематического раздела  $\Pi$  с учетом специфики применения навыка  $k$ .

В качестве обобщения изложенных выше положений можно предложить следующий алгоритм вычисления комплексных оценок уровня подготовки диспетчеров по совокупности контролируемых параметров (рис. 2).

Для каждой задачи из тематического раздела  $\Pi$  выбирается набор целей обучения  $B_{P_{\Pi}}$ . В свою очередь для каждой из целей обучения  $P_{\Pi}$  выбирается перечень частных нормативных показателей  $A_{\Pi}$ , характеризующий степень овла-



■ **Рис. 2.** Алгоритм определения комплексных оценок уровня подготовленности диспетчера  
 ■ **Fig. 2.** Algorithm of definition of complex estimates of level of readiness of the dispatcher

дения диспетчером УВД знаниями и навыками тематического подраздела П. При этом весовые коэффициенты находятся путем экспертного опроса диспетчеров-инструкторов и составляют базу данных весовых коэффициентов. Состав  $A_{\Pi}$  устанавливается исходя из значения цели конкретного упражнения. Нормативные значения  $A_{\Pi}$  определяются экспериментальным путем для соответствующих показателей (безошибочности или быстродействия) в зависимости от критериев оценивания контролируемого параметра:

$$A_{\Pi} = \begin{cases} \{\Theta\tau_0^0, \dots, \Theta\tau_{\Pi\max}^{k\max}\} \\ \{\Theta u_0^0, \dots, \Theta u_{\Pi\max}^{k\max}\} \end{cases}.$$

«Обучающий вектор» характеризуется численными значениями состояний уровня обученности  $\{S_1, S_2, \dots, S_{\Pi\max}\}$ , каждое из которых в свою очередь определяется вектором частных нормативных показателей  $\{C_{\Pi}^k\}$  индивидуально для каждого тематического раздела П. В процессе выполнения программы тематического раздела  $\Pi^n$ , адаптированной для обучаемого, находится величина  $S_{\Pi}^n$ , характеризующая уровень подготовки диспетчера согласно программе тематического раздела П. При этом

$$S_{\Pi}^n = \begin{cases} \{\tau_0^{0'}, \dots, \tau_{\Pi\max}^{k\max'}\} \\ \{U_0^{0'}, \dots, U_{\Pi\max}^{k\max'}\} \end{cases}.$$

Полученное значение сравнивается со значением цели обучения  $P_{\Pi}(C_{\Pi}^n, g_{\Pi}^k)$ .

По достижении  $\Pi_{\max}$  выполняется итоговая общая проверка, охватывающая все пройденные тематические разделы П, по результатам которой принимается окончательное решение о соответствии достигнутого уровня обученности диспетчера УВД нормативным требованиям. В случае выявления недостаточности навыков в отдельных тематических областях диспетчер проходит заново программу тематического раздела, в изучении которого был показан отрицательный результат. При проведении итоговой общей проверки можно воспользоваться по аналогии методом определения граничной комплексной цели обучения  $P_{\Pi\max}(C_{\Pi}^n, g_{\Pi}^k)$  [14].

В процессе принятия решения о результатах прохождения итоговой общей проверки возможно появление ошибок первого и второго рода. Если известны законы распределения показателя  $S_{\Pi\max}$ , то вероятности этих ошибок легко могут быть найдены по таблицам процентных точек распределения. Если вероятность ошибок первого и второго рода достаточно велика (т. е. имеется большое число расхождений оценок инструктора с результатами расчета), то необходима последовательная коррекция исходных данных  $(C_{\Pi}^n, g_{\Pi}^k)$ , а также уточнение значения граничной комплексной цели обучения  $P_{\Pi\max}(C_{\Pi}^n, g_{\Pi}^k)$ . Для обеспечения сходимости оценок в первую очередь следует уточнить значения весовых коэффициентов  $g_{\Pi}^k$ , данные процедуры должны быть выполнены при отладке и тестировании на примере специальных курсов подготовки специалистов.

### Заключение

Изложенный метод позволяет получать оценки эффективности адаптивных тренажно-моделирующих комплексов с элементами экспертной системы на базе использования методов теории адаптивного управления. Применение представленного метода позволяет синтезировать структуру системы управления обучением, в общем виде описывающую изменение состояния обучаемого от  $S_{start}$  до  $S_{\Pi\max}$  с математической точки зрения. Синтезированная при этом упорядоченная последовательность математических операций является ключом к формализации описания процесса изменения обученности специалиста управления движением в целях последующего ее представления в виде конкретных числовых величин. В дальнейшем это позволит осуществлять детальное сравнение показателей эффективности существующих тренажно-моделирующих комплексов с вновь разрабатываемыми строго формализованными математическими методами.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-07-00065а, грант № 16-07-00030а.

### Литература

1. Дос 9868. Правила аэронавигационного обслуживания. Ч. IV: Подготовка и оценка персонала по организации воздушного движения (ОрВД). Изд. 2-е. — ИКАО, 2016. С. IV-1-1–IV-3-1.
2. Scholz D., Thorbeck J. Computer based Training in Aircraft Design Education// ICAS 2000 Congress. P. 173.1–173.12.
3. Филин А. Д., Шатраков А. Ю. Тренажерные комплексы радиолокационного контроля воздушного пространства: монография/ под науч. ред. Ю. Г. Шатракова. — СПб.: ГУАП, 2013. — 221 с.
4. Бестугин А. Р., Шатраков Ю. Г., Филин А. Д. и др. Автоматизированные системы управления воздушным движением: монография/под науч. ред. Ю. Г. Шатракова. — СПб.: Политехника, 2014. — 450 с.

5. Бестугин А. Р., Филин А. Д., Шатраков Ю. Г. Совершенствование процесса обучения летного состава и специалистов управления авиационных подразделений // Информационно-управляющие системы: сб. науч. тр. СПб.: Политехника, 2014. С. 1–15.
6. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы. — М.: Высш. шк., 2003. — 263 с.
7. Антохина Ю. А., Филин А. Д., Шатраков Ю. Г. Инновационные технологии при развитии тренажеров управления авиацией // Вестник воздушно-космической обороны. 2015. Вып. 1. С. 116–122.
8. Филин А. Д., Рачков В. П., Шатраков Ю. Г. Метод объективной оценки эффективности использования тренажно-моделирующих комплексов летных экипажей и специалистов боевого управления авиацией // Вестник воздушно-космической обороны. 2017. Вып. 1. С. 15–25.
9. Санников В. А. Использование статистических методов для оценки уровня квалификации диспетчеров управления воздушным движением // Научный вестник МГТУГА. 2010. № 159. С. 11–19.
10. Филин А. Д., Бестугин А. Р., Киршина И. А., Шатраков Ю. Г. Автоматизированные средства обучения для дистанционной системы поддержания квалификации авиационных специалистов // Техника и технология: новые перспективы развития: материалы XX Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 5–7 апреля 2016 г. С. 33–39.
11. Крыжановский Г. А., Цепляев Ю. Ф. Некоторые задачи исследования и оптимизации процессов профессиональной подготовки операторов // Автоматика и Телемеханика. 1982. № 7. С. 148–156.
12. Крыжановский Г. А., Цепляев Ю. Ф. К оценке уровня квалификации операторов сложных автоматизированных систем управления // Автоматика и Телемеханика. 1986. № 1. С. 151–161.
13. Бестугин А. Р., Филин А. Д., Киршина И. А., Санников В. А. Безопасность полетов и направления развития тренажеров специалистов управления авиацией: монография / под науч. ред. А. Р. Бестугина. — СПб.: ГУАП, 2015. — 516 с.
14. Бестугин А. Р., Филин А. Д., Санников В. А. Разработка автоматизированной системы обучения и контроля знаний для подготовки специалистов управления авиацией // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. Т. I. — СПб.: Стратегия будущего, 2016. С. 5–12.

UDC 351.814

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.51

## Simulation Model of an Adaptive Training Complex for Aviation Management Specialists

Bestugin A. R.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, fresguap@mail.ruIvanov A. I.<sup>a</sup>, Graduate Student, young3@yandex.ruKirshina I. A.<sup>a</sup>, PhD, Econ., Associate Professor, ikirshina@mail.ruSannikov V. A.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, valerisannikov@gm.comFilin A. D.<sup>a</sup>, Dr. Sc, Tech., Professor, fadadf@rambler.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The constantly increasing air traffic intensity and tough safety demands require the systematic improvement of training and educational facilities for upgrading the professional level of aviation management specialists. Therefore, developing a theory of synthesizing an adaptive training simulator looking like an expert system is an important task. Our interest to this problem is associated with finding new ways of increasing the efficiency of training complexes by introducing cognitive technologies into the management structure of the training facilities. **Purpose:** The goal is to create a simulation model of an adaptive training simulator for aviation management specialists, and to develop a learning process management structure which would describe the change in the state of a learner in a formalized mathematical representation. **Results:** The structure has been developed for a simulation model of an adaptive training simulator for aviation management specialists, as an evaluation subsystem subset. The model provides objective criteria for judging whether the learner's knowledge and skills match the required level. Also, the model generates corrective actions which affect the current thematic section of the training program for the traffic service and the training subsystem in which, due to the corrective actions, a program is formed for mastering the given thematic section according to the individual traits of the trainees. An algorithm is obtained to calculate complex estimates of the training level for a set of monitored parameters. This algorithm finds estimates based on the results of test exercises from special training courses for aviation specialists. As a generalizing estimate for parameters of different nature, it is suggested to use the averaging criteria of accuracy and performance. The proposed method allows you to obtain estimates of the efficiency of adaptive training simulators with elements of an expert system. **Practical relevance:** The developed cognitive structure of a learning process management system and the obtained algorithm for determining complex estimates of aircrew proficiency level allow you to proceed to the creation of a new generation of effective training complexes whose introduction will improve the flight safety due to better professional training of the aviation specialists.

**Keywords** — Simulation Model, Efficiency Evaluation, Simulator Complex, Adaptive Control, Expert System.

## References

1. Doc 9868. *Pravila aeronavigatsionnogo obsluzhivaniia. Chast' IV. Podgotovka i otsenka personala po organizatsii vozdušnogo dvizheniia (OrVD)* [Rules of Air Navigation Service. Part IV. Preparation and Performance Appraisal on Air Traffic Management]. Ed. 2nd. ICAO Publ., 2016, pp. IV-1-1–IV-3-1.
2. Scholz D., Thorbeck J. Computer based Training in Aircraft Design Education. *ICAS 2000 Congress*, pp. 173.1–173.12.
3. Filin A. D., Shatrakov A. Yu. *Trenazhernye komplekсы radiolokatsionnogo kontroliia vozdušnogo prostranstva* [Air Traffic Control Training Complexes]. Ed. Iu. G. Shatrakov. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2013. 221 p. (In Russian).
4. Bestugin A. R., Shatrakov Yu. G., Filin A. D. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia vozdušnym dvizheniem* [Automated Air Traffic Control Systems]. Ed. Iu. G. Shatrakov. Saint-Petersburg, Politekhnik Publ., 2014. 450 p. (In Russian).
5. Bestugin A. R., Filin A. D., Shatrakov Yu. G. Improvement of the Training Process for the Flight Crew and Aviation Department Specialists. *Sbornik nauchnykh trudov "Informatsionno-upravliaiushchie sistemy"*, Saint-Petersburg, Politekhnik Publ., 2014, pp. 1–15 (In Russian).
6. Alexandrov A. G. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Optimum and Adaptive Systems]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 2003. 263 p. (In Russian).
7. Antohina Yu. A., Filin A. D., Shatrakov Yu. G. Innovation Technologies in the Development of Aviation Simulators. *Vestnik vozdušno-kosmicheskoi oborony*, 2015, iss. 1, pp. 116–122 (In Russian).
8. Filin A. D., Rachkov V. P., Shatrakov Yu. G. The Method of Objective Evaluation of using Air Traffic Control Training Systems for Pilots and Combat Air Controllers. *Vestnik vozdušno-kosmicheskoi oborony*, 2017, iss. 1, pp. 15–25 (In Russian).
9. Sannikov V. A. Use of Statical Methods to Assess the Skill Level of Air Traffic Controllers. *Nauchnyi vestnik MGTUGA*, 2010, no. 159, pp. 11–19 (In Russian).
10. Filin A. D., Bestugin A. R., Kirshina I. A., Shatrakov Yu. G. Automated Training Facilities for the Distance System for the Maintenance of Aviation Specialists. *Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Tekhnika i tekhnologii: novye perspektivy razvitiia"* [Proc. of the XX Intern. Scientific and Practical Conf. "Engineering and Technology: New Development Prospects"], Moscow, April 5–7, 2016, pp. 33–39 (In Russian).
11. Kryzhanovskii G. A., Tsepliaev Yu. F. Some Research Problems and Optimization of Processes of Vocational Training of Operators. *Avtomatika i Telemekhanika*, 1982, no. 7, pp. 148–156 (In Russian).
12. Kryzhanovskii G. A., Tsepliaev Yu. F. To Assess the Skill Level of Operators of Complex Automated Control Systems. *Avtomatika i Telemekhanika*, 1986, no. 1, pp. 151–161 (In Russian).
13. Bestugin A. R., Filin A. D., Kirshina I. A., Sannikov V. A. *Bezopasnost' poletov i napravleniia razvitiia trenazherov spetsialistov upravleniia aviatsiei* [Safety of Flights and Directions of Development of Simulators of Specialists in Aviation Management]. Ed. by A. R. Bestugin. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2015. 516 p. (In Russian).
14. Bestugin A. R., Filin A. D., Sannikov V. A. Development of an Automated System Of Training and Knowledge Control for the Training of Air Traffic Controllers. *Materialy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Fundamental'nye i prikladnye issledovaniia v sovremennom mire"* [Proc. of the XIII Intern. Scientific and Practical Conf. "Fundamental and Applied Research in the Modern World"], Saint-Petersburg, Strategiiia budushchego Publ., 2016, vol. 1, pp. 5–12 (In Russian).

## 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, имеющих 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.

# АЛГОРИТМЫ ПРОВЕРКИ ПРИМЕНИМОСТИ ПРОТОКОЛОВ ДОСТУПА К РЕСУРСАМ В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

**В. В. Никифоров<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

**С. А. Подкорытов<sup>а</sup>**, PhD in Computer Science, младший научный сотрудник

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** разработка многозадачных приложений требует организации разделения доступа отдельных задач к общим ресурсам. Для этого принято использовать синхронизирующие элементы типа мьютексов. Использование мьютексов может приводить к взаимному блокированию задач, для предотвращения которого применяются специальные протоколы доступа к ресурсам, усложняющие выполнение операций над мьютексами (запрос/освобождение ресурса) за счет введения дополнительных условий и (или) действий. Для приложений, работающих в реальном времени, соответствующее увеличение времени отклика может оказаться существенным. Ранее было предложено решение проблемы возникновения взаимного блокирования на основе статической обработки моделей программных приложений реального времени, представляемых средствами графического формализма типа маршрутных сетей. Это решение опирается на построение специального многодольного ориентированного графа — графа зависимостей связей критических интервалов. **Цель исследования:** разработать алгоритмы, реализующие предложенную ранее обработку, и дать оценку сложности их исполнения. **Результаты:** разработаны алгоритмы, позволяющие анализировать программные продукты на возможность возникновения в них взаимного блокирования задач. Анализ проводится в три этапа. На первом этапе строится граф связей критических интервалов. После этого в построенном графе выделяются междольные контуры. Наконец, обнаруженные на предыдущем этапе междольные контуры проверяются на дизъюнктность. Оценка сложности показала, что время построения графа связей линейно относительно суммы числа связей и их зависимостей. Сложность построения перечня междольных контуров оценивается как  $O((n + e)(c + 1))$ , где  $c$  — число контуров в графе связей;  $n$  — число вершин;  $e$  — число ребер. Сложность проверки графа связей на дизъюнктность междольных контуров линейно зависит от суммы длин всех этих контуров. **Практическая значимость:** разработанные алгоритмы позволяют на раннем этапе разработки принимать решения о перестройке структуры приложения для устранения возможности взаимной блокировки задач и о выборе оптимального с точки зрения производительности протокола доступа.

**Ключевые слова** — системы реального времени, модели многозадачных приложений, протоколы доступа, разделяемые ресурсы.

## Введение

Программное приложение для систем реального времени, как правило, строится в виде комплекса кооперативных (действующих для достижения общих стоящих перед системой целей) задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  [1]. Для обеспечения анализа особенностей структуры многозадачных приложений реального времени строятся модели, отражающие размещение синхронизирующих операторов в задачах приложения, строятся методы обработки таких моделей, позволяющие проверить возможность возникновения аномальных ситуаций в ходе исполнения приложения. Примером аномальных ситуаций является взаимное блокирование задач, когда две или более задач оказываются связанными замкнутой цепочкой ожиданий поступления синхронизирующих посылок [2].

Известны подходы к построению таких моделей и методов их обработки, направленные на предотвращение возможностей возникновения взаимного блокирования задач [3]. Подход, представленный в работах [4, 5], опирается на представление структуры многозадачного программного приложения средствами маршрутных сетей [6] и обработку таких моделей с помощью специ-

альных многодольных графов — графов связей критических интервалов. При этом для проверки возможности возникновения взаимного блокирования предлагается выполнять проверку наличия в графе связей междольных контуров. Однако в указанных работах не представлены алгоритмы:

- построения перечня связей критических интервалов;
- построения графа связей, соответствующего конкретному экземпляру маршрутной сети;
- построения перечня имеющихся в графе связей междольных контуров;
- проверки наличия в графе связей пересекающихся междольных контуров.

В настоящей статье приведены такие алгоритмы, выполнена оценка их сложности.

## Протоколы доступа к разделяемым ресурсам

Большинство реальных программных приложений реального времени содержит взаимозависимые задачи, для которых не исключается возможность попадания в состояние ожидания сигнальных сообщений от других задач. Одной из разновидностей причин возникновения взаимной

зависимости задач является необходимость обеспечения корректного доступа различных задач к общим глобальным информационным ресурсам, что, в свою очередь, должно обеспечивать сохранение их целостности. Общепринятым методом обеспечения целостности разделяемых информационных ресурсов является использование мьютексов [2]. Для каждого из разделяемых информационных ресурсов  $g_1, g_2, \dots$  формируются мьютексы  $m_1, m_2, \dots$  — синхронизирующие интерфейсные элементы, контролирующие доступ к этим ресурсам. Имеющиеся в коде задачи критические интервалы по доступу к ресурсу  $g$  начинаются операторами  $lock(m)$  — операторами запроса на вход в критический интервал по доступу к этому ресурсу. Каждый критический интервал по доступу к ресурсу  $g$  завершается оператором  $unlock(m)$  — оператором освобождения ресурса  $g$ . Перечень условий предоставления запрашиваемого ресурса при обращении к оператору  $lock(m)$  зависит от применяемого протокола доступа [7]. При применении простейшего протокола доступа (Primitive Protocol — PP) единственное условие предоставления запрашиваемого ресурса состоит в том, что в текущий момент ресурс свободен. Если ресурс занят, то задание, запрашивающее разрешения на доступ к нему, переводится в состояние ожидания момента его освобождения.

Средствами маршрутных сетей представлена структура приложения, состоящего из двух задач  $\tau_1$  и  $\tau_2$  (рис. 1), каждая из которых содержит пересекающиеся критические интервалы по доступу к ресурсам  $g_1$  и  $g_2$ : в задаче  $\tau_1$  критические интервалы являются сцепленными, в задаче  $\tau_2$  — вложенными. Два критических интервала задачи  $\tau$  по ресурсам  $g$  и  $g^*$  назовем связанными (образующими связку  $L = \langle \tau, g, g^* \rangle$ ), если они пересекаются, т. е. содержат общие сегменты кода задачи. На начальном (головном) участке связки  $L = \langle \tau, g, g^* \rangle$  задача  $\tau$  имеет доступ к головному ресурсу  $g$  связки. На центральном участке задача  $\tau$  имеет доступ к обоим ресурсам связки — голов-



■ **Рис. 1.** Приложение из двух задач с двумя разделяемыми ресурсами

■ **Fig. 1.** An application with two tasks and two shared resources

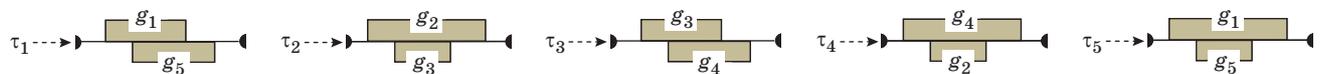
ному  $g$  и дополнительному  $g^*$ . На завершающем участке один из ресурсов связки уже освобожден задачей  $\tau$ .

Факт наличия связок критических интервалов является необходимым условием возможности возникновения взаимного блокирования задач. Однако сам по себе этот факт не означает, что взаимное блокирование действительно возможно. Так, в приложении со структурой рис. 1, несмотря на наличие связок критических интервалов, взаимное блокирование невозможно. А для приложения со структурой рис. 2 возможно попадание в состояние взаимного блокирования задач  $\tau_2, \tau_3, \tau_4$ .

В одном из способов предотвращения взаимного блокирования применяется протокол пороговых приоритетов (Priority Ceiling Protocol — PCP) [3]. Отличие PCP от PP состоит в том, что в дополнение к проверке, свободен ли запрашиваемый ресурс, выполняется дополнительная проверка текущего состояния других разделяемых ресурсов. За гарантию предотвращения взаимного блокирования путем применения PCP приходится платить снижением эффективности исполнения приложения (оцениваемой, например, путем определения значения «плотности приложения» [8]). Плотность приложения может снижаться, в частности из-за возможности составного [9] и цепного [10] блокирования задач, а также из-за того, что некоторые протоколы не допускают использования высокоэффективных дисциплин планирования с динамическим переназначением приоритетов задач. В этой связи важно иметь способ проверки структуры приложения на возможность возникновения взаимного блокирования. Такая возможность предоставляется путем построения специального многодольного ориентированного графа — графа связок критических интервалов (или просто графа связок) [4].

**Граф связок**

Граф связок является многодольным графом, отражающим отношения зависимости связок. Связка  $L_x = \langle \tau_i, g_a, g_i \rangle$  является зависимой от связки  $L_y = \langle \tau_k, g_j, g_d \rangle$ , если  $\tau_i$  и  $\tau_k$  — различные задачи и  $g_b = g_c$ . Другими словами, связка  $L_x$  является зависимой от  $L_y$ , если  $L_x$  и  $L_y$  принадлежат различным задачам и головной ресурс связки  $L_y$  совпадает с дополнительным ресурсом связки  $L_x$ .



■ **Рис. 2.** Приложение, допускающее возникновение взаимного блокирования задач

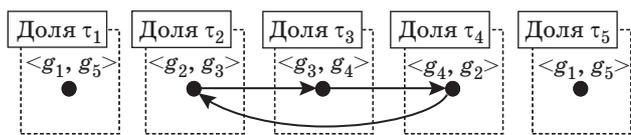
■ **Fig. 2.** An application where deadlocks are possible

Граф связок для приложения со структурой рис. 2 изображен на рис. 3.

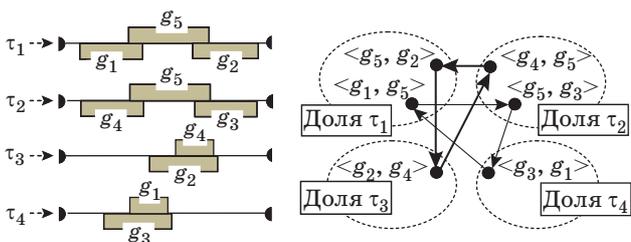
Поскольку зависимые связки не могут принадлежать одной и той же задаче, граф связок является многодольным графом (по одной доле на задачу). Имеющийся в графе рис. 3 контур является междольным контуром в том смысле, что все его вершины принадлежат разным долям графа. Именно наличие такого контура означает возможность возникновения взаимного блокирования задач. Для наличия возможности возникновения в ходе работы приложения взаимного блокирования необходимо и достаточно, чтобы в соответствующем графе связок присутствовал междольный контур.

В приложении со структурой рис. 1 нет зависимых связок, соответствующий граф связок не содержит дуг (и, следовательно, междольных контуров). При работе такого приложения может применяться РР, допускающий использование эффективных дисциплин планирования. В случае программного приложения рис. 2 применение РР могло бы привести к взаимному блокированию — здесь необходимо применять протокол, специально ориентированный на предотвращение взаимного блокирования, например, РСР.

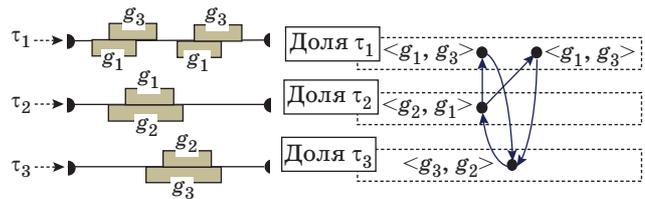
В работе [11] представлен протокол междольных контуров (Interparty Contours Protocol — ICP), который совмещает достоинства РР и РСР, допускает использование дисциплин планирования с динамически назначаемыми приоритетами заданий и вместе с тем предотвращает взаимное блокирование. Применение этого протокола допустимо при произвольном числе междольных контуров в соответствующем графе связок, например, в случае приложения со структурой рис. 4.



■ **Рис. 3.** Граф связок для приложения со структурой рис. 2  
 ■ **Fig. 3.** Graph of bundles corresponding to the application from fig. 2



■ **Рис. 4.** Граф связок с двумя непересекающимися междольными контурами  
 ■ **Fig. 4.** Graph of bundles with two disjoint circuits



■ **Рис. 5.** Граф связок с пересекающимися междольными контурами  
 ■ **Fig. 5.** Graph of bundles with intersecting circuits

Единственное ограничение на применение ИСР состоит в том, что междольные контуры графа связок не должны пересекаться. О том, что возможность таких пересечений в общем случае существует, свидетельствует рис. 5.

Существующая версия ИСР непригодна для применения в приложениях, которым соответствует граф связок с пересекающимися междольными контурами. В этих условиях для приложения на рис. 5 потребуется применение РСР и, следовательно, использование менее эффективных дисциплин планирования со статическими приоритетами. Отсюда следует актуальность разработки следующих алгоритмов:

- построения графа связок по данным о структуре приложения, представляемой, например, средствами маршрутных сетей;
- составления перечня междольных контуров, имеющихся в графе связок;
- проверки наличия в графе связок пересекающихся междольных контуров.

Также актуальна оценка сложности перечисленных алгоритмов.

### Алгоритм построения графа связок

Построение графа связок предлагается выполнять в два этапа. На первом этапе по данным о структуре приложения составляется список связок. На втором этапе по составленному списку строится граф связок.

### Алгоритм построения перечня вершин графа связок

Для каждой задачи необходимо построить список связок, соответствующих пересечению ее критических интервалов. Для этого необходимо организовать перебор сегментов каждой задачи в цикле. При переборе сегментов необходимо хранить набор занятых ресурсов. Оптимальной структурой данных для этого является хеш-таблица, поскольку она обеспечивает константное время добавления и удаления элементов. Тело цикла, перебирающего сегменты, будет выглядеть следующим образом.

Если сегмент занимает ресурс  $g$ :

1) построить список пар вида  $\langle g_i, g \rangle$ , где  $g_i$  — имена занятых ресурсов, хранимых во вспомогательной хеш-таблице;

2) добавить эти пары к списку связей данной задачи;

3) добавить имя ресурса  $g$  в хеш-таблицу.

Для сегмента, освобождающего ресурс  $g$ , достаточно просто удалить имя ресурса  $g$  из хеш-таблицы.

Поскольку операции добавления и удаления элементов занимают константное время, самой трудоемкой частью вышеприведенного алгоритма является составление списка пар  $\langle g_i, g \rangle$ . В худшем случае (все ресурсы последовательно занимаются, а затем освобождаются) на  $n$ -м шаге приходится добавлять  $n$  пар. Таким образом, максимальное время работы  $O(n^2)$ . Однако на практике количество одновременно пересекающихся интервалов ограничено сверху, а в таком случае время исполнения  $O(n)$ .

#### Алгоритм построения ребер графа связей

В результате выполнения представленного алгоритма сформирован состав долей графа связей и для каждой доли — состав принадлежащих ей вершин. Если в какой-либо задаче есть однотипные связи (такие связи, у которых совпадают и головные, и дополнительные ресурсы), то доля графа связей, представляющая задачу  $\tau_i$ , включает соответствующее число однотипных вершин.

Для построения всех ребер, исходящих из вершины  $L = \langle \tau, g, g' \rangle$ , следует использовать вспомогательную структуру данных, содержащую все связи, для которых ресурс  $g$  является головным. В качестве такой структуры целесообразно использовать «словарь» (map), позволяющий хранить пары (ключ, значение). Словари, использующие в основе хеш-таблицы, обеспечивают доступ к хранимым значениям по значению хеш-функции ключа за константное время. Заполнение такого словаря потребует линейного времени от количества связей.

После этого добавление ребер в граф может быть осуществлено следующим образом:

1) для каждой вершины  $\langle g_i, g_j \rangle$  получим из словаря список всех вершин вида  $\langle g_j, g \rangle$ , для которых ресурс  $g_j$  является головным;

2) для каждой вершины вида  $\langle g_j, g \rangle$  добавим в граф соответствующее ребро, если связи  $\langle g_i, g_j \rangle$  и  $\langle g_j, g \rangle$  соответствуют разным задачам.

Таким образом, граф связей может быть построен за линейное относительно суммы количества связей и количества добавляемых ребер время.

#### Алгоритм построения перечня контуров в ориентированном графе

Алгоритм построения перечня междольных контуров может быть основан на базе алгоритма построения перечня всех контуров в ориентированном графе. В этом разделе приводится описание такого алгоритма, предложенного Джонсоном в [12]. Данный алгоритм основывается на алгоритмах, предложенных в работах [13] и [14], однако превосходит их по скорости исполнения. Алгоритм Джонсона является лучшим на данный момент с точки зрения скорости исполнения [15].

#### Алгоритм Джонсона

Ниже приведены некоторые определения из общей теории графов, которые используются в описании алгоритма построения перечня контуров.

Граф  $G' = (U, W)$  называется *подграфом* графа  $G = (E, V)$ , если  $U \subset E, W \subset V$ . Говорят, что подграф  $G'$  порожден множеством вершин  $W$ , если  $U$  содержит всевозможные ребра из  $V$ , соединяющие вершины из  $W$ . Подграф  $G'$  называется *сильным*, если для любых вершин  $u, v \in W$  существуют маршруты из вершины  $u$  в вершину  $v$  и обратно. Подграф  $G'$  называется *максимальным*, если любой подграф  $G''$ , содержащий в себе  $G'$ , не является сильным.

Алгоритмы построения максимально сильного подграфа за линейное время описаны в работах [16, 17].

Пусть вершины графа пронумерованы в произвольном порядке  $L_1 < L_2 < \dots < L_n$ . Для каждой вершины, начиная с  $L_1$ , рассматривается максимальный сильный подграф, порожденный данной и последующей вершинами.

Алгоритм конструирует маршруты для каждого максимально сильного подграфа, начиная с вершины с наименьшим номером. Для хранения текущего маршрута используется стек. Чтобы избежать повторного обхода, посещенные вершины помечаются как заблокированные. Посещенная вершина остается заблокированной до тех пор, пока все смежные с ней вершины остаются заблокированными.

Рассмотрим для примера участок некоторого графа: две вершины  $L, L'$  и ребро из  $L$  в  $L'$ . Пусть в момент посещения вершины  $L$  вершина  $L'$  уже заблокирована. В этом случае вершина  $L$  останется заблокированной до тех пор, пока не будет разблокирована вершина  $L'$ .

Чтобы обеспечить своевременную разблокировку, для каждой вершины хранится вспомогательный список вершин, которые должны быть разблокированы вместе с ней.

Обход графа организован следующим образом. Вершина  $L$  помещается в пустой стек и по-

мечается как блокированная. Для вершины, находящейся на вершине стека, рассматриваются смежные к ней вершины:

1) если начальная вершина  $L$  является одной из смежных, то текущее состояние стека и стартовая вершина добавляются к списку найденных контуров;

2) если смежная вершина не является заблокированной, то она помещается в стек и помечается как заблокированная, после чего начинают рассматривать смежные с ней вершины;

3) если контур не был обнаружен, то текущая вершина снимается со стека и добавляется в списки, соответствующие всем смежным с ней вершинам.

Необходимо отметить, что блокировка не снимается с вершин при снятии их со стека. Это гарантирует, что вершина не будет посещена повторно до того, как будет обнаружен контур или завершен обход всего подграфа.

При обнаружении контура блокировка снимается с текущей вершины, а сама вершина — со стека. При снятии блокировки с каждой вершины снимается также блокировка и со всех вершин из соответствующего списка.

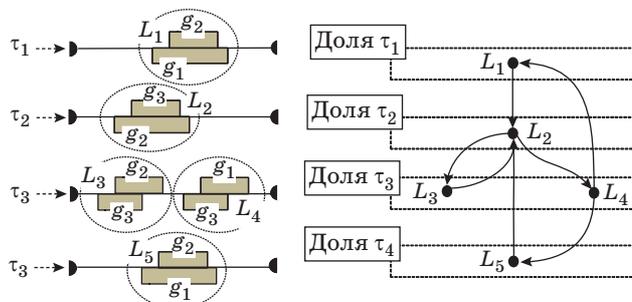
Когда в стеке заканчиваются вершины, строится следующий максимальный сильный подграф, порожденный вершинами  $\{L_2, L_3, \dots, L_n\}$ , и процесс обхода повторяется.

Время работы между нахождением двух контуров оценивается как  $O(n + e)$ , где  $n$  — количество вершин, а  $e$  — количество ребер. Общее время работы алгоритма оценивается как  $O((n + e) \times (c + 1))$ , где  $c$  — количество контуров в графе.

**Пример работы алгоритма построения перечня контуров**

Ниже приведен пример работы алгоритма построения перечня контуров для графа, изображенного на рис. 6.

Пусть вершины графа связок упорядочены следующим образом:  $L_1 < L_2 < L_3 < L_4 < L_5$ .



■ **Рис. 6.** Граф связок для примера приложения из четырех задач с тремя ресурсами  
 ■ **Fig. 6.** Graph of bundles for an application with four tasks and three shared resources

Изначально алгоритм рассматривает максимальный подграф, порожденный связками  $L_1$  и следующими за ней. Такой подграф содержит все связки. Ниже приведена последовательность шагов, иллюстрирующая обработку алгоритмом данного подграфа.

1. Связка  $L_1$  помещается на вершину стека и блокируется.

2. Единственная смежная связке  $L_1$  связка  $L_2$  помещается на вершину стека и блокируется.

3. Первая смежная связке  $L_2$  связка  $L_3$  помещается на вершину стека и блокируется.

4. Единственная смежная связке  $L_3$  связка  $L_2$  уже заблокирована, поэтому связка  $L_3$  снимается со стека и добавляется в список, соответствующий связке  $L_2$ .

5. Вторая смежная связке  $L_2$  связка  $L_4$  помещается на вершину стека и блокируется.

6. Первая смежная связке  $L_4$  связка  $L_1$  является начальной, потому текущее состояние стека ( $L_1, L_2, L_4$ ) и стартовая связка  $L_1$  добавляются к списку контуров.

7. Вторая смежная связке  $L_4$  связка  $L_5$  помещается на вершину стека и блокируется.

8. Единственная смежная связке  $L_5$  связка  $L_2$  уже заблокирована, поэтому связка  $L_5$  снимается со стека и добавляется в список, соответствующий связке  $L_2$ .

9. Связка  $L_5$  снимается со стека, но остается заблокированной.

10. Связка  $L_4$  снимается со стека и разблокируется.

11. Связка  $L_2$  снимается со стека и разблокируется.

12. Разблокируются связки  $L_5$  и  $L_3$  из вспомогательного списка, соответствующего связке  $L_2$ .

13. Снимается со стека последняя содержащаяся в нем связка  $L_1$ .

Состояние стека, списка заблокированных вершин, а также вспомогательных списков для каждой вершины при обработке алгоритмом данного подграфа приведено в таблице. Звездочкой выделено состояние стека в момент обнаружения контура.

Далее алгоритм рассматривает максимальный подграф, порожденный связками  $L_2$  и следующими. Такой подграф содержит связки  $L_2, L_3, L_4, L_5$ . Последовательность шагов, иллюстрирующая обработку этого подграфа, следующая.

1. На вершину пустого стека помещается связка  $L_2$ .

2. Первая смежная связке  $L_2$  связка  $L_3$  помещается на вершину стека и блокируется.

3. Единственная смежная связке  $L_3$  связка  $L_2$  является начальной, потому текущее состояние стека ( $L_2, L_3$ ) и стартовая связка  $L_2$  добавляются к списку контуров.

4. Связка  $L_3$  снимается со стека и разблокируется.

- Состояние стека и списка заблокированных вершин
- Stack contents and corresponding blocked vertices list

Стек	Блок	Вспомогательные списки при				
		$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$
$L_1$	$L_1$	—	—	—	—	—
$L_1, L_2$	$L_1, L_2$	—	—	—	—	—
$L_1, L_2, L_3$	$L_1, L_2, L_3$	—	—	—	—	—
$L_1, L_2$	$L_1, L_2, L_3$	—	$L_3$	—	—	—
$L_1, L_2, L_4^*$	$L_1, L_2, L_3, L_4$	—	$L_3$	—	—	—
$L_1, L_2, L_4, L_5$	$L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$	—	$L_3$	—	—	—
$L_1, L_2, L_4$	$L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$	—	$L_3, L_5$	—	—	—
$L_1, L_2$	$L_1, L_2, L_3, L_5$	—	$L_3, L_5$	—	—	—
$L_1$	$L_1$	—	—	—	—	—

5. Вторая смежная связке  $L_2$  связка  $L_4$  помещается на вершину стека и блокируется.

6. Единственная в данном подграфе смежная связке  $L_4$  связка  $L_5$  помещается на вершину стека и блокируется.

7. Единственная смежная связке  $L_5$  связка  $L_2$  является начальной, потому текущее состояние стека ( $L_2, L_4, L_5$ ) и стартовая связка  $L_2$  добавляются к списку контуров.

8. Связка  $L_5$  снимается со стека и разблокируется.

9. Связка  $L_4$  снимается со стека и разблокируется.

10. Последняя в стеке связка  $L_2$  снимается со стека и разблокируется.

Последующие подграфы, рассматриваемые алгоритмом, тривиальны (содержат только одну вершину) и не содержат контуров.

### Алгоритмы построения перечня и проверки наличия междольных контуров в графе связок

Алгоритм Джонсона, описанный в предыдущем разделе, может быть модифицирован для построения списка междольных контуров. Оригинальный алгоритм блокирует посещаемые вершины, чтобы избежать повторного обхода одних и тех же участков графа. Модифицированный алгоритм, помимо блокировки вершин, блокирует также и соответствующие доли.

При помещении очередной связки на вершину стека соответствующая доля блокируется. Связка не может быть помещена на вершину стека, если заблокирована она или соответствующая ей доля. При снятии вершины со стека соответствующая доля разблокируется, хотя отдельные вершины, относящиеся к данной доле, могут оставаться заблокированными.

Блокировка и разблокировка долей может быть организована за константное время. Поскольку на этапе построения графа связок для каждой связки сохранялось название соответствующей задачи, то проверка, относится ли данная связка к заблокированной доле, тоже занимает константное время.

Заметим, что блокировка долей в дополнение к блокировке отдельных вершин хоть и может уменьшить количество перебираемых алгоритмом маршрутов, существуют случаи, в которых подобный подход не уменьшает общего количества шагов. Примером может служить граф, целиком состоящий из одного или нескольких непересекающихся междольных контуров, подобный приведенному на рис. 4.

Таким образом, модифицированный алгоритм, строящий список междольных контуров, работает за то же время, что и оригинальный алгоритм, строящий список всех контуров.

Алгоритм проверки наличия пересекающихся контуров принимает на вход набор контуров, где каждый контур представлен в виде списка вершин. Поиск общих вершин можно осуществить за один обход всех контуров. Выделим хеш-таблицу для хранения уже посещенных вершин. Для каждой вершины, встреченной при обходе контура, проверим ее наличие в таблице посещенных вершин. Если вершина не принадлежит ни к одному из уже посещенных контуров, то добавим ее в таблицу и перейдем к обработке следующей вершины. Встретив же уже посещенную вершину, алгоритм останавливается, возвращая соответствующий результат. Если же при обходе всех контуров не было обнаружено ни одной вершины, встречающейся более одного раза, то и пересечений между контурами не существует.

Поскольку добавление и поиск элемента в хеш-таблице занимает константное время, общее вре-

мя работы алгоритма поиска пересекающихся контуров равно  $O(n)$ , где  $n$  — сумма длин всех контуров.

## Заключение

Представленные алгоритмы позволяют выполнять анализ структуры программных приложений систем реального времени на возможность применения тех или иных протоколов доступа к разделяемым ресурсам. В общем случае анализ выполняется в три этапа.

На первом этапе строится многодольный граф связей критических интервалов по доступу задач к разделяемым ресурсам. Число долей в этом графе равно числу задач в программном приложении. Сложность построения графа связей линейно зависит от суммы числа вершин и числа ребер графа связей.

Второй этап состоит в построении перечня междольных контуров графа связей. Сложность построения перечня междольных контуров оценивается как  $O((n + e)(c + 1))$ .

Факт отсутствия междольных контуров в графе связей означает, что взаимное блокирование задач невозможно и, следовательно, при реализации приложения возможно применение любого протокола доступа к разделяемым ресурсам, начиная с простейшего протокола, допускающего использование эффективных процедур планиро-

вания с динамически переопределяемыми приоритетами задач.

При обнаружении в графе связей междольных контуров возможны следующие варианты реализации приложения:

— применение протоколов пороговых приоритетов, защищающих приложение от возникновения взаимного блокирования задач, однако применение этих протоколов исключает возможность использования наиболее эффективных дисциплин планирования;

— перестройка структуры задач таким образом, чтобы разорвать имеющиеся в графе связей междольные контуры, тогда необходимость применения протоколов пороговых приоритетов отпадает, открывается возможность использования самых эффективных дисциплин планирования;

— если такая перестройка структуры задач не удастся, то может оказаться целесообразным выполнение третьего этапа анализа, состоящего в проверке наличия в графе связей пересечений междольных контуров. Если таких пересечений нет, защиту от возникновения взаимного блокирования обеспечит применение протокола междольных контуров, не накладывающего ограничений на варианты используемых дисциплин планирования.

Сложность проверки графа связей на отсутствие пересекающихся междольных контуров линейно зависит от суммы длин всех этих контуров.

## Литература

1. Давиденко К. Я. Технология программирования АСУТП. Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 183 с.
2. Liu J. W. S. Real-Time Systems. — NJ: Prentice Hall, 2000. — 590 p.
3. Sha L., Rajkumar R., Lehoczky J. P. Priority Inheritance Protocols: An Approach to Real-Time Synchronization // IEEE Trans. on Computers. 1990. N 39(9). P. 1175–1185.
4. Никифоров В. В., Баранов С. Н. Статическая проверка корректности разделения ресурсов в системах реального времени // Тр. СПИИРАН. 2017. № 3(52). С. 17–21.
5. Nikiforov V. V., Baranov S. N. Multi-Partite Graphs and Verification of Software Applications for Real-Time Systems // Cybernetics and Information Technologies. 2016. N 16(2). P. 85–96.
6. Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. Маршрутные сети — графический формализм представления структуры программных приложений реального времени // Тр. СПИИРАН. 2010. № 14. С. 5–28.
7. Данилов М. В., Никифоров В. В. Статическая обработка спецификаций программных систем реального времени // Программные продукты и системы. 2000. № 4. С. 13–19.
8. Baranov S. N., Nikiforov V. V. Density of Multi-Task Real-Time Applications // Proc. 17th Conf. FRUCT, Yaroslavl, 2015. С. 9–15.
9. Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. Составное блокирование взаимосвязанных задач в системах на многоядерных процессорах // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. № 7. С. 25–31.
10. Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. Цепное блокирование задач в системах реального времени // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. № 7. С. 17–21.
11. Никифоров В. В. Протокол предотвращения взаимного блокирования задач в системах реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. № 57(12). С. 21–27.
12. Johnson D. Finding All the Elementary Circuits of a Directed Graph // SIAM Journal on Computing. 1975. N 4(1). P. 77–84. doi:10.1137/0204007/issn0097-5397
13. Tarjan R. Enumeration of the Elementary Circuits of a Directed Graph // SIAM Journal on Computing. 1973. N 2(3). P. 211–216. doi:10.1137/0202017/issn 0097-5397
14. Tiernan J. C. An Efficient Search Algorithm to Find the Elementary Circuits of a Graph // Communica-

tions of the ACM. 1970. N 13(12). P. 722–726. doi:10.1145/362814.362819

15. Mateti P., Deo N. On Algorithms for Enumerating all Circuits of a Graph // *SIAM Journal on Computing*. 1976. N 5(1). P. 90–99. doi:10.1137/0205007

16. Tarjan R. Depth-first Search and Linear Graph Algorithms // *SIAM Journal on Computing*. 1972. N 1(2). P. 146–160.

17. Dijkstra E. *A Discipline of Programming*. — NJ: Prentice Hall, 1976. — 217 p.

UDC 004.04

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.59

### Algorithms for Checking Applicability of Resource Access Protocols in Real-Time Systems

Nikiforov V. V.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, nikifor\_sergei@mail.ru

Podkorytov S. A.<sup>a</sup>, PhD, Junior Researcher, podkorytovs@gmail.com

<sup>a</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Developing multi-task applications often requires that access to their common resources is shared between multiple tasks. For this purpose, synchronizing elements like mutexes are often used. However, using mutexes can lead to deadlocks. To avoid them, you can use special access protocols with additional steps on top of mutex operations («request»/»free resource»). In real-time systems, these steps could lead to a significant increase in response time for high priority tasks. Previously, a solution based on static analysis of real-time application models was proposed. The applications are modeled using graphical formalism of route nets. This solution relies on building a special multipartite oriented graph (a graph of bundles of critical intervals). **Purpose:** The goal is to develop algorithms which would implement the static analysis proposed earlier, and to evaluate their complexity. **Results:** The algorithms developed in this study can determine whether the necessary and sufficient conditions for deadlocks are found in a given application. The analysis is performed in three steps. The first algorithm builds a graph of bundles of critical intervals. This algorithm is linear with respect to number of bundles and their dependencies. The second algorithm enumerates the interparty circuits. This algorithm takes  $O((n+e)(c+1))$ , where  $c$  is the number of the circuits,  $n$  is number of the vertices, and  $e$  is the number of the edges. Finally, the third algorithm searches for intersections between the interparty circuits. The third algorithm takes linear time with respect to the total length of all the interparty circuits. These algorithms allow developers to modify an application early in its development to prevent deadlocks or chose an access protocol providing the best performance.

**Keywords** — Real-Time Systems, Multi-Task Application Models, Access Protocols, Shared Resources.

### References

1. Davidenko K. Ya. *Tekhnologiya programirovaniia ASUTP. Proektirovanie sistem real'nogo vremeni, paralel'nykh i raspredelennykh prilozhenii* [A Technology for Programming Industrial Control Systems. Designing Real-Time Systems, Parallel and Distributed Applications]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 183 p. (In Russian).
2. Liu J. W. S. *Real-Time Systems*. NJ, Prentice Hall, 2000. 590 p.
3. Sha L., Rajkumar R., Lehoczky J. P. Priority Inheritance Protocols: An Approach to Real-Time Synchronization. *IEEE Trans. on Computers*, 1990, no. 39(9), pp. 1175–1185.
4. Nikiforov V. V., Baranov S. N. Static Verification of Task Access to Shared Resources in Real-Time Systems. *Trudy SPIIRAN*, 2017, vol. 3(52), pp. 138–157 (In Russian).
5. Nikiforov V. V., Baranov S. N. Multi-Partite Graphs and Verification of Software Applications for Real-Time Systems. *Cybernetics and Information Technologies*, 2016, no. 16(2), pp. 85–96.
6. Nikiforov V. V., Shkirtil V. I. Route Nets — Graphical Form for Structural Representation of Real-Time Software Applications. *Trudy SPIIRAN*, 2010, no. 14, pp. 5–28 (In Russian).
7. Danilov M. V., Nikiforov V. V. Static Processing of Real-Time Software System Specifications. *Programmnye produkty i sistemy*, 2000, no. 4, pp. 13–19 (In Russian).
8. Baranov S. N., Nikiforov V. V. Density of Multi-Task Real-Time Applications. *Proc. 17th Conf. FRUCT*, Yaroslavl, 2015, pp. 9–15.
9. Nikiforov V. V., Shkirtil V. I. Compound Blocking of Dependent Tasks in Real-Time Systems at Multi-Core Processors. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2012, no. 1, pp. 25–31 (In Russian).
10. Nikiforov V. V., Shkirtil V. I. Chained Task Blocking in Real-Time Systems. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravliaiushchie sistemy*, 2013, no. 7, pp. 17–21 (In Russian).
11. Nikiforov V. V. Protocol for Avoiding of Mutual Blocking in Real-Time Systems. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2014, no. 12, pp. 21–27 (In Russian).
12. Johnson D. Finding All the Elementary Circuits of a Directed Graph. *SIAM Journal on Computing*, 1975, no. 4(1), pp. 77–84. doi:10.1137/0204007/issn0097-5397
13. Tarjan R. Enumeration of the Elementary Circuits of a Directed Graph. *SIAM Journal on Computing*, 1973, no. 2(3), pp. 211–216. doi:10.1137/0202017/issn:0097-5397
14. Tiernan J. C. An Efficient Search Algorithm to Find the Elementary Circuits of a Graph. *Communications of the ACM*, 1970, no. 13(12), pp. 722–726. doi:10.1145/362814.362819
15. Mateti P., Deo N. On Algorithms for Enumerating all Circuits of a Graph. *SIAM Journal on Computing*, 1976, no. 5(1), pp. 90–99. doi:10.1137/0205007
16. Tarjan R. Depth-first Search and Linear Graph Algorithms. *SIAM Journal on Computing*, 1972, no. 1(2), pp. 146–160.
17. Dijkstra E. *A Discipline of Programming*. NJ, Prentice Hall, 1976. 217 p.

# УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ОРГАНИЗАЦИИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ВЫДЕЛЕННОГО СЕРВЕРА С КОНТЕЙНЕРНОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИЕЙ

**В. А. Липатников<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

**А. А. Шевченко<sup>а</sup>**, младший научный сотрудник

**А. Д. Яцкин<sup>а</sup>**, старший оператор

**Е. Г. Семенова<sup>б</sup>**, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** существует противоречие между требованиями международных стандартов к организации по установке порядка внутренней и внешней коммуникации по вопросам, относящимся к системе менеджмента качества и касающимся сохранения целостности системы при планировании и внесении в нее изменений в условиях кибернетического противоборства. **Цель:** разработка способа управления информационной безопасностью, при котором документированная информация системы менеджмента качества будет находиться под управлением для обеспечения ее доступности, а также защищенности от потери конфиденциальности, ненадлежащего использования или потери целостности. **Результаты:** предложен способ управления информационной безопасностью, основанный на добавлении в демилитаризованную зону информационно-вычислительной сети выделенного сервера, на котором с помощью технологии контейнерной виртуализации развертывается виртуальная копия реальной сети, включающая сетевые сервисы. Злоумышленник, производящий подготовку компьютерной атаки на сеть, работая с данным сервером, предполагает, что взаимодействует с реальной сетью. В процессе анализа действий злоумышленника в реальном времени администратор сети получает информацию о приоритетных целях, используемых средствах злоумышленника и уязвимостях различных элементов сети, что дает ему возможность оперативно принять меры по повышению защищенности сети и избежать ее компрометации. **Практическая значимость:** использование данного подхода позволяет поддерживать работоспособность системы менеджмента качества на требуемом уровне при динамике изменения множества угроз с учетом масштабирования при планировании и внесении в нее изменений в условиях кибернетического противоборства.

**Ключевые слова** — автоматизированная система менеджмента организации интегрированной структуры, информационно-вычислительная сеть, компьютерная атака, защита информации, оценка рисков, контейнерная виртуализация, проактивное управление, масштабирование, показатель защищенности.

## Введение

Согласно требованиям международного стандарта [1], организация должна установить порядок внутренней и внешней коммуникации по вопросам, относящимся к системе менеджмента качества (СМК). Перспективным направлением управления в организации является внедрение автоматизированных систем менеджмента качества организации интегрированной структуры (АСМК ОИС) [2]. Имеет место противоречие между требованиями международного стандарта к организации по установлению порядка внутренней и внешней коммуникации по вопросам, относящимся к СМК. С одной стороны, должно быть определено, с кем и каким образом будет осуществляться коммуникация. С другой стороны, требуется сохранение целостности СМК при планировании и внесении в нее изменений в условиях кибернетического противоборства. Необходимо разработать способ, при котором документированная информация АСМК ОИС будет находиться под управлением

в целях ее доступности и пригодности для применения, а также адекватно защищена (от потери конфиденциальности, ненадлежащего использования или потери целостности).

Требуется сохранение целостности СМК при планировании и внесении в нее изменений. Традиционные средства защиты информации (СЗИ), такие как антивирусное программное обеспечение, межсетевые экраны и системы обнаружения вторжений, как известно, не гарантируют абсолютной защищенности информационно-вычислительных сетей (ИВС), входящих в состав АСМК ОИС. Антивирусное программное обеспечение, являясь средством реактивной защиты, реагирует только на известные системе виды воздействий. Межсетевые экраны и системы обнаружения вторжений не лишены уязвимостей, которые могут быть использованы злоумышленником для проникновения в защищенную ИВС как составную часть АСМК.

Основным показателем защищенности АСМК ОИС в условиях кибернетического противобор-

ства является время бесперебойной работы ИВС  $T_3$  на заданном интервале наблюдения. На этапе проектирования задается требуемое время нахождения ИВС в исправном состоянии  $T_{тр}$ . Для оценки информационной безопасности (ИБ) используется вероятность нахождения ИВС в состоянии защищенности от компьютерной атаки (КА)

$$P_3(T) = P(T_3 \geq T_{тр}).$$

В процессе масштабирования АСМК эффективность мер, принятых для обеспечения ИБ, может снижаться, так как возникают новые угрозы, поэтому текущее значение показателя  $P_3(T)$  уменьшается. Для поддержания оптимального уровня защищенности необходимо осуществлять управление с учетом текущей обстановки с прогнозированием.

В одном способе [2] прогнозирование состояния ИБ и выявление уязвимостей ИВС АСМК выполняется на основе заданной на начальном этапе таблицы уязвимостей. Такой подход удобен с точки зрения анализа последствий реализации известных уязвимостей и прогнозирования дальнейшего функционирования ИВС. В другом способе контроля уязвимостей [3] также используется предварительно сформированная таблица тестирования и база данных уязвимостей. Общим недостатком вышеперечисленных способов является то, что в них используется фиксированное множество известных уязвимостей. Способы позволяют точно оценить защищенность  $P_3(T)$  и принять определенные меры в рамках этого множества, но, в действительности, нельзя пренебрегать тем фактом, что множество угроз постоянно меняется. Злоумышленники находят новые способы обхода СЗИ, обнаруживают новые уязвимости в программах и протоколах.

Одним из подходов, предоставляющих органу управления возможность прогнозировать предстоящие КА, является использование средств обеспечения ИБ, выполняющих имитацию работы реальных элементов ИВС, так называемых honeypot-систем. Средства, такие как Security Studio Honeypot Manager [4], позволяют имитировать работу строго определенных элементов ИВС, например СУБД Oracle, что является существенным ограничением гибкости подобных систем. При этом обеспечивается не полноценное функционирование ложного элемента ИВС, а лишь имитация его работы, как, например, в системе HoneyBot [5], которая имитирует работу хоста под управлением ОС Windows и способна отвечать на запросы по протоколам echo, ftp, telnet, smtp, http, pop3, ident, dcom, socks. Эти системы называются низкоинтерактивными с точки зрения полноты покрытия функциона-

ла реальной системы. Такие системы потребляют меньше ресурсов и представляют меньшую угрозу для безопасности ИВС, но при этом легко обнаруживаются злоумышленником, и поэтому информация, полученная с помощью данных систем, не будет содержать действительно важных для администратора безопасности ИВС сведений. Высокоинтерактивные honeypot-системы, обеспечивающие полноценную работу ложных элементов ИВС, такие как HiHat [6], обычно ограничены функционалом только одного приложения. Решения на базе виртуальных машин, имитирующие работу реального хоста, имеют место, но при этом являются слишком дорогими в плане обеспечения их вычислительными ресурсами, что делает их нерентабельными.

Задачей данного исследования является разработка способа управления ИБ ИВС с распознаванием КА и прогнозированием предполагаемого сценария дальнейшего развития КА, учитывающего возможные последствия при принятии решений по предупреждающим действиям.

### Предлагаемый способ управления ИБ ИВС на основе выделенного сервера с контейнерной виртуализацией

В качестве решения предлагается внедрение в сеть выделенного сервера, на котором с использованием технологии контейнерной виртуализации развертывается виртуальная копия ИВС, полностью или частично повторяющая все ее элементы. Предполагается, что, получив доступ к этому серверу, злоумышленник будет в течение определенного времени считать, что работает с реальной ИВС и производит действия по подготовке и реализации распределенных атак. Результаты регистрируются и передаются органу управления ИБ для принятия мер по защите реальной ИВС от готовящейся атаки.

Исходными данными для решения являются вероятность нахождения АСМК в состоянии защищенности от КА  $P_3(T)$  и критерий ИБ (требуемый уровень защищенности)  $P_{3,т}$ . Требуется обеспечить  $P_{3,т}$  при следующих исходных данных:

$\{H\} = \{h_1, \dots, h_i\}$  — элементы ИВС;

$\{D\} = \{d_1, \dots, d_i\}$  — средства защиты, используемые в ИВС;

$\{S\} = \{s_1, \dots, s_i\}$  — сетевые службы, функционирующие в ИВС.

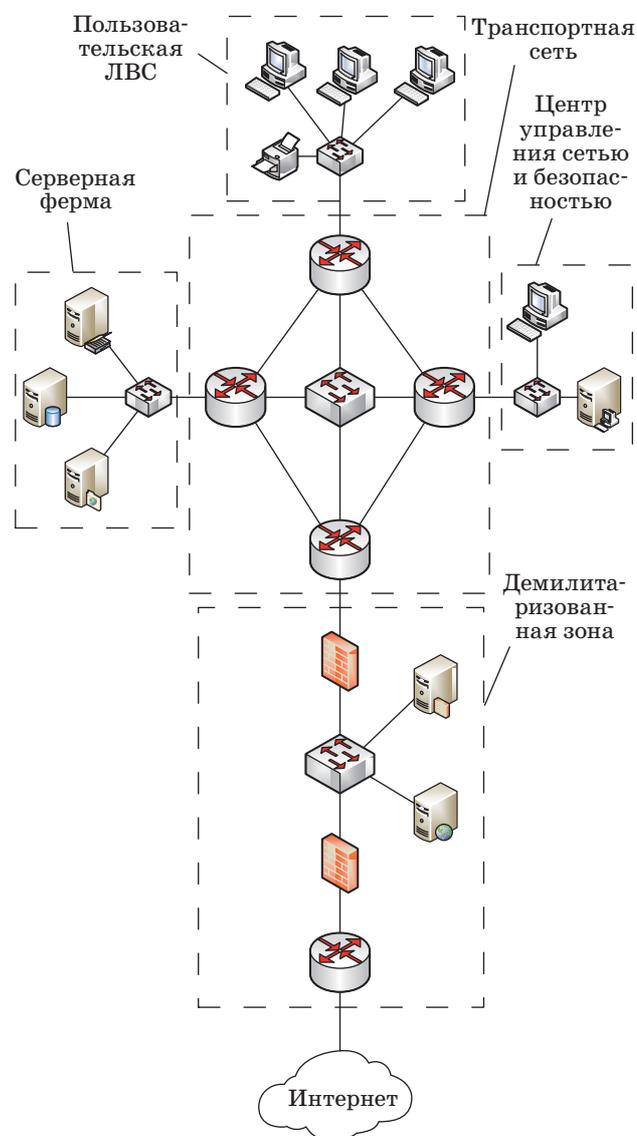
Исключается возможность злоумышленника обнаруживать признаки того, что его активность подвергается анализу. Процесс получения сведений о действиях злоумышленника не снижает безопасность и производительность АСМК как интеллектуальной многоагентной системы. Обеспечивается отвлечение ресурсов злоумышленника от воздействия на основную часть ИВС.

В работе рассматривается типовая структура ИВС, состоящая из следующих элементов (рис. 1):

1. Транспортной сети. Она включает в себя сетевые устройства, такие как маршрутизаторы и коммутаторы, главной задачей которых является обеспечение обмена данными между различными сегментами ИВС.

2. Демилитаризованной зоны, участка ИВС, находящегося на ее границе и соединяющегося с сетью Интернет через пограничный маршрутизатор. Внутри этого участка ИВС располагаются службы, которые должны быть доступны пользователям внешней сети, такие как веб-сервер, прокси-сервер и др.

3. Серверной фермы, где располагаются серверы, обеспечивающие работу различных служб,



■ **Рис. 1.** Структурная схема предлагаемой информационно-вычислительной сети  
 ■ **Fig. 1.** Computer network diagram used in the study

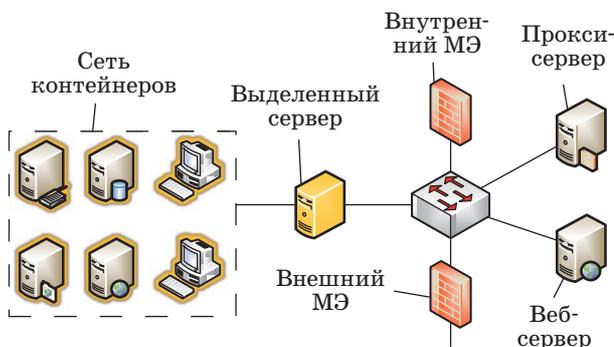
используемых внутри ИВС: файловый сервер, сервер баз данных, сервер службы каталогов и др.

4. Центра управления безопасностью, задачей которого является контроль уязвимостей узлов сети и управление работой используемых СЗИ. Должны быть определены знания, необходимые для функционирования процессов ИВС и для достижения требуемой ИБ. Эти знания должны поддерживаться на соответствующем уровне и быть доступными в необходимом объеме (п. 7.1.6 ISO 9001-2015).

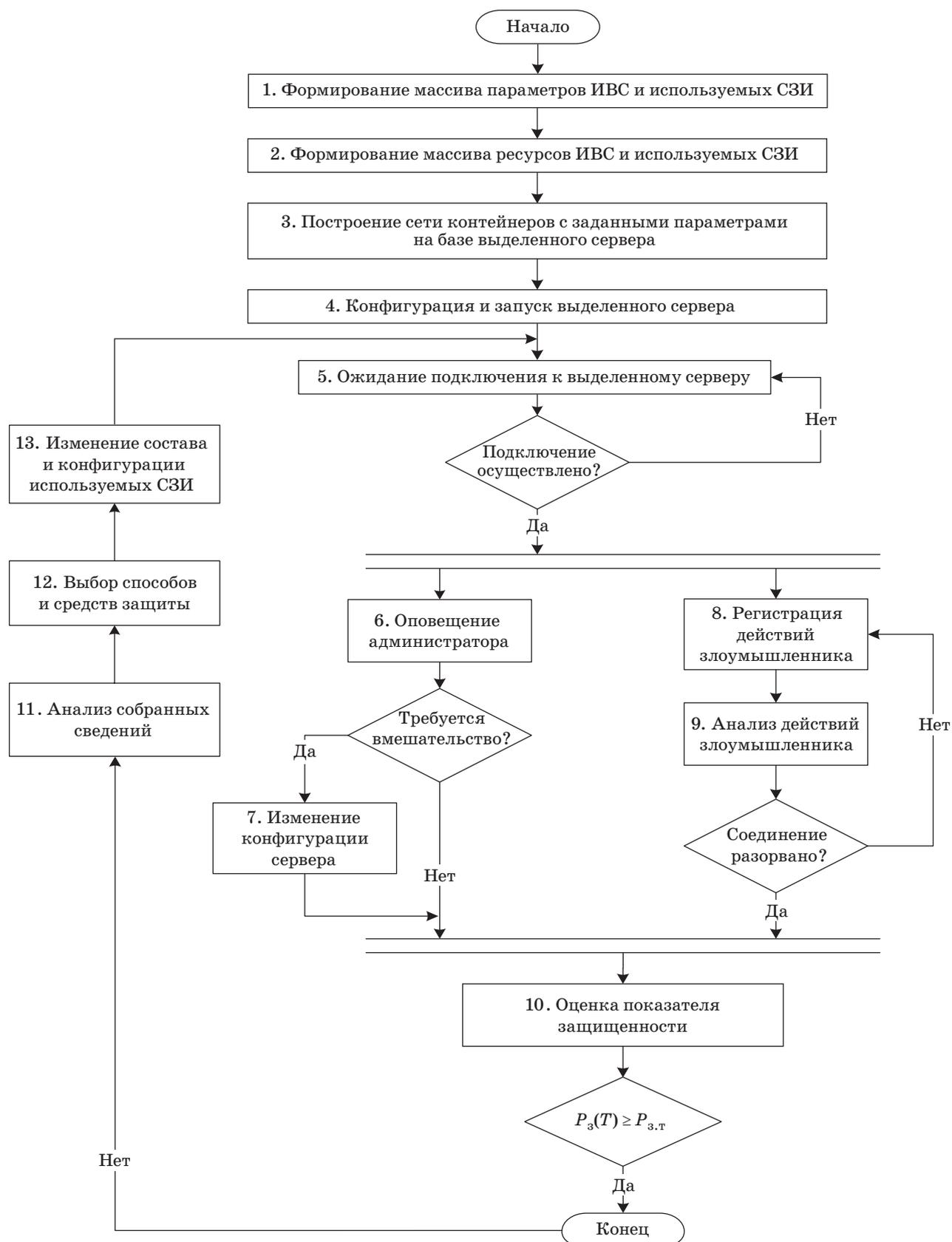
5. Пользовательской локальной вычислительной сети ЛВС, состоящей из рабочих мест пользователей, сетевых принтеров и других устройств. Таких сетей обычно бывает несколько; они могут быть разделены по подразделениям или по другому принципу, предложенному администратором сети.

Возможны два способа расположения выделенного сервера в ИВС: в демилитаризованной зоне и внутри ИВС. В первом случае предполагается воздействие на ИВС со стороны внешнего злоумышленника, т. е. через сеть Интернет, а во втором — со стороны внутреннего, т. е. легитимного пользователя.

Рассмотрим первый вариант, когда выделенный сервер располагается в демилитаризованной зоне между двумя межсетевыми экранами МЭ (рис. 2) и для внешнего злоумышленника может выглядеть как произвольный сетевой ресурс ИВС. Сеть, развернутая на базе выделенного сервера, представляет собой сеть Linux-контейнеров на базе программного продукта Docker, созданную таким образом, чтобы повторять топологию и функциональную принадлежность элементов реальной ИВС. Получив доступ к данному веб-серверу, злоумышленник в первую очередь попытается произвести мониторинг топологии ИВС, но вместо взаимодействия с реальной ИВС он уже будет обмениваться данными с контейнерами. При этом все его действия будут регистрироваться и анализироваться.



■ **Рис. 2.** Расположение выделенного сервера с контейнерной виртуализацией  
 ■ **Fig. 2.** Dedicated server placement



■ **Рис. 3.** Алгоритм проактивного управления ИБ ИВС АСМК на основе выделенного сервера с контейнерной виртуализацией  
 ■ **Fig. 3.** Proactive management algorithm based on a dedicated server with a container virtualization

Использование технологии контейнерной виртуализации в рассматриваемой интеллектуальной многоагентной системе позволяет более гибко настраивать элементы сети: вместо создания полноценных виртуальных машин администратор может, пользуясь модульной структурой Docker-контейнеров, оперативно разворачивать элементы сети, конфигурировать их сетевые интерфейсы, разворачивать необходимые сетевые службы, при этом службы, также помещенные в контейнеры, не требуют повторной настройки на каждом из элементов сети, что значительно упрощает процесс конфигурации системы. Используя информацию, полученную в процессе анализа действий злоумышленника, можно установить приоритетные цели, возможности атакующего и средства, используемые для осуществления КА, методы взлома и уязвимости СЗИ; сформировать статистику атак и произвести определение способов противодействия им.

Согласно вышеизложенному предлагается алгоритм проактивного управления ИБ ИВС, состоящий из следующих шагов (рис. 3).

1. На основании данных о структуре ИВС: адресах элементов ИВС и СЗИ, расположении их в сети, наличии связей с другими элементами и их назначении, — формируются массивы  $\{H\} = \{h_1, \dots, h_j\}$  — элементы ИВС и  $\{D\} = \{d_1, \dots, d_j\}$  — используемые СЗИ. Элементами массивов являются:  $h_i = (\text{Идентификатор элемента, Сетевой адрес, Расположение в ИВС, Назначение})$ ,  $d_i = (\text{Идентификатор СЗИ, Сетевой адрес, Расположение в ИВС, Назначение})$ .

2. Сведения о составе сетевых служб, работающих на элементах ИВС, их назначении, а также о каналах управления используемыми СЗИ позволяют сформировать массив  $\{S\} = \{s_1, \dots, s_j\}$ . Элементы массива имеют вид  $s_j = (\text{Идентификатор службы, Элемент ИВС, Используемый порт, Назначение})$ .

3. С помощью сформированных массивов с данными о составе ИВС, используемых служб и СЗИ создаются контейнеры, которые будут работать на выделенном сервере: производится настройка сетевых интерфейсов, контейнеров сетевых служб и др.

4. Производится конфигурация и запуск выделенного сервера.

5. Выделенный сервер ожидает подключения со стороны злоумышленника. Легитимные пользователи работают только с реальными хостами, а весь сетевой трафик изолирован от реальных элементов ИВС. Сам факт подключения к выделенному серверу считается нарушением ИБ.

6. При подключении к серверу администратор безопасности оповещается об этом событии.

7. Администратор безопасности может изменить конфигурацию ИВС, например, ослабить

или, наоборот, усилить механизмы защиты хостов, работающих на его базе, для того чтобы манипулировать злоумышленником.

8. Параллельно с оповещением администратора о подключении начинается подробная регистрация действий злоумышленника внутри сети.

9. Данные, полученные в ходе регистрации действий злоумышленника с виртуальной сетью, анализируются и передаются администратору, который на их основе принимает решения в п. 8. При анализе данных определяется тип воздействия на ИВС, идентифицируются известные КА, а также их различные параметры. Прогнозируются воздействие и элементы, на которые будет направлена КА, и принимается решение по предупреждающим действиям.

Для прогнозирования состояния ИВС можно применить один из методов методологии прогнозирующих моделей (Model Predictive Control — MPC), например, метод State-Space Model Predictive Control (управление с прогнозированием на основе модели пространства состояний) [7, 8].

Модель процесса функционирования объекта управления используется для предсказания выходных данных объекта управления на основе прошлых и текущих значений параметров обнаружения атак [9] и предполагаемых оптимальных управляющих воздействий в будущем.

10. С учетом данных об уязвимостях ИВС, приоритетных целях злоумышленника и эффективности используемых СЗИ, полученных в процессе взаимодействия злоумышленника с выделенным сервером, производятся оценка вероятности нахождения ИВС в состоянии защищенности от КА и сравнение результатов оценки с заданным критерием  $P_{з.т}$ .

11. Администратором ИБ ИВС проводится анализ полученных сведений, целью которого является выработка мер, необходимых для повышения уровня защищенности.

12. Определяются необходимые изменения конфигурации используемых СЗИ, целесообразности включения в ИВС новых СЗИ, различные настройки сетевых служб.

13. Производится конфигурация используемых и внедрение новых СЗИ в ИВС.

### Практическая значимость

Процесс управления ИБ ИВС АСМК является циклическим, и предполагается, что до момента времени  $t = 0$  ИВС находится на этапе подготовки. Он включает в себя начальную оценку рисков, выбор и внедрение требуемых СЗИ. В момент  $t > 0$  сеть переходит на этап эксплуатации, что приводит к постоянному снижению показателя защищенности  $P_3(T)$ . В процессе дальнейшего функционирования ИВС при обнаружении

новых угроз ИБ необходимо также производить оценку рисков, внедрение новых и изменение конфигурации используемых СЗИ. Эти действия и определяют границу одного цикла управления. Время начала очередного цикла управления  $t_{y i}$  также можно принять за  $t = 0$ . Основная задача процесса управления состоит в том, чтобы значение показателя  $P_3(T) \geq P_{3,т}$  для всех интервалов  $[t_{y i}, t_{y i+1}]$ .

Процесс воздействия злоумышленниками на ИВС в наблюдаемом промежутке времени можно рассматривать, как поток случайных событий (КА), имеющий плотность распределения  $w_a(t)$ , а меры защиты, принимаемые администратором безопасности ИВС, как поток случайных событий с плотностью распределения  $w_3(t)$  [10]. Можно определить величину  $P_3(T)$  как

$$P_3(T) = \int_0^T w_3(\tau) \left[ 1 - \int_0^\tau w_a(t) dt \right] d\tau. \quad (1)$$

Поскольку случайные события, связанные с подготовкой и осуществлением КА, являются последовательными, то можно предположить, что обе рассмотренные случайные величины имеют экспоненциальное распределение со значением параметра интенсивности  $\lambda = 1/T_3$  и  $\lambda = 1/T_a$  для действий администратора системы и действий злоумышленника соответственно, т. е.

$$w_3(t) = \frac{1}{T_3} \exp\left(-\frac{t}{T_3}\right);$$

$$w_a(t) = \frac{1}{T_a} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right),$$

где  $T_3$  — среднее время, требуемое для реализации мер защиты;  $T_a$  — среднее время, необходимое для осуществления КА.

Экспоненциальное распределение характеризуется одним параметром, определяющим среднее значение времени обеспечения  $T_3$  или преодоления защиты  $T_a$ . При задании в выражении (1) плотностей распределения вероятностей  $w_3(t)$  и  $w_a(t)$ , соответствующих экспоненциальному распределению, могут быть получены аналитические выражения для вероятности обеспечения защиты  $P_3(T)$  в зависимости от параметров  $T_3$  и  $T_a$ .

Экспоненциальное распределение соответствует простейшему потоку событий и описанию переходов между состояниями защищенности информационной системы марковскими случайными процессами. Вычисление вероятности соответствия уровня защищенности требуемому за заданное время  $T$  в соответствии с выражением (1) для экспоненциальных функций плотности рас-

пределения вероятностей  $w_3(t)$  и  $w_a(t)$  с параметрами  $T_3$  и  $T_a$  дает

$$P_3(T) = \frac{1}{1 + T_3/T_a} \left( 1 - \exp\left(-\frac{T(1 + T_3/T_a)}{T_3}\right) \right). \quad (2)$$

Перед реализацией КА злоумышленнику необходимо получить информацию об уязвимостях ИВС, которые могут быть использованы при реализации атаки. Процесс сбора злоумышленником информации об ИВС в общем случае представляет следующую последовательность действий:

- 1) пассивный анализ, целью которого является сбор данных, без непосредственного активного взаимодействия с ИВС;
- 2) вскрытие топологии сети (активное сетевое сканирование);
- 3) определение используемых операционных систем, состава работающих сетевых служб и их версий;
- 4) выявление наличия уязвимостей используемых операционных систем и сетевых служб.

Обозначим время, которое потребуется злоумышленнику на проведение пассивной подготовки (п. 1) как  $T_{п.п}$ , активных процессов в целях подготовки КА (процессы по п. 2–4) как  $T_{а.п}$ , а время, необходимое для реализации КА с использованием полученных сведений об ИВС, как  $T_p$ .

Соответственно, весь цикл осуществления КА будет складываться из времени, потраченного злоумышленником на подготовку, и временем, требуемым для непосредственной реализации КА:

$$T_a = T_{п.п} + T_{а.п} + T_p.$$

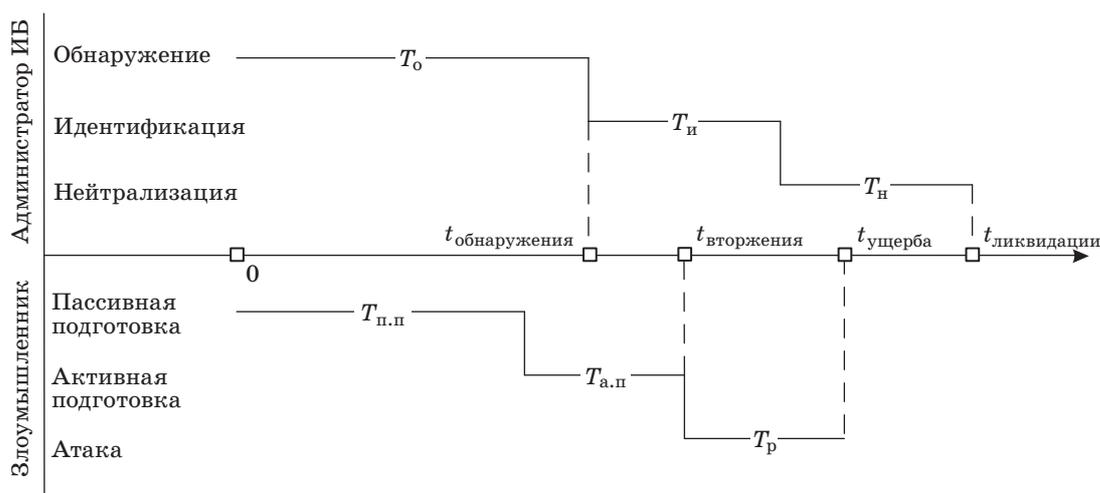
Администратор ИБ ИВС может обнаружить КА только начиная с момента активной подготовки ее злоумышленником. Время от начала атаки до ее обнаружения —  $T_0$ . При обнаружении факта наличия КА требуется время на идентификацию  $T_{и}$  этой КА и выполнение нейтрализации (минимизации) воздействия  $T_{н}$ . Среднее время, требуемое для реализации мер защиты, определяется как

$$T_3 = T_0 + T_{и} + T_{н}.$$

Временная диаграмма вторжения в ИВС представлена на рис. 4. Администратор ИБ получает информацию о наличии КА уже в процессе ее осуществления, т. е. момент времени  $t_{обнаружения}$  наступает, когда КА находится уже на этапе активной подготовки.

Система находится в незащищенном состоянии начиная в промежуток времени  $[t_{вторжения}, t_{ликвидации}]$ .

Компьютерную атаку можно считать успешно проведенной злоумышленником, так как за



■ **Рис. 4.** Временная диаграмма успешной КА на ИВС  
 ■ **Fig. 4.** Timing diagram of a successful computer attack

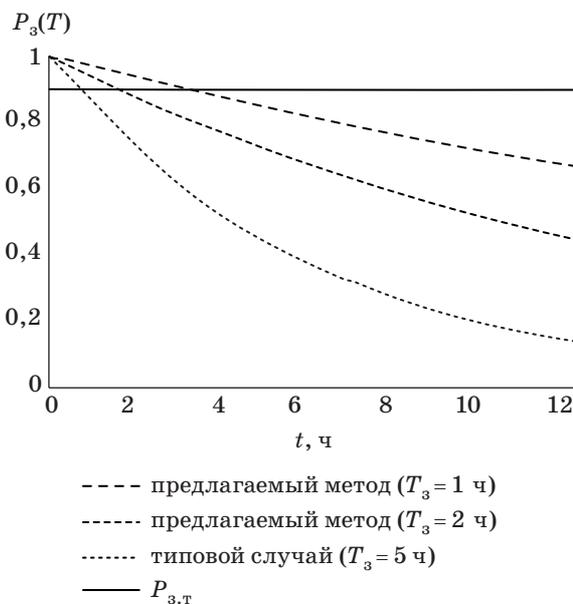
время, необходимое администратору на обнаружение, идентификацию и нейтрализацию КА, могут быть полностью или частично достигнуты цели КА.

Применение предложенного способа позволяет администратору опередить злоумышленника, вторгнувшегося в сеть. Пока злоумышленник взаимодействует с сетью контейнеров, администратору представляется возможность подготовить реальную сеть к противодействию аналогичной атаке со стороны злоумышленника. То есть при условии, что злоумышленник сначала попытается осуществить атаку на сеть контейнеров, администратор ИБ АСМК предполагает, что подобная атака может быть осуществлена и на реальную ИВС, поэтому значительно сокращается время обнаружения КА:  $T_o \rightarrow 0$ . На момент проведения атаки на реальную ИВС у администратора уже будет достаточная информация о предполагаемой КА, а также возможность заранее предпринять меры по защите.

Предложенный способ, помимо сокращения времени  $T_o$ , позволяет уменьшить величину  $T_и$ , так как администратор ИБ ИВС, располагая сведениями о предполагаемой атаке, сможет быстрее ее идентифицировать. Таким образом, сокращая интервалы времени  $T_o$  и  $T_и$ , тем самым уменьшая величину  $T_з$ , мы, в соответствии с формулой (2), можем повысить уровень защищенности ИВС  $P_з(T)$ .

Рассмотрим  $P_з(T)$ , где момент  $t = 0$  — момент начала управления ИБ. Положим, что плотность вероятности величины, характеризующей действия защиты:  $w_з(t) = \delta(t - T_з)$ , тогда формула (1) примет вид

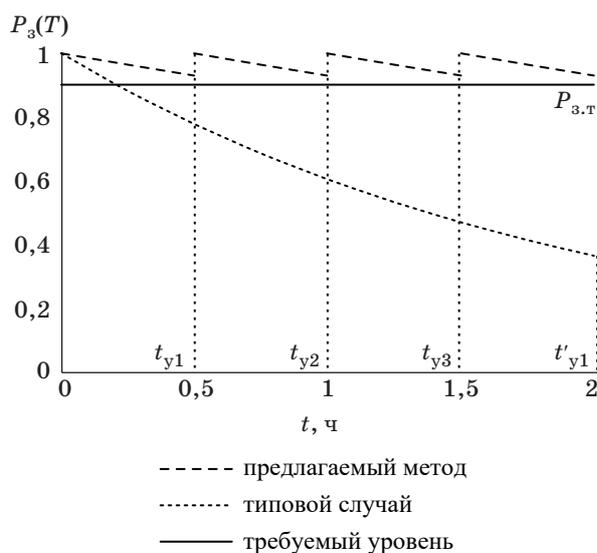
$$P_з(T) = \exp(-tT_з/T_a).$$



■ **Рис. 5.** Вероятность защищенности ИВС АСМК в отсутствие мероприятий по управлению ИБ  
 ■ **Fig. 5.** Probability chart of a security value without an information security management process

Зафиксируем значение величины  $T_a = 10$  ч, а требуемый уровень защищенности ИВС  $P_з.т = 0,9$ . График зависимости для типовых условий в случае различных значений  $T_з$  представлен на рис. 5.

Определено снижение уровня защищенности в зависимости от времени, а также точка пересечения графиков, в которой  $P_з(T) = P_з.т$ . Этот момент времени является критическим для принятия мер по обеспечению ИБ, т. е. определяются границы интервала  $[t_{y0}, t_{y1}]$ . При наличии в ИВС



■ **Рис. 6.** Вероятность защищенности АСМК с учетом циклического управления ИБ

■ **Fig. 6.** Probability chart of a security value with an information security management process

процесса управления ИБ постоянное падение показателя защищенности  $P_3(T)$  компенсируется путем проведения мероприятий по предупреждению и противодействию КА в момент времени  $t_{y,i}$ .

В типовом случае обнаружение КА может занимать несколько часов с момента начала злоумышленником действий по подготовке к ее осуществлению. Предположим значение  $T_0 = 3$  ч. Время, которое потребуется на идентификацию КА от момента ее обнаружения, положим равным  $T_{и} = 1$  ч, а время на нейтрализацию КА  $T_{н} = 1$  ч. Как было рассмотрено ранее, предложенный способ позволяет значительно сократить время обнаружения КА, так как после осуществления КА на виртуальную копию ИВС администратор уже будет располагать всеми необходимыми сведениями для проактивного противодействия атаке на реальную ИВС, поэтому можно положить  $T_0 = 0$  ч, а время на идентификацию КА  $T_{и} = 0,5$  ч. Для типового случая  $T_3 = T_0 + T_{и} + T_{н} = 3 + 1 + 1 = 5$  ч, а при использовании предложенного метода значение  $T_3 = 0 + 0,5 + 1 = 1,5$  ч. Требуемый уровень защищенности оставим прежним  $P_{3,т} = 0,9$ . При этом, с учетом того факта, что время реализации мер защиты  $T_3$  уже учтено в модели снижения защищенности в рамках одного цикла управления, примем допущение, что действия по повышению защищенности в конце каждого цикла осуществляются мгновенно, т. е. время между двумя циклами управления не учитывается. График зависимости значения показателя защищенности  $P_3(T)$  от времени по формуле (1) с учетом циклического подхода к управлению ИБ представлен на рис. 6.

По сравнению с типовым случаем показатель защищенности  $P_3(T)$  снижается медленнее при использовании предложенного метода. Это, а также более низкое время обнаружения и идентификации атаки позволяют принять меры заблаговременно, что дает выигрыш во времени для осуществления проактивного противодействия КА. Использование способа позволяет поддерживать защищенность АСМК выше требуемого значения  $P_{3,т}$  в пределах каждой итерации цикла управления ИБ  $[t_{y,i}, t_{y,i+1}]$ , тогда как в типовом случае (при использовании реактивного подхода к управлению ИБ) на момент, когда администратор будет обладать достаточной информацией о КА, чтобы идентифицировать ее и принять меры по повышению защищенности, т. е. в момент времени  $t'_{y1}$ , показатель защищенности упадет ниже требуемого значения  $P_{3,т}$ .

## Заключение

Результатом использования предложенного способа управления ИБ в АСМК в условиях кибернетического противоборства является возможность поддерживать защищенность на требуемом уровне, используя получаемую информацию для проактивной борьбы с попытками злоумышленника осуществить КА.

Новизна предлагаемого способа в сравнении с существующими решениями заключается в следующем.

1. В предлагаемом способе управления ИБ добавлены процессы получения информации о приоритетных целях злоумышленника, используемых им средствах и уязвимостях различных элементов сети. Для технической реализации способа в демилитаризованную зону ИВС включается выделенный сервер, на котором с помощью технологии контейнерной виртуализации развертывается виртуальная копия реальной сети, включающая сетевые сервисы в условиях ограниченных ресурсов.

2. Анализ взаимодействия злоумышленника с ИВС в реальном времени позволяет администратору своевременно реагировать на попытки осуществления распределенных атак. Использование эффективных методов анализа и прогнозирования повышает достоверность информации, уменьшает время реагирования на осуществление атаки на АСМК.

Можно выделить следующие преимущества предлагаемого метода:

- возможность своевременно обнаружить попытку несанкционированного воздействия, производить статистику атак и определение способов противодействия им;

- централизованное управление системой позволяет оперативно менять ее структуру, адапти-

ровать под изменения реальной информационно-вычислительной сети, а также производить анализ данных, полученных в результате работы системы;

— проактивная модель работы позволяет обеспечить защиту от новых стратегий воздей-

ствия на информационно-вычислительную сеть АСМК;

— изолированность системы от реальной АСМК ОИС предполагает возможность компрометации выделенного сервера с контейнерной виртуализацией без вреда для реальной.

## Литература

- ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. — М.: Изд-во стандартов, 2005. — 32 с.
- Костарев С. В., Липатников В. А. Анализ состояния и динамики качества объектов автоматизированной системы менеджмента предприятия интегрированной структуры // Информационные системы и технологии. 2015. № 3 (89). С. 52–64.
- Липатников В. А., Шевченко А. А. Способ контроля уязвимостей при масштабировании автоматизированной системы менеджмента предприятия интегрированной структуры // Информационные системы и технологии. 2016. № 2 (94). С. 128–140.
- Honeypot Manager. <https://www.securitycode.ru/products/honeypot> (дата обращения: 04.12.2016).
- HoneyBOT — the Windows Honeypot. <http://www.atomicsoftwaresolutions.com> (дата обращения: 04.12.2016).
- НИНАТ — High Interaction Honeypot Analysis Tool. <http://hihat.sourceforge.net> (дата обращения: 04.12.2016).
- Samacho E. F., Bordons C. Model Predictive Control. — London: Springer-Verlag, 2004. — 405 p.
- Кузнецов И. А., Липатников В. А., Сахаров Д. В. Управление АСМК организации интегрированной структуры с прогнозированием состояния информационной безопасности // Электросвязь. 2016. № 3. С. 28–36.
- Лукацкий А. Обнаружение атак. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 304 с.
- Мальцев Г. Н., Панкратов А. Н., Лесняк Д. А. Исследование вероятностных характеристик изменения защищенности информационной системы от несанкционированного доступа нарушителей // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 50–57. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.50

UDC 004.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.67

### Information Security Management of Integrated Structure Organization based on a Dedicated Server with Container Virtualization

Lipatnikov V. A.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, lipatnikovanl@mail.ru

Shevchenko A. A.<sup>a</sup>, Junior Researcher, alexandr\_shevchenko91@mail.ru

Yatskin A. D.<sup>a</sup>, Science Company Senior Operator, yatskinandrey@gmail.com

Semenova E. G.<sup>b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, egsemenova@mail.ru

<sup>a</sup>Military Academy of Telecommunication of S. M. Budionov, 3, Tikhoretskii Pr., K-64, 194064, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** There is a contradiction between the requirements of the international standards on internal and external communication concerning the issues related to the quality management system and the system integrity when planning or reconfiguring under the conditions of cyberattacking. **Purpose:** We have to develop a way of information security management in which the documented information of the quality management system is controlled to ensure its accessibility, as well as its protection from a loss of confidentiality, misuse or loss of integrity. **Results:** A method of information security management is proposed, based on adding a dedicated server into the demilitarized zone of a computer network. The method uses the virtual container technology, deploying a virtual copy of the real network including the network services. Attackers, while interacting with the server, presume that they interact with the real network. The network administrator analyzes the attackers' actions in real time and obtains the information about their priority targets, the tools they use and the vulnerabilities of the network elements. This allows the administrator to quickly take measures in order to increase the network security and avoid its compromise. **Practical relevance:** This approach allows you to maintain the operability of a quality management system at the required level considering the dynamics of the increasing number of threats and the process of scaling and making changes to the network under the conditions of cyberattacking.

**Keywords** — Automated Management System of an Integrated Structure Organization, Information and Computer Network, Computer Attack, Data Protection, Risk Assessment, Container Virtualization, Proactive Management, Scaling, Index of Security.

References

1. State Standard ISO 9001–2015. Quality Management Systems. Requirements. Moscow, Standartov Publ., 2005. 32 p. (In Russian).
2. Kostarev S. V., Lipatnikov V. A. Analysis of Status and Trends in the Quality of the Automated Management System of Enterprise Integrated Structure. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information Systems and Technologies], 2015, no. 3 (89), pp. 52–64 (In Russian).
3. Lipatnikov V. A., Shevchenko A. A. The Vulnerability Control Method Applying while Automated Integrated Structure Organization Management System Scaling. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information Systems and Technologies], 2016, no. 2(94), pp. 128–140 (In Russian).
4. *HoneyPot Manager — Kod Bezopasnosti* [HoneyPot Manager — Security Code]. Available at: <https://www.security-code.ru/products/honeypot> (accessed 4 July 2017).
5. *HoneyBOT — the Windows HoneyPot*. Available at: <http://www.atomicsoftwaresolutions.com> (accessed 4 July 2017).
6. *HIHAT — High Interaction HoneyPot Analysis Tool*. Available at: <http://hihat.sourceforge.net> (accessed 4 July 2017).
7. Camacho E. F., Bordons C. Model Predictive Control. London, Springer-Verlag, 2004. 405 p.
8. Kuznetsov I. A., Lipatnikov V. A., Sakharov D. V. The Operation Quality Management Automated System of Organization Integrated Structure with the Prediction Function of Condition of Information Security. *Elektrosviaz'*, 2016, no. 3, pp. 28–36 (In Russian).
9. Lukatskiy A. *Obnaruzhenie atak* [Attack Detection]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2008. 304 p. (In Russian).
10. Maltsev G. N., Pankratov A. V., Lesniak D. A. Probabilistic Characteristics of Information System Security Changes under Unauthorized Access. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 1, pp. 50–57 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.50

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](mailto:i-us.spb@gmail.com)  
Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)

# ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ВЕДЕНИИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Л. А. Мартынова<sup>а</sup>, доктор техн. наук, старший научный сотрудник  
<sup>а</sup>АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** одной из важнейших задач при ведении сейсморазведки с использованием автономного необитаемого подводного аппарата является определение его местоположения с требуемой точностью. В силу особенностей ведения сейсморазведки, связанных с миниатюрными массогабаритами аппарата, отсутствием возможности излучения акустического сигнала и определения с высокой точностью собственного местоположения, имеющиеся методы навигации объекта в морской среде не могли быть применены в полной мере. **Цель исследования:** разработка метода определения местоположения автономного необитаемого подводного аппарата с учетом особенностей его использования при ведении сейсморазведки, включающего в себя дифференциальный режим коррекции положения аппарата. **Метод:** определение расстояния между аппаратом и излучателем разностно-дальномерным методом, позволяющим устранить ошибки, связанные с расхождением временных шкал аппарата и излучателя. **Результаты:** разработан метод определения местоположения автономного необитаемого подводного аппарата, который, в отличие от использовавшихся ранее, не требует синхронизации шкал излучателя и приемника, проведения специальных исследований среды распространения звукового сигнала, излучений со стороны аппарата и позволяет вести вычисления по определению местоположения аппарата непосредственно на его борту. Установка одной базовой станции в районе исключает необходимость размещения на дне сети донных станций «маяков-ответчиков», используемых в настоящее время при определении местоположения в морской среде по методу длинной базы. Дифференциальный режим предлагаемого метода включает в себя алгоритмы выработки дифференциальных поправок и их корректировки местоположения подводного аппарата, широко используемые в спутниковой навигации. Проведенные исследования позволили установить основные закономерности использования режима дифференциальных поправок, определить ограничения предложенного метода. **Практическая значимость:** предложенный метод существенно сокращает время на проведение подготовительных работ при сейсморазведке, является коммерчески более скрытым по сравнению с используемыми.

**Ключевые слова** — автономный необитаемый подводный аппарат, местоположение объекта, поправки, дифференциальный режим.

## Введение

В настоящее время вопросам сейсморазведки уделяется повышенное внимание, особенно в условиях ледовой обстановки. В статье [1] предложен метод ведения сейсморазведки, заключающийся в использовании группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) с размещенными на них геофонами. В процессе сейсморазведки геофоны принимают отраженные от залежей углеводородов сигналы, излучаемые специальным излучателем (вибратором), расположенным на крупногабаритном обитаемом подводном объекте-носителе. Реализация предложенного в работе [1] метода эффективна только при достаточно точном определении местоположения каждого АНПА группы по широте-долготе и по глубине.

Имеется большое количество методов позиционирования подводного объекта, в данном случае АНПА, в морской среде с использованием гидроакустических сигналов [2].

Однако позиционирование АНПА при выполнении сейсморазведки имеет ряд особенностей, которые не позволяют в полной мере воспользоваться имеющимися на сегодняшний момент

методами и способами [3–7]. Так, применение методов с длинной базой связано с необходимостью оборудования морского дна маяками-ответчиками, что само по себе является дорогостоящим, технически сложным мероприятием. Использование методов короткой базы связано с необходимостью излучения АНПА сигнала, что приводит к избыточному расходу запаса электроэнергии АНПА, а также препятствует скрытному позиционированию и является демаскирующим признаком, что в условиях коммерческой конкуренции крайне нежелательно. Использовать метод ультракороткой базы нельзя из-за невозможности размещения на АНПА фазированной решетки с учетом его очень скромных массогабаритов, исчисляемых десятками сантиметров. Использование одномаяковой навигации требует дополнительной подготовительной работы, связанной с оценками эффективной скорости распространения звукового сигнала в воде [7] в рассматриваемом районе. Поскольку ведение сейсморазведки — процесс достаточно длительный, происходит в течение нескольких суток и даже недель, то измерения вертикального распределения скорости звука необходимо вести регулярно в процессе сейсморазведки, что связано с техни-

ческими, временными и финансовыми трудностями.

Таким образом, применение перечисленных выше методов невозможно, с одной стороны, из-за сложностей, сопровождающих их использование, и, с другой стороны, необходимости учитывать ряд особенностей при позиционировании АНПА. Однако положительным фактором является то, что определение точного нахождения АНПА в большей степени необходимо при их стационарном состоянии, а при движении основное внимание следует сосредоточить на безаварийности движения АНПА с одной стороны и удалении на дальности связи друг от друга с другой стороны. Вместе с тем прикрепленный к дну АНПА может оказаться в зоне тени по отношению к излучателю вследствие неровностей рельефа. Это также должно учитываться при выборе метода определения местоположения АНПА.

В настоящей работе в развитие перечисленных в статье [2] методов предлагается метод высокоточной навигации АНПА путем дифференциальной коррекции позиционирования АНПА с учетом особенностей ведения сейсморазведки.

### Особенности метода ведения сейсморазведки

Сейсморазведка проводится следующим образом [1]. В заданном районе с использованием АНПА перемещают и к дну прикрепляют геофоны в точках, расположенных в узлах условной сетки, покрывающей дно заданного района. Вблизи донной поверхности по круговой траектории (циклоиде) перемещается излучатель, расположенный на подводном носителе, зондируя донную поверхность импульсными сигналами. АНПА с геофонами принимают отраженные сигналы от залежей углеводородов в придонном слое [1].

Предложенный метод поиска залежей углеводородов [1] основан на согласованном функционировании излучателя и группы АНПА. В то время как большая часть АНПА из группы прикреплена к дну и принимает отраженный сигнал, создаваемый излучателем, другая часть АНПА перемещается для занятия новой позиции, не участвуя при этом в приеме отраженных сигналов. После занятия новой позиции отраженные сигналы принимает группа АНПА в обновленном составе, при этом часть АНПА, не задействованная в приеме сигнала, перемещается в места новой своей дислокации. Тем самым достигается динамичность функционирования всей системы в целом и непрерывность сейсморазведки, что сокращает время на ее проведение.

Из данного описания метода ведения сейсморазведки следует, что:

— наиболее точное позиционирование АНПА должно быть обеспечено в периоды его стационарного положения при прослушивании отраженных сигналов;

— позиционирование можно проводить как до начала излучения геосигнала, так и в процессе сейсморазведки;

— время, затрачиваемое на позиционирование стационарно расположенных АНПА, не ограничено: определять местоположение можно синхронно с приемом отраженных сигналов.

При разработке метода позиционирования каждого АНПА группы предполагаем следующие:

— подводный носитель оснащен качественной высокоточной бортовой инерционной навигационной системой и обладает возможностью определения своего местоположения, например, с использованием информации глобальной навигационной спутниковой системы;

— навигационная система подводного носителя обеспечивает стабильную временную шкалу;

— уход шкалы времени у каждого АНПА постоянен и с течением времени не меняется;

— расхождение шкал времени  $\Delta t$  излучателя и АНПА на время проведения измерений у каждого АНПА будем считать постоянной величиной.

В соответствии с предложенным методом [1] ведения сейсморазведки подводный аппарат с излучателем движется по круговой траектории и излучает акустический сигнал. Пусть мощность излучаемого сигнала такова, что прямой сигнал регистрируется каждым АНПА. Поскольку положение АНПА различно, то и прием каждым АНПА сигнала происходит в разное время. Если бы часы АНПА были синхронизированы с часами излучателя, то достаточно было бы зарегистрировать сигнал на АНПА и на этом закончить измерения. Однако часы каждого АНПА имеют собственную временную шкалу, уход которой от шкалы излучателя неизвестен. В то же время предполагаем, что уход шкалы у каждого отдельно взятого АНПА — постоянный по отношению к временной шкале излучателя. По прямому сигналу излучателя каждый АНПА определяет дальность до излучателя и по совокупности нескольких измерений дальности самостоятельно решает навигационную задачу, в результате чего определяет свое собственное местоположение.

### Метод определения положения АНПА

При определении местоположения АНПА после их прикрепления к дну воспользуемся разностно-дальномерным методом определения местоположения АНПА, в ходе которого происходит измерение разностей времен распространения сигнала от излучателя до АНПА для поиска

точки пересечения гипербол. Такой метод является одной из разновидностей методов длинной базы [2]. Достоинством методов длинной базы является возможность высокоточного (до десятков сантиметров) определения координат АНПА при условии использования для измерения времени распространения сигнала между излучателем и АНПА разработанного в последние годы так называемого модемного обмена [2]. Модем позволяет обеспечить точность измерения времени распространения сигнала между излучателем и АНПА вплоть до 0,01% [2], в том числе в условиях многолучевого гидроакустического канала. Однако в рассматриваемом случае такой метод не применим, поскольку, как было сказано в начале, АНПА лишен возможности излучать ответный сигнал.

Для идеальных условий синхронизации излучателя с приемниками АНПА и среды распространения сигнала уравнение дальности от излучателя с координатами  $(x_n, y_n, z_n)$  до  $i$ -го АНПА имеет вид

$$R_i = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2}, \quad (1)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  — координаты  $i$ -го АНПА.

Однако реальные условия отличаются от идеальных тем, что:

- шкалы времени излучателя и приемников АНПА не синхронизированы;
- условия распространения сигнала, прежде всего вертикальное распределение скорости звука в текущий момент времени, также неизвестно.

В связи с этим при измерении дальности до  $i$ -го АНПА получаем так называемую *псевдодальность*  $R_i^*$ , отличающуюся от истинной дальности  $R_i$  на постоянную величину  $\Delta R_i$ . Уравнение (1) для псевдодальностей приобретает вид

$$R_i^* = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2} + \Delta R_i. \quad (2)$$

Поверхностью положения  $i$ -го АНПА является сфера с центром в точке положения излучателя, но радиус этой сферы изменен на неизвестную величину  $\Delta R_i$ . Для определения координат каждого  $i$ -го АНПА необходимо решить задачу с четырьмя неизвестными  $(x_i, y_i, z_i, \Delta R_i)$ . Следовательно, для решения системы уравнений в псевдодальномерном методе при классическом использовании метода необходимо измерить псевдодальности минимум до четырех пространственно разнесенных излучателей. Поскольку в рассматриваемом методе ведения сейсморазведки используется только один излучатель, то в этом случае, по аналогии со спутниковой навигацией [8], возникающую пространственную неоднозначность исключают при помощи последовательных измерений

нескольких (четырёх-пяти) положений излучателя [2]. При этом в каждом  $j$ -м измерении определяется псевдодальность  $R_{ij}^*$ :

$$R_{ij}^* = \sqrt{(x_{nj} - x_i)^2 + (y_{nj} - y_i)^2 + (z_{nj} - z_i)^2} + \Delta R_{ij}. \quad (3)$$

По полученным значениям псевдодальностей на борту АНПА определяется его местоположение.

### Исключение расхождения временных шкал излучателя и АНПА-приемника при определении дальностей

Для исключения расхождения временных шкал излучателя и АНПА-приемника воспользуемся разностно-дальномерным методом. Его особенностью является то, что шкалы излучателя и каждого акустического приемника  $i$ -го АНПА не должны быть синхронизированы, поскольку метод основан на разностях прихода сигнала от различного положения излучателя к одному и тому же  $i$ -му АНПА, и разногласие шкал при обработке исключается из рассмотрения.

При разностно-дальномерном методе используются три разности между псевдодальностями  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , вычисленные для четырех измерений расстояний от излучателя до АНПА по (2), так как в этом выражении величина  $\Delta R_i$  постоянная и сокращается при вычитании псевдодальностей. Следовательно, вычисление разностей псевдодальностей равносильно вычислению разностей истинных дальностей. В данном случае навигационным параметром является  $\Delta R_i$ , а поверхность положения представляет собой двуполостной гиперboloид вращения, фокусами которого являются координаты положения излучателя при  $(j-1)$ -м и  $j$ -м измерениях ( $j=1\div 4$ ). Ограничением на применение разностно-дальномерного метода является требование относительно положения излучателя в моменты определения положения АНПА: точки положения излучателя должны быть достаточно широко разнесены в пространстве для повышения точности позиционирования АНПА [9].

В результате решения системы уравнений (3) АНПА определяет координаты своего местоположения.

При этом необходимо отметить, что такой процесс может происходить параллельно с зондированием дна сейсмосигналами, поскольку они отличаются по частоте и их приемом заняты геофоны, а не гидрофоны. Тогда можно синхронизировать излучение акустических сигналов с излучением геопосылок.

Поскольку в силу особенностей ведения сейсморазведки большая часть АНПА достаточно долго остается прикрепленной ко дну, то количество акустических сигналов, формируемых излучателем, может оказаться значительно больше четырех и достаточным, чтобы по разностно-дальномерному методу определить положение АНПА с требуемой точностью.

Возможность получить большее количество сигналов от АНПА, своего рода избыточность, необходима также на тот случай, если некоторые АНПА окажутся затененными по отношению к излучателю из-за особенностей рельефа дна.

Таким образом, в процессе сейсморазведки определение положения АНПА происходит следующим образом: АНПА прикреплены ко дну, и в течение времени несколько раз производится излучение/прием геосигналов излучателя, положение которого известно. Одновременно идет излучение акустического сигнала для позиционирования АНПА. При этом излучатель постоянно движется, совершая круговые движения вокруг группы АНПА. АНПА неподвижны, поэтому по этим последовательным излучениям, в свою очередь, определяются координаты положения АНПА. Причем чем шире широкоазимутальность прихода сигналов на АНПА и обратно к излучателю, тем точнее определяется положение АНПА [9].

В ходе постобработки на каждом АНПА на зарегистрированные моменты времени будут получены разности времени между приходами сигналов от излучателя. По результатам разностей времени принятых сигналов будут получены данные для определения местоположения каждого АНПА.

### **Исключение влияния среды распространения на определение дальностей. Метод дифференциального режима уточнения положения под водой**

При необходимости более точного получения координат АНПА в работе предлагается метод учета погрешности распространения акустического сигнала, связанной с особенностями среды распространения, возможными аномалиями распространения звука в воде, в результате чего происходит искривление лучей, задержки в распространении акустического сигнала, причем на разных глубинах — по-разному. Как отмечено в работе [2], для устранения этого эффекта целесообразно иметь измерения распределения скорости звука, однако это требует дополнительных усилий, и измерение по глубине также вызывает определенные трудности. Необходим инструментарий для высокоточного определения скорости звука в воде.

Предлагаемый в настоящей работе метод формирования дифференциальных поправок, включающий необходимость измерений скорости звука, удобен тем, что для его использования необходимо знать лишь разность между временем распространения звука в идеальных условиях и временем распространения звука в фактических условиях, без анализа причин возникновения и изменения с глубиной этой разности.

Метод основан на выработке дифференциальных поправок к псевдодальностям между излучателем и каждым АНПА.

Из спутниковой навигации известно [8], что если все псевдодальности изменить на одну и ту же величину, то результат решения навигационной задачи не изменится. На этом факте основан также принцип уточнения определения местоположения АНПА с использованием поправок к псевдодальностям: соотношение между псевдодальностями должно стремиться к теоретически рассчитанному соотношению расстояний до излучателя.

Предлагаемый метод дифференциального режима уточнения местоположения АНПА заключается в использовании базовой станции (БС), например, в специальном АНПА или отдельном маяке, расположенном на возвышенном месте донной поверхности вблизи места проведения поиска углеводородов. Положение БС определяется с высокой точностью на предварительном (подготовительном) этапе до сейсморазведки. Для этого допустимо проведение специального мероприятия, например, специальное движение подводного объекта с излучателем вокруг этой БС и определение ее местоположения. И уже после определения ее местоположения — собственно проведение сейсморазведки. В отличие от использования трех БС в методах длинной базы, в предлагаемом методе необходима только одна станция, что экономически более выгодно. Чтобы впустую не расходовался ресурс БС, она становится работоспособной только в момент ведения сейсморазведки по сигналу от излучателя. Все остальное время она может находиться в «спящем» режиме.

При изложении метода предполагаем, что для получения точного положения отдельно взятого «базового» АНПА технического оснащения достаточно, а время высокоточного определения БС не ограничено.

Пусть по результатам высокоточных измерений известно положение БС с координатами  $(x_6, y_6, z_6)$ . Тогда в момент излучения акустического сигнала подвижным излучателем, положение которого известно, определяется измеренное расстояние до излучателя

$$R_{ij}^{\text{изм}} = \sqrt{(x_{ij} - x_6)^2 + (y_{ij} - y_6)^2 + (z_{ij} - z_6)^2}.$$

Одновременно вычисляется «теоретическое» расстояние от БС до излучателя, поскольку координаты БС известны с высокой точностью:

$$R_{ij} = \sqrt{(x_{и_j} - x_б)^2 + (y_{и_j} - y_б)^2 + (z_{и_j} - z_б)^2}.$$

По полученным результатам определяется разность расстояния хода сигнала от излучателя до БС при  $j$ -м измерении:

$$\Delta R_{ij} = R_{ij} - R_{ij}^{\text{изм}}.$$

К  $i$ -м псевдодальностям остальных АНПА добавляется вычисленная поправка  $\Delta R_i$ , поскольку предполагается, что условия распространения звука одинаковые. Тогда корректировка псевдодальностей с учетом дифференциальных поправок примет вид

$$R_{ij}^* = \sqrt{(x_{и_j} - x_i)^2 + (y_{и_j} - y_i)^2 + (z_{и_j} - z_i)^2} + \Delta R_{ij}.$$

При использовании предложенного метода необходимо, чтобы расстояние от АНПА до излучателя многократно превосходило расстояние между БС и остальными АНПА. Если же расстояние соизмеримо, то поправки к псевдодальностям БС и остальных АНПА уже нельзя считать одинаковыми, и в этом случае для повышения точности целесообразно учитывать различие дистанций от излучателя до БС и от излучателя до остальных АНПА. Также можно дополнительно учитывать время хода сигнала от БС до каждого АНПА.

Таким образом, использование метода дифференциальной коррекции происходит в два этапа.

Сначала высокоточно определяется положение БС. Для этого совершаются круговые вращения излучателя вокруг БС. Как отмечалось в работах [1, 2 и 9], в данном случае такая траектория способствует широкоазимутальности приема сигналов от АНПА, а поскольку БС неподвижна, то, как следствие, — увеличению точности определения ее местоположения.

На втором этапе, уже в ходе ведения сейсморазведки, наряду с геосигналами излучателем излучается акустический сигнал. На АНПА регистрируются приходы сигнала от излучателя и от БС. Сравниваются теоретически прогнозируемая и фактически полученная дальности до БС, и по ним вычисляется дифференциальная поправка, которая затем добавляется к дальности, полученной по сигналу от излучателя. Предполагается, что в рассматриваемом районе условия распространения звукового сигнала одинаковы по всему району. При этом распределение звука по глубине совершенно неважно, главное — иметь поправку к псевдодальности.

Использование метода дифференциальной коррекции в каждом измерении приводит к повышению точности определения местоположения АНПА.

Для получения количественных характеристик повышения точности определения местоположения АНПА целесообразно проведение моделирования или натурального эксперимента. Поскольку подводные эксперименты затруднительны, то используют математическое моделирование. При этом необходимо учитывать процессы, происходящие в реальности.

Для выявления характерных закономерностей был проведен более доступный эксперимент с сигналами спутниковых радионавигационных систем, позволяющий затем перенести полученные закономерности в моделирование водной среды, поскольку:

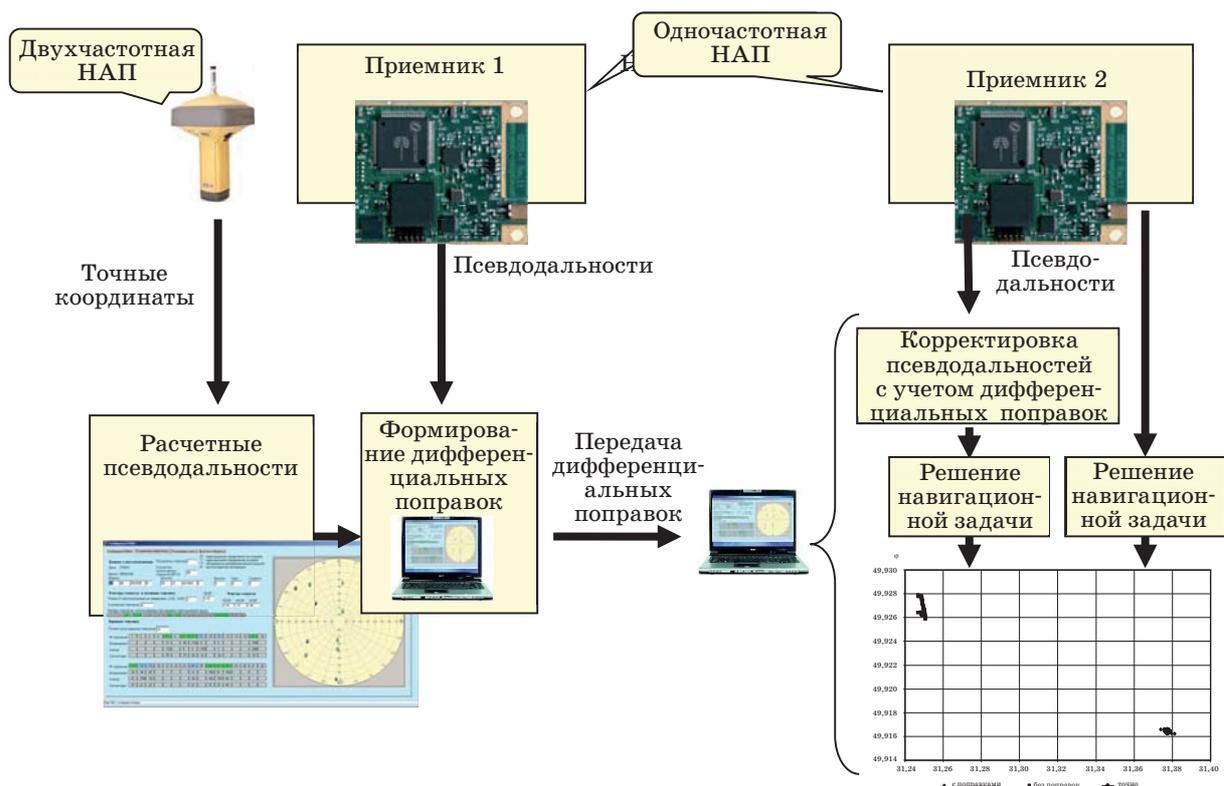
- влияние на время распространения сигнала оказывает как морская, так и воздушная среда;
- математический аппарат обработки результатов измерений от среды не зависит.

## Результаты эксперимента

Чтобы убедиться в том, что, с одной стороны, дифференциальные поправки действительно повышают точность позиционирования, а с другой стороны, кроме дифференциальных поправок, никаких дополнительных данных не требуется, был проведен натуральный эксперимент [10–13].

При проведении эксперимента использовались два одночастотных приемника «Геос-1», позволяющих получить текущие псевдодальности до навигационных спутников. Преимуществом приемника «Геос-1» является несложность его использования. В качестве исследуемой рассматривалась конкретная точка с фиксированными координатами. Точная информация о координатах выбранной точки была получена по результатам длительных измерений двухчастотным геодезическим приемником «Топкон» (Япония).

На эти же моменты времени определялись теоретически рассчитанные точные значения псевдодальностей, полученные по специально разработанной математической модели определения положения навигационных спутников на расчетный текущий момент времени для точки с точно измеренными координатами, в которой находится приемник «Геос-1». Модель и реализующая ее программа работали в реальном масштабе времени и позволяли в каждый момент приема псевдодальностей определять видимое созвездие. Эта же модель по полученным псевдодальностям до видимых навигационных спутников позволяла сформировать оптимальное рабочее созвездие, решить навигационную задачу и определить координаты (широту и



■ **Рис. 1.** Схема стенда по работе с дифференциальными поправками: НАП — навигационная аппаратура потребителя  
 ■ **Fig. 1.** Diagram of the stand for work with differential corrections: НАП — navigation equipment

долготу), а также высоту нахождения приемника.

Схема экспериментального стенда по формированию, передаче и учету дифференциальных поправок к псевдодальностям приведена на рис. 1.

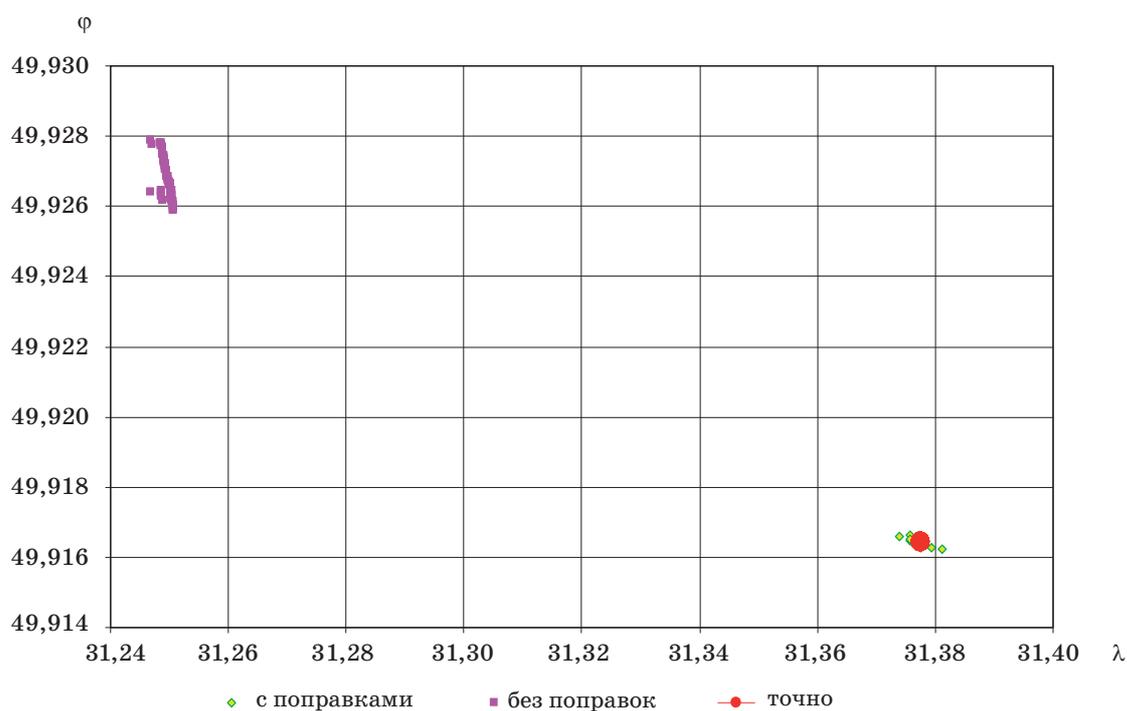
В ходе проведения эксперимента по показаниям «Геос-1» (приемник 1) поступали псевдодальности и передавались на ПК, на основании полученной информации происходило определение поправок к псевдодальностям по каждому космическому аппарату видимой группировки.

Затем полученные поправки передавались в программу, регистрирующую псевдодальности с приемника, расположенного в другом месте (приемник 2). Полученные с приемника 1 поправки использовались для корректировки псевдодальностей приемника 2. По данным приемника 2 осуществлялось решение навигационной задачи и определялись координаты точки его положения. Для исследований влияния использования поправок на точность определения местоположения координаты точки рассчитывались как без учета, так и с учетом поправок к псевдодальностям.

Результаты регистрировались на ПК приемника 2 параллельно для последующей постобработки.

Рассматривался вариант размещения приемников «Геос-1», при котором оба приемника находились рядом в одной и той же точке, но с различными условиями приема.

При таком варианте размещения двух приемников один из них находился на крыше четырехэтажного здания, другой — под ним на окне четвертого этажа этого же здания. Особенность такого положения приемника заключалась в том, что стена здания экранировала спутниковые сигналы, и практически половина спутниковых сигналов приемником не регистрировалась. За «базу» принимался приемник, расположенный на крыше и в зоне видимости которого находились практически все навигационные спутники видимого для данной точки созвездия. Приемник, расположенный на окне («пользователь»), определял псевдодальности и передавал их по локальной сети на ПК, на котором псевдодальности уточнялись с использованием поправок. Оба ПК были соединены витой парой. По полученным значениям на приемнике 2 осуществлялось решение навигационной задачи по псевдодальностям как без полученных поправок, так и с поправками. Эксперимент длился 12 часов в дневное время. За весь период наблюдения использование поправок к псевдодальностям дало значительно лучший результат по сравнению с решением навига-



■ **Рис. 2.** Мишенное поле положения точки без поправок и с поправками  
 ■ **Fig. 2.** Target field of the point position without corrections and with corrections

ционной задачи без поправок. Причем результат решения с полученными поправками практически соответствовал точным координатам данной точки. Приемник «Геос-1», расположенный на крыше, получал сигналы от спутников при угле их видимости от  $15^\circ$ , при этом были видны 11 навигационных спутников.

Приемник «Геос-1», расположенный на окне, получал сигналы практически только от половины навигационных спутников (4–5), так как экранировала стена дома. Из-за этого решение навигационной задачи оказывалось крайне неточным. Использование сформированных и переданных поправок позволило существенно улучшить точность определения местоположения и приблизить полученный результат к точным координатам точки.

Мишенное поле с указанием положения точек определения местоположения показано на рис. 2.

В левом верхнем углу мишенного поля расположены точки, координаты которых получены без учета дифференциальных поправок, в правом нижнем углу расположены точки, координаты которых получены с учетом дифференциальных поправок, там же большой круг красного цвета показывает точное положение навигационного приемника.

В результате проведения эксперимента подтвердились теоретические предпосылки формирования дифференциальных поправок к псев-

додальностям, использование которых привело к повышению точности определения координат в дифференциальном режиме. Это позволит в дальнейшем учитывать и использовать дифференциальный режим в других смежных работах, в том числе и в морской среде. Кроме того, полученные результаты натурального эксперимента в дальнейшем могут быть использованы при построении математической модели определения местоположения АНПА — с учетом особенностей распространения гидроакустического сигнала в морской среде.

### Заключение

Предложенный метод позиционирования АНПА при ведении сейсморазведки отличается тем, что не требует излучения сигнала самого АНПА. Рассмотрены возможности ухода от необходимости синхронизации временных шкал и учет среды распространения без необходимости проведения трудоемких дорогостоящих измерений характеристик самой среды. На результатах натурального эксперимента показана работоспособность и эффективность применения предложенного метода.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666-а).

## Литература

1. Мартынова Л. А. Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. 2017. № 1. С. 83–92. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83
2. Кебкал К. Г., Машошин А. И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. № 3 (94). С. 115–130. doi:10.1728/0869-7035.2016.24.3.115-130
3. Кебкал К. Г., Кебкал В. К., Кебкал А. Г., Петрочка Р. Экспериментальная оценка вероятности доставки пакетов навигационных данных по цифровому гидроакустическому каналу связи // Гироскопия и навигация. 2016. № 2 (93). С. 107–122. doi:10.17285/0869-7035.2016.24.2107-122.
4. Кебкал К. Г., Кебкал А. Г. Комбинированная система гидроакустического позиционирования с короткой и длинной базой: экспериментальные результаты // СЕКЦИЯ 2 Технические средства и методы акустических, геофизических и физико-химических исследований океана, биотехнологии и экология. <http://libed.ru/knigi-nauka/415342-1-sekciya-tehnicheskie-sredstva-i-metodi-akusticheskikh-geofizicheskikh-fiziko-himicheskikh-issledovaniy-okeana-biotehnolog.php> (дата обращения: 23.03.2017).
5. Кебкал К. Г., Кебкал В. К., Кебкал А. Г. Цифровые гидроакустические сети для условий связи с произвольно большими задержками соединения и разрывами соединений: экспериментальное исследование // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2(20). С. 12–19.
6. Дубровин Ф. С., Щербатюк А. Ф. Исследование некоторых алгоритмов однопаяковой мобильной навигации АНПА: результаты моделирования и морских испытаний // Гироскопия и навигация. 2015. № 4 (91). С. 160–172. doi:10.17285/0869-7035.2015.23.4.160-172
7. Кебкал К. Г., Кебкал В. К., Кебкал А. Г. Инструментальные средства синхронизации гидроакустических устройств связи в задачах управления подводными сенсорами, распределенными антеннами, автономными аппаратами // Гироскопия и навигация. 2014. № 4 (85). С. 70–85.
8. Яценков Б. Б. Основы спутниковой навигации. — М.: Каталог, 2002. — 106 с.
9. Буя М., Флорес П. Э., Хилл Д., Палмер Э., Росс Р., Уокер Р., Хаубирс М., Томпсон М., Лаура С., Менликли Д., Молдовану Н., Снайдер Э. и др. Морская сейсморазведка по спиральной траектории Coil Shooting // Нефтегазовое обозрение. 2008. Т. 21. № 4. С. 22–39.
10. Мартынова Л. А. Разработка технологии комплексной обработки разнородной информации, содержащей данные космических радионавигационных систем: дис. ... д-ра техн. наук — СПб., 2013. — 272 с.
11. Мартынова Л. А. Обработка информации космических радионавигационных систем для определения местоположения в условиях ограниченного приема спутникового сигнала // Информация и космос. 2012. № 3–4. С. 58–60.
12. Мартынова Л. А. Обработка информации, включающей данные космических радионавигационных систем, при установке и функционировании быстроразвертываемого охранного комплекса // Информация и космос. 2013. № 2. С. 61–64.
13. Емельянец Г. И., Блажнов Б. А., Степанов А. П. Особенности использования фазовых измерений в задаче ориентации интегрированной инерциально-спутниковой системы. Результаты ходовых испытаний // Гироскопия и навигация. № 3 (74). 2011. С. 3–23.

UDC 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.77

## Differential Method of Positioning a Standalone Unmanned Submersible in Seismic Exploration

Martynova L. A.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, martynowa999@bk.ru<sup>a</sup>State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** One of the most important problems in seismic exploration with a standalone unmanned submersible is to determine its location with the required accuracy. Such seismic surveys have certain peculiarities: small size of the submersibles, their impossibility to emit an acoustic signal, and the difficulty to determine their own location with high accuracy. Therefore, the available methods for positioning an object in a marine environment cannot be fully applied. **Purpose:** We need to develop a method for positioning a standalone unmanned submersible taking into account all its specific features, including the differential mode of correcting the device position. **Method:** The distance between the device and the radiator is measured by the difference-ranging method which allows you to eliminate the errors caused by the discrepancy between the time scales of the device and of the radiator. **Results:** A method has been developed for determining the location of a standalone unmanned submersible. Unlike the previously used methods, this one does not require the synchronization of the radiator and receiver scales, special research of the sound propagation medium, or providing emission from the device. All the calculations can be carried out aboard the submersible. Setting up just one base station in the area makes it unnecessary to arrange a network of “beacon-responder” bottom stations which are commonly used now with the long base technique.

The differential mode of the proposed method includes algorithms for generating differential corrections in order to correct the submersible position which are widely used in satellite navigation. The conducted research helped us to find the ways of using the differential correction mode and to determine the limitations of the proposed method. **Practical relevance:** The proposed method significantly reduces the time necessary for the preparatory work in seismic exploration, being more commercially concealed as compared to others.

**Keywords** — Standalone Unmanned Submersible, Object Location, Corrections, Differential Mode.

## References

1. Martynova L. A. Concerted Action of a Radiator and Autonomous Uninhabited Submersibles for Effective Seismic Exploration. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 83–92 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83
2. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. Acoustic Positioning Methods of Autonomous Vehicles. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2016, vol. 24, no. 3 (94), pp. 115–130 (In Russian). doi:10.1728/0869-7035.2016.24.3.115-130
3. Kebkal K. G., Kebkal V. K., Kebkal A. G., Petrochcha River. Experimental Estimation of Delivery Success of Navigation Data Packages Transmitted via Digital Hydroacoustic Communication Channel. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2016, vol. 24, no. 2 (93), pp. 107–122 (In Russian). doi:10.17285/0869-7035.2016.24.2107-122
4. Kebkal K. G., Kebkal A. G. Combined System of Hydroacoustic Positioning with a Short and Long Basis: the Experimental Results. *SEKTSIIA 2 Tekhnicheskie sredstva i metody akusticheskikh, geofizicheskikh i fiziko-khimicheskikh issledovaniy okeana, biotekhnologii i ekologiia*. Available at: <http://libed.ru/knigi-nauka/415342-1-sekciya-tehnicheskikh-sredstva-metodi-akusticheskikh-geofizicheskikh-fiziko-himicheskikh-issledovaniy-okeana-biotekhnolog.php> (accessed 23 March 2017).
5. Kebkal K. G., Kebkal V. K., Kebkal A. G. Digital Hydroacoustic Networks for Communication in Conditions of Long Delays and Breaks the Connection: an Experimental Research. *Podvodnye issledovaniia i robototekhnika*, 2015, no. 2(20), pp. 12–19 (In Russian).
6. Dubrovin F. S., Scherbatyuk A. F. Study of the Algorithms for the Single Beacon Mobile Navigation of Underwater Vehicles: Results of Simulation and Sea Trials. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2015, no. 4 (91), pp. 160–172 (In Russian). doi:10.17285/0869-7035.2015.23.4.160-172
7. Kebkal K. G., Kebkal V. K., Kebkal A. G. Synchronization Tools of Acoustic Communication Devices in Control of Underwater Sensors, Distributed Antennas, and Autonomous Underwater Vehicles. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2014, no. 2 (85), pp. 70–85 (In Russian).
8. Yatsenkov B. B. *Osnovy sputnikovoi navigatsii* [Bases of Satellite Navigation]. Moscow, Katalog Publ., 2002. 106 p. (In Russian).
9. Flores P. E., Hill D., Palmer E., Ross R., Walker R., Haubirs M., Thompson M., Laura S., Menlikli D., Moldovan N., Snider E. Naval Seismic Exploration on a Spiral Trajectory of Coil Shooting *Neftegazovoe obozrenie*, 2008, vol. 21, no. 4, pp. 22–39 (In Russian).
10. Martynova L. A. *Razrabotka tekhnologii kompleksnoi obrabotki raznorodnoi informatsii, sodержashchei dannye kosmicheskikh radionavigatsionnykh sistem*. Dis. dokt. tehn. nauk [Development of Technology of Complex Processing of the Heterogeneous Information Containing Data of Space Radio Navigational Systems. Dr. tehn. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2013. 272 p. (In Russian).
11. Martynova L. A. Information Processing Operation of Space-based Radio Navigation Systems for Position Fixing in Conditions of Terminated Satellite Signal. *Informatsiia i kosmos*, 2012, no. 3–4, pp. 58–60 (In Russian).
12. Martynova L. A. The Information Processing, Including Data of Space Radio Navigational Systems, at Installation and Functioning of the Fast-developed Security Complex. *Informatsiia i kosmos*, 2013, no. 2, pp. 61–64 (In Russian).
13. Emelyantsev G. I., Blazhnov B. A., and Stepanov A. P. Using Phase Measurements for Determining Vehicle's Attitude Parameters by GPS-Aided Inertial System in Sea Tests. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2011, no. 3 (74), pp. 3–11.

# ВЗАИМНОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ СИГНАЛОВ И ОЦЕНКА СКОРОСТИ ВЕТРА В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ МЕТЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

П. И. Ермаков<sup>а</sup>, аспирант

А. А. Монаков<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** в связи с активным внедрением многопозиционных метеорадиолокационных систем на базе малогабаритных метеорологических локаторов актуальна проблема разработки эффективных алгоритмов обработки сигналов в таких системах. **Цель исследования:** разработка и анализ качества алгоритмов оценки средней скорости ветра в многопозиционных метеорадиолокационных системах. **Результаты:** получено общее выражение для пространственно-временной взаимнокорреляционной функции сигналов в бистатической метеорадиолокационной системе. Сделан вывод о независимости сигналов в рассмотренной системе. Предложен двухэтапный алгоритм оценки скорости ветра, основанный на известных методах оценки доплеровской частоты и ширины спектра, а также рассмотрен ряд его упрощенных вариантов. Проведено математическое моделирование для сравнения качества работы предложенных алгоритмов. Сделан вывод о том, что определяющее значение на качество оценки скорости ветра оказывает точность используемых на первом этапе алгоритмов оценки доплеровской частоты и ширины спектра. Упрощения алгоритма на втором этапе оценки несущественно ухудшают ее качество. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при разработке многопозиционных метеорадиолокационных систем для оценки вектора средней скорости ветра.

**Ключевые слова** — радиолокационная метеорология, скорость ветра, объединение данных, многопозиционная метеорологическая радиолокация, доплеровская частота.

## Введение

Одной из основных задач, решаемых в рамках метеорологической радиолокации, является оценка средней скорости ветра. В случае одного метеорологического радиолокатора (МРЛ) эту задачу можно свести к оценке средней частоты доплеровского спектра метеосигнала. Полученная таким образом оценка несет информацию только о радиальной составляющей средней скорости ветра относительно направления на точку расположения МРЛ. Чтобы восстановить полный вектор скорости ветра, необходимо иметь возможность наблюдать поле скоростей ветра как минимум с трех различных ракурсов (по числу компонент скорости ветра). Такая необходимость приводит к созданию многопозиционной метеорологической радиолокационной системы (ММРЛС). Настоящая работа посвящена синтезу алгоритмов оценки вектора средней скорости ветра в ММРЛС.

Вопросу, поднимаемому в статье, посвящено большое количество публикаций (см., например, [1–4]). Обобщая материалы этих публикаций, можно считать, что в большинстве случаев оценка вектора средней скорости ветра сводится к минимизации некоторого функционала ошибок:

$$J = \sum_i J_i. \quad (1)$$

При этом  $J_0$  — основная компонента функционала ошибок, представляющая собой невязку измеренных и истинных радиальных скоростей ветра:

$$J_0 = \sum_m w_m \left( V_r^{(m)} - \mathbf{n}_m \mathbf{V}_0 \right)^2, \quad (2)$$

где суммирование ведется по всем МРЛ;  $w_m$  — вес, ассоциированный с  $m$ -м МРЛ;  $V_r^{(m)}$  — радиальная скорость ветра по отношению к  $m$ -му МРЛ;  $\mathbf{n}_m$  — единичный вектор (орт), указывающий направление на точку наблюдения из точки, где расположен  $m$ -й МРЛ;  $\mathbf{V}_0$  — вектор истинной средней скорости ветра в точке наблюдения.

Остальные члены суммы (1) характеризуют дополнительные ограничения, налагаемые на оценку скорости ветра. В качестве наиболее часто используемых ограничений можно привести требование гладкости поля скоростей ветра, требование выполнения условия неразрывности и т. п.

В настоящей работе будет рассмотрена основная компонента функции ошибок  $J_0$ . Необходимость в освещении этой темы продиктована тем, что довольно затруднительно найти в литературе строгое обоснование вида функции  $J_0$ . В особенности это касается весов  $\{w_m\}$ , входящих в выражение (2). Чаще всего встречаются два варианта их выбо-

ра: равные веса [4] или веса, обратно пропорциональные некоторой степени расстояния до точки наблюдения [3]. Однако ни один из этих вариантов не является достаточно обоснованным.

В первом разделе статьи рассмотрена пространственно-временная взаимнокорреляционная функция (ВКФ) сигналов ММРЛС. Во втором разделе, посвященном алгоритмам измерения вектора средней скорости ветра, предложен новый двухэтапный алгоритм, основанный на предварительной оценке доплеровской частоты и ширины спектра известными методами [5–7]. Также в этом разделе вычислены границы Крамера — Рао для оценок компонент вектора средней скорости ветра. В третьем разделе приведены результаты математического моделирования предложенных алгоритмов. В заключении сделаны выводы о качестве предложенных алгоритмов.

### Пространственно-временная ВКФ сигналов ММРЛС

Для покрытия большой зоны ответственности ММРЛС принято располагать отдельные МРЛ на относительно большом удалении друг от друга. Представляет интерес выяснить, имеется ли существенная корреляционная связь сигналов МРЛ, расположенных в двух удаленных точках.

#### Модель турбулентного движения воздуха

Чаще всего при описании турбулентности используют методы дискретных и непрерывных порывов [8]. Метод дискретных порывов исторически появился раньше, проще в реализации. Однако в силу довольно грубых допущений он значительно уступает методу непрерывных порывов в точности. В настоящей работе будет использоваться метод непрерывных порывов.

Этот метод позволяет охарактеризовать поле скоростей в некоторой точке тремя независимыми стационарными гауссовыми случайными процессами:  $u_x(t)$ ,  $u_y(t)$  и  $u_z(t)$ . При этом ось  $x$  системы координат ориентирована по направлению средней скорости ветра  $V_0$ , ось  $y$  лежит в горизонтальной плоскости, а ось  $z$  составляет с  $x$  и  $y$  правую систему координат. В такой системе  $u_x(t)$  называется продольной составляющей турбулентности,  $u_y(t)$  — поперечной, а  $u_z(t)$  — вертикальной. Поскольку процессы  $u_x(t)$ ,  $u_y(t)$  и  $u_z(t)$  в силу сделанного предположения стационарны, для них можно ввести спектральные плотности мощности (СПМ)  $\Phi_x(\omega)$ ,  $\Phi_y(\omega)$  и  $\Phi_z(\omega)$ , которых достаточно для полного статистического описания турбулентности, поскольку его компоненты по допущению гауссовы. Наиболее известными моделями метода непрерывных порывов являются модели Драйдена (Dryden) [9] и фон Кармана (von Kármán) [10]. СПМ компонент турбулент-

ности в этих моделях задаются следующим образом:

$$\Phi_x^{(D)}(\omega) = \sigma_x^2 \frac{2L_x}{\pi V_0} \frac{1}{1 + \left(\frac{L_x \omega}{V_0}\right)^2},$$

$$\Phi_y^{(D)}(\omega) = \sigma_y^2 \frac{2L_y}{\pi V_0} \frac{1 + 12 \left(\frac{L_y \omega}{V_0}\right)^2}{\left(1 + 4 \left(\frac{L_y \omega}{V_0}\right)^2\right)^2},$$

$$\Phi_z^{(D)}(\omega) = \sigma_z^2 \frac{2L_z}{\pi V_0} \frac{1 + 12 \left(\frac{L_z \omega}{V_0}\right)^2}{\left(1 + \left(\frac{L_z \omega}{V_0}\right)^2\right)^2},$$

$$\Phi_x^{(K)}(\omega) = \sigma_x^2 \frac{2L_x}{\pi V_0} \frac{1}{\left(1 + \left(1,339 \frac{L_x \omega}{V_0}\right)^2\right)^{\frac{5}{6}}};$$

$$\Phi_y^{(K)}(\omega) = \sigma_y^2 \frac{2L_y}{\pi V_0} \frac{1 + \frac{8}{3} \left(2,678 \frac{L_y \omega}{V_0}\right)^2}{\left(1 + \left(2,678 \frac{L_y \omega}{V_0}\right)^2\right)^{\frac{11}{6}}};$$

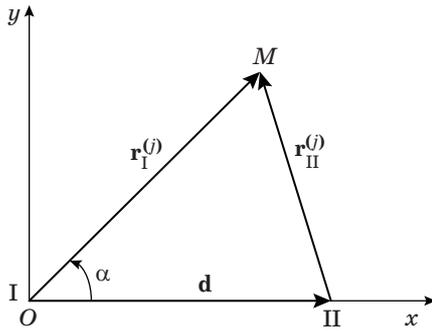
$$\Phi_z^{(K)}(\omega) = \sigma_z^2 \frac{2L_z}{\pi V_0} \frac{1 + \frac{8}{3} \left(2,678 \frac{L_z \omega}{V_0}\right)^2}{\left(1 + \left(2,678 \frac{L_z \omega}{V_0}\right)^2\right)^{\frac{11}{6}}},$$

где  $\sigma_i^2$ ,  $L_i$  — дисперсия и масштаб соответствующей компоненты поля турбулентности. В статье использована модель фон Кармана.

#### Общее выражение

##### для пространственно-временной ВКФ

Рассмотрим ситуацию, изображенную на рис. 1: в точке I, совпадающей с началом координат O, расположен первый МРЛ; в точке II расположен второй МРЛ, и его положение относительно первого МРЛ определяется радиус-вектором  $\mathbf{d}$ , направленным вдоль оси  $x$ ; в точке M на плоскости  $xOy$  расположена метеочастица пренебрежимо малого размера, движение которой характеризуется вектором скорости  $\mathbf{V}$ . Положение точ-



■ **Рис. 1.** К выводу пространственно-временной ВКФ  
 ■ **Fig. 1.** On the deduction of spatio-temporal cross-correlation function

ки  $M$  относительно точек  $I$  и  $II$  характеризуется радиус-векторами  $r_I^{(j)}$  и  $r_{II}^{(j)}$  соответственно. Ось  $z$  направлена перпендикулярно к плоскости рисунка и образует с осями  $x$  и  $y$  правую систему координат (СК) СК<sub>0</sub>.

При выводе выражения для ВКФ примем следующие физически обоснованные допущения:

— пренебрежем перемещением антенн МРЛ за время наблюдения сигнала. Данное допущение оправдано при типичных для МРЛ скоростях вращения антенн и частотах повторения сигнала [7];

— будем считать диаграммы направленности МРЛ настолько узкими, что можно пренебречь разницей в доплеровских сдвигах сигналов, входящих с разных угловых направлений;

— будем полагать, что расстояние между МРЛ  $d = |\mathbf{d}|$  много меньше расстояний от МРЛ до точки  $M$ :

$$\begin{aligned} d \ll r_I^{(j)} &= \left| \mathbf{r}_I^{(j)} \right|; \\ d \ll r_{II}^{(j)} &= \left| \mathbf{r}_{II}^{(j)} \right|. \end{aligned} \quad (3)$$

Если при данном допущении окажется, что радиус пространственной корреляции сигнала, рассеянного разрешаемым объемом метеоцели, меньше, чем расстояние между МРЛ, то анализ прочих случаев не нужен.

При сделанных допущениях комплексные амплитуды сигналов на выходах приемников первого и второго МРЛ будут равны:

$$\begin{aligned} e_j^{(I)}(t) &= \dot{\rho}_j \exp\left(-i2kr_I^{(j)}\right); \\ e_j^{(II)}(t) &= \dot{\rho}_j \exp\left(-i2kr_{II}^{(j)}\right), \end{aligned}$$

где  $\dot{\rho}_j$  — комплексная амплитуда сигнала, отраженного от метеочастицы  $M$ ;  $k$  — волновое число. Комплексные амплитуды  $\dot{\rho}_j$  для обоих МРЛ положены одинаковыми, поскольку влиянием раз-

ницы в затухании принятых волн на значение ВКФ можно пренебречь в силу неравенства (3).

Пусть в некоторой области  $S$  присутствует большое количество метеочастиц со своими собственными скоростями движения. Тогда комплексные напряжения на входах приемников первого и второго МРЛ будут соответственно равны суммам напряжений, созданных отражениями от всех метеочастиц в области  $S$ :

$$\begin{aligned} e^{(I)}(t) &= \sum_j \dot{\rho}_j \exp\left(-i2kr_I^{(j)}\right); \\ e^{(II)}(t) &= \sum_j \dot{\rho}_j \exp\left(-i2kr_{II}^{(j)}\right). \end{aligned}$$

Вычислим ВКФ комплексных напряжений на выходах приемников первого и второго МРЛ:

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \left\langle e^{*(I)}(t) e^{(II)}(t+\tau) \right\rangle = \\ &= \left\langle \sum_{j_1, j_2} \dot{\rho}_{j_1}^* \dot{\rho}_{j_2} \exp\left\{i2k \left[ r_I^{(j_1)}(t) - r_{II}^{(j_2)}(t+\tau) \right] \right\} \right\rangle = \\ &= \left\langle \sum_j p_j \exp\left\{i2k \left[ r_I^{(j)}(t) - r_{II}^{(j)}(t+\tau) \right] \right\} \right\rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $p_j = \left\langle |\dot{\rho}_j|^2 \right\rangle$  — средняя мощность сигнала, отраженного от  $j$ -й частицы.

Последнее равенство в формуле (4) справедливо, так как сигналы, отраженные от разных метеочастиц, независимы [11]. Рассмотрим отдельно показатель экспоненты в (4) и опустим для простоты индексы  $j$ , имея их в виду при дальнейших вычислениях:

$$\begin{aligned} r_I(t) - r_{II}(t+\tau) &= \left| \mathbf{r}_I(0) + \mathbf{V}t \right| - \\ &- \left| \mathbf{r}_I(0) + \mathbf{V}(t+\tau) - \mathbf{d} \right| \approx \mathbf{n}(0)\mathbf{d} - \mathbf{n}(0)\mathbf{V}\tau, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\mathbf{n}(t) = \mathbf{r}_I(t)/r_I(t)$  — орт направления от первого МРЛ к  $j$ -й метеочастице. Приближенное равенство в (5) справедливо, поскольку верны неравенства (3). Тогда

$$r_I(t) - r_{II}(t+\tau) \approx d \cos \alpha_j + V_j \tau,$$

где  $\alpha_j$  — угол между осью  $x$  и направлением от первого МРЛ к  $j$ -й метеочастице;  $V_j$  — радиальная составляющая скорости  $j$ -й метеочастицы по отношению к первому МРЛ (сближение соответствует положительному значению  $V_j$ ).

Тогда корреляционная функция (КФ) равна

$$R(\tau) = \left\langle \sum_j p_j \exp\left\{i2k \left( d \cos \alpha_j + V_j \tau \right) \right\} \right\rangle. \quad (6)$$

Исследуем статистические характеристики радиальной скорости  $V_j$ , пользуясь моделью непрерывных порывов, описанной в подразд. «Модель турбулентного движения воздуха». Для этого выразим  $V_j$  через компоненты поля скоростей:

$$V_j = \mathbf{n}(0)\mathbf{V} = \mathbf{n}(0)(\mathbf{V}_0 + \mathbf{M}\mathbf{u}(0)). \quad (7)$$

Перепишем (7) с учетом допущения о том, что ширина диаграммы направленности МРЛ мала:

$$V_j = \mathbf{n}(0)(\mathbf{V}_0 + \mathbf{M}\mathbf{u}(0)) = V_r + \mathbf{n}^T\mathbf{M}\mathbf{u}, \quad (8)$$

где  $V_r$  — средняя радиальная скорость ветра по отношению к первому МРЛ, при этом в силу (3) мы будем трактовать эту скорость как радиальную скорость по отношению к системе из двух МРЛ;  $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$  — орт вектора, проведенного из точки расположения первого МРЛ в центр наблюдаемой области  $S$ ;  $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)^T$  — вектор турбулентной скорости в СК<sub>v</sub>, ориентированной по вектору средней скорости  $\mathbf{V}_0 = (V_x, V_y, V_z)^T$  (см. подразд. «Модель турбулентного движения воздуха»);  $\mathbf{M}$  — ортогональная матрица преобразования СК<sub>v</sub> для ее совмещения с СК<sub>0</sub>. Этот поворот позволяет преобразовать координаты  $\mathbf{u}$  в СК<sub>0</sub>. Искомое преобразование — это композиция поворота вокруг  $y$  против часовой стрелки на угол  $\pi/2 - \theta$  и поворота вокруг  $z$  по часовой стрелке на угол  $\varphi$ , где  $\varphi$  и  $\theta$  — азимут и полярный угол вектора  $\mathbf{V}_0$ .

Анализируя (8), приходим к выводу, что  $\mathbf{n}^T\mathbf{M}\mathbf{u}$  — линейная комбинация компонент турбулентной скорости и, следовательно, является нормальной случайной величиной  $\delta V$  с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma_V^2$ . Тогда  $V_j$  можно представить в следующем виде:

$$V_j = V_r + \delta V. \quad (9)$$

Подставим (9) в (6):

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \sum_j p_j \exp(i2kV_r\tau) \times \\ &\times \exp(i2kd\cos\alpha_j) \langle \exp(i2k\delta V\tau) \rangle = \\ &= \exp(i2kV_r\tau) \langle \exp(i2k\delta V\tau) \rangle \times \\ &\times \sum_j p_j \exp(i2kd\cos\alpha_j). \end{aligned}$$

Поскольку  $\delta V$  — нормальная случайная величина:

$$\langle \exp(i2k\delta V\tau) \rangle = \varphi_V(2k\tau) = \exp\left\{-2(k\sigma_V\tau)^2\right\},$$

где  $\varphi_V(\cdot)$  — характеристическая функция случайной величины  $\delta V$ . Окончательно пространственно-временная ВКФ

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \exp(i2kV_r\tau) \exp\left\{-2(k\sigma_V\tau)^2\right\} \times \\ &\times \sum_j p_j \exp(i2kd\cos\alpha_j). \end{aligned}$$

Распределение средней мощности по метеочастицам  $p_j$  характеризует отражающие свойства рассматриваемого объема и в силу высокой пространственной плотности метеочастиц обычно выражается в форме непрерывной функции пространственных координат  $p(x, y)$ . Тогда КФ можно представить в виде

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \exp(i2kV_r\tau) \exp\left\{-2(k\sigma_V\tau)^2\right\} \times \\ &\times \int_S p(x, y) \exp(i2kd\cos\alpha) ds. \quad (10) \end{aligned}$$

В формуле (10) пространственную корреляцию характеризует множитель  $\int_S p(x, y) \exp(i2kd\cos\alpha) \times ds$ . Введем понятие пространственной корреляционной функции (ПКФ):

$$B(x) = \int_S p(\mathbf{r}) \exp(i2kx\cos\alpha) d\mathbf{r}, \quad (11)$$

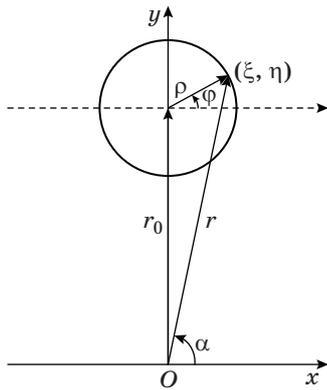
где  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор точки в области  $S$ ;  $x$  — параметр, характеризующий расстояние между точками наблюдения метеосигнала. На практике удобно пользоваться нормированной ПКФ:

$$b(x) = \frac{\int_S p(\mathbf{r}) \exp(i2kx\cos\alpha) d\mathbf{r}}{\int_S p(\mathbf{r}) d\mathbf{r}}.$$

Эта функция характеризует статистическую связь между значениями принимаемого метеосигнала в разных пространственных точках.

### Оценка интервала пространственной корреляции

Рассмотрим ситуацию, изображенную на рис. 2: на расстоянии  $r_0$  от первого МРЛ по оси  $y$  находится центр облака метеочастиц в виде круга радиусом  $s$ . Распределение  $p(\mathbf{r})$  внутри облака будем считать равномерным и равным единице. Текущая точка внутри облака характеризуется координатами  $(\xi, \eta)$  относительно его центра. Расстояние от точки  $(\xi, \eta)$  до центра облака —  $\rho$ . Угол  $\varphi$  — это угол между вектором, проведенным из центра облака в точку  $(\xi, \eta)$ , и осью  $x$ . Расстояние между позицией первого МРЛ и точкой  $(\xi, \eta)$  обозначено как  $r$ . Угол между вектором,



■ **Рис. 2.** Пример расчета пространственно-временной ВКФ

■ **Fig. 2.** Example of spatio-temporal cross-correlation function computing

проведенным из позиции первого МРЛ в точку  $(\xi, \eta)$ , и осью  $x$  обозначен как  $\alpha$ .

Вычислим ПКФ по формуле (11):

$$B(x) = \int_S \exp(i2kx \cos \alpha) dr.$$

Вычислим  $\cos \alpha$ :

$$\cos \alpha = \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + (\eta + r_0)^2}} \approx \frac{\rho \cos \varphi}{r_0}.$$

Тогда

$$B(x) \approx \int_S \exp\left(\frac{i2kx\rho \cos \varphi}{r_0}\right) dr. \quad (12)$$

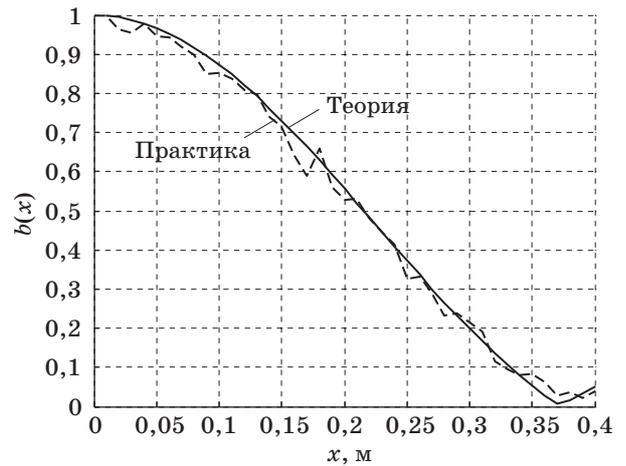
Перейдем к полярным координатам и вычислим интеграл (12):

$$B(x) \approx \int_S \exp\left(\frac{i2kx\rho \cos \varphi}{r_0}\right) dr = \int_0^s \int_0^{2\pi} \rho \exp\left(\frac{i2kx\rho \cos \varphi}{r_0}\right) d\rho d\varphi = 2\pi s^2 \frac{J_1\left(\frac{2ksx}{r_0}\right)}{\left(\frac{2ksx}{r_0}\right)}, \quad (13)$$

где  $J_1(\cdot)$  — функция Бесселя первого рода первого порядка.

Интервал пространственной корреляции можно оценить по первому нулю функции Бесселя в (13). Известно, что первый ноль  $J_1(t)$  равен  $t_0 = 3,832$ . Зная это, можно вычислить соответствующее значение радиуса корреляции:

$$x_0 = 3,832 \frac{r_0}{2ks} \approx 0,37 \text{ м.}$$



■ **Рис. 3.** Пространственная корреляционная функция и ее оценка

■ **Fig. 3.** True spatial correlation function and its estimate

Результаты расчета  $B(x)$  в соответствии с уравнением (13) и оценка по результатам математического моделирования, представленные на рис. 3, подтверждают правильность уравнения (13).

Таким образом, поскольку значение  $x_0$  пренебрежимо мало по сравнению с применяемыми на практике значениями пространственного разнесения МРЛ, сигналы МРЛ в ММРЛС можно считать статистически независимыми.

### Оценка скорости ветра

Пользуясь результатами разд. «Пространственно-временная ВКФ сигналов ММРЛС», можно получить выражения, связывающие параметры сигнала (доплеровскую частоту и ширину спектра) с параметрами поля скоростей ветра (средней скоростью ветра и дисперсией компонент вектора скорости).

Средняя частота СПМ метео сигнала

$$f_{cp} = \frac{2V_r}{\lambda} = \frac{2nV_0}{\lambda}. \quad (14)$$

Среднеквадратическая ширина СПМ

$$\Delta F = \frac{2\sigma_V}{\lambda}. \quad (15)$$

В соответствии с результатами предыдущего раздела будем считать сигналы отдельных МРЛ в составе ММРЛС статистически независимыми.

### Функция правдоподобия принятого сигнала и потенциальная точность оценки скорости ветра

Рассмотрим отдельно один МРЛ системы. В качестве исходных данных пусть имеется выборка

отсчетов комплексной огибающей принятого сигнала размера  $N$ :

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_n = (u[1], \dots, u[k], \dots, u[N]),$$

где  $\mathbf{u}_s$  — вектор отсчетов метеосигнала;  $\mathbf{u}_n$  — вектор отсчетов дискретного белого шума.

В соответствии со сделанным в предыдущем разделе предположением  $\mathbf{u}(t)$  — комплексный стационарный гауссовый случайный процесс [11]. Тогда его фурье-образ

$$\mathbf{U}(f) = F[\mathbf{u}(t)](f) = \mathbf{U}_s(f) + \mathbf{U}_n(f)$$

тоже будет комплексным гауссовым процессом в силу линейности преобразования Фурье. При этом в силу стационарности его КФ равна

$$R_U(f, f') = A(f)\delta(f - f'), \quad (16)$$

где  $A(f)$  — СПМ метеосигнала.

Полагая, что средняя скорость ветра  $\mathbf{V}_0$  является параметром СПМ  $A(f)$ , получим следующее выражение для плотности распределения случайного отсчета  $S[i] = |U[i]|^2$ :

$$p(S[i] | \mathbf{V}_0) = \frac{1}{A(i\Delta f, \mathbf{V}_0) + A_n} \exp\left\{-\frac{S[i]}{A(i\Delta f, \mathbf{V}_0) + A_n}\right\},$$

где  $\Delta f = 1/(NT)$  — шаг дискретизации по частоте;  $T$  — шаг дискретизации по времени;  $A_n$  — средняя мощность дискретного белого шума.

Тогда совместная плотность распределения случайного вектора

$$\mathbf{S} = (|U[1]|^2, \dots, |U[i]|^2, \dots, |U[N]|^2)$$

будет равна произведению частных плотностей:

$$p(\mathbf{S} | \mathbf{V}_0) = \prod_{i=1}^N p(S[i] | \mathbf{V}_0),$$

так как согласно (16) отсчеты выборочной СПМ вектора  $\mathbf{S}$  статистически независимы [11]. Тогда в силу независимости сигналов отдельных МРЛ функция правдоподобия (ФП) для выборок всех МРЛ будет равна

$$p(\mathbf{S}^{(1)}, \dots, \mathbf{S}^{(M)} | \mathbf{V}_0) = \prod_{m=1}^M \prod_{i=1}^N \frac{1}{A^{(m)}(i\Delta f, \mathbf{V}_0) + A_n^{(m)}} \times \exp\left\{-\frac{S^{(m)}[i]}{A^{(m)}(i\Delta f, \mathbf{V}_0) + A_n^{(m)}}\right\}, \quad (17)$$

где  $M$  — общее число МРЛ в ММРЛС;  $A^{(m)}(f)$  и  $A_n^{(m)}(f)$  — СПМ полезного сигнала и средняя мощность шума для  $m$ -го МРЛ;  $\mathbf{S}^{(m)}$  — выборочный вектор  $m$ -го МРЛ.

Дважды дифференцируя логарифм ФП (17) по  $j$ -й компоненте вектора скорости ветра, можно вычислить границу Крамера — Рао для этой компоненты:

$$\sigma_{j \min}^2 \approx \frac{\Delta f}{\sum_{m=1}^M \int_{-1/(2T)}^{1/(2T)} \left( \frac{1}{A^{(m)}(f, \mathbf{V}_0) + A_n^{(m)}} \times \frac{\partial A^{(m)}(f, \mathbf{V}_0)}{\partial V_j} \right)^2 df} \quad (18)$$

### Алгоритм оценки вектора средней скорости ветра

Вернемся к ФП (17). Рассмотрим задачу совместной оценки компонент вектора средней скорости ветра  $\mathbf{V}_0$ . Для решения этой задачи необходимо решить систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln p(\mathbf{S}^{(1)}, \dots, \mathbf{S}^{(M)} | \mathbf{V}_0)}{\partial V_x} = 0 \\ \frac{\partial \ln p(\mathbf{S}^{(1)}, \dots, \mathbf{S}^{(M)} | \mathbf{V}_0)}{\partial V_y} = 0 \\ \frac{\partial \ln p(\mathbf{S}^{(1)}, \dots, \mathbf{S}^{(M)} | \mathbf{V}_0)}{\partial V_z} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Введем функцию

$$\Lambda(\mathbf{S}^{(m)} | f_{cp}^{(m)}(\mathbf{V}_0), \Delta F^{(m)}(\mathbf{V}_0)) = \ln p(\mathbf{S}^{(m)} | \mathbf{V}_0),$$

где  $f_{cp}^{(m)}$  и  $\Delta F^{(m)}$  — доплеровская частота и ширина спектра для  $m$ -го МРЛ, зависящие от вектора средней скорости ветра. Такая запись допустима, если принять допущение о гауссовой СПМ полезного сигнала, которое оправдано в большинстве практических ситуаций [11]. Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln p(\mathbf{S}^{(1)}, \dots, \mathbf{S}^{(M)} | \mathbf{V}_0)}{\partial V_j} &= \sum_{m=1}^M \frac{\partial \ln p(\mathbf{S}^{(m)} | \mathbf{V}_0)}{\partial V_j} = \\ &= \sum_{m=1}^M \frac{\partial \Lambda(\mathbf{S}^{(m)} | f_{cp}^{(m)}, \Delta F^{(m)})}{\partial f_{cp}^{(m)}} \frac{df_{cp}^{(m)}}{dV_j} + \end{aligned}$$

$$+ \sum_{m=1}^M \frac{\partial \Lambda(\mathbf{S}^{(m)} | f_{cp}^{(m)}, \Delta F^{(m)})}{\partial \Delta F^{(m)}} d\Delta F^{(m)}.$$

Можно показать [12], что частные производные  $\Lambda$  в этом уравнении обращаются в ноль тогда, когда  $f_{cp}^{(m)}$  и  $\Delta F^{(m)}$  — оценки максимального правдоподобия доплеровской частоты и ширины спектра в  $m$ -м МРЛ. Таким образом, если в систему (19) подставить оценки максимального правдоподобия доплеровских частот и ширин спектра для всех МРЛ ММРЛС, то система будет совместна.

Из проведенных рассуждений можно заключить, что в качестве оценки вектора средней скорости ветра можно взять такой вектор  $\mathbf{V}_0$ , значение которого соответствует оценкам максимального правдоподобия  $f_{cp}(\mathbf{V}_0)$  и  $\Delta F(\mathbf{V}_0)$  для всех МРЛ в составе ММРЛС. Зависимости доплеровской частоты и ширины спектра от вектора средней скорости ветра уже известны [см. (14) и (15)]. Таким образом, поставленную задачу можно решить в два этапа:

- получить оценки максимального правдоподобия доплеровских частот и ширин спектра [12];
- по известным значениям  $f_{cp}$  и  $\Delta F$  для произвольного числа МРЛ определить  $\mathbf{V}_0$ .

### Вычисление средней скорости ветра

При известных оценках  $f_{cp}$  и  $\Delta F$  для всех МРЛ можно вычислить соответствующий этим оценкам вектор скорости ветра  $\mathbf{V}_0$ . В общем случае при известных функциональных зависимостях доплеровских частот и ширин спектра от скорости ветра (14), (15) такая задача должна сводиться к решению системы уравнений

$$\begin{cases} f_{cp}^{(1)}(\mathbf{V}_0) = f_{cp}^{(1)} \\ \vdots \\ f_{cp}^{(M)}(\mathbf{V}_0) = f_{cp}^{(M)} \\ \Delta F^{(1)}(\mathbf{V}_0) = \Delta F^{(1)} \\ \vdots \\ \Delta F^{(M)}(\mathbf{V}_0) = \Delta F^{(M)} \end{cases}, \quad (20)$$

где  $f_{cp}^{(m)}$  и  $\Delta F^{(m)}$  — оценки доплеровской частоты и ширины спектра  $m$ -го МРЛ.

Ввиду того, что получение оценок  $f_{cp}^{(m)}$  и  $\Delta F^{(m)}$  сопровождается ошибками, решение системы (20) не представляется возможным в силу возможной некорректности данной задачи [13]. Если известны характеристики ошибок измерителей, общий подход к решению подобного рода задач заключается в применении кри-

терия взвешенного минимума среднеквадратической ошибки:

$$\mathbf{V}_{0MSE} = \arg \min_{\mathbf{V}_0} \times \sum_{m=1}^M \left[ \frac{\left( f_{cp}^{(m)}(\mathbf{V}_0) - f_{cp}^{(m)} \right)^2}{\sigma_f^{2(m)}} + \frac{\left( \Delta F^{(m)}(\mathbf{V}_0) - \Delta F^{(m)} \right)^2}{\sigma_{\Delta F}^{2(m)}} \right], \quad (21)$$

при этом можно использовать оценки  $f_{cp}^{(m)}$  и  $\Delta F^{(m)}$ , полученные любыми методами, для которых известны дисперсии оценок средней частоты  $\sigma_f^2$  и ширины спектра  $\sigma_{\Delta F}^2$ .

### Компьютерное моделирование

Будем рассматривать ММРЛС наземного базирования, в состав которой входят три МРЛ со следующими координатами:  $M_1 = (-7000, -7000, 0)$ ,  $M_2 = (5000, -5000, 0)$ ,  $M_3 = (0, 12000, 0)$ .

Будем считать характеристики всех МРЛ одинаковыми и типичными:

- длина волны излучения  $\lambda = 3,2$  см;
- ширина диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскостях  $\alpha_{л} = \varepsilon_{л} = 3^\circ$ ;
- разрешающая способность по дальности  $\delta r_u = 100$  м;
- размер выборки  $N = 64$ ;
- частота повторения импульсов  $F_n = 1/T = 2$  кГц.

Для моделирования турбулентности будем использовать модель фон Кармана, при этом будем считать вектор средней скорости ветра неизменным в пространстве. Примем следующие характеристики модели турбулентности:

- масштаб турбулентности  $L_x = L_y = L_z = 2000$  м;
- среднеквадратическое отклонение (СКО) продольной составляющей скорости ветра  $\sigma_x = 3$  м/с;
- СКО поперечной составляющей скорости ветра  $\sigma_y = 2$  м/с;
- СКО вертикальной составляющей скорости ветра  $\sigma_z = 1,5$  м/с;
- средняя скорость ветра  $V_0 = 8$  м/с;
- ориентация вектора средней скорости ветра (азимут и угол места):  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\theta = -10^\circ$ .

Отражающие свойства наблюдаемого метеорообразования и мощность шума приемников МРЛ выбраны такими, чтобы обеспечить для МРЛ отношение сигнал/шум 10 дБ на дальности 10 км.

Для анализа качества алгоритмов оценки средней скорости ветра построим графики зависимостей нормированных к  $V_0$  СКО оценок компонент вектора средней скорости ветра от точки оценивания.

Рассмотрим точки наблюдения, расположенные вдоль прямой, параллельной оси  $x$  и проходящей на высоте 3000 м ( $z = 3000$ ). Концы инте-

ресующего нас отрезка по оси  $x$  будут иметь координаты  $-5000$  и  $5000$  м.

На графиках построим следующие кривые:

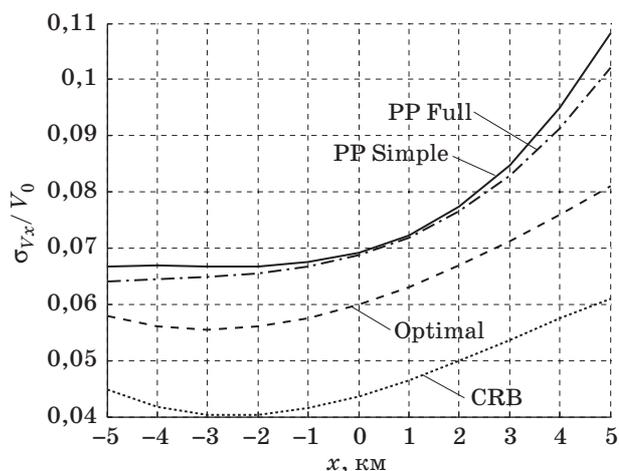
— границы Крамера — Рао для СКО оценок компонент средней скорости ветра, вычисленные по формуле (18) с гауссовой аппроксимацией СПМ полезного сигнала (обозначение — CRB);

— СКО оценок компонент скорости ветра по формуле (21), вычисляемых на основе оценок максимального правдоподобия доплеровской частоты и ширины спектра (обозначение — Optimal);

— СКО оценок компонент скорости ветра по формуле (21), вычисляемых на основе оценок доплеровской частоты и ширины спектра по методу пульс-пары [11] (обозначение — PP Full);

— СКО упрощенных оценок компонент скорости ветра по формуле (2) с одинаковыми весами, вычисляемых на основе оценок доплеровской частоты и ширины спектра по методу пульс-пары (обозначение — PP Simple).

Проиллюстрируем результаты на примере графика СКО ошибки измерения для компоненты  $V_x$  (рис. 4). Можно заметить, что поведение кривых для разных методов оценок одинаково и соответствует характеру кривой потенциальной точности. При этом выше всех проходит график PP Simple-оценки (наихудшая оценка), которая является наиболее простой. Следом за ней по точности идет PP Full-оценка, которая дополнительно использует взвешивание и информацию о ширине спектра. Самой высокой точностью обладает Optimal-оценка, использующая оценки максимального правдоподобия доплеровской частоты и ширины спектра. Для последней СКО ошибки не превосходит 10 % от значения модуля вектора средней скорости  $V_0$ .



■ **Рис. 4.** Зависимость нормированного СКО оценки  $x$ -компоненты вектора средней скорости ветра от положения точки оценивания

■ **Fig. 4.** Normalized RMS for estimate of  $x$ -wind speed component as a function of estimation attitude

Также можно заметить, что разница в точности между PP Full- и PP Simple-оценками не такая существенная, как разница в точности между этими оценками и Optimal-оценкой. Отсюда можно сделать вывод, что основное влияние на точность оценки компонент средней скорости ветра оказывают точности оценок доплеровской частоты и ширины спектра. Упрощение алгоритма на втором этапе не столь существенно ухудшает качество оценок, поэтому может считаться оправданным.

### Заключение

В работе выведено выражение для пространственно-временной ВКФ сигналов в бистатистической метеорологической радиолокационной системе и сделан вывод об отсутствии значимой корреляции между сигналами удаленных друг от друга МРЛ. На основе полученного выражения выведены границы Крамера — Рао для оценок компонент вектора средней скорости ветра. Синтезирован алгоритм оценки вектора средней скорости ветра, основанный на применении известных оценок доплеровской частоты и ширины спектра. Проведено математическое моделирование полученного алгоритма для случаев оценок доплеровской частоты и ширины спектра методами максимального правдоподобия и пульс-пары. Также проведено моделирование упрощенного алгоритма без использования информации о ширине спектра. По результатам моделирования можно сделать вывод, что теоретическое соотношение между точностью исследованных методов подтвердилось. Выяснено, что определяющую роль в качестве получаемой оценки играет точность используемых методов оценки доплеровской частоты и ширины спектра. Показано, что упрощенная версия алгоритма дает вполне удовлетворительные результаты, и ее применение оправдано.

### Литература

1. Gao J., Xue M., Shapiro A., Droegemeier K. K. A Variational Method for the Analysis of Three-Dimensional Wind Fields from Two Doppler Radars // Monthly Weather Review. 1999. N 9(127). P. 2128–2142.
2. Gao J., Xue M., Brewster K., Droegemeier K. K. A Three-Dimensional Variational Data Analysis Method with Recursive Filter for Doppler Radars // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2004. N 3(21). P. 457–469.
3. López Carrillo C., Raymond D. J. Retrieval of Three-Dimensional Wind Fields from Doppler Radar Data Using an Efficient Two-Step Approach // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. N 12(4). P. 2717–2733.

4. Kabeche F., Lemaître Y., Kemkemia S., Artis J.-P. Airborne Radar Retrieved 3D Wind Fields for Turbulence Detection // 7th European Radar Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology, Toulouse, June 25–29, 2012. P. 1–6.
5. Sirmans D., Bumgarner B. Numerical Comparison of Five Mean Frequency Estimators // Journal of Applied Meteorology. 1975. N 6(14). P. 991–1003.
6. Bamler R. Doppler Frequency Estimation and the Cramer-Rao Bound // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1991. N 3(29). P. 385–390.
7. Монаков А. А., Монаков Ю. А. Наблюдение турбулентных атмосферных областей в бортовых метеорологических радиолокаторах: измерение параметров турбулентности // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 5. С. 14–28.
8. Доброленский Ю. П. Динамика полета в неспокойной атмосфере. — М.: Машиностроение, 1969. — 257 с.
9. Dryden H. L. A Review of the Statistical Theory of Turbulence // Quarterly of Applied Mathematics. 1943. N 1(1). P. 7–42.
10. Von Karman T. Progress in the Statistical Theory of Turbulence // Proc. of the National Academy of Sciences. 1948. N 11(34). P. 530–539.
11. Doviak R. J., Zrnic D. S. Doppler Radar and Weather Observations. — Courier Corporation, 1993. — 592 p.
12. Levin M. Power Spectrum Parameter Estimation // IEEE Transactions on Information Theory. 1965. N 1(11). P. 100–107.
13. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1979. — 288 с.

UDC 621.396.967.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.86

**Cross-Correlation Function of Signals and Wind Speed Estimation in Weather Radar Networks**Ermakov P. I.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, big.awesome.pie@gmail.comMonakov A. A.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, a\_monakov@mail.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Due to the active promotion of weather radar networks based on small weather radars, the development of effective signal processing algorithms for such systems is important. **Purpose:** We develop mean wind speed estimation algorithms for weather radar networks, and analyze their performance. **Results:** In the paper, we discuss the derivation of a general expression for the signals cross-correlation function in a bistatic weather radar network, and make a conclusion that the signals in the system are independent. The core result is a two-step algorithm of wind speed estimation which is based on estimating the mean Doppler frequency and the efficient spectral bandwidth. The paper discusses a number of simplifications of the proposed algorithm with lower computational difficulty. Computer simulation has been carried out to compare the quality of the proposed algorithms. The main conclusion is that the performance of the mean Doppler frequency and the efficient spectral bandwidth estimation at the first step are of critical importance. Simplifications at the second step have little impact on the overall algorithm performance. **Practical relevance:** The obtained results can be used in the development of weather radar networks for mean wind speed vector estimation.

**Keywords** — Radar Meteorology, Wind Speed, Data Fusion, Weather Radar Network, Doppler Frequency.

**References**

1. Gao J., Xue M., Shapiro A., Droegemeier K. K. A Variational Method for the Analysis of Three-Dimensional Wind Fields from Two Doppler Radars. *Monthly Weather Review*, 1999, no. 9(127), pp. 2128–2142.
2. Gao J., Xue M., Brewster K., Droegemeier K. K. A Three-Dimensional Variational Data Analysis Method with Recursive Filter for Doppler Radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, no. 3(21), pp. 457–469.
3. López Carrillo C., Raymond D. J. Retrieval of Three-Dimensional Wind Fields from Doppler Radar Data Using an Efficient Two-Step Approach. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, no. 12(4), pp. 2717–2733.
4. Kabeche F., Lemaître Y., Kemkemia S., Artis J.-P. Airborne Radar Retrieved 3D Wind Fields for Turbulence Detection. *7th European Radar Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*, Toulouse, 2012, pp. 1–6.
5. Sirmans D., Bumgarner B. Numerical Comparison of Five Mean Frequency Estimators. *Journal of Applied Meteorology*, 1975, no. 6(14), pp. 991–1003.
6. Bamler R. Doppler Frequency Estimation and the Cramer-Rao Bound. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, no. 3(29), pp. 385–390.
7. Monakov A. A., Monakov Y. A. Observation of Atmospheric Turbulence in Airborne Weather Radars: Detection of Weather Signals. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2012, no. 5, pp. 14–28 (In Russian).
8. Dobrolenskii Y. P. *Dinamika poleta v nespokoynoi atmosfere* [The Dynamics of Flight in a Turbulent Atmosphere]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 257 p. (In Russian).
9. Dryden H. L. A Review of the Statistical Theory of Turbulence. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1943, no. 1(1), pp. 7–42.
10. Von Karman T. Progress in the Statistical Theory of Turbulence. *Proc. of the National Academy of Sciences*, 1948, no. 11(34), pp. 530–539.
11. Doviak R. J., Zrnic D. S. *Doppler Radar and Weather Observations*. Courier Corporation, 1993. 592 p.
12. Levin M. Power Spectrum Parameter Estimation. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1965, no. 1(11), pp. 100–107.
13. Tihonov A. N., Arsenin V. J. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for Solving Ill-Posed Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 288 p. (In Russian).

## АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ НАВИГАЦИОННЫХ ЗНАНИЙ

А. П. Григорьев<sup>а, б</sup>, ассистент, начальник проектно-конструкторского сектора

С. Г. Бурлуцкий<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

А. О. Чернелевский<sup>а, в</sup>, магистр, инженер

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург, РФ

<sup>в</sup>ПАО «Техприбор», Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** при подготовке авиационных специалистов требуется непрерывный мониторинг успеваемости, таким образом, вопросы, связанные с обеспечением качественного контроля знаний, оценивания степени усвоения учебного материала на теоретическом этапе обучения становятся все более актуальными. **Цель исследования:** рассмотрение прикладных задач контроля навигационных знаний с использованием смысловых графовых моделей учебного материала, применяемых для структурирования учебных элементов предметной области, ранжирования (определения сложности) тестовых заданий при адаптивном тестировании с помощью аппарата нечеткой логики (определения степени приближения ответа обучаемого к эталонному), а также разработка программы автоматизированного тестирования для реализации непрерывной процедуры адаптивного контроля знаний. **Результаты:** сформулированы целевые задачи, решаемые программой: обеспечение контроля уровня усвоения теоретического материала, диагностика и восстановление неувоенных/неполных (фрагментарных) знаний на теоретическом этапе обучения с учетом адаптации к индивидуальным особенностям обучаемых. Предложен алгоритм адаптивного контроля знаний на базе тестирования закрытого типа (с приведенными вариантами ответа) для обучения авиационных специалистов. На основании алгоритма в среде графического программирования NI LabVIEW спроектирована программа, которая реализует процедуру адаптации уровня сложности тестовых заданий к уровню подготовки каждого конкретного обучаемого и организует автоматизированное тестирование. По результатам тестирования осуществляется автоматизированный контроль знаний и обеспечивается его объективность и безошибочность. Программа тестирования может быть использована также в качестве самодиагностирующей при реализации внеаудиторной самостоятельной работы обучаемых. Осуществляется частичная разгрузка инструктора (преподавателя) за счет его освобождения от выполнения ряда технологических операций, связанных с обработкой результатов тестирования. **Практическая значимость:** разработанная на базе языка графического программирования NI LabVIEW дистанционная адаптивная система обучения позволяет сократить время, отведенное на обучение в рамках теоретической подготовки, а также интенсифицировать обучающий процесс и в конечном счете повысить степень усвоения учебного материала.

**Ключевые слова** — подготовка авиационных специалистов, контроль знаний, семантический граф, графосемантические модели предметной области, адаптивные обучающие системы, системы контроля знаний, нечеткое оценивание знаний.

### Введение

Профессиональная подготовка оператора летательного аппарата (ЛА) — это трудоемкий и дорогостоящий процесс, складывающийся из курса теоретического обучения, практических тренажерной и летной подготовок. Важно также отметить, что обучение оператора ЛА необходимо рассматривать как управляемый и контролируемый процесс решения тестовых навигационных заданий.

Тестовый контроль отличается эффективностью при самостоятельной работе; объективностью в оценке знаний; экономией времени преподавателя; высокой степенью дифференциации тестируемых по уровню знаний; возможностью индивидуализации процесса обучения; прогнозированием темпа и результата обучения; возможностью выявления структуры знаний каждого слушателя для дальнейшего изменения

методики обучения. Известные модели тестирования подробно изложены в работе [1]. Наиболее прогрессивными в настоящее время являются адаптивные модели тестирования, в которых сложность заданий меняется в зависимости от правильности ответов испытуемого.

Применение при автоматизированной проверке знаний адаптивного тестирования (АТ) позволяет повысить эффективность обучения за счет адаптации обучающего процесса под особенности каждого конкретного обучаемого.

Определение свойств этих заданий и выдача комментариев по каждому из них должны проводиться 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.



■ **Рис. 1.** Алгоритм адаптивного тестирования  
 ■ **Fig. 1.** Adaptive testing algorithm

Рассмотрим АТ по алгоритму (рис. 1) на примере одного из параграфов главы «Учет влияния ветра на полет самолета» учебного пособия «Воздушная навигация и элементы самолетовождения», реализованное в среде графического программирования LabVIEW в виде программы автоматизированного адаптивного тестирования (ПААТ).

Первоначально обучаемому выдается вопрос среднего уровня сложности. Под объективной сложностью (т. е. рассчитанной математически) следует понимать степень вероятности выполнения обучаемым задания, а под субъективной сложностью (трудностью) — частную составляющую, характеризующую индивидуальные особенности выполнения обучаемым того или иного задания.

Для определения уровня сложности тестовых заданий (ТЗ) используют:

- 1) экспертную оценку, получаемую на основании мнения специалистов (экспертов) в целях последующего принятия решения;
- 2) графосемантическое ранжирование, являющееся математически интерпретируемым и обоснованным методом определения сложности ТЗ;
- 3) статистические методы обработки и анализа ответов обучаемых на ТЗ.

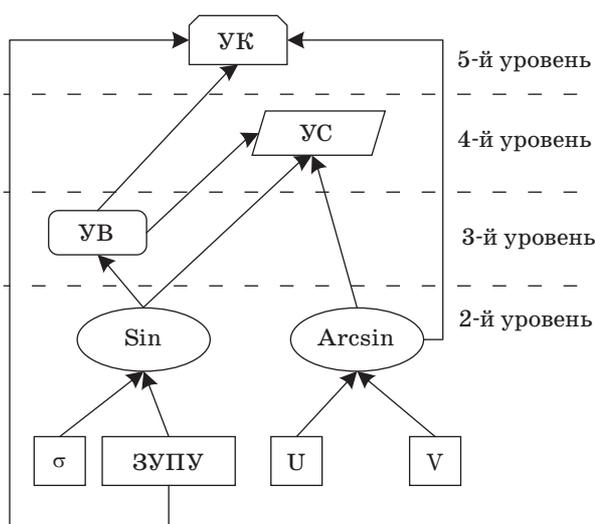
Как правило, при реализации АТ используются ТЗ закрытого типа (с приведенными вариантами ответа), которые могут быть представлены

в виде неполного определения, формулы и т. д. Напротив каждого варианта ответа имеются «пустые окошки». Обучаемый должен, выбрав вариант ответа, подтвердить свой выбор нажатием левой клавиши «мыши» на соответствующее «окно», в котором появится «метка». Для окончательного ответа на вопрос необходимо нажать клавишу «Ответить».

### Построение семантического графа предметной области

Уровень сложности вопроса определялся с помощью семантического графа (рис. 2).

Семантический граф (семантическая сеть) представляет собой связанный ориентированный мультиграф  $G(C, E)$ , вершинами которого являются концепты множества  $C$ , а дугами — отношения множества  $E$  [2]. Очевидно, что граф, имеющий большее количество вершин или ребер, является более сложным [2]. Различают входные концепты — понятия или же определения курса; внутренние концепты, используемые для определения других понятий курса (следующий уровень графа), и выходные концепты — понятия, не используемые для определения других понятий курса. Очевидно, что концепт, связанный с большим количеством других концептов, позиционируется как более сложный. В нашем конкретном случае вопросы, ориентированные



■ **Рис. 2.** Семантический граф  
 ■ **Fig. 2.** The semantic graph

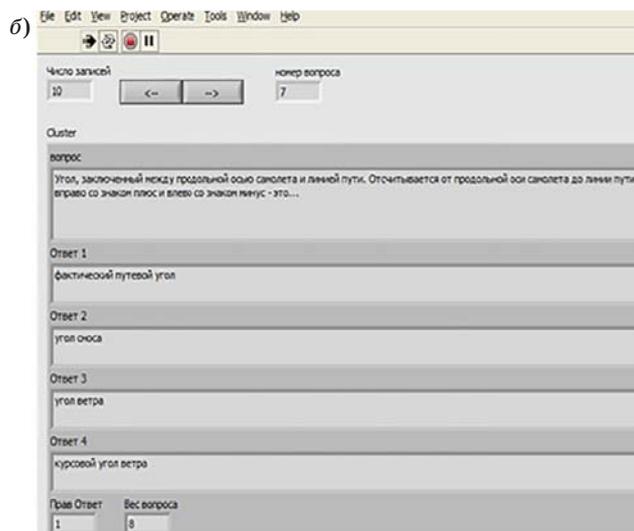
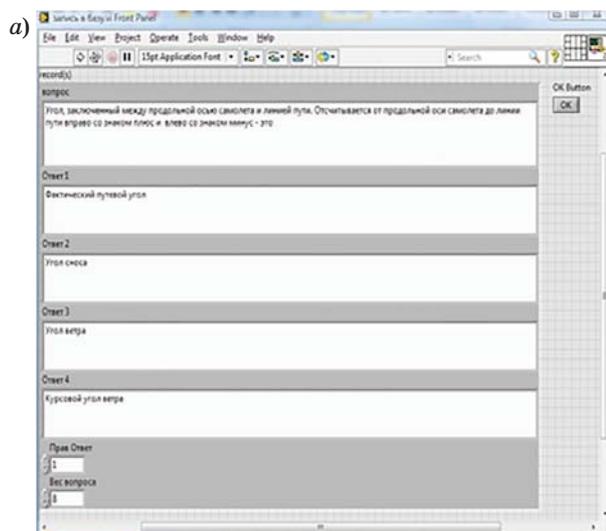
на знания входных концептов, считаются наиболее простыми; это, как правило, фундаментальные определения и понятия курса «Воздушная навигация», данным вопросам присваивается наименьший вес. Вопросы, ориентированные на знания концептов высших уровней, имеют следующие веса: 2 — тригонометрические функции и их отношения; 3 — понятие об угле ветра, расчет его направления; 4 — угол сноса и 5 — условный курс и его расчет. После ранжирования вопросов по сложности составляется общая база, в которой каждому вопросу присваивается свой собственный вес. Таким образом, моделировались задачи различного уровня сложности.

### Описание интерфейса контролирующей программы

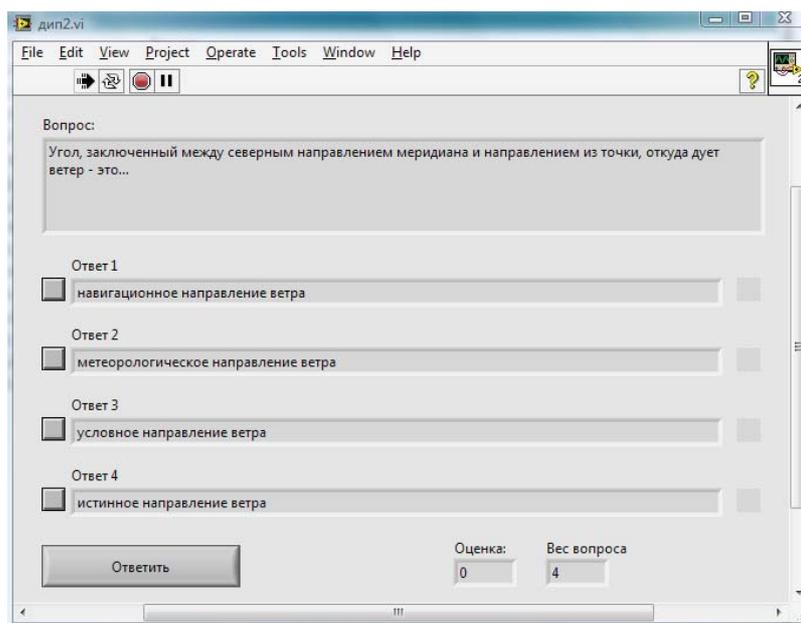
Разработанная ПААТ осуществляет проверку ответа обучаемого. Если ответ верен, то обучаемому выдается следующий вопрос, по уровню сложности выше предыдущего. Если ответ на вопрос неверный, обучаемому предлагается вопрос ниже по уровню сложности. Таким образом, после серии из пяти вопросов определяется уровень знаний. Это означает, что для каждого конкретного обучаемого программа сгенерирует свои вопросы и выдаст их для решения в требуемой адаптивной последовательности. По результатам прохождения тестирования обучаемому выставляется оценка по 4-балльной шкале (5, 4, 3, 2) [3]. Адаптивность такой обучающей системы выражена в адаптации уровня сложности к уровню подготовки обучаемого.

База тестовых вопросов создается в следующем порядке. Первоначально записывается каждый тестовый вопрос, при этом необходимо учитывать, что форма записи в базе вопросов строго определена и состоит из определенных полей (рис. 3, а), заполняемых разработчиком вручную:

- «Вопрос» — пустое поле для текстовой записи вопроса;
- «Ответ 1», «Ответ 2», «Ответ 3», «Ответ 4» — четыре варианта ответа на тестовый вопрос. Каждый из возможных вариантов ответа необходимо вписать в соответствующие порядковые номера полей;
- поле «Прав. ответ» используется для указания порядкового номера правильного ответа — правильный вариант находится в диапазоне 1÷4



■ **Рис. 3.** Общий вид подпрограммы «Запись вопросов» (а) и «Чтение вопросов» (б)  
 ■ **Fig. 3.** General view of the subprogram «Record questions» (а) and «Reading questions» (б)



- *Рис. 4.* Общий вид окна «Программа тестирования»
- *Fig. 4.* General view of the «Testing program» window

и выбирается клавишей с изображением двунаправленной стрелки;

— поле «Вес вопроса» предназначено для указания веса вопроса, присвоенного с помощью семантического графа (см. рис. 2).

Запись вопросов, проводимая в порядке возрастания их сложности, осуществляется по умолчанию на диск C:\. Сохраняется база вопросов в виде файла без расширения. Сам файл базы вопросов представляет собой запись данных в формате datalog. Этот формат используется в среде LabVIEW для ведения архива сложных данных при непрерывном процессе измерения. Данные в этом формате хранятся в виде массива однотипных данных, структура которых задается разработчиком (программистом). В нашем случае такой записью является кластер из четырех текстовых и двух числовых полей соответственно.

Чтение базы вопросов осуществляется с помощью подпрограммы (рис. 3, б), которая позволяет получать требуемое число записей тестовых вопросов и проверять их корректное сохранение в базе вопросов. Кнопки «→» и «←» предназначены для просмотра имеющихся в базе записей. Индикатор «номер вопроса» показывает порядковый номер вопроса в базе.

Контроль знаний при использовании ПААТ происходит следующим образом: обучаемому предлагается тест, состоящий из пяти вопросов с четырьмя вариантами ответа на каждый (рис. 4).

Разработанная ПААТ была апробирована при тестировании группы студентов III курса

Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП) в рамках дисциплины «Бортовые вычислительные комплексы навигации и самолетовождения» по теме «Учет влияния ветра на полет ЛА». Каждому обучаемому было отведено по 3 мин для ответа на пять вопросов закрытого типа. Программа содержала базу из множества вопросов, каждый из которых имел свой вес. При правильном ответе на вопрос загорался индикатор зеленого цвета и программа автоматически выдавала следующий вопрос, который имел более высокий вес и, следовательно, сложность, если же ответ на вопрос был неверен, то загорался индикатор красного цвета и выдавался вопрос на уровень ниже. По окончании опроса на экран выводилась оценка. Если обучаемый не успевал ответить на все вопросы за отведенное время, то программа завершала свою работу с выставлением оценки 0 баллов.

Программа выставляет оценки в абсолютной шкале (десятичные дроби), а также в стандартной 4-балльной шкале [3]. Для оценивания знаний обучаемых преподавателем использовалась 4-балльная шкала [3].

#### **Нечеткая логика в адаптивном контроле навигационных знаний**

В процессе тестирования степень суммарной истинности ответов обучаемого на все вопросы теста оценивается подсчетом результирующей функции принадлежности (ФП) всего теста.

Итоговая оценка знаний тестируемого выводится сравнением полученной результирующей ФП всего теста с эталонными ФП [4].

Формально модель нечеткого оценивания знаний может быть представлена в виде [4]

$$\forall t_i \in T : F(t_i, M_E, I) \rightarrow N_i, \quad (1)$$

где  $F$  — процедура задания степени истинности предлагаемых вариантов ответов на каждое тестовое задание  $t_i \in T$ ;  $M_E$  — эталонная модель знаний;  $N_i$  — нечеткое множество вариантов возможных ответов;  $I = [I_1, I_2, \dots, I_m]$  — лингвистическая переменная, определяющая шкалу оценивания истинности ответов,  $m$  — число значений  $I$ ,  $I_k$  — значения, используемые в качестве оценочных категорий при построении ФП,  $k = 1, m$  [3]. Например, для пятизначной шкалы  $m = 5$ , соответственно,  $I_1 =$  «правильно»,  $I_2 =$  «не совсем правильно»,  $I_3 =$  «неполно»,  $I_4 =$  «неточно»,  $I_5 =$  «неправильно».

Для вывода итоговой оценки по результатам тестирования формируется шкала итоговых оценок в виде нечеткого множества

$$S_O = \{(s_r, \mu_r)\}, \quad (2)$$

где  $s_r$  — значение оценки;  $\mu_r$  — эталонная ФП, определяющая, в какой степени суммарная истинность ответов тестируемого на все вопросы теста соответствует оценке  $s_r$ ,  $r = 1, R$ ,  $R$  — число значений итоговой оценки, выставляемой по результатам тестирования. Для 4-балльной системы оценивания знаний  $R = 4$ , и, соответственно, получаем:  $s_1 =$  «неудовлетворительно»,  $s_2 =$  «удовлетворительно»,  $s_3 =$  «хорошо»,  $s_4 =$  «отлично».

Эталонные ФП  $\mu_r$  задаются в виде

$$\mu_r = \{O_{1r}/I_1, O_{2r}/I_2, \dots, O_{mr}/I_m\}, \quad (3)$$

где  $O_{kr}$  — степень соответствия совокупности ответов тестируемого оценочной категории  $I_k$ .

При использовании четырехзначной шкалы оценивания экспертным путем может быть задана эталонная ФП оценки  $s_4 =$  «отлично» следующим образом:  $\mu_4 = \{1/\text{правильно}, 0,3/\text{не совсем правильно}, 0,1/\text{неполно}, 0,0/\text{неточно}, 0,0/\text{неправильно}\}$ .

Эталонная ФП оценки  $s_2 =$  «удовлетворительно» может быть задана так:  $\mu_4 = \{0,2/\text{правильно}, 0,4/\text{не совсем правильно}, 0,9/\text{неполно}, 0,7/\text{неточно}, 0,3/\text{неправильно}\}$ .

Для контроля знаний обучаемого формируется конечное множество ТЗ

$$T = \{t_i\}, \quad (4)$$

где  $i = \overline{1, I_{\max}}$ ,  $I_{\max}$  — число заданий, включенных в множество  $T$ . Для каждого  $i$ -го задания создается нечеткое множество вариантов возможных ответов

дается нечеткое множество вариантов возможных ответов

$$N_i = \{(n_{ji}, \mu_{ji})\}, \quad j = \overline{1, P_i}, \quad (5)$$

где  $n_{ji}$  —  $j$ -й вариант ответа на  $i$ -е задание;  $\mu_{ji}$  — ФП, определяющая степень правдоподобия ответа  $n_{ji}$ ;  $P_i$  — мощность множества  $N_i$  (число вариантов ответов на ТЗ).

Функции принадлежности  $\mu_{ji}$  определяются в виде

$$\mu_{ji} = \{O_1 / I_1, O_2 / I_2, \dots, O_m / I_m\}, \quad (6)$$

где  $O_k$  — степень соответствия ответа  $n_{ji}$  оценочной категории  $I_k$  [4].

В процессе контроля знаний обучаемому последовательно предъявляются ТЗ  $t_i^{mj} \in S_O$  и варианты ответов  $N_i = \{n_{ji}\}$  на каждое  $i$ -е задание. На основании выбранных вариантов ответов  $n_{ji}^* \in N_i$  и соответствующих этим ответам ФП  $\mu_{ji}$  рассчитывается суммарная истинность ответов тестируемого на все задания теста в виде ФП  $\mu_\Sigma$ , нормированной относительно количества заданий  $n$ :

$$\mu_\Sigma = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mu_{ji}^* = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n O_{1ji}^* / I_1, \right. \\ \left. \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n O_{2ji}^* / I_2, \dots, \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n O_{mji}^* / I_m \right\}. \quad (7)$$

Итоговая оценка  $O_T$  за тест определяется по результатам сравнения рассчитанного значения  $\mu_\Sigma$  со всеми эталонными ФП  $\mu_r$ . Для каждого допустимого значения оценки  $s_r \in S_O$  вычисляется скалярное расстояние  $\Delta\mu_r$  между ее ФП  $\mu_r$  и результирующей ФП всего теста  $\mu_\Sigma$ :  $\Delta\mu_r = \mu_\Sigma / \mu_r$ , а при использовании меры Хемминга значение  $\Delta\mu_r$  вычисляется по формуле

$$\Delta\mu_r = \sum_{j=1}^m |O_{jr} - O_{j\Sigma}|, \quad (8)$$

где  $O_{jr}$  — степень соответствия совокупности ответов тестируемого оценочной категории  $I_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ , эталонных ФП;  $O_{j\Sigma}$  — степень соответствия совокупности ответов тестируемого оценочной категории  $I_j$  расчетных суммарных ФП ответов тестируемых.

Итоговая оценка вычисляется по формуле

$$O_T = s_r \mid \Delta\mu_r = \min_{\forall j=1..R} (\Delta\mu_j). \quad (9)$$

В качестве итоговой оценки принимается то значение оценки  $s_r \in S_O$ , для которого скалярное расстояние  $\Delta\mu_r$  между ее ФП  $\mu_r$  и результирующей ФП  $\mu_\Sigma$  всего теста оказывается минимальным.

### Анализ адекватности и эффективности адаптивного контроля навигационных знаний

Проведенный эксперимент в группе студентов показал, что по серии из 14 статистик адекватность программы контроля составила 93 %. Расхождение между оценками преподавателя и ПААТ составило 7 % (рис. 5, обучаемый № 9).

Контрольное АТ показало, что студенты с невысоким уровнем знаний затруднялись отвечать на вопросы среднего уровня сложности, как следствие — шесть неудовлетворительных оценок, в то время как студенты с высокой успеваемостью (две оценки — отлично, три оценки — хорошо) не испытывали затруднений даже при ответе на вопросы высокой сложности. Это свидетельствует о сильно выраженной «стратификации» успеваемости обучаемых, что необходимо учитывать при построении базы ТЗ и ранжировании сложности тестовых вопросов.

Данный факт указывает на необходимость реализации более «плавной» адаптации к уровню знаний и скорости усвоения УМ, о необходимости индивидуализации процесса передачи УМ, особенно при работе с «отстающими» студентами. В данном случае при расширении базы вопросов и пересмотре структуры семантического графа указанные недостатки могут быть ликвидированы.

Для реализации более «плавной» адаптации целесообразно варьировать длину шага при выборе сложности очередного вопроса из базы данных. Если представить базу данных вопросов в абсолютной величине в интервале 0...1, то нулю будет соответствовать самый легкий вопрос, а единице — самый сложный. Общее число ша-

гов соответствует количеству вопросов ТЗ. Для определения оптимальной длины каждого шага может быть использован любой из методов одномерной оптимизации, но с точки зрения наибольшей эффективности целесообразно использовать метод чисел Фибоначчи.

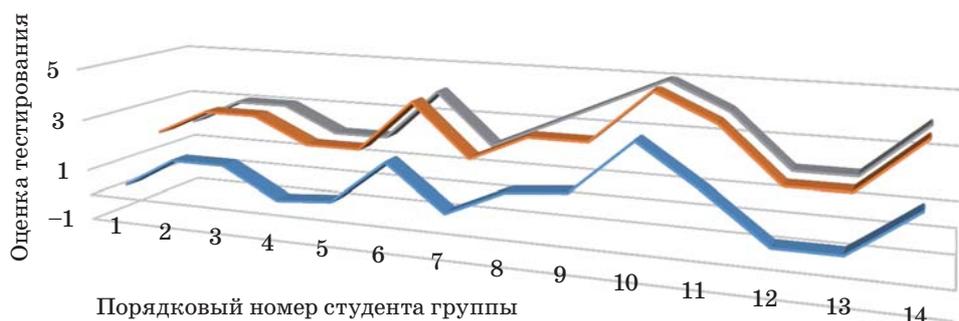
Помимо всего прочего, необходимо отметить, что важным недостатком спроектированных таким образом ПААТ часто является низкая степень адаптации к индивидуальным психофизиологическим особенностям обучаемых, взаимодействующих с системой [5, 6].

Для эффективного решения задач обучения и преодоления этого недостатка авторами статьи предложено внедрить в ПААТ систему психофизиологической диагностики (ПФД) обучаемых [5, 6].

Осуществим повторный эксперимент после проведения ПФД по алгоритмам, методикам и программам, подробно рассмотренным в работах [5, 6] (рис. 6).

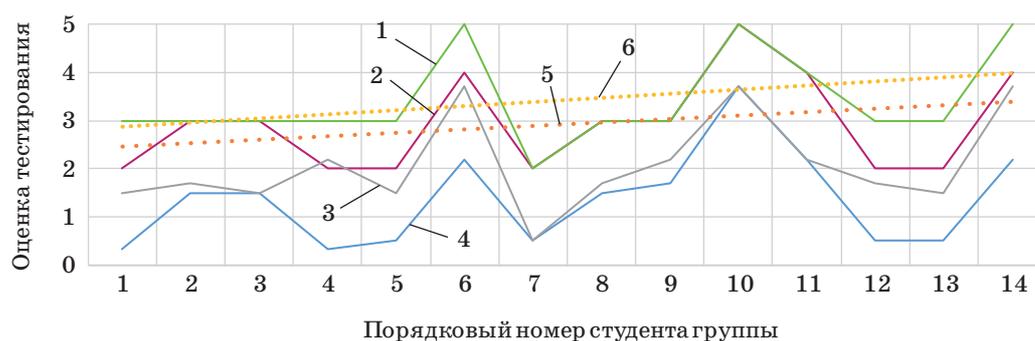
Из представленных графиков очевидно, что после проведения ПФД текущая успеваемость группы увеличилась преимущественно за счет задания адаптивных временных диапазонов, отводимых для тестирования. В данном конкретном случае диапазоны задавались в соответствии с результатами тестирования, полученными на основании работ [5, 6], исходя из индивидуальных типологических особенностей нервной системы обучаемого.

Сравнивая полученные результаты, отметим, что при организации ПФД средняя оценка по 4-балльной шкале составила 3,4 (см. рис. 6, линия 3) по сравнению со средним значением 2,8, полученным по результатам тестирования, не учитывающим ПФД (см. рис. 6, линия 5).



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
■ оценка ПААТ в абсолютной величине, баллы	0,33	1,5	1,5	0,33	0,5	2,2	0,5	1,5	1,7	3,7	2,2	0,5	0,5	2,2
■ оценка ПААТ в 4-балльной шкале	2	3	3	2	2	4	2	3	3	5	4	2	2	4
■ оценка преподавателя в 4-балльной шкале	2	3	3	2	2	4	2	3	4	5	4	2	2	4

■ Рис. 5. Результаты тестового контроля  
 ■ Fig. 5. Results of the test control



- 1 — оценка ПААТ в абсолютной величине, баллы  
 2 — оценка ПААТ в 4-балльной шкале  
 3 — оценка ПААТ в абсолютной величине после проведения ПФД, баллы  
 4 — оценка ПААТ в 4-балльной шкале после проведения ПФД  
 5 — линейная (оценка ПААТ в 4-балльной шкале)  
 6 — линейная (оценка ПААТ в 4-балльной шкале после проведения ПФД)

■ **Рис. 6.** Результаты тестового контроля после проведения ПФД

■ **Fig. 6.** Results of the test control after the psychophysiological diagnostics

Таким образом, ПФД обучаемых не только может быть эффективно интегрирована в обучающий процесс на любом из этапов обучения, но и позволит существенно повысить и адаптивность, и эффективность обучения в компьютерных обучающих системах.

В итоге после устранения указанных недостатков разработанная программа позволяет:

- автоматизировать процесс контроля навигационных знаний обучаемого;
- разгрузить преподавателя от монотонных технологических операций, связанных с проверкой ТЗ;
- адаптировать процесс контроля знаний для каждого конкретного студента;
- исключить предвзятое отношение со стороны преподавателя при выставлении оценки;
- повысить общую адаптивность ПААТ;
- обеспечить должное качество и адекватность полученных результатов за счет более полного описания модели обучаемого с учетом индивидуальных психофизиологических особенностей нервной системы.

Программа может быть использована в качестве эффективной дистанционной системы контроля и психофизиологической самодиагностики при условии размещения на персональном компьютере обучаемого. Наличие в составе ПААТ системы тестирования психофизиологических характеристик позволяет адаптировать обучающую систему к индивидуальным характеристикам обучаемого за счет задания временных параметров системы контроля знаний, что обеспечивает адекватную оценку знаний и повышает качество обучения.

Дальнейшие исследования адекватности полученных моделей тестирования направлены на

придание подходу интеллектуальности за счет возможности использования нечетких шкал оценивания [7] и реализации диагностики на базе искусственных нейронных сетей [8]. В настоящее время для решения задач распознавания и классификации широкое распространение получили искусственные нейронные сети, которые требуют незначительного объема обучающих статистик (case-based). Необходимо лишь иметь достаточное количество примеров для качественной настройки сети с заданной степенью достоверности.

### Заключение

Таким образом, разработанная на базе языка графического программирования NI LabVIEW дистанционная адаптивная система обучения позволяет сократить время, отведенное на обучение в рамках теоретической подготовки, а также интенсифицировать обучающий процесс и в конечном счете повысить степень усвоения учебного материала. Представленная программа может быть использована в качестве самодиагностирующей при реализации внеаудиторной самостоятельной работы обучаемых, помогает осуществить частичную разгрузку преподавателя за счет освобождения его от выполнения технологических операций, связанных с обработкой результатов тестирования.

Материалы данной статьи использованы в учебном процессе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на кафедре аэрокосмических приборов и измерительно-вычислительных комплексов.

## Литература

1. 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.
2. Лаптев В. В. Модель предметной области и оценка ее сложности в обучающей системе по программированию // Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Управление, вычисл. техн. и информ. 2010. № 2. С. 35–44.
3. Васильев В. И., Тягунова Т. Н., Хлебников В. А. Триадная сущность шкалы оценивания // Дистанционное образование. 2000. № 6. С. 19–25.
4. Рудинский И. Д. Модель нечеткого оценивания знаний как методологический базис автоматизации педагогического тестирования // Информационные технологии. 2003. № 9. С. 46–51.
5. Григорьев А. П., Орлов А. А. Адаптация АОС к психофизиологическим особенностям обучаемых // Сб. докл. научной сессии ГУАП. СПб.: ГУАП, 2014. С. 22–26.
6. Григорьев А. П., Писаренко Е. С. Моделирование психофизиологического тестирования обучаемых высшей технической школы // Сб. докл. научной сессии ГУАП. СПб.: ГУАП, 2014. С. 26–29.
7. Дуплик С. В. Модель адаптивного тестирования на нечеткой математике // Открытое и дистанционное образование. 2004. № 4. С. 78–88.
8. Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd ed. — Prentice-Hall, 1998. — 842 p.

UDC 004.89

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.95

## Adaptive System for Navigational Knowledge Control

Grigoryev A. P.<sup>a,b</sup>, Assistant Professor, Head of Design and Engineering Sector, alexgrid-1986@mail.ruBurlutsky S. G.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, sergey\_burluckiy@mail.ruChernelevsky A. O.<sup>a,c</sup>, M. Sc., Engineer, anatoliy.chernelevskiy@mail.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation<sup>b</sup>JSC «Arsenal Design Bureau named after Mikhail Vasil'evich Frunze», 1-3, Komsomola St., Saint-Petersburg, 195009, Russian Federation<sup>c</sup>PJSC «Techpribor», 5a, Varshavskaia St., Saint-Petersburg, 196084, Russian Federation

**Introduction:** The training of aviation specialists presumes continuous monitoring of academic performance. Thus, the issues related to ensuring the knowledge quality control and assessing the mastering of the educational material at the theoretical stage of the training are becoming increasingly relevant. **Purpose:** We have to consider the applied problems of navigation knowledge control using semantic graph models of the educational material used for structuring the learning elements of the subject area, ranking the tests according to their complexity in adaptive testing using fuzzy logic (determining how close the learner's answer is to the reference one), and developing an automated testing program in order to implement a continuous procedure of adaptive knowledge control. **Results:** The target tasks have been formulated for the program: to provide control over the level of mastering the theoretical material, to diagnose and restore unassigned or incomplete (fragmentary) knowledge at the theoretical stage of education, taking into account the adaptation to the individual traits of the trainees. An adaptive knowledge control algorithm has been proposed for the training of aviation specialists, based on testing of the closed type (with given options for the answer). On the base on this algorithm, in NI LabVIEW graphical programming environment, a program has been developed which adapts the test task complexity level to the level of every individual trainee and organizes automated testing. According to the results of the testing, automated control of the knowledge is carried out with properly ensured objectivity and correctness. The testing program can also be used as a self-diagnostic tool for independent out-of-class work of the trainees. The teaching load of the instructor becomes smaller due to the removal of certain technological operations related to the processing of the test results. **Practical relevance:** The remote adaptive training system developed on the base of graphic programming language NI LabVIEW allows you to reduce the time for training in the theoretical preparation framework, to intensify the teaching process and, ultimately, to improve the academic performance.

**Keywords** — Training of Aviation Specialists, Knowledge Control, Semantic Graph, Graphosemantic Domain Models, Adaptive Training Systems, Knowledge Control System, Fuzzy Estimation of Knowledge.

## References

1. 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).
2. Laptev V. V. Domain Model and Estimation of its Complexity in the Training System for Programming. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2010, no. 2, pp. 35–44 (In Russian).
3. Vasil'ev V. I., Tiagunova T. N., Khebnikov V. A. Triadic Nature of Assessment Scales. *Distantionnoe obrazovanie*, 2000, no. 6, pp. 19–25 (In Russian).
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. Duplik S. V. Model of Adaptive Testing on Fuzzy Math. *Otkrytoe i distantionnoe obrazovanie* [Open and Distance Education], 2004, no. 4 (16), pp. 78–88 (In Russian).
8. Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd ed. Prentice-Hall, 1998. 842 p.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОСПОЛНЕНИЯ БИОРЕСУРСОВ

**В. В. Михайлов<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

**А. Ю. Переварюха<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** внезапное истощение биоресурсов на фоне мнимого благополучия является важной и не решенной проблемой. Этим определяется актуальность разработки методов математического моделирования, позволяющих прогнозировать состояние биоресурсов с учетом взаимодействия комплекса факторов среды в серии вычислительных экспериментов. **Цель:** построение комплекса моделей для исследования динамики популяций промысловых рыб при изменении трофического статуса водоема. **Методы:** синтез дискретных компьютерных моделей экосистем озер и модели динамики популяций рыб с учетом свойственных их жизненному циклу экологических метаморфозов, что дает возможность организовать совместное использование моделей в сценарных экспериментах. **Результаты:** сформирована комплексная модель, связывающая блок динамики биогенных элементов, влияющих на выживаемость поколения при прохождении интервала уязвимости в онтогенезе рыб, с блоком динамики численности популяций, в котором указанное влияние отражено. Структура вычислительной модели динамики убыли поколений на интервале ювальной уязвимости представлена предикативно-переопределяемой системой дифференциальных уравнений и системой уравнений в конечных разностях, описывающих изменение концентраций азота и фосфора, продукционных показателей и прозрачности воды в среднегодовом усреднении. **Практическая значимость:** модель может быть применена для прогнозирования численности и видового состава рыбного населения водоемов при изменении их трофического статуса и выбора рациональной стратегии эксплуатации промысловых ресурсов.

**Ключевые слова** — динамическая система, фазовый портрет, аттракторы, трофическое состояние, жизненный цикл рыб, сценарный подход.

### Введение

В цикле работ мы последовательно совершенствуем возможности применения сценарного подхода и вычислительных моделей динамики популяций, которым свойственны выраженные комплексные эколого-физиологические метаморфозы. В работе [1] была предложена математическая формализация влияния темпов развития осетровых Каспия на итоговую выживаемость численности пополнения при установленной нерациональной стратегии эксплуатации запасов. Развиваемый подход к сценарным моделям предназначен для анализа критических режимов существования важных промысловых популяций.

Общей задачей исследований является анализ вычислительных модельных сценариев смены фаз и факторов при исчерпании биоресурсов или ускоренном размножении. Мы успешно рассмотрели факторы внутривидовой конкуренции за медленно возобновляющиеся ресурсы, действие которой на темпы роста немонотонно может зависеть от численности группы особей. Если для общего жизненного цикла большинства костистых рыб накопление биомассы удовлетворительно описывается семейством сигмоидных кривых, получаемых из балансового уравнения Бергаланффи, то для важного интервала наибольшей уязвимости на ранних этапах развития

прирост невозможно описать одним уравнением. Система предикативно переопределяемых дифференциальных уравнений динамики убыли поколений исходно предполагала раздельную формализацию изменений факторов смертности, связанных с плотностью скопления, и прочих, не зависящих от плотности. Если условия протекания физиологических процессов остаются постоянными, то в модели учет влияния внешних факторов не повлияет на итоговые выводы, так как действует математическое понятие о топологической эквивалентности устойчивых многообразий. Большой интерес представляют сценарии с целенаправленно меняющимися факторами. Количественные изменения концентраций биогенных элементов и первичной продукции водоема могут вызывать появление топологически неэквивалентных фазовых портретов динамических систем, как это происходит при некоторых бифуркациях асимптотически устойчивых стационарных состояний траектории или изменениях границ области притяжения при сосуществовании альтернативных аттракторов.

Для подобной задачи перспективно в вычислительную модель выживаемости молодежи инкапсулировать выходные переменные блока расчета биогенных элементов посредством оригинальной формализации темпов развития как механизма опосредованного влияния.

### Градации трофического состояния среды

Принято классифицировать водоемы по их биологической продуктивности в зависимости от трофического статуса, определенного уровнем содержания биогенных элементов, как дистрофные, олиготрофные, мезотрофные и эвтрофные — наиболее насыщенные органикой. Однако далеко не всегда обилие питательной среды — это положительный фактор для биоразнообразия. Вообще, показатель эвтрофирования экосистемы озера и биоразнообразия его населения не имеют прямой связи. Каждому уровню эвтрофирования водоема соответствует свой набор доминирующих видов живых организмов, отличных от видов, характерных для водоемов как с более высоким, так и более низким уровнем трофности. Количество видов рыбного населения и общая биомасса могут увеличиваться или уменьшаться, но к проблеме биоразнообразия это отношения не имеет. Антропогенная эвтрофикация вплоть до критического гипертрофного состояния становится одной из актуальных проблем для замкнутых экосистем при антропогенной нагрузке [2]. Для Волго-Каспийского региона проблема эвтрофикации и летнего цветения воды является весьма острой. Масштабность данного явления иллюстрирует приведенный в Википедии спутниковый снимок акватории всего Северного Каспия.

Отдельное моделирование динамики внешних факторов предполагает анализ реальных происходящих процессов в трофической цепи водоема. Существует большое количество моделей, описывающих продукционные процессы в водных экосистемах. Условно их можно разделить на детальные экосистемные и обобщенные. В моделях первого типа имитируются трофические цепи, включающие организмы фито- и зоопланктона, фито- и зообентоса, потоки детрита, его накопления в донных отложениях, выедания бентосом и разложения бактериальным сообществом водоема. Из химических элементов в моделях, как правило, учитываются фосфор и азот (в некоторых случаях кремний), лимитирующие образование первичной продукции. Представленные в модели балансы и круговороты минеральных соединений азота и фосфора с учетом внешних поступлений, выноса с водным стоком, захоронений в донных осадках (главным образом, соединений фосфора) и выделения в атмосферу (азота в газообразной форме и метана) позволяют исследовать динамику концентрации биогенных элементов в водной толще, изменение продукционных показателей и уровня трофности водоема. Сложность в использовании подобных моделей связана с необходимостью верификации параметров компонент экосистемы. Параметрическая верификация — нетривиальная задача, нерешаемая вычислительными алгоритмами, и требует специаль-

ных экспедиционных исследований и обработки неполных данных.

В обобщенных (интегральных) моделях отображается динамика потоков биогенных элементов без их трофической детализации. Это позволяет существенно упростить процедуру верификации моделей, исключив во многих случаях необходимость проведения дополнительных натурных исследований. Полученные путем моделирования данные о концентрации биогенных элементов могут быть инкапсулированы в модель развития молоди анадромных видов рыб для анализа топологических характеристик фазовых портретов динамических систем, о чем в этой статье было заявлено ранее.

Для моделирования эффективности воспроизводства популяций рыб будем использовать интегрированную модель экосистемы озера, разработанную в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН. Совместно с Хефэйским институтом интеллектуальных машин Академии наук Китая модель была адаптирована и применена для анализа и прогнозирования состояния озера Чао (провинция Анху, Китай) [3]. Ситуация озера Чао представляет интерес для нашей основной задачи совершенствования математических методов описания репродуктивного цикла анадромных рыб, так как отражает его основные особенности как модельного эталонного объекта условий раннего нереста: малую глубину и высокую проточность, низкую прозрачность, связанную с ослаблением света частицами донных отложений, относительно низкую величину интегральной первичной продукции. По данным 1987–1990 гг. трофическое состояние озера соответствовало мезоэвтрофному типу. К 1994 г. трофический уровень озера повысился до гипертрофного, что привело к качественным изменениям процессов высвобождения минерального фосфора из донных отложений при дефиците кислорода с угнетением аэрофильных видов. В дальнейшем, в связи с повышением внимания к охране природной среды в Китае и вводом очистных сооружений, фосфорная нагрузка стала снижаться и к 2000 г. вернулась к уровню 1987 г. Состояние экосистемы озера по большинству показателей стало соответствовать эвтрофному типу.

### Концептуальная формализация круговорота биогенных элементов

Принципы моделирования цикла круговорота органических веществ, направление «трофодинамики» были заложены работами ленинградской научной школы Г. Г. Винберга [4], изучавшего аспекты скорости образования первичной продукции водоемов, имевших различный трофический статус. Разработанная нами модель

экосистемы озера относится, по терминологии П. М. Хомякова [5], к классу интегральных моделей. Особенность данного класса моделей состоит в использовании известных и принятых научным сообществом эмпирических зависимостей, построенных по массовым данным и связывающих те или иные переменные модели при соблюдении законов сохранения материальных субстанций. В нашем случае известные в лимнологии эмпирические зависимости [6, 7] были применены для расчетов концентрации хлорофилла и первичной продукции по среднегодовой концентрации общего фосфора. Формулы, описывающие процессы образования детрита, его минерализации в водной толще и оседания на дно также были построены на основе массовых данных для озер разного трофического статуса и глубины [8]. Причем при выводе формул использовался динамический подход, учитывающий биологическую специфику указанных процессов. Модель донных отложений описывает динамику трех форм фосфора: органического, минерального фосфора порового раствора и сорбированного с использованием соотношений реакций первого порядка. Для азота учитывается его присутствие в органической и минеральной формах.

Количество азота и фосфора, заключенного в годовой первичной продукции и перешедшего в результате деструкции в минеральную форму, — это условные величины, характеризующие в модели интенсивность биологического круговорота. Однако разность величин годовой продукции и деструкции соответствует реальной величине захоронения органического вещества в донных отложениях, используемой при расчете баланса азота и фосфора и характеризующей роль биоты в осадконакоплении.

Модель представлена в виде системы уравнений в конечных разностях. Шаг счета в модели определяется свойствами эмпирических зависимостей и равен одному году. Уменьшить шаг счета и выполнить предельный переход к системе дифференциальных уравнений здесь принципиально невозможно. Расчет продукционных показателей экосистемы озера ведется по среднегодовой концентрации общего фосфора. Поэтому при подведении балансов предыдущего года и подготовки исходных данных для очередного шага счета используются данные о биогенной нагрузке также очередного (но не предыдущего) года.

### Блок динамики биогенных элементов

Исходя из рассмотренной ранее лимнологической характеристики объекта, в агрегированный модельный блок целесообразно включить перечисленные далее показатели трофического состояния, динамически связанные на основе эмпирически определенных функциональных за-

висимостей. Агрегированную модель разделим на функциональные сегменты.

I. Концентрация хлорофилла  $CHL$ ; прозрачность  $S$ ; первичная продукция в оптимальном по освещенности слое  $A_{opt}$ ; среднесуточная  $AD$  и годовая  $AY$  интегральная первичная продукция, где  $VEG$  — время вегетации:

$$CHL = 0,28 \cdot TP_s^{0,96}; A_{opt} = 30,6 \cdot CHL^{0,927};$$

$$S_1 = 5,7 \cdot CHL^{-0,44}; E_1 = \ln(0,05) / S_1;$$

$$E_2 = 1 / (k_1 \cdot Z^{k_2} + 1); E_S = E_1 + E_2;$$

$$S = \ln(0,05) / E_S; AD = A_{opt} \cdot S;$$

$$AY = AD \cdot VEG.$$

При расчете прозрачности воды отдельно учитывали ослабление света планктонно-детритной взвесью и частицами донных отложений, поступивших в воду в результате взмучивания. Для первой составляющей первоначально по эмпирическим формулам [6] рассчитывается прозрачность воды  $S_1$  и определяется коэффициент ослабления света  $E_1$ . Зависимость коэффициента ослабления света взвесью частиц донных отложений  $E_2$  от глубины озера  $Z$  задана в форме обратной степенной функции. Входящие в нее параметры  $k_1$  и  $k_2$  подбираются по данным о сезонных изменениях прозрачности, глубины озера и ослаблении света планктонно-детритной взвесью. Величины  $E_1$  и  $E_2$  суммируются для получения полного коэффициента ослабления света  $E_S$ . Далее определяется прозрачность воды  $S$  и интегральная первичная продукция.

II. Седиментация детрита  $CRD$ . Здесь  $V$  — скорость осаждения детрита, м/сут;  $\tau_i, \alpha_i$  — постоянная времени разложения, сут, и доля лабильной, промежуточной и консервативной фракции детрита:  $\tau_1 = 1, \tau_2 = 20, \tau_3 = 365, \alpha_1 = 0,15, \alpha_2 = 0,8, \alpha_3 = 0,05, V = 0,175$ .

При  $Z > 2S$ :  $CRD =$

$$= \sum_{i=1}^3 0,5 \cdot A_{opt} \cdot V \cdot \tau_i \cdot \alpha_i \cdot (1 - \exp(-Z / (V \cdot \tau_i)));$$

$$\text{при } Z > 2S: CRD = \sum_{i=1}^3 0,5 \cdot A_{opt} \cdot V \cdot \tau_i \cdot \alpha_i \times \\ \times (1 - \exp(-Z / (V \cdot \tau_i))) \cdot \exp(2 \cdot S - Z) / (V \cdot \tau_i);$$

$$CR = CRD \cdot VEG.$$

III. Седиментация азота  $NR$  и фосфора  $PR$  в составе детрита, где  $cn, cp$  — соотношение углерод-азот и углерод-фосфор в детрите:

$$NR = CR / cn; PR = CR / cp.$$

IV. Минерализация органического азота  $STN$  и фосфора  $STP$ ; коэффициент минерализации  $k1 = 0,4$ ;  $NRR$ ,  $PRR$  — количество органического азота и фосфора, поступающее в активный слой отложений:

$$STN = NR \cdot k1; STP = PNR \cdot k1;$$

$$NRR = NR - STN; PRR = PR - STP.$$

V. Минерализация и захоронение органического азота ( $NORGM$ ,  $NORGZ$ ) и фосфора ( $PORGM$ ,  $PORGZ$ ) активного слоя отложений;  $NORG$ ,  $PORG$  — количество органического азота и фосфора в активном слое;  $k2 = 0,017$ ,  $k3 = 0,0066$ :

$$NORGM = NORG \cdot k2; NORGZ = NORG \cdot k3;$$

$$PORGM = PORG \cdot k2; PORGZ = PORG \cdot k3.$$

VI. Отдельно проведем расчет и внесение поправок в коэффициент выноса фосфора в воду  $k4$  и коэффициент десорбции  $k5$ . Нас интересует расчет выноса в воду  $PPMV$ , где сорбция  $PPMS$  минерального фосфора порового раствора  $PPM$ , десорбция  $PSDS$  и захоронение  $PSS$  сорбированного фосфора  $PS$  активного слоя донных отложений. Важнейшая характеристика  $PLIM$  — граничное значение содержания органического вещества (в долях фосфора) в донных отложениях, при котором наступает дефицит кислорода. Установлено  $k4 = 0,045$ ,  $k5 = 0,002$ ,  $k6 = 0,1$ ,  $k7 = 0,0065$ .

Алгоритмически для расчета поправок применим схему

$$kkk = 0;$$

$$\text{if } (PORG + PR) > PLIM,$$

$$kkk = (PORG + PR - PLIM);$$

$$k4 = 0,045 + k4 \cdot kkk; k5 = 0,002 + k5 \cdot kkk;$$

end

и рассчитаем вынос биогенов уже с поправками:

$$PPMV = PPM \cdot k4; PPMS = PPM \cdot k6;$$

$$PSDS = PS \cdot k5; PSS = PS \cdot k7.$$

VII. В заключительном сегменте модели определим общее выделение минеральных соединений азота  $NVV$  и фосфора  $PVV$  в воду. Пересчет органического, минерального и сорбированного фосфора и органического азота активного слоя донных отложений для следующего шага счета рассчитывается линейно:

$$NVV = STN + NORGM; PVV = STP + PPMV.$$

$$NORG(t + 1) =$$

$$= NORG(t) + NRR - NORGM - NORGZ;$$

$$PORG(t + 1) = PORG(t) + PRR - PORGM - PORGZ.$$

$$PPM(t + 1) =$$

$$= PPM(t) - PPMV - PPMS + PORGM + PSDS;$$

$$PS(t + 1) = PS(t) - PSDS - PSS + PPMS + PSV.$$

Таким образом, в балансе азота и фосфора в водной массе учитывается внешняя биогенная нагрузка, седиментация органического и минерального фосфора, поток азота и фосфора из отложений в воду, потери с водным стоком. После подведения всех балансов рассчитывается концентрация общего азота и фосфора для следующего шага итерации. Теперь необходимо инкапсулировать сегменты блока динамики биогенных элементов в рассмотренную ранее модель эффективности воспроизводства в форме уравнений выживаемости на интервале наибольшей уязвимости  $[0, T]$  в раннем онтогенезе, который можно разделять на этапы.

### Непрерывно-дискретная структура модели популяции

При модификации модели выживаемости примем следующие биологически обоснованные гипотезы. Дефицит кислорода в донных отложениях не стратифицированных водоемов связан с количеством органического вещества в них, следовательно, существует граничный уровень органического вещества, при котором возникают в придонном слое анаэробные зоны. Существует оптимальное значение концентрации биогенных элементов, тогда как отклонения от оптимума могут воздействовать на скорость роста молодежи и выживаемость. Тогда воздействие динамики растворенных биогенов целесообразно описать через возникающее отклонение в темпах размерного развития молодежи. Замедленное развитие поколения молодежи в свою очередь опосредованно действует на скорость убыли численности поколения или в альтернативном способе формализации удлиняет интервал уязвимости  $[0, T_1]$ ,  $T_1 > T$ . Необходимо модифицировать базовую систему дифференциальных уравнений убыли численности поколения с учетом воздействия колебаний факторов среды для ситуации низкой эффективности выращивания в непроточном водоеме молодежи рыб в целях последующей ее интродукции. Изначально базовая модель описания убыли численности от  $N(0)$  в виде системы двух уравнений на отрезке времени, составляющем интервал уяз-

вимости  $t \in [0, T]$  до момента  $R = N(T)$ , с начальными условиями для дифференциальных уравнений  $N(0) = \lambda S$ ,  $w(0) = w_0$ ,  $k \in [1/2, 2/3]$

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -(\alpha w(t)N(t) + \theta(S)\beta)N(t); \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{N^k(t) + \sigma}, \quad \theta(S) = \frac{1}{1 - e^{-cS}} \end{cases} \quad (1)$$

была дополнена вспомогательным параметром индивидуального развития поколения  $w(t)$ , отражающим и изменения пищевых потребностей по мере развития особей. Здесь  $\theta(S)$  — триггерный функционал действия эффекта Олли  $\lim_{S \rightarrow \infty} \theta(S) = 1$ ,

который в следующей работе мы планируем дополнить стохастической составляющей. Разделенные компенсационные  $\alpha$ -факторы и декомпенсационные  $\beta$ -факторы убыли численности предполагаются регулируемы.

Множество решений задач Коши для всех допустимых значений  $S \in Z^+$  определит интересующую нас зависимость  $\psi$  от исходного запаса  $S$ . Применением получаемым в вычислительной среде решением задачи Коши (1) в виде оператора эволюции функциональной итерации  $R_{n+1} = \psi(R_n)$  удалось грамотно нарушить критерий возникновения каскада бесконечных удвоений периода цикла  $p = 2^i$ ,  $i \rightarrow \infty$ , сохранив единственный экстремум зависимости  $R_m = \max \psi(S)$  эффективности воспроизводства.

Путем организации непрерывно-дискретной системы получено необходимое для сложных биосистем свойство бистабильности для траекторий  $\{\psi^n(x_{0i})\}_{n=0}^{\infty}$  с разными начальными точками  $x_{0i}$ . Следовательно, для областей  $\Omega_1, \Omega_2 \in \mathfrak{R}^+$  таких, что выполняется  $(\Omega_1 \cap \Omega_2) = \emptyset$ , и граничной «репеллерной» точки  $R_1 \notin \Omega_1 \cup \Omega_2$  дополнительно справедливо условие

$$\begin{aligned} \forall x \in \Omega_1 \subset \mathfrak{R}^+ : \lim_{n \rightarrow \infty} \psi^n(x) = 0; \\ \forall y \in \Omega_2 \subset \mathfrak{R}^+ : \lim_{n \rightarrow \infty} \psi^n(y) = R^*; \\ \partial_{\mathfrak{R}} \Omega_1 \equiv \partial_{\mathfrak{R}} \Omega_2 = R_1 < R^*. \end{aligned}$$

Исследовалась в (1) потеря устойчивости стационарных точек как для критического случая  $|\psi'(R^*)| = -1$ , так и для соотношения производной  $|\psi'(R^*)| = 1$ , влекущего образование циклов порядка Шарковского:  $\psi^{n+p}(R^*) = \psi(R^*)$ ,  $p \neq 2^i$ ,  $i = 1 \dots \infty$ .

Серия нечетных циклов возникает после касательных бифуркаций у дискретной составляющей траектории гибридной динамической системы, которая включает событийную составляющую отсчетов времени  $\{\tau_1, \dots, \tau_i\} \in t$ . Дискретная

компонента времени указывает моменты  $\tau_i$  структурных изменений в онтогенезе рыб. Гибридное время  $t$  формируется в виде набора упорядоченных интервалов, куда вводится компонента событийности для фиксации изменений непрерывного процесса:

$$\mathfrak{D} = \bigcup_n \{L_{gap}, [t_{n-1}, t_n], R_{gap}\}, \quad (2)$$

где  $L_{gap}, R_{gap}$  — правая и левая «временная щель» для выделения событий с мгновенной длительностью. Так как исследуются метаморфозы дискретной составляющей траектории, то подход позволит координировать расчеты на конце интервала времени до начала нерестового цикла с пошаговой структурой сегментированного блока биогенных элементов.

### Агрегированная модель выживаемости молоди

Для рассматриваемой задачи моделирования одним из возможных методов вычислительного решения представляется сценарий, в котором показатель скорости развития рыб способен получить значимую роль. В случае искусственного выращивания молоди осетровых рыб существуют факты, которые трудно объяснить иначе, как последствиями существенного отклонения от гидрохимического оптимума во время развития молоди. По мере наращивания объемов выращиваемой молоди органика все больше осаждается в отложениях. Неизбежно происходят изменения трофического статуса использовавшихся водоемов, что осложняется неоптимальным повышением температуры. Накопление избыточной органики в илистом слое — процесс медленный, но, как часто бывает, медленное нарастание негативных факторов сложнее обнаружить и своевременно предотвратить. Типичный пример быстрых последствий медленного процесса — сценарий стремительного коллапса запасов трески Канады в 1992 г. спустя 15 лет после перелома. Ихтиологами отмечалось [9], что процент промыслового возврата при небольших объемах выпуска заводской молоди на естественной кормовой базе в 1970-е гг. был значительно выше, чем при массовой интродукции в 1980-е гг. В итоге из-за действия последовательности взаимосвязанных прямых и опосредованных факторов эффективность искусственной интродукции осетровых оказалась значительно меньше ожидаемой по планам рыбного хозяйства [10].

Положим, что в естественной среде есть оптимальная скорость развития, тогда как отклонения, вызываемые неблагоприятной трофической обстановкой, не способствуют выживаемости.

Помимо конкуренции внутри группы, на развитие оказывают влияние темпы восстановления кормовой базы и обеспеченность кислородом, напрямую зависящие от содержания биогенных элементов. Эталонные темпы мы зададим, взяв за основу известное уравнение Бергаланффи [11], где указан общий баланс для соотношения эффективности анаболизма  $\eta$  и катаболизма  $\vartheta$ :

$$\frac{dW}{dt} = \eta \sqrt[3]{W^\zeta(t)} - \vartheta W^\sigma(t). \quad (3)$$

Для вычислительных исследований уравнение (3) предоставляет достаточную вариативность. Оно используется обычно в частном решении, когда принимают значение  $\sigma = 1$ . Для рыб считают показатель анаболизма  $\zeta = 2$ :

$$W_t = \left( \eta / \vartheta - \left( \eta / \vartheta - \sqrt[3]{W_0} \right) e^{-\vartheta t / 3} \right)^3.$$

Описание прироста одной зависимостью накопления и распада биомассы на протяжении всего жизненного цикла вряд ли биологически обосновано, потому для ранних стадий онтогенеза молодки мы можем варьировать показатели, и  $\sigma$  может отличаться от единицы. Будем считать (3) идеальной моделью, с которой реально сравнивать вариации. Прежде всего, интересно рассмотреть влияние конкуренции внутри группы согласно теории «запас-пополнение» Рикера [12] на динамику индивидуального развития в контексте отклонения гидрохимической обстановки среды от оптимального диапазона. Математически отразим влияние, оказываемое плотностью скопления и динамикой биогенов на показатели эффективности анаболизма:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\eta}{\xi v_1(NVV)v_2(PVV)} \sqrt[3]{w^\zeta(t)} - \vartheta w^\sigma(t), \quad (4)$$

где давление конкуренции за пищевые ресурсы в группе мы отразим функциями и где будет учтено усиление конкуренции при неблагоприятной обстановке:

$$v_1(x) = \frac{x}{z_1 \exp(-bx(\gamma e^{-\rho x} + 1))};$$

$$v_2(x) = \frac{x}{z_2 \exp(-bx(\gamma_1 e^{-\rho x} + jxN(0)))}.$$

Значения, соответствующие минимумам  $v_1(NVV)$ ,  $v_2(PVV)$ , будут считаться оптимальными. Существуют противоречивые результаты исследований об ускорении темпов развития и увеличении сопутствующих морфометрических характеристик при малой плотности молодки

волжской севрюги в выростных водоемах, успех питания связан с групповым поведением.

Выразим необходимый нам показатель отклонения от идеального развития в виде, который заведомо не меняет знак слагаемого в правой части:

$\Delta_{Wt} = \sqrt{(W(t) - w(t))^2}$ , модифицировав первое уравнение убыли, представленной в инструментальной среде моделирования в форме гибридной системы:

$$\frac{dN}{dt} = -(\alpha \Delta_{Wt} N(t) + \beta \Psi(S)) N(t), \quad (5)$$

где триггерную функцию, отражающую действие эффекта Олли на эффективность нереста с необходимым свойством ограниченного действия  $\lim_{S \rightarrow \infty} \Psi(S) = 1$ , определим таким образом:

$$\Psi(S) = 1 + \exp(-\kappa S^2).$$

Базовую систему уравнений (2) можно расширить, преобразовав в форму динамически переопределяемой вычислительной структуры. Переопределение будет происходить на интервалах  $\chi$ , соответствующих эколого-физиологическим стадиям развития молодки, как показано нами ранее в первой работе цикла статей [13].

Вариант структуры модели с переопределением темпов размерного развития путем смены трех форм правой части дифференциального уравнения у второго уравнения в системе (2) выглядит мало обоснованным для модельных сценариев оценки эффективности искусственного воспроизводства рыб. Такой способ, скорее, подходит для особенностей онтогенеза насекомых-вредителей. Альтернативный способ формализации давления чрезмерной концентрации биогенов через влияние непостоянства интервала  $t \in [0, T = f(PVV)] \circ f_1(NVV)$  более сложно реализуем при вычислениях моментов времени  $t_n$  с плавающей границей временных кадров.

## Заключение

Таким образом, сформирован блок динамики биогенных элементов, что позволило опосредованно, через показатель темпов развития, отразить влияние общего накопления органического фосфора и азота на итоговую выживаемость поколения при прохождении интервала уязвимости в онтогенезе рыб. Разработанная вычислительная модель не относится к наиболее общему типу феноменологических популяционных моделей, как классические уравнения математической биологии Ферхюльста или Вольтерра, асимптотика которых не зависела от начальных условий. Расширения базовой модели предназначены для вариативного сценарного исследования эволюции некоторого исходного экологического состояния,

задаваемого набором основных важнейших характеристик репродуктивного процесса и внешних воздействий, такого как промысловое изъятие. Действие промысла на популяцию задается при переопределении начальных условий. Из-за промысла происходит изъятие доли запаса  $h$ . Начальные условия в уравнении убыли определим для  $N(t)$  как  $N_{n+1}(0) = \lambda(1 - h)N_n(T)$ .

Перспективно в дальнейших проектах исследовать развитие состояний, приводящих к длительным нестационарным режимам в динамике моделируемой биосистемы, как, например, долгосрочное воздействие масштабной интродукции выращенной в искусственных условиях молоди осетровых рыб. Основным аспектом в развиваемом сценарном подходе к исследованию переопределяемых вычислительных структур является понятие о ситуации и наиболее вероятных путях ее развития — трендах, предполагающих парный сравнительный анализ. Сценарий

с повышением степени влияния двух основных биогенных элементов при их избытке относится к медленно проявляющимся трендам. Процесс перехода к эвтрофному состоянию иллюстрируется известным эффектом «лягушки в кипятке», когда медленное нарастание негативного фактора оказывается не очевидным для наблюдателя и не происходит своевременной реакции. Примером служит запоздалое решение о запрете коммерческого промысла осетровых видов Каспия [14]. Если межсезонное изменение гидрохимических показателей составляет единицы процентов, то их могут относить к погрешности метода и считать условия размножения постоянными, тогда как медленный негативный тренд биогенной нагрузки может вдруг резко проявить себя при сильном повышении температуры.

Работа выполнена в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 15-07-01230 (СПИИРАН).

## Литература

1. Соловьева Т. Н., Переварюха А. Ю. Динамическая модель деградации запасов осетровых рыб со сложной внутривидовой структурой // Информационно-управляющие системы. 2016. № 4. С. 60–67. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.60
2. Carpenter S. R., Caraco N. F., Smith V. H. Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen // Ecological Applications. 1998. Vol. 8. P. 559–568.
3. Михайлов В. В., Марлей В. Е., Быков Я. И., Тинг-дзо Фанг, Бин Конг, Дю-тун Донг, Зонг-мо Ма. Прогнозирование состояния озера Чао путем моделирования // Экологическая химия. 2006. Т. 15. Вып. 1. С. 39–46.
4. Vinberg G. G. Energy Flow in Aquatic Ecological System // Polskie Archiwum Hydrobiologii. 1970. Vol. 17. N 1. P. 11–19.
5. Пегов С. А., Хомяков П. М. Моделирование развития экологических систем. — Л.: Гидрометеоздат, 1991. — 222 с.
6. Бульон В. В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. — СПб.: Наука, 1994. — 219 с.
7. Hakanson L., Boulion V. V. Regularities in Primary Production, Secchi Depth and Fish Yield and New System to Define Trophic and Humic State Indices for Lake Ecosystems // International Revue Hydrobiology. 2001. Vol. 86. P. 23–62.
8. Мартынова М. В., Михайлов В. В. Зависимость накопления органического вещества в донных отложениях от глубины и продуктивности водоемов // Докл. АН СССР. 1988. Т. 299. № 5. С. 1210–1212.
9. Khodorevskaya R. P., Kalmykov V. A. Formation of Populations of Acipenseridae Sturgeons in the Volga-Caspian Basin // Journal of Ichthyology. 2014. Vol. 54. Iss. 8. P. 576–583.
10. Veshchev P. V., Guteneva G. I. Efficiency of Natural Reproduction of Sturgeons in the Lower Volga under Current Conditions // Russian Journal of Ecology. 2012. Vol. 43. N 2. P. 142–147.
11. Bertalanffy L. Zur Geschichte Theoretischer Modelle in der Biologie // Studium Generale. 1965. Vol. 18. P. 290–298.
12. Ricker W. Stock and Recruitment // Journal Fisheries Research Board of Canada. 1954. N 11. P. 559–623.
13. Переварюха А. Ю. Нелинейная динамическая модель системы запас-пополнение // Информационно-управляющие системы. 2008. № 2. С. 9–14.
14. Ascher W., Mirovitskaya N. The Caspian Sea: A Quest for Environmental Security. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. — 364 p.

UDC 639.215.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.103

**Modeling the Dynamics of Nutrient Loading in Assessing the Effectiveness of Replenishment of Biological Resources**Mikhailov V. V.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, mwwcari@gmail.comPerevarukha A. Ju.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, temp\_elf@mail.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Sudden depletion of biological resources on the background of imaginary well-being is an important and unsolved problem. This determines the urgency of developing methods of mathematical modeling which would allow us to predict the condition of biological resources taking into account the interaction of complex environmental factors in a series of computational experiments. **Purpose:** We need to build complex models in order to study the population dynamics of commercial fish when the trophic status of their reservoir is changing. **Methods:** We synthesize discrete computer models of lake ecosystems, and a model of fish population dynamics, taking into account the peculiar life-cycle of environmental changes. This approach allows us to organize the joint use of models in our scenario experiments. **Results:** A complex model has been developed which binds a block describing the dynamics of nutrients influential for the generation survival when the fish ontogeny vulnerability interval is passed, with the block of population magnitude dynamics in which the above-mentioned influence is taken into account. The structure of the computational model for the generation decline dynamics on juvenile vulnerability interval is represented by a predicative redefinable system of differential equations and a system of finite difference equations describing the change in nitrogen and phosphorus concentrations, in production indicators and water transparency in their annual average. **Practical relevance:** The model can be applied to predict the abundance and species composition of fish population in water bodies when their trophic status is changing, and for choosing a rational strategy for the exploitation of fishing resources.

**Keywords** — Dynamic System, Phase Portrait, Attractors, Trophic Condition, Fish Life Cycle, Scenario Approach.

**References**

- Solov'eva T. N., Perevaryukha A. Y. Dynamic Model of Degradation of Sturgeon Stocks with a Complex Intrapopulation Structure. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 4, pp. 60–67 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.60
- Carpenter S. R., Caraco N. F., Smith V. H. Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Ecological Applications*, 1998, vol. 8, pp. 559–568.
- Mikhailov V. V., Marley V. E., Bykov Y. I., Ting djo Fang, Bin Kong, Diu tu Dong, Zongmo Ma. Prediction of Chao Lake State by Modeling. *Ekologicheskaja khimiia*, 2006, vol. 16, no. 1, pp. 39–46 (In Russian).
- Vinberg G. G. Energy Flow in Aquatic Ecological System. *Pol'skie Archiwum Hydrobiologii*, 1970, vol. 17, no. 1, pp. 11–19.
- Pegov S. A., Khomyakov P. M. *Modelirovanie razvitiia ekologicheskikh sistem* [Modeling the Development of Ecological Systems]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ, 1991. 222 p. (In Russian).
- Boulion V. V. *Zakonomernosti pervichnoi produktsii v limnicheskikh ekosistemakh* [Regulation of the Primary Production in Lake Ecosystem]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 1994. 219 p. (In Russian).
- Hakanson L., Boulion V. V. Regularities in Primary Production, Secchi Depth and Fish Yield and a New System to Define Trophic and Humic State Indices for Lake Ecosystems. *International Revue Hydrobiology*, 2001, vol. 86, pp. 23–62.
- Martynova M. V., Mikhailov V. V. Dependence of the Accumulation of Organic Matter in Sediments from Depth and the Productivity of the Reservoirs. *Doklady AN SSSR*, vol. 299, no. 5, pp. 1210–1212 (In Russian).
- Khodorevskaya R. P., Kalmykov V. A. Formation of Populations of Acipenseridae Sturgeons in the Volga-Caspian Basin. *Journal of Ichthyology*, 2014, vol. 54, iss. 8, pp. 576–583.
- Veshchev P. V., Guteneva G. I. Efficiency of Natural Reproduction of Sturgeons in the Lower Volga under Current Conditions. *Russian Journal of Ecology*, 2012, vol. 43, no. 2, pp. 142–147.
- Bertalanffy L. Zur Geschichte Theoretischer Modelle in der Biologie. *Studium Generale*, 1965, vol. 18, pp. 290–298.
- Ricker W. Stock and Recruitment. *Journal Fisheries Research Board of Canada*, 1954, no. 1, pp. 559–623.
- Perevaryukha A. Y. Nonlinear Dynamic Model of the Reserve-Replenishment System. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2008, no. 2, pp. 9–14 (In Russian).
- Ascher W., Mirovitskaya N. *The Caspian Sea: A Quest for Environmental Security*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000. 364 p.

## ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСНЫХ ФИЛЬТРОВ

С. И. Зиатдинов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

Ю. В. Соколова<sup>а</sup>, магистрант

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** при создании таких систем обработки информации, как доплеровские измерители скорости и ускорения, системы селекции движущихся целей, радиовысотомеры с частотной модуляцией несущего сигнала, согласованные устройства обнаружения и оценки параметров объектов, используются когерентные методы приема и анализа сигналов. Применяемые при этом, в частности, комплексные фильтры обладают комплексными импульсными характеристиками, позволяющими при заданных входных сигналах с помощью интеграла наложения найти выходные сигналы. **Цель:** разработка методики синтеза комплексных фильтров с заданными частотными свойствами на основе комплексных импульсных характеристик. **Результаты:** в общем виде получены выражения для квадратурных составляющих импульсных характеристик как полосовых, так и режекторных комплексных фильтров, что позволяет при известных входных сигналах найти их выходные сигналы. Выдвинутые теоретические положения подтверждены конкретными примерами. **Практическая значимость:** использование комплексных фильтров в когерентных системах обработки сигналов дает возможность всецело учесть временные и спектрально-корреляционные характеристики входных воздействий и тем самым значительно повысить эффективность разнообразных радиотехнических систем.

**Ключевые слова** — комплексный фильтр, частотная передаточная функция, вычеты, полюсы, комплексная импульсная характеристика.

### Введение

В настоящее время при обработке сигналов широкое распространение получили когерентные методы обработки сигналов, элементами которых являются разнообразные фильтры. С помощью фильтров выполняются операции фильтрации, дифференцирования, интегрирования, экстраполяции и т. д. В каждом конкретном случае фильтр должен обладать определенными частотными свойствами. В когерентных системах при преобразовании высокочастотных сигналов на видеочастоту и последующей обработке необходимо полностью сохранить все временные и спектрально-корреляционные свойства сигналов, включая знак частоты Доплера [1]. Данная задача легко решается с использованием разнообразных комплексных фильтров, в которых сравнительно легко изменяется их частота настройки без изменения амплитудно-частотных характеристик. При этом частота настройки фильтров может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

В общем виде частотная передаточная функция (ПФ) непрерывного комплексного фильтра записывается следующим образом [2, 3]:

$$W(p) = \frac{a_0(p - p_0)^m + a_1(p - p_0)^{m-1} + \dots + a_m}{b_0(p - p_0)^n + b_1(p - p_0)^{n-1} + \dots + b_n}. \quad (1)$$

Данная частотная ПФ является дробно-рациональной функцией, которая называется правиль-

ной, если  $n \geq m$ . Корни числителя в (1) называются нулями функции, а корни знаменателя — полюсами. Полюсы и нули являются либо действительными числами, либо комплексно-сопряженными. В выражении (1)  $p = j\omega$ ;  $p_0 = j\omega_0$ , где  $\omega_0$  — частота настройки комплексного фильтра. Следует отметить, что при  $m < n$  и  $\omega_0 \neq 0$  комплексный фильтр является полосовым фильтром, при  $m < n$  и  $\omega_0 = 0$  — фильтром нижних частот, а при  $m = n$  и  $\omega_0 \neq 0$  — комплексным режекторным фильтром и, наконец, при  $m = n$ ,  $\omega_0 = 0$  — фильтром верхних частот.

### Импульсная характеристика комплексного фильтра

Для нахождения импульсной характеристики комплексного фильтра в выражении (1) введем замену переменных  $s = p - p_0$ . Тогда частотная ПФ (1) записывается в виде

$$W(s) = \frac{a_0 s^m + a_1 s^{m-1} + \dots + a_m}{b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_n}. \quad (2)$$

В соответствии с работами [2, 3] данную частотную ПФ можно представить в параллельной форме

$$W(s) = \frac{r_n}{s - s_n} + \frac{r_{n-1}}{s - s_{n-1}} + \dots + \frac{r_1}{s - s_1} + W_0, \quad (3)$$

где  $r_i$  — вычеты;  $s_k$  — полюсы функции.

Целая часть  $W_0 \neq 0$  при  $m = n$ . Вычеты, соответствующие комплексно-сопряженным полюсам, также являются комплексно-сопряженными.

Обратное преобразование Фурье параллельной формы (3) определяет импульсную характеристику комплексного фильтра в виде суммы экспонент и  $\delta$ -функции [3]:

$$h(t) = \sum_{k=1}^n r_k \exp(p_k t) + W_0 \delta(t), \quad (4)$$

где  $p_k = s_k + j\omega_0$  — полюсы частотной ПФ (1).

Такую импульсную характеристику имеет система с  $(n + 1)$  каналами, в которой канал с импульсной характеристикой  $h(t) = W_0 \delta(t)$  воспроизводит входной сигнал без искажений. Это безынерционный канал с бесконечной полосой пропускания. Показатели  $p_k$  в экспоненциальных слагаемых в общем случае являются комплексными числами  $p_k = c_k + j(\omega_k + \omega_0)$ . При этом необходимо, чтобы действительная часть  $c_k \leq 0$ , иначе в сумме (4) появляются слагаемые вида  $r_k \exp(c_k t)$ , которые со временем возрастают до бесконечности. Компонента  $j\omega_k$  придает колебательный характер импульсной характеристике фильтра с частотой  $\omega_k$ . Затухающий гармонический сигнал  $\exp(-at)(\cos \omega_k t + j \sin \omega_k t)$  появляется на выходе при  $c_k < 0$ . Наличие компоненты  $j\omega_0$  дает колебательный характер импульсной характеристике фильтра на частоте  $\omega_0$ .

В результате импульсная характеристика комплексного фильтра может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned} h(t) &= \sum_{k=1}^n r_k \exp(c_k t) \exp[j(\omega_k + \omega_0)t] + W_0 \delta(t) = \\ &= \sum_{k=1}^n r_k \exp(c_k t) \exp(j\omega_k t) [\cos(\omega_0 t) + \\ &\quad + j \sin(\omega_0 t)] + W_0 \delta(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что импульсная характеристика комплексного фильтра в общем виде является тоже комплексной, т. е. содержит как вещественную, так и мнимую составляющие. Для перехода от действительного фильтра к комплексному с частотой настройки  $\omega_0$  достаточно импульсную характеристику действительного фильтра умножить на комплексный сигнал  $[\cos(\omega_0 t) + j \sin(\omega_0 t)]$ , что эквивалентно переносу частотной ПФ действительного фильтра на частоту  $\omega_0$  без изменения формы амплитудно-частотной характеристики.

В систему MatLab [4] включена группа функций для работы с ПФ. Нули и полюсы ПФ (2) рассчитываются с помощью функции `roots` вычисления корней полиномов числителя и знаменателя. Векторы коэффициентов числителя и знаменате-

ля ПФ записываются со старшего коэффициента. Функция `poly` по значениям корней вычисляет коэффициенты полиномов; функция `residue(a, b)` вычисляет вычеты  $r_k$  и вектор  $k$ . Пустой вектор  $k = []$  показывает отсутствие целой части в ПФ  $W_0 = 0$  ( $n < m$ ). С помощью функции `freqs(a, b, \omega)` вычисляется комплексная ПФ на заданной оси  $\omega$  по значениям коэффициентов  $a$  и  $b$ .

### Примеры вычислений импульсных характеристик

1. *Комплексный полосовой фильтр на базе фильтра нижних частот Баттворта второго порядка.*

Частотная ПФ такого фильтра с учетом соотношения (1) записывается следующим образом [3, 4]:

$$W(j\omega) = \frac{\omega_{cp}^2}{j(\omega - \omega_0)^2 + \sqrt{2}j\omega_{cp}(\omega - \omega_0) + \omega_{cp}^2}, \quad (6)$$

где  $\omega_{cp}$  — частота среза фильтра.

Модуль частотной ПФ (6) определяется соотношением

$$W(\omega) = 1 / \sqrt{1 + \frac{(\omega - \omega_0)^4}{\omega_{cp}^4}},$$

при этом коэффициенты  $a$  и  $b$  имеют вид

$$a = [\omega_{cp}^2]; \quad b = [1 \quad \sqrt{2}\omega_{cp} \quad \omega_{cp}^2].$$

Программа расчета полюсов функции (6) при  $\omega_0 = 0$  по данным коэффициентам представляется следующим образом [5]:

$$a = [\omega_{cp}^2] \% \text{ коэффициенты числителя (6)}$$

$$b = [1 \quad \sqrt{2}\omega_{cp} \quad \omega_{cp}^2] \% \text{ коэффициенты знаменателя (6)}$$

$$p = \text{roots}(b) \% \text{ полюсы функции (6)}$$

$$[r, p, k] = \text{residue}(a, b) \% \text{ вычисление вычетов и вектора } k$$

Выполнение данной программы дает следующие результаты:

$$r_1 = 0 - j0,707107, p_1 = -0,7071070 + j0,707107;$$

$$r_2 = 0 + j0,707107, p_2 = -0,707107 - j0,707107; k = [].$$

Таким образом, для рассматриваемого фильтра при  $\omega_0 = 0$  вычеты  $r_1$  и  $r_2$ , а также полюсы  $p_1$  и  $p_2$  являются комплексно-сопряженными. Тогда в соответствии с (5) импульсная характеристика комплексного полосового фильтра определяется соотношением

$$h(t) = [r_1 \exp(p_1 t) + r_2 \exp(p_2 t)] [\cos(\omega_0 t) + j \sin(\omega_0 t)].$$

Полученная импульсная характеристика может быть записана через вещественную и мнимую составляющие  $h_x(t)$  и  $h_y(t)$ . При этом  $h(t) = h_x(t) + jh_y(t)$ , где

$$h_x(t) = [r_1 \exp(p_1 t) + r_2 \exp(p_2 t)] \cos(\omega_0 t);$$

$$h_y(t) = [r_1 \exp(p_1 t) + r_2 \exp(p_2 t)] \sin(\omega_0 t).$$

Вид амплитудно-частотной характеристики рассматриваемого комплексного полосового фильтра при  $\omega_{cp} = 1$  рад/с и  $\omega_0 = 10$  рад/с показан на рис. 1 (линия 1), а на рис. 2, а изображены квадратурные составляющие  $h_x(t)$  и  $h_y(t)$  импульсной характеристики фильтра.

2. *Комплексный режекторный фильтр на базе фильтра нижних частот Баттерворта второго порядка.*

Частотная ПФ и ее модуль рассматриваемого фильтра с учетом соотношения (1) могут быть записаны, соответственно, в виде [2, 3]

$$W(j\omega) = \frac{j(\omega - \omega_0)^2}{j(\omega - \omega_0)^2 + \sqrt{2}j\omega_{cp}(\omega - \omega_0) + \omega_{cp}^2};$$

$$W(\omega) = \frac{(\omega - \omega_0)^2}{\omega_{cp}^2} / \sqrt{1 + \frac{(\omega - \omega_0)^4}{\omega_{cp}^4}}. \quad (7)$$

Модуль частотной ПФ  $W(\omega)$  показан на рис. 1 (линия 2) для случая, когда  $\omega_{cp} = 1$  рад/с и  $\omega_0 = -5$  рад/с.

Векторы коэффициентов фильтра представляются следующим образом:

$$a = [1 \ 0 \ 0]; \quad b = [1 \ \sqrt{2}\omega_{cp} \ \omega_{cp}^2].$$

При этом программа расчетов полюсов функции (7)  $\omega_0 = 0$  по заданным коэффициентам принимает вид

```
a = [1 0 0] % коэффициенты числителя (7)
b = [1 sqrt(2)*omega_cp omega_cp^2] % коэффициенты знаменателя (7)
p = roots(b) % полюсы функции (7)
[r, p, k] = residue(a, b) % вычисление вычетов и вектора k
```

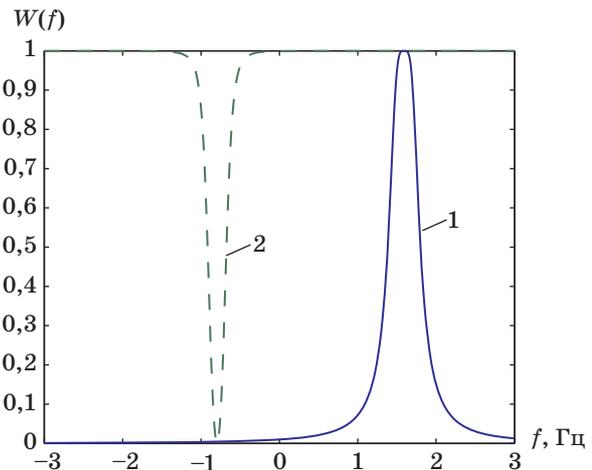
При выполнении данной программы получаются следующие результаты:

$$r_1 = -0,707107 + j0, \quad p_1 = -0,7071070 + j0,707107;$$

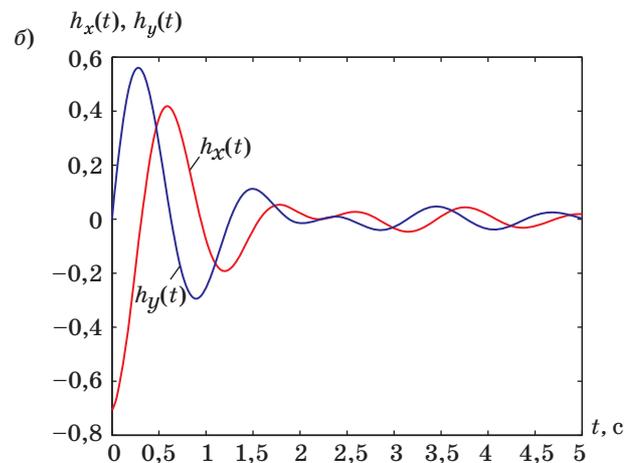
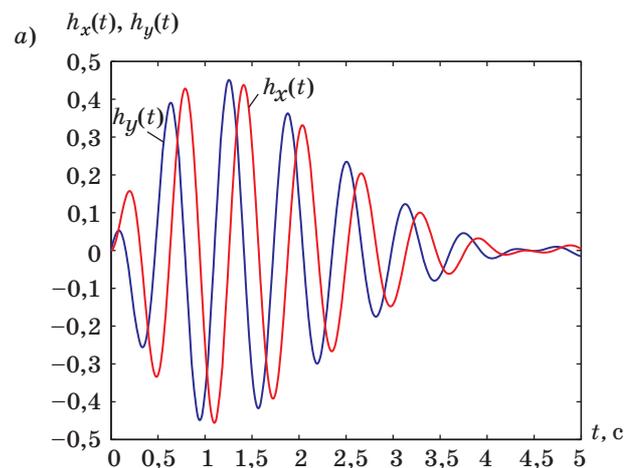
$$r_2 = -0,707107 + j0, \quad p_2 = -0,7071070 - j0,707107; \quad k = 1.$$

В итоге импульсная характеристика комплексного режекторного фильтра приобретает вид

$$h(t) = [r_1 \exp(p_1 t) + r_2 \exp(p_2 t)] [\cos(\omega_0 t) + j \sin(\omega_0 t)] + \delta[0].$$



■ **Рис. 1.** Амплитудно-частотные характеристики полосового 1 и режекторного 2 комплексных фильтров  
 ■ **Fig. 1.** Amplitude-frequency characteristics of band-pass 1 and notch 2 complex filters



■ **Рис. 2.** Импульсные характеристики полосового (а) и режекторного (б) фильтра  
 ■ **Fig. 2.** Pulse characteristics of the bandpass (a) and notch (b) filter

Для случая, когда  $\omega_{cp} = 1$  рад/с и  $\omega_0 = -5$  рад/с, на рис. 2, б представлены квадратурные составляющие импульсной характеристики фильтра за исключением  $\delta$ -функции.

### Заключение

Полученные теоретические результаты показывают, что импульсные характеристики как полосового, так и режекторного комплексных фильтров являются также комплексными и содержат вещественную и мнимую составляющие, сдвинутые по

фазе на  $90^\circ$ . Для преобразования действительного фильтра в комплексный достаточно его импульсную характеристику умножить на комплексный сомножитель  $[\cos(\omega_0 t) + j\sin(\omega_0 t)]$ , где  $\omega_0$  — частота настройки фильтра. Рассмотренная в статье методика расчета импульсных характеристик может быть распространена на полосовые и режекторные комплексные фильтры практически любых порядков. Подобные фильтры могут быть использованы при построении когерентных доплеровских измерителей скорости и ускорения, систем селекции движущихся целей, радиовысотометров и т. д.

### Литература

1. Микропроцессорные системы автоматического управления/под общ. ред. В. А. Бесекерского. — Л.: Машиностроение, 1988. — 365 с.
2. Воробьев С. Н. Цифровая обработка сигналов. — М.: Академия, 2013. — 318 с.
3. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Радио и связь, 1986. — 512 с.

4. Зиятдинов С. И. Импульсная характеристика комплексного полосового фильтра Баттерворта // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 8. С. 9–14.
5. Кетков Ю., Кетков А., Шульц М. MATLAB 6.x: программирование численных методов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 650 с.

UDC 621.396:681.323

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.111

### Impulse Characteristics of Complex Filters

Ziatdinov S. I.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, kaf53@guap.ru

Sokolova Y. V.<sup>a</sup>, Master Student, kaf53@guap.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** When developing such information processing systems as Doppler measuring instruments for speed or acceleration, moving target selection systems, radio altimeters with frequency modulation of the bearing signal, or coordinated devices for detection and assessment of object parameters, the developers often use coherent methods of signal reception and analysis. In particular, they use complex filters with complex impulse characteristics which allow you to find output signals for any preset input signals by means of integral of imposing. **Purpose:** We need to develop a technique of synthesizing complex filters with preset frequency properties on the basis of complex impulse characteristics. **Results:** We have obtained expressions in general terms for quadrature components of impulse characteristics of both band and rejection complex filters. This allows you to find their output signals for the known input ones. The suggested theoretical statements are substantiated by concrete examples. **Practical relevance:** The use of complex filters in coherent systems of signal processing allows you to fully consider the temporal and spectral-correlation characteristics of the input signals and to considerably increase the efficiency of various radio-technical systems.

**Keywords** — Complex Filter, Frequency Transfer Function, Deductions, Poles, Complex Impulse Characteristic.

### Reference

1. *Mikroprotsessornyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Microprocessor-based Automatic Control Systems]. Ed. by V. A. Besekerskiy. Saint-Petersburg, Mashinostroenie Publ., 1988. 365 p. (In Russian).
2. Vorobyov S. N. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing]. Saint-Petersburg, Akademiya Publ., 2013. 318 p. (In Russian).
3. Gonorovsky I. S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio Circuits and Signals]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 512 p. (In Russian).
4. Ziatdinov S. I. Impulse Response of a Complex Band-pass Butterworth Filter. *Izvestiya vuzov. Priborostroneniye*, 2015, vol. 58, no. 8. pp. 9–14 (In Russian).
5. Ketkov Yu., Ketkov A., Shultz M. *MATLAB 6.x: programirovaniye chislennykh metodov* [Programming of Numerical Methods]. Saint-Petersburg, BKhV-Petersburg Publ., 2004. 650 p. (In Russian).

**БЕСТУГИН  
Александр  
Роальдович**



Профессор, директор Института радиотехники, электроники и связи, заведующий кафедрой конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил Ленинградский государственный университет им. А. А. Жданова по специальности «Математика». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 150 научных публикаций, в том числе 12 монографий, двух учебников, 15 патентов на изобретения, полезную модель, регистрацию программного продукта для ЭВМ. Область научных интересов — радиотехника и электроника. Эл. адрес: fresguar@mail.ru

**БУРАКОВ  
Михаил  
Владимирович**



Доцент кафедры управления и информатики в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1984 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Автоматизированные системы управления». В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — системы интеллектуального управления, нечеткие регуляторы, нейронные сети, эволюционные алгоритмы. Эл. адрес: bmv@sknt.ru

**ГРИБКОВ  
Алексей  
Николаевич**



Доцент, профессор кафедры конструирования радиоэлектронных и микропроцессорных систем Тамбовского государственного технического университета. В 2004 году окончил Тамбовский государственный технический университет по специальности «Проектирование и технология электронных средств». В 2016 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 102 научных публикаций и двух патентов на изобретения. Область научных интересов — теория оптимального управления многомерными объектами, методы разработки алгоритмического и программного обеспечения информационно-управляющих систем. Эл. адрес: GribovAlexey@yandex.ru

**БРИТОВ  
Георгий  
Семенович**



Доцент кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1963 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Авиационное приборостроение». В 1968 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 13 патентов на изобретения. Область научных интересов — теория надежности и техническая диагностика информационных систем. Эл. адрес: bgs@ibi.metrocom.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» им. 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

**ЕРМАКОВ  
Павел  
Игоревич**



Аспирант кафедры бортовой радиоэлектронной аппаратуры Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2013 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Радиотехника». Является автором 11 научных публикаций и двух патентов на изобретения. Область научных интересов — метеорологическая радиолокация, цифровая обработка сигналов. Эл. адрес: big.awesome.pie@gmail.com

**ЗИАТДИНОВ  
Сергей  
Ильич**



Профессор кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1970 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электронные устройства». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 140 научных публикаций и 16 патентов на изобретения. Область научных интересов — аналоговая и цифровая обработка сигналов, автоматические системы управления. Эл. адрес: kaf53@guar.ru

**ИВАНОВ  
Александр  
Юрьевич**



Инженер-разработчик АО «Орден Трудового Красного знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиопаратуры», Санкт-Петербург. В 2002 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения, в 2008 году — Академию методов и техники управления Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. Является автором 13 научных публикаций. Область научных интересов — моделирование процессов управления воздушным движением, имитационные модели и алгоритмы радиотехнических средств обеспечения полетов, синтез тренажерно-моделирующих комплексов УВД. Эл. адрес: young3@yandex.ru

**КИРШИНА  
Ирина  
Анатольевна**



Доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1986 году окончила с отличием Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Вычислительные сети и системы». В 2011 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Является автором 57 научных публикаций, в том числе двух монографий, двух патентов на изобретение и одну полезную модель. Область научных интересов — радиотехника и электроника. Эл. адрес: zlata@aanet.ru

**КОНОВАЛОВ  
Александр  
Сергеевич**



Профессор кафедры управления и информатики в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1968 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов». В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 120 научных публикаций. Область научных интересов — автоматическое и интеллектуальное управление. Эл. адрес: Kononov@c4t.com

**КУРКИН  
Илья  
Александрович**



Ассистент кафедры конструирования радиоэлектронных и микропроцессорных систем Тамбовского государственного технического университета, аналитик ООО «Аналитические технологии», Рязань. В 2011 году окончил Тамбовский государственный технический университет по специальности «Проектирование и технология электронных средств». В 2015 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 33 научных публикаций. Область научных интересов — оптимальное управление, программные стратегии управления, многомерные объекты, методы искусственного интеллекта. Эл. адрес: allodsl@mail.ru

**ЛАШКОВ**  
**Игорь**  
**Борисович**



Аспирант кафедры информационных систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, младший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2014 году окончил с отличием Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Информационные системы и технологии».

Является автором 12 научных публикаций. Область научных интересов — управление знаниями, профилирование, базы данных, мобильные технологии и др. Эл. адрес: igor-lashkov@ya.ru

**МАРТЫНОВА**  
**Любовь**  
**Александровна**



Старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Системы освещения обстановки» АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 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

**МОНАКОВ**  
**Андрей**  
**Алексеевич**



Профессор кафедры бортовой радиоэлектронной аппаратуры Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1978 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиотехника».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 150 научных публикаций и 17 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Область научных интересов — радиолокация протяженных целей, радиотехнические методы наблюдения атмосферы и поверхности Земли, радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны, цифровая обработка сигналов, управление воздушным движением.

Эл. адрес: a\_monakov@mail.ru

**ЛИПАТНИКОВ**  
**Валерий**  
**Алексеевич**



Профессор, старший научный сотрудник Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург, заслуженный изобретатель РФ, член-корреспондент РАЕН.

В 1974 году окончил Военную академию связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного по специальности «Специальная радиотехника».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 267 научных публикаций и 80 патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория многоуровневой иерархической радиоэлектронной защиты, безопасности связи и информации инфотелекоммуникационных сетей.

Эл. адрес: lipatnikovan@mail.ru

**МИХАЙЛОВ**  
**Владимир**  
**Валентинович**



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1957 году окончил Ленинградский электротехнический институт по специальности «Математические и счетно-решающие приборы и устройства».

В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 190 научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерное моделирование в области экологии и робототехники, разработка систем автоматизации моделирования.

Эл. адрес: mwwcari@gmail.com

**МУРОМЦЕВ**  
**Дмитрий**  
**Юрьевич**



Профессор, проректор по научно-инновационной деятельности, заведующий кафедрой конструирования радиоэлектронных и микропроцессорных систем Тамбовского государственного технического университета.

В 1996 году окончил Тамбовский государственный технический университет по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».

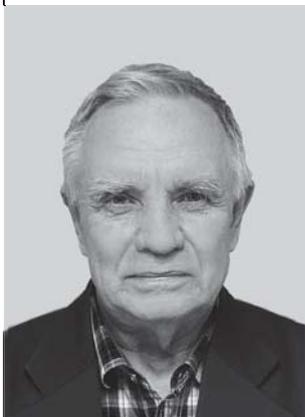
В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 173 научных публикаций и десяти патентов на изобретения.

Область научных интересов — анализ и синтез сложных систем на множестве состояний функционирования, энерго- и ресурсосбережение, энергосберегающие технологии и др.

Эл. адрес: crems@crems.jesby.tstu.ru

**НИКИФОРОВ  
Виктор  
Викентьевич**



Профессор, главный научный сотрудник лаборатории информационно-вычислительных систем и технологий программирования Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1965 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Радиотехника».

В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 120 научных публикаций.

Область научных интересов — системы реального времени, встроенные системы, операционные системы.

Эл. адрес: [nik@iias.spb.su](mailto:nik@iias.spb.su)

**ПЕРЕВАРЮХА  
Андрей  
Юрьевич**



Старший научный сотрудник лаборатории прикладной информатики Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2002 году окончил Астраханский государственный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 49 научных публикаций.

Область научных интересов — моделирование нелинейных явлений в биологических процессах, гибридные системы, сценарное моделирование в теории управления.

Эл. адрес: [temp\\_elf@mail.ru](mailto:temp_elf@mail.ru)

**ПОДКОРЫТОВ  
Сергей  
Алексеевич**



Младший научный сотрудник лаборатории информационно-вычислительных систем и технологий программирования Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2010 году окончил математико-механический факультет Санкт-Петербургского государственного университета по специальности «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем».

В 2014 году защитил диссертацию на соискание степени PhD in Computer Science.

Является автором двух научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерная графика, фракталы, нейронные сети.

Эл. адрес: [podkorytovs@gmail.com](mailto:podkorytovs@gmail.com)

**САЗОНОВ  
Александр  
Михайлович**



Студент Института математики и информационных технологий Петрозаводского государственного университета.

Является автором трех научных публикаций.

Область научных интересов — задачи оптимального управления динамическими структурами данных, динамическое распределение памяти, FIFO-очереди, настраиваемые очереди, параллельные алгоритмы работы с графами и разреженными матрицами.

Эл. адрес: [sazonov@cs.karelia.ru](mailto:sazonov@cs.karelia.ru)

**САННИКОВ  
Валерий  
Александрович**



Доцент кафедры радиотехнических систем средств организации воздушного движения и их эксплуатации Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1977 году окончил с отличием Академию гражданской авиации по специальности «Эксплуатация воздушного транспорта».

В 1988 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 70 научных публикаций, в том числе десяти изобретений.

Область научных интересов — применение методов математического моделирования при исследовании процессов управления воздушным движением.

Эл. адрес: [valerisannikov@gm.com](mailto:valerisannikov@gm.com)

**СЕМЕНОВА  
Елена  
Георгиевна**



Профессор, директор Института инноватики и базовой магистерской подготовки, заведующая кафедрой инноватики и управления качеством Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1975 году окончила математическо-механический факультет Вильнюсского государственного университета по специальности «Математик».

В 2004 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 57 научных публикаций и 12 изобретений.

Область научных интересов — автоматизация распознавания и идентификации стохастических систем и др.

Эл. адрес: [egsemenova@mail.ru](mailto:egsemenova@mail.ru)

**СОКОЛОВ  
Андрей  
Владимирович**



Ведущий научный сотрудник Института прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, профессор кафедры информатики и математического обеспечения Петрозаводского государственного университета.

В 1974 году окончил Ленинградский государственный университет по специальности «Прикладная математика».

В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — задачи оптимального управления динамическими структурами данных, динамическое распределение памяти, FIFO-очереди.

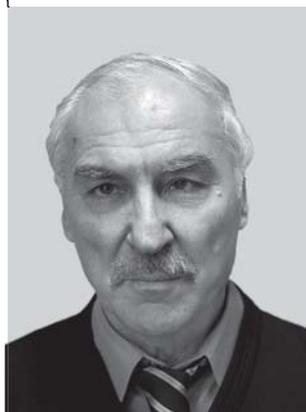
Эл. адрес: avs@krc.karelia.ru

**СОКОЛОВА  
Юлия  
Витальевна**



Магистрант кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов — информационные технологии. Эл. адрес: kaf53@guar.ru

**ФИЛИН  
Александр  
Дмитриевич**



Профессор кафедры радиотехнических систем средств организации воздушного движения и их эксплуатации Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1972 году окончил Государственную морскую академию им. адмирала С. О. Макарова по специальности «Радиотехника».

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 120 научных публикаций, в том числе двух монографий, двух учебников и десяти изобретений.

Область научных интересов — моделирование процессов управления воздушным движением, системный анализ решения задач синтеза тренажно-моделирующих комплексов.

Эл. адрес: fadadf@rambler.ru

**ХАФИЗОВ  
Ринат  
Гафиятуллович**



Профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета, Йошкар-Ола.

В 1994 году окончил Марийский государственный технический университет по специальности «Радиотехника».

В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 130 научных публикаций и четырех монографий.

Область научных интересов — цифровая обработка сигналов, обработка и распознавание изображений.

Эл. адрес: HafizovRG@volgatech.net

**ЧЕРНЕЛЕВСКИЙ  
Анатолий  
Олегович**



Магистр кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, инженер отдела топливных систем Инженерно-инновационного центра ПАО «Техприбор», Санкт-Петербург.

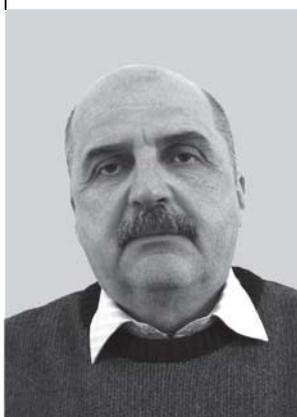
В 2017 году окончил с отличием магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Приборостроение».

Является автором более 25 научных публикаций.

Область научных интересов — психопрограммирование, психология, искусственный интеллект.

Эл. адрес: anatoliy.chernelevskiy@mail.ru

**ШАМКИН  
Валерий  
Николаевич**



Профессор кафедры конструирования радиоэлектронных и микропроцессорных систем Тамбовского государственного технического университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1972 году окончил Тамбовский институт химического машиностроения по специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов».

В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций и трех авторских свидетельств.

Область научных интересов — математическое моделирование, оптимизация режимов и управление сложными технологическими процессами, дестабилизационная оптимизация и др.

Эл. адрес: shamkin-v@mail.ru

**ШЕВЧЕНКО**  
**Александр**  
**Александрович**



Младший научный сотрудник Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург.

В 2015 году окончил Рязанский государственный радиотехнический университет по специальности «Компьютерная безопасность».

Является автором шести научных публикаций и одной программы для ЭВМ, зарегистрированной в ФИПС.

Область научных интересов — компьютерная безопасность, информационная безопасность, способы контроля уязвимостей и управления безопасностью информационно-вычислительных, информационно-телекоммуникационных и распределенных информационных сетей.

Эл. адрес:  
alexandr\_shevchenko91@mail.ru

**ЯРАНЦЕВА**  
**Татьяна**  
**Валентиновна**



Аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета, Йошкар-Ола, учитель физики высшей категории.

В 1997 году окончила Марийский государственный педагогический институт им. Н. К. Крупской по специальности «Учитель физики и информатики».

Является автором восьми научных публикаций.

Область научных интересов — цифровая обработка изображений и сигналов.

Эл. адрес: fiza08@rambler.ru

**ЯЦКИН**  
**Андрей**  
**Дмитриевич**



Старший оператор Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург.

В 2016 году окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого по специальности «Компьютерная безопасность».

Является автором двух научных публикаций.

Область научных интересов — сетевые технологии, компьютерная безопасность.

Эл. адрес:  
yatskinandrey@gmail.com