

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

1(68)/2014

1(68)/2014

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

Founder

«Information and Control Systems», Ltd.

Editor-in-Chief

M. Sergeev

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

Deputy Editor-in-Chief

E. Krouk

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

Executive secretary

O. Muravtsova

Editorial Council

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

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

B. Meyer

PhD, 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. Blaustein

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

A. Dudin

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

V. Khimenko

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

G. Maltsev

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

V. Melekhin

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

A. Shalyto

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, 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: A. Koleshko, M. Chernenko

Layout and composition: A. Koleshko

Contact information

The Editorial and Publishing Center, SUAI

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

Website: <http://i-us.ru/en>, E-mail: 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.

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.

© Corporate authors, 2014

INFORMATION PROCESSING AND CONTROL

- Balotin N. A., Sergeev M. B.** *Local Maximum Determinant Matrices* 2
Kruchinin A. Yu. *Control of an Extended Object Recognition Process in Real Time Based on Evaluation Complexity of Each Stage of Recognition* 16
Savchenko L. V. *Recognition Algorithm on the Basis of the Fuzzy Phonetic Coding-Decoding Method* 23

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

- Branishtov S. A., Tumchenok D. A., Shirvanyan A.M.** *Automation Issues of Train Control* 32
Yuldashev Z. M. *A Multilevel Spatially Distributed System for Elimination of Medical-Sanitary Consequences of Emergency Situations* 43
Sheremet A. I., Sadovoy A. V. *Regression Analysis in Interrelated Electromechanical Systems Based on the Support Vector Method* 48
Petrov I. O. *A Method for Determination of Optimal Operational Programs of Aircraft Movement in relation to the Center of Mass* 57

INFORMATION SECURITY

- Osipov V. Yu., Nosal I. A.** *Substantiation of the Period of Revision of Information Security Measures* 63
Nikitin V. N., Kovtsur M. M., Yurkin D. V. *Enhancement of Security of Key Distribution Protocols against Intruder Attacks in the Middle of a Communication Channel* 70

INFORMATION CODING AND TRANSMISSION

- Cheprukov Yu. V., Socolov M. A.** *Binary R2-Codes, Their Features and Application* 76

INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM

- Sharov V. G., Nikitin V. S., Lomanov A. N., Chaika S. V.** *Experimental Investigation of a Data Transfer System Based on a Switched Multi-Channel Fiber-Optic Connection* 84
Loskutov A. I., Byankin A. A., Dunikov A. S. *Use of Bispectral Analysis in Symbol Synchronization of Radio-Telemetric Systems* 93
Durnev R. A., Lukyanovich A. V., Kotosonova A. S. *Practical Results of Text Message Parameters Substantiation for Population Notification in Emergency Situations* 97

SYSTEM ANALYSIS

- Semenova E. G., Vasilyev O. I.** *Systems approach to the analysis of production processes of precision figurine Structures* 102

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

- Dmitriev V. N.** *Methods for Development of a Unified Technology of Materials Accounting in a Holding Company* 108
Orlova O. B. *Peculiarities of Logistics Management in Special Seaport Economic Areas* 116

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

121

Submitted for publication 20.12.13. Passed for printing 17.02.14. Format 60×84/8.
Offset paper. Phototype SchoolBookC. Offset printing.

Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Учредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»

Главный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Ответственный секретарь
О. В. Муравцова

Редакционный 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. Кристоделу,
д-р. наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США
Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария
Ю. Ф. Подоплекин,
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, РФ

Редакционная 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
А. И. Зейфман,
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ
Г. Н. Мальцев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, 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. Шалыто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
З. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: А. Н. Колешко, М. Л. Черненко
Компьютерная верстка: А. Н. Колешко

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: http://i-us.ru

Журнал 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».

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить
через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:
№ 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

© Коллектив авторов, 2014

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы локального максимума
детерминанта 2

Кручинин А. Ю. Управление режимом распознавания протяженного
объекта в реальном времени на основе оценки сложности каждого
этапа распознавания 16

Савченко Л. В. Алгоритм пофонемного распознавания устной речи
на основе метода нечеткого фонетического кодирования-декодирова-
ния слов 23

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Браништов С. А., Тумченко Д. А., Ширванян А. М. Вопросы
автоматизации управления поездной работой 32

Юлдашев З. М. Многоуровневая пространственно-распределенная
система ликвидации медико-санитарных последствий чрезвычайных
ситуаций 43

Шеремет А. И., Садовой А. В. Регрессионный анализ во взаимосвя-
занных электромеханических системах на базе метода опорных
векторов 48

Петров И. О. Метод определения оперативных оптимальных программ
движения ЛА относительно центра масс 57

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Осипов В. Ю., Носаль И. А. Обоснование периода пересмотра
мероприятий по защите информации 63

Никитин В. Н., Ковцур М. М., Юркин Д. В. Повышение защиты
протоколов распределения ключей от атак вторжения в середину
канала связи 70

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Чепруков Ю. В., Соколов М. А. Бинарные R2-коды, их характеристики
и применение 76

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Шаров В. Г., Никитин В. С., Ломанов А. Н., Чайка С. В. Эксперимен-
тальное исследование системы передачи данных по коммутируемому
многоканальному оптоволоконному соединению 84

Лоскутов А. И., Бянкин А. А., Дуников А. С. Использование би-
спектрального анализа в процессе символьной синхронизации
радиотелеметрических систем 93

Дурнев Р. А., Лукьянович А. В., Котосонова А. С. Практические
результаты обоснования параметров текстовых сообщений
для оповещения населения при чрезвычайных ситуациях 97

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Семенова Е. Г., Васильев О. И. Системный подход при анализе про-
цессов производства прецизионных сложнопрофильных конструкций 102

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Дмитриев В. Н. Методика создания унифицированной технологии
материального учета холдинговой компании 108

Орлова О. Б. Особенности управления логистикой в особых портовых
экономических зонах 116

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

121

ЛР № 010292 от 18.08.98.
Сдано в набор 20.12.13. Подписано в печать 17.02.13. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 14,7. Уч.-изд. л. 18,4. Тираж 1000 экз. Заказ 45.
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.

УДК 519.61:511-33

МАТРИЦЫ ЛОКАЛЬНОГО МАКСИМУМА ДЕТЕРМИНАНТА

Н. А. Балонин^а, доктор техн. наук, профессор

М. Б. Сергеев^а, доктор техн. наук, профессор

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

Постановка проблемы: основные обобщения матриц Адамара связывают с матрицами максимального детерминанта или с не оптимальными по детерминанту матрицами с ортогональными столбцами; квазиортогональные матрицы локального максимума детерминанта изучены недостаточно полно. Целью работы является обзор теории таких матриц по результатам предварительных исследований. **Методы:** экстремальные решения ищутся минимизацией максимума абсолютных значений элементов исследуемых матриц с последующей классификацией их по количеству и значениям уровней, зависящих от порядков. **Результаты:** обосновывается предположение, что существует всего пять нетривиальных малоуровневых строго оптимальных матриц нечетных порядков, меньших 13. Выделены и описаны функциями веса основные типы квазиортогональных матриц локального максимума детерминанта (*M*-матриц), включающие матрицы Мерсенна, Ферма и Эйлера. Сформулировано предположение о существовании всех матриц Мерсенна нечетных порядков. Рассмотрен вопрос существования матриц Мерсенна и Адамара. Приведен пример аппроксимации матрицы Адамара 668-го порядка блочным массивом с матрицами Вильямсона на основе матриц Мерсенна. Приведены графики, описывающие зависимость детерминантов *M*-матриц от порядка. **Практическая значимость:** алгоритмы нахождения *M*-матриц использованы при построении исследовательского программного комплекса. Субоптимальные по детерминанту матрицы составляют основу фильтров Мерсенна и Ферма, применяемых для сжатия и маскирования изображений.

Ключевые слова — ортогональные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Белевича, матрицы Мерсенна, матрицы Ферма, матрицы Эйлера, гипотеза Адамара.

Введение

В работе авторов [1] была сформулирована задача о нахождении некоторых аналогов матриц Адамара (*M*-матриц) на четных и нечетных порядках. Позднее опубликованы [2–10] результаты, развивающие положения постановочной статьи.

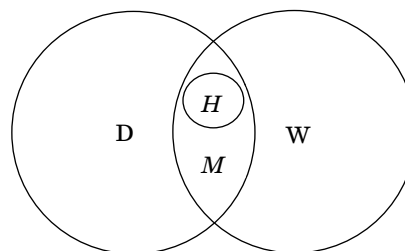
В 1893 г. Адамар обнаружил у матриц Сильвестра (1867) [11] с элементами $\{1, -1\}$ и порядков $n = 2^k$, где k — здесь и далее (если не оговорено) — целое число, свойство совмещать в себе два качества [12]: они имеют максимальный детерминант на широком классе матриц с элементами, не большими по модулю единицы; они квазиортогональны, т. е. строго ортогональны после нормирования их столбцов. Среди обобщений матриц Адамара часто встречаются следующие два. Первое связано с матрицами (не ортогональными по столбцам), обладающими максимальным значением детерминанта. Второе — с матрицами, называемыми взвешенными, обладающими расширенным (для обеспечения ортогональности столбцов) составом элементов $\{0, 1, -1\}$.

Определение 1. Значения, которым равны элементы матрицы, будем называть ее уровнями. Например, матрица Адамара [12] с элементами $\{1, -1\}$ имеет два уровня (двухуровневая), а матрица Белевича [13] с элементами $\{0, 1, -1\}$ — трехуровневая.

Квазиортогональные обобщенные матрицы Адамара с элементами, не большими по модулю

единицы, лежат на пересечении *M* двух классов (рис. 1): *D*-матриц абсолютного максимума детерминанта (не ортогональных по столбцам) и квазиортогональных *W*-матриц (безотносительных к оптимуму детерминанта) с некоторым, желательно небольшим, количеством уровней. Классические матрицы Адамара образуют на пересечении *D*-матриц и *W*-матриц подмножество *H* всех матриц с единичными по модулю элементами.

Проблема обобщения состоит в том, что матрицы класса *H* существуют не для всех значений порядков n . Соответственно, возникает дополнительная задача поиска квазиортогональных матриц с максимальным значением детерминанта, т. е. матриц класса *M*, к которому принадлежат некоторые известные квазиортогональные матрицы, например, часть матриц Белевича. Количество уровней матриц класса *M* в общем



■ **Рис. 1.** Диаграмма Венна пересечения *M* множеств *D*-матриц и *W*-матриц, отражающая подмножество *H* матриц Адамара

неизвестно и должно быть определено для каждого порядка, отличного от порядков двухуровневых матриц Адамара. Детерминант — непрерывная функция от элементов матрицы, имеющая не только глобальный, но и локальные максимумы. Более широкими обобщениями матриц Адамара следует считать квазиортогональные матрицы, обладающие либо глобальным, либо локальным максимумом детерминанта.

Такая постановка задачи на поиск обобщений, несмотря на более чем столетнюю историю матриц Адамара, нова и в силу ее сложности исследована и представлена в публикациях недостаточно полно. Целью настоящей работы является обзор, которым будет показана особая роль матриц локального максимума детерминанта.

Квазиортогональные матрицы и значение их детерминанта

Согласно *теореме Адамара*, $|\det(\mathbf{A})| \leq n^{n/2}$ для всех матриц \mathbf{A} с элементами, не большими по модулю единицы. Равенство достижимо только на матрицах Адамара \mathbf{H} с их экстремально малым количеством уровней при экстремально большом детерминанте.

Определение 2. Квазиортогональной будем называть квадратную матрицу \mathbf{A} порядка n с приведенными к единице максимумами модулей элементов каждого из столбцов, удовлетворяющую квадратичному условию связи

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \omega \mathbf{I},$$

где \mathbf{I} — единичная матрица; ω — вес матрицы.

Вес $\omega = 1$ характерен для ортогональных матриц, к которым квазиортогональные матрицы и, в частности, матрицы Адамара, помимо тривиальной матрицы первого порядка, не относятся. Вместе с тем эти матрицы весьма близки к ортогональным, получаемым из \mathbf{A} элементарным нормированием их столбцов, после чего максимальный по модулю элемент (m -норма) уменьшается до $m < 1$ для порядков $n > 1$.

Определение 3. Минимаксными квазиортогональными M -матрицами в строгом смысле будем называть матрицы, обладающие минимумом m -нормы на классе квазиортогональных матриц порядка n .

Несложно заметить, что $|\det(\mathbf{A})| = \omega^{n/2}$, причем $\omega = 1/m^2$.

Матрица Адамара \mathbf{H} , обладающая максимумом детерминанта, имеет минимальное значение $m = 1/\sqrt{n}$, т. е. является частным случаем M -матриц с весом $\omega = n$.

На многих порядках завышенная неравенством Адамара верхняя граница значения модуля детерминанта не достижима в принципе,

поэтому для них матриц Адамара не существует. Отсутствие оптимального решения искусственное, поскольку возможен поиск достижимого максимума модуля детерминанта, т. е. M -матрицы.

Определение 4. Минимаксными квазиортогональными M -матрицами в общем смысле будем называть матрицы, обладающие глобальным или локальным минимумом m -нормы на классе квазиортогональных матриц порядка n .

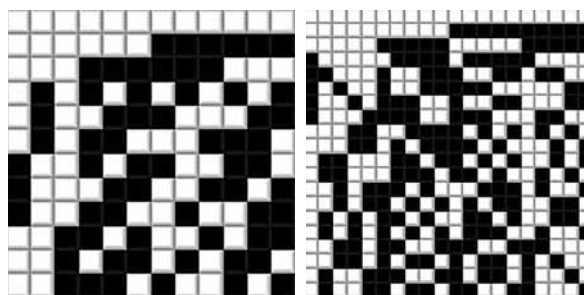
Такие M -матрицы более широко определены, они обладают глобальным или локальным максимумом модуля детерминанта.

Определение 5. Адамаровой нормой (h -нормой, взвешенной m -нормой) матрицы будем называть показатель $h = m\sqrt{n}$.

Адамарова норма отражает близость матрицы к матрице Адамара, у которой она имеет минимально возможное значение $h = 1$. Модуль детерминанта квазиортогональной матрицы $|\det(\mathbf{A})| = 1/m^n = n^{n/2}/h^n$ включает в себя правую часть неравенства Адамара $n^{n/2}$, пониженную до достижимой величины делением на n -ю степень h -нормы. Вопрос существования M -матриц решается значительно проще, чем для классических матриц Адамара, что видится естественным, поскольку первые должны их обобщить. Однако отсюда следуют и более далеко идущие выводы, позволяющие иначе подойти к оценке факта существования классических матриц на порядках, кратных четырем.

Предположение Пэли (гипотеза Адамара)

То, что матрицы Адамара существуют для порядков n , равных 1, 2 и всех кратных четырем, предположил Пэли [14], наблюдая, что алгоритмы их вычисления дают пересекающиеся, но не совпадающие между собой множества матриц. С пары новых матриц 12-го и 20-го порядков (рис. 2), отличных от силвестровых, начинал Адамар [12], пояснив ими необходимое условие $n = 4k$ для нахождения квазиортогональных матриц с элементами $\{1, -1\}$. Здесь и далее белый



■ Рис. 2. Матрицы Адамара \mathbf{H}_{12} и \mathbf{H}_{20} , отличающиеся от силвестровых

квадрат портрета матрицы соответствует элементу 1, черный — элементу -1.

Позднее Скарпи [15] нашел не пару, а множество матриц порядков, указанных Адамаром [12], не вычислимых по правилу Сильвестра [11]. Следом Пэли разработал несколько алгоритмов. Матрицы двух его базовых конструкций [14] включают две матрицы Адамара H_{12} и H_{20} (они выглядят иначе), но отличаются в общем от матриц Сильвестра и Скарпи. Отсюда вывод Пэли: любую матрицу допустимого порядка $n=4k$, видимо, можно найти, предложив некоторый новый алгоритм их вычисления.

Начиная с конструкций Пэли, методы нахождения новых матриц включают в себя переборные алгоритмы, что при современной скорости вычислителей не позволяет найти уже в первой тысяче матриц, например, матрицы Адамара порядков 668, 716 и 892.

Таким образом, предположение Пэли, называемое также *гипотезой Адамара (Hadamard conjecture)*, считается недоказанным.

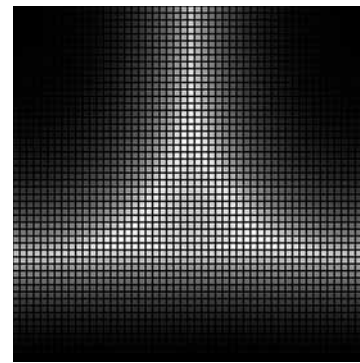
Квазиортогональные матрицы максимального детерминанта

Рассмотрим строго минимаксные М-матрицы, т. е. квазиортогональные и обладающие глобальным максимумом модуля детерминанта [1].

Общий подход в их построении заключается в минимизации m -нормы, поскольку $|\det(A)| = \omega^{n/2}$ при $\omega = 1/m^2$. Для нахождения оптимальной матрицы следует на множестве ортогональных матриц соответствующего порядка найти ту, которая обладает минимумом максимума абсолютного значения элемента. Например, на втором порядке это будут ортогональные матрицы Эйлера двумерного поворота на угол α с варьируемыми элементами $\cos(\alpha)$ и $\sin(\alpha)$ в первом столбце. Второй столбец содержит их же, но в обратном порядке, причем знак при синусе изменен.

Функция $|\det(A)| = 1/m^2$, где $m = \max\{\sin(\alpha), \cos(\alpha)\}$, при $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ имеет максимальное значение 2, соответствующее модулю детерминанта квазиортогональной матрицы Адамара. Она получается, например, из оптимальной матрицы Эйлера делением ее на m -норму, соответствующую экстремальному углу поворота $\alpha = \pi/4$.

Случай матрицы третьего порядка немногим сложнее. Детерминант ее — функция трех углов Эйлера α, β, γ поворота трехмерного базиса в трехмерном пространстве. Как и в предыдущем случае, для управления ориентацией первого вектор-столбца хватает меньшего числа углов (двух), остальные два вектора занимают подчиненное положение. Из всех возможных их ориентаций выбираем те, которые дают максимум m -нормы. Для нахождения минимаксной матрицы оста-



■ Рис. 3. Зависимость $|\det(A)|$ в системе угловых координат α, β

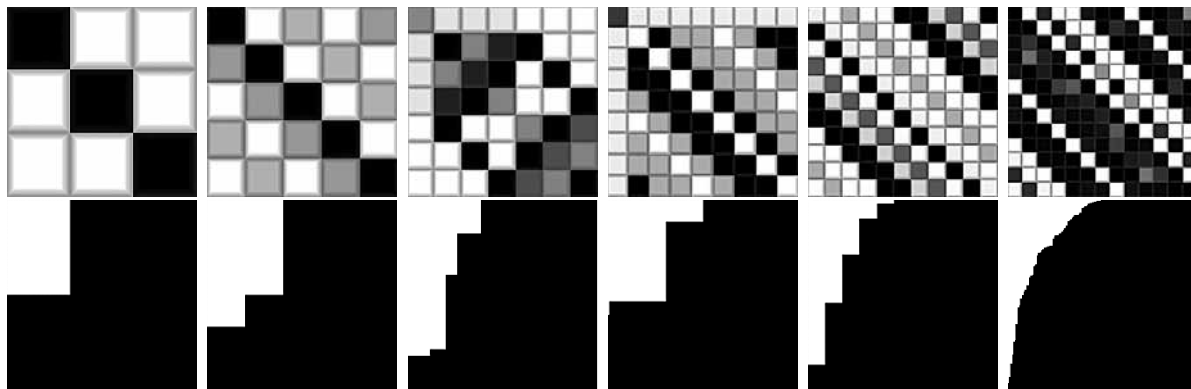
ется найти минимум отмеченного максимума. Не останавливаясь на деталях геометрического построения, представим фрагмент зависимости функции $|\det(A)|$ от двух ведущих углов в районе сосредоточения ее экстремумов: угловые координаты α, β задают ширину и высоту рисунка, а величина значения модуля детерминанта отражена насыщенностью точек белого цвета (рис. 3).

Судя по второму порядку, глобальный экстремум модуля детерминанта матриц Адамара выражен достаточно ясно. По сравнению с ними у матриц нечетного порядка на месте потенциального максимума наблюдается локальный минимум вследствие отмеченной оптимизации положения подчиненных векторов базиса, влияющих на m -норму. Особенность геометрических пространств размерностей, кратных четырем, состоит в том, что зависимые векторы на максимум не влияют. Максимум не смещен, расположен по центру, и такая матрица имеет все равные между собой координаты: матрица Адамара — это модульно одноуровневая матрица.

Оптимальные матрицы нечетных порядков соответствуют смещенному положению максимума. Он наиболее смещен для матрицы третьего порядка A_3 так, что одна из трех координат ортогонального базиса убывает вдвое. Таких вариантов несколько, они эквивалентны друг другу по значению модуля детерминанта. На рис. 3 варианты решения видны в виде трех вершин одинаковой яркости, образуемых центральным понижением на трех ведущих к центру гребнях функции $|\det(A)|$. Вид матрицы, эквивалентной всем тем решениям, приведем ниже.

Предположение о малоуровневых М-матрицах

Матрицу-элемент первого порядка $A_1 = 1$ отнесем к тривиальным одноуровневым, она начинает последовательность Сильвестра двухуровневых матриц Адамара.



■ Рис. 4. Портреты матриц $A_3, A_5, A_7, A_9, A_{11}, A_{13}$ с гистограммами модулей элементов

Определение 6. Малоуровневыми квазиортогональными матрицами назовем такие, количество модульных уровней которых превосходит $K=(n+1)/2$ не более чем на 1.

Например, матрица A_3 — малоуровневая М-матрица, число ее уровней, в соответствии с оценочной формулой и построением выше, равно двум.

Предположение 1. Существует только пять нетривиальных малоуровневых строго минимаксных М-матриц нечетного порядка $n < 13$.

Для иллюстрации приведем пять оптимальных матриц $A_3, A_5, A_7, A_9, A_{11}$, сопоставляя их между собой и с многоуровневой матрицей A_{13} по структуре портретов и количеству модульных уровней на гистограммах (рис. 4).

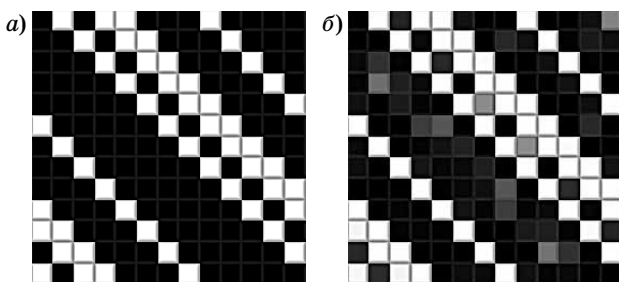
Три малоуровневые матрицы A_3, A_5, A_{11} сводятся к циклическим, количество их модульных уровней оценивается как $K=(n+1)/2$. Промежуточная пара A_7, A_9 имеет на единицу отличное от K количество уровней. Модули уровней A_3 относятся друг к другу в пропорциях 1:2, A_5 — в пропорциях 2:3:6, уровни остальных матриц иррациональны. Многоуровневая матрица A_{13} (рис. 5, а) близка по матричному ее портрету к двухуровневой циклической D-матрице Рагхаварао R_{13} (рис. 5, б) [16] абсолютного максимума детерминанта. Ортогонализация столбцов R_{13} с сохранением оптимальности дости-

гается утратой цикличности (но не симметрии относительно побочной диагонали) при значительном превышении количеством уровней значения K .

Ортогональный базис — некоторое простое первичное понятие. Зависимость числа уровней квазиортогональной М-матрицы от порядка — фундаментальная характеристика «вместаемости» пространства. Это, скорее, атрибут самого пространства, чем матрицы. Исходя из гипотезы Адамара зависимость эта плохо изучена — нет сформировавшегося мнения относительно не только всем хорошо известных матриц Адамара, но и остальных минимаксных матриц. С ростом размерности различие между соседними пространствами убывает, но для начальных пространств наблюдается кризисный 13-й порядок.

Геометрический анализ позволяет предположить, что смещающий глобальный максимум модуля детерминанта локальный минимум с ростом порядка утрачивает свое доминирование. Увеличивается общее количество локальных минимумов и максимумов, их значения сближаются между собой. Задача поиска экстремальной матрицы на плато становится все более плохо обусловленной, возникает много почти не отличимых по детерминанту матриц. Но и это еще не предел неопределенности. Линейное возрастание числа уровней «бифуркациями» и наличие критической точки (на порядке 13) отвечает воззрениям, сложившимся в теории детерминированного хаоса [1].

Значение h -нормы A_{13} предложено [1] считать базовой константой $B=m13^{1/2}$, где $m \in [0, 31]$, т. е. $B \in [0, 31 \cdot 13^{1/2} = 1 + \delta = 1,117...]$. Это не столько показатель этой именно матрицы, сколько интегральный параметр слоя «хаотических» матриц, к которому матрица тринадцатого порядка принадлежит. Матрицы Адамара и их обобщения представляют аттракторы итерационных алгоритмов вычисления минимаксных матриц (фрак-



■ Рис. 5. Портреты матрицы A_{13} (а) и матрицы Рагхаварао R_{13} (б)

талы). Сходство с константой Фейгенбаума F константы B состоит в ее универсализме: независимо от порядка итерациям свойственно за-цикливаться на матрицах с h -нормами, больши-ми B [1]. Решение с h при $B > h \geq 1$ представляет собой интерес как «информативная» матрица. Информативность матриц будем оценивать по показателю $I = \lg(h - \delta) / \lg(1 - \delta)$. У матриц Адамара он положителен и достигает максимума — единицы, низкая информативность A_{13} принята за эталон, у всех таких матриц она в точности или приближенно равна нулю.

Обратим внимание, что относительно легко находимые начальные M -матрицы до двенадцатого порядка включительно имеют приведенную норму h выше константы B . Далее начинаются серьезные проблемы поиска таких матриц.

Концепция матриц локального максимума детерминанта

Рассмотрим M -матрицы в широком их понимании, как квазиортогональные матрицы глобального и локального максимумов детерминанта, представляющие собой частные проявления некоторого единого математического объекта.

Определение 7. Слоем будем называть M -матрицы, определенные с помощью функции веса $\omega(n)$ на порядках $n = 4k + d$, где d — фиксированное целое значение $0 \leq d < 4$.

Если идентифицирована связывающая M -матрицы от порядка к порядку зависимость $\omega(n)$ без особых точек (типа деления на 0), то это основа для индуктивного заключения о существовании всех таких матриц нечетных порядков.

Определение 8. Срезом будем называть M -матрицы, принадлежащие разным слоям и объединенные близостью их порядков.

Например, помимо матриц Адамара, отличный от них слой образуют матрицы Мерсенна и Эйлера [4, 6]. Матрицы Ферма [5], определенные на порядках, не смежных четырех, слоя не образуют — это отдельные проявления, примыкающие к срезам, включающим в себя триады матриц Эйлера, Мерсенна, Адамара. Кроме работ [1–10], авторам не известны исследования квазиортогональных матриц локального максимума детерминанта, альтернативных матрицам Адамара. Поясним особое их значение.

Ранее было показано, что M -матрицы нечетного порядка, обладающие глобальным максимумом детерминанта, начинаются и завершаются первыми пятью их нетривиальными малоуровневыми представителями. Сходные проблемы наблюдаются и у матриц смежных классов. При $n = 12$ кончается представительство матриц Адамара, передаваемых одной их эквивалентной реализацией.

D -матрицы абсолютного максимума детерминанта, казалось бы, существуют всегда, при любых порядках. Значительно менее ощутимо качественное изменение материала: доказано, что они двухуровневые, т. е. их элементы имеют значения $\{1, -1\}$. Если и есть усложнение условий поиска таких матриц, то оно похоже на следствие увеличения их порядка. Тем не менее D -матрица 15-го порядка [17] найдена лишь в 2004 г., она одна из множества сходных с ней, первая неизвестная матрица имеет порядок 22 (для матриц Адамара проблемным порядком является 668 [18]). Сопоставление M -матрицы A_{13} и матрицы Рагхаварао R_{13} [16] говорит о том, что проблемы у двух типов матриц максимального детерминанта, квазиортогональных и нет, столь различны.

Все эти факты взаимосвязаны и говорят о плохой обусловленности задачи, независимо от ее трактовки на различных классах матриц. Порядок 13 является граничным для строго оптимальных матриц. Локальный экстремум несколько иной в своем окружении, чем глобальный. Безусловно, он сопровождает глобальный максимум и является его повторением, менее выраженным деталями. Он лишен разнообразия, а значит, нет близких решений. Локальные экстремумы устойчивы, что способствует легкости их нахождения. Важно подчеркнуть: устойчивы они настолько, что нет рубежной границы проявления хаоса в количестве уровней иско-мых матриц.

Располагаясь на срезах единого математического объекта, матрицы локального максимума детерминанта несут информацию о строго оптимальных матрицах четных порядков. Тем самым матрицы Адамара можно изучать по их соседям на нечетном порядке — матрицам Мерсенна, включая и сам факт их существования.

Матрицы Мерсенна

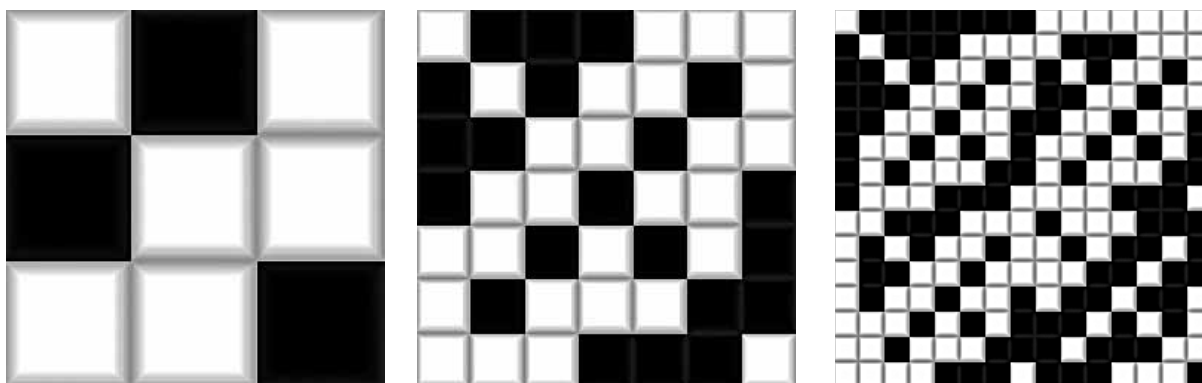
Матрицы Мерсенна [4] — квазиортогональные матрицы локального максимума детерминанта, впервые обнаруженные на порядках $n = 2^k - 1$, где k — целое число, принадлежащих последовательности чисел Мерсенна.

Определение 9. Квазиортогональными матрицами Мерсенна M будем называть двухуровневые матрицы порядков $n = 4k - 1$ со значениями элементов $\{1, -b\}$, где $b < 1$, удовлетворяющие квадратичному условию связи

$$M^T M = \omega(n) I.$$

Здесь I — единичная матрица;

$$\omega(n) = \frac{(n+1) + (n-1)b^2}{2} \text{ — переменный вес, } b = 1/2$$



■ Рис. 6. Портреты матриц Мерсенна M_3, M_7, M_{15} порядков, равных числам Мерсенна

при $n=3$, в остальных случаях $b = \frac{q + \sqrt{4q}}{q-4}$, $q=n+1$

(порядок соседствующих матриц Адамара).

Матрица M_3 является матрицей глобального максимума детерминанта и совпадает с матрицей A_3 . На фоне более значительного по величине детерминанта матрицы A_7 структура M_7 мало заметна, но после идентификации ее как продолжения A_3 появился модифицированный алгоритм Сильвестра их вычисления [4], давший последовательность матриц, представленных на рис. 6. Здесь, как отмечено, белый квадрат соответствует единице, а черный — отрицательному элементу $-b$.

Следуя логике Адамара и Пэли [14], следом были найдены квазиортогональные матрицы порядков 11 и 19, что позволило сформулировать гипотезу о существовании матриц Мерсенна на более широком, чем числа Мерсенна, множестве порядков [9].

Предположение 2. Матрицы Мерсенна всех порядков $n=4k-1$ существуют.

Предположение по характеру соответствует гипотезе Адамара, выдвинутой Пэли, но касается оно квазиортогональных матриц нечетного порядка. Матрицы Мерсенна — не целочисленные матрицы. Итерационный поиск локального экстремума функции детерминанта матрицы не является переборным, он применим без изменения к разным порядкам матриц (чего не было у Пэли). Итерационные алгоритмы иногда (не всегда) уступают комбинаторным в эффективности, когда последние применяются для частных случаев, на которые они ориентированы. Рассмотрим такой случай ниже.

Матрицы Мерсенна конструкции Пэли

Нахождение матриц Мерсенна в сечениях, для которых известны алгоритмы вычисления соседних с ними матриц Адамара, облегчено

возможностью построения модифицированных версий алгоритмов Сильвестра, Скарпи, Пэли, Уолша и др. Формулируются они даже проще, чем для классических матриц, поскольку матрицы Мерсенна в некотором смысле более первичны. Их порядок давно звучит в алгоритмах вычисления матриц Адамара.

Пусть n — простое число, задающее порядок матриц Мерсенна $n=4k-1$. Это необходимое и достаточное условие существования квазиортогональной циклической матрицы Мерсенна M с элементами, равными двухуровневым символам Лежандра $\chi\left(\frac{j-i}{n}\right) = \{1, -b\}$, вычисленным

для разностей индексов i, j их строк и столбцов.

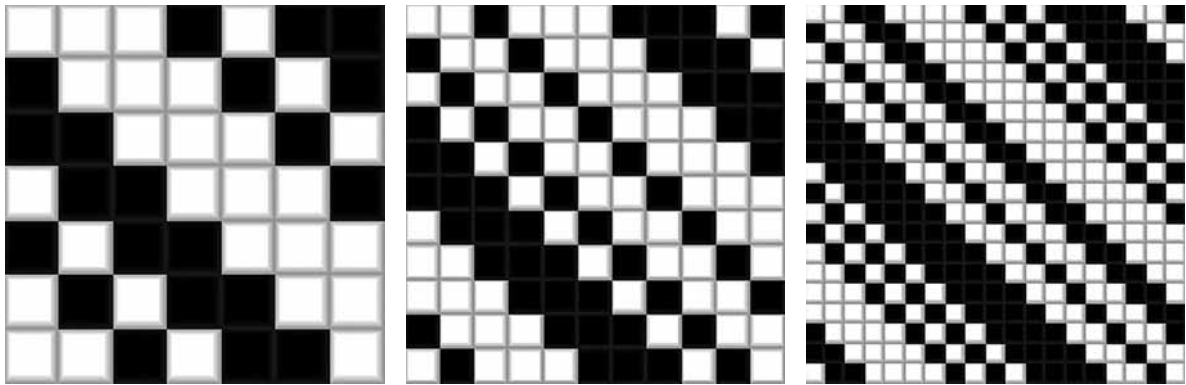
При симметричном определении символов Лежандра они равны 1, если числитель их аргумента — квадратичный вычет по модулю n , и -1 , если невычет (в данном случае $-b$). При вычислении основанных на символах Лежандра матриц

Якобсталя с нулевой диагональю значение $\chi\left(\frac{0}{n}\right)$

считают равным нулю. При расчете матриц Мерсенна аргументы в пользу ненулевого начала (единицы) перевешивают целесообразной простотой формулировки алгоритма.

Пример 1. Рассмотрим построение матрицы Мерсенна седьмого порядка M_7 , связанное с нахождением символов Лежандра для набора чисел $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, равных разностям индексов элементов первой строки. Их квадраты по модулю 7 равны $\{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$. Соответственно, числа набора $\{1, 2, 4\}$ представляют собой квадратичные вычеты, а остальные — невычеты. Иррациональное значение модуля уровня $b=2-\sqrt{2} \cong 0,5857$.

Портреты трех циклических матриц Мерсенна конструкции Пэли, начиная с M_7 и включая M_{11} и M_{19} , которыми они отличаются от сильвестровых, приведены на рис. 7.



■ Рис. 7. Портреты матриц Мерсенна конструкции Пэли M_7, M_{11}, M_{19}

Матрицы Ферма

В теории чисел существуют хорошо известные последовательности чисел Мерсенна и Ферма. Последовательность чисел Мерсенна задается в виде $n=2^k-1$ и начинается с чисел 1, 3, 5, 15, 31, ..., она принадлежит подмножеству чисел вида $4k-1$. Последовательность чисел Ферма задается в виде $n=2^{2^k}+1$ и начинается с чисел 3, 5, 17, 257, 65 537, 4 294 967 297, ..., она принадлежит подмножеству чисел вида $4k+1$. Очевидно, что между теорией чисел и теорией ортогональных базисов существует соответствие, и если есть квазиортогональные матрицы Мерсенна, то есть и квазиортогональные матрицы Ферма. От матриц более общего характера их отличает особая простота получения модифицированным алгоритмом Сильвестра [5].

Интерес к самим числам Ферма возник в связи с ошибочным объединяющим их предположением, что члены этой последовательности — простые числа. Предположение не подтвердилось, и с тех пор поиск делителей чисел Ферма превратился в своеобразный вид математического соревнования. Для теории квазиортогональных матриц важно не то, что числа Ферма стали истори-

ческим реликтом, а то, что для них и, расширительно, всех порядков $n=2^k+1$ при четных значениях k модифицированный алгоритм Сильвестра строит комплементарную сивльвестровым матрицам Мерсенна последовательность квазиортогональных матриц, названных матрицами Ферма [5].

Определение 10. Квазиортогональными матрицами Ферма F будем называть трехуровневые матрицы порядков $n=2^k+1$ при четных значениях k с элементами $\{1, -b, s\}$, где $s \leq b < 1$, удовлетворяющие квадратичному условию связи

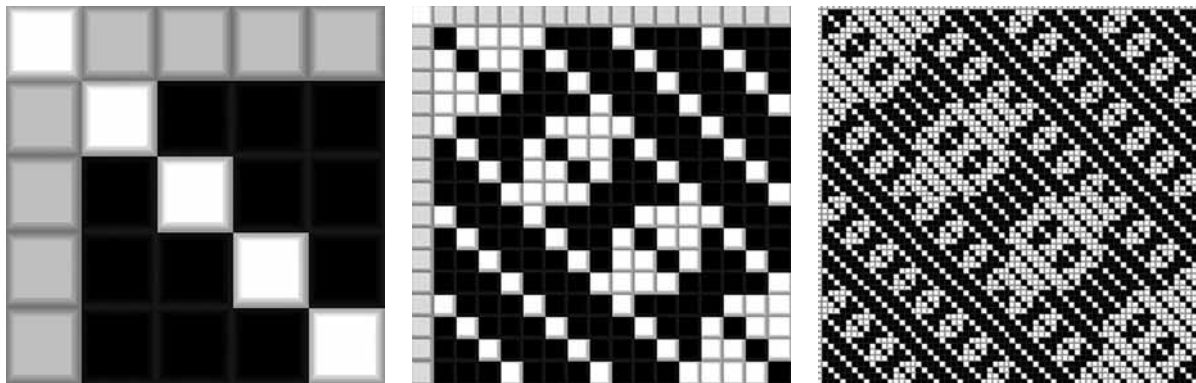
$$F^T F = \omega(n)I,$$

где I — единичная матрица; вес $\omega(n) = 1 + (n-1)s^2$. Модульные уровни $b=s=2/3$ при $n=5$, в общем

$$b = \frac{2n-p}{\rho}, \text{ элементы канвы } s = \frac{\sqrt{nq-2\sqrt{q}}}{\rho}$$

составляют первые строку и столбец, за исключением первого единичного элемента, $\rho = q + \sqrt{q}$, $q = n-1$ (порядок соседствующих матриц Адамара). Портреты трех первых матриц Ферма F_5, F_{17}, F_{65} приведены на рис. 8.

Этот тип аппроксимации матриц Адамара сверху интересен для теории квазиортогональ-



■ Рис. 8. Портреты матриц F_5, F_{17}, F_{65}

ных матриц тем, что определен на последовательности чисел $n = 4k + 1$ с пропусками. Вне базовых (сильвестровых) точек матрицы Ферма не обнаружены, поэтому слоя не образуют. Тем не менее локальный максимум детерминанта, их формирующий, появляется на предсказуемых значениях порядков, включающих числа Ферма.

Матрицы Ферма выделяет то, что они наиболее близки к матрицам Адамара и к матрицам с абсолютным значением максимума детерминанта нечетного порядка. Те и другие являются их целочисленной аппроксимацией при замене $b = s = 1$, для получения матрицы Адамара отрезается кайма. Таким образом, модифицированная версия алгоритма Сильвестра [5] годится для вычисления обобщенных матриц Адамара нескольких классов. В силу новизны рассматриваемых матриц факт этот и алгоритм их нахождения широко не известны.

Матрицы Эйлера

Описание квазиортогональных матриц локального максимума детерминанта дополним матрицами четных порядков вида $n = 4k - 2$.

Определение 11. Квазиортогональными матрицами Эйлера E будем называть модульно двухуровневые матрицы порядков $n = 4k - 2$ с элементами $\{1, -1, b, -b\}$, где $b < 1$, удовлетворяющие квадратичному условию связи

$$E^T E = \omega(n) I.$$

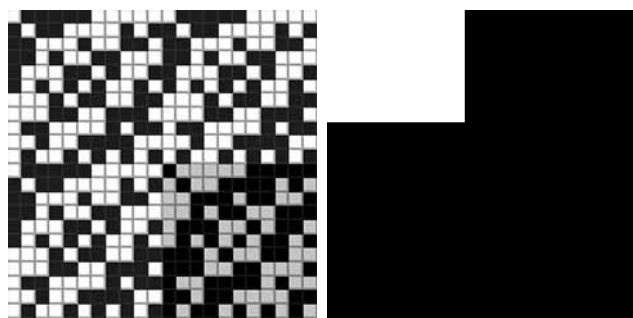
Здесь I — единичная матрица;

$$\omega(n) = \frac{(n+2) + (n-2)b^2}{2} \text{ — переменный вес матрицы.}$$

Модульный уровень $b = 1/2$ при $n = 6$, в общем

$$b = \frac{q - \sqrt{8q}}{q - 8}, \quad q = n + 2 \text{ (порядок соседствующих матриц Адамара).}$$

Половину всех матриц Эйлера можно вычислить по правилу Сильвестра [1] из матриц Мерсенна. В качестве примера на рис. 9 приведен



■ Рис. 9. Портрет матрицы E_{22} и гистограмма модулей ее элементов

портрет матрицы Эйлера E_{22} , построенной учетверением матрицы Мерсенна M_{11} , и гистограмма модулей ее элементов.

Среди весовых функций $\omega(n)$ на рассматриваемых порядках в первую очередь были изучены простейшие линейные зависимости, порождающие матрицы Белевича с элементами $\{0, 1, -1\}$, нулевой диагональю и весом $\omega(n) = n - 1$ [13]. До их выделения эти матрицы были известны как блоки алгоритма Пэли нахождения матриц Адамара удвоенного порядка. Целочисленность элементов матрицы — условие жесткое. Для его обеспечения необходимо, чтобы значение $\omega(n)$ было разложимо на сумму двух квадратов чисел [6]. Матрицы Белевича не существуют для значений порядков 22, 34, 58 и т. п., а первая проблемная матрица, которая не найдена, имеет порядок 66.

Матрицы Белевича были обобщены похожими на них взвешенными матрицами $W(n, k)$ с большим количеством разрешенных нулей и весом $\omega(n) = n - k$. Недостаток такого подхода к обеспечению условий существования состоит в следующем. Детерминант матрицы — степенная функция весового коэффициента: $|\det(A)| = \omega^{n/2}$, идея дискретного снижения $\omega(n) = n - k$ хороша ввиду простоты реализации, но оптимальное значение детерминанта возможно лишь у матриц Белевича или матриц, близких к ним. В самом деле, если $n = 22$ и $n = 34$, то следует допустить существование двух нулевых «диагоналей» (т. е. по два нуля в каждом столбце матрицы). Условие совместности матрицы порядка 58 требует наличия не менее пяти нулей. Можно найти квазиортогональные матрицы, превосходящие по детерминанту подобного сорта целочисленные варианты.

Следующая продуктивная идея состоит в том, чтобы указать матрицы локального максимума детерминанта, образующие, в отличие от матриц Белевича, слой — матрицы, заданные некоторым весом $\omega(n)$ и существующие на всех значениях порядка $n = 4k + 2$. Модульно двухуровневые матрицы несложно получить, как отмечалось, применением алгоритма удвоения порядка Сильвестра к матрицам Мерсенна. Таковы матрицы Эйлера, названные так потому, что замещаемые ими пропуски в ряду матриц Белевича определяются теоремой Эйлера — Ферма, дающей условие разложения веса на сумму двух квадратов чисел. Матрицы Эйлера легко образуют новые модификации: первая отличается целочисленными элементами $\{1, -1\}$ внедиагональных блоков, вторая, напротив, — равными между собой по модулю и противоположными по знакам элементами блоков диагональных. В этом они сходны с рассматриваемыми ниже матрицами Зейделя, которые слоя, в отличие от матриц Эйлера, не образуют.

Основное свойство матриц Эйлера состоит в том, что они существуют и легко находимы

на проблемных для взвешенных матриц порядках 22, 34, 58, 66 и т. п. Разумеется, удвоение пропускает каждую вторую матрицу Эйлера. Существует алгоритм построения матриц с той же весовой функцией движением не снизу — удвоением порядка матриц Мерсенна, а сверху [6]. Они получаются из нормализованных матриц Мерсенна отрезанием их каймы. Соответственно, справедливо утверждение: если все матрицы Мерсенна существуют (а они существуют), то существуют и все матрицы Эйлера.

Квазиортогональные матрицы Зейделя

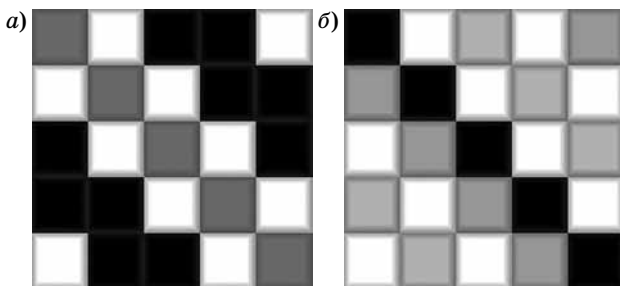
Для алгоритма Пэли разница между порядками матриц Мерсенна и Ферма невелика, в обоих случаях он порождает циклические малоуровневые квазиортогональные матрицы. На порядках матриц Ферма, в отличие от порядков матриц Мерсенна, ортогональность столбцов достигается на трехуровневых матрицах, которые будем называть квазиортогональными матрицами Зейделя.

Пусть n — простое число, задающее порядок в виде $n=4k+1$. Это необходимое и достаточное условие существования трехуровневых квазиортогональных циклических матриц Зейделя S с элементами, равными трехуровневым символам Лежандра $\chi\left(\frac{j-i}{n}\right)=\{1, -b, d\}$, $d < b < 1$, вычисляемых для разностей индексов i, j их строк и столбцов.

Трехуровневые символы Лежандра отличаются от двухуровневых (случай матриц Мерсенна) величиной диагональных элементов

$$\chi\left(\frac{0}{n}\right) = d = \frac{1}{1 + \sqrt{n}}$$

нечетные уровни $b = 1 - 2d$. Матрицы нечетных порядков Зейделя и Мерсенна объединяет то, что их можно рассматривать как результат ортогонализации столбцов асимметричных и симметричных матриц Якобсталя. В теории графов первому типу матриц соответствуют целочисленные неорто-



■ Рис. 10. Портреты матриц Зейделя S_5 (а) и оптимальной матрицы A_5 (б)

гональные матрицы смежности графов Зейделя [19], получаемые из матриц Белевича отрезанием их каймы.

Между циклическими матрицами Зейделя и Мерсенна есть и существенное различие. Циклические матрицы Мерсенна соответствуют локальному максимуму детерминанта. Для симметричных матриц Зейделя это не так. Например, на порядке $n=5$ сосуществуют циклические симметричная матрица Зейделя S_5 (рис. 10, а) и матрица A_5 (рис. 10, б) глобального максимума детерминанта. Матрица Зейделя переходит во вторую матрицу изменением параметров первой сдвиговой строки с *увеличением* ее детерминанта, т. е. это края континуальной матрицы с завершениями S_5 и A_5 .

На порядке $n=11$ сосуществуют циклические матрица Мерсенна M_{11} и матрица A_{11} глобального максимума детерминанта. Параметрическая оптимизация матрицы Мерсенна с переходом к A_{11} связана с понижением детерминанта в окрестности ее параметров. Отсюда следует предположение.

Предположение 3. Отличие порядков $n=4k+1$ и $n=4k-1$ состоит в том, что для первых матрицы локального максимума детерминанта слоя не образуют.

В качестве примера иных матриц, отличных от матриц Ферма, можно привести также D-матрицы, обладающие при $n=4k+1$ абсолютным максимумом детерминанта. Таковы циклические матрицы Рагхаварао R_5 и R_{13} [16]. Как и матрицы Якобсталя [16], они ортогонализуются всего лишь изменением уровня их отрицательных элементов.

Это вторая важная ветвь квазиортогональных матриц, сходных с матрицами Ферма выборочными значениями, которые принимают их порядки.

Таким образом, матрицы Зейделя к матрицам локального максимума детерминанта не принадлежат. Они являются предикаторами матриц Белевича и не существуют отдельно от них. Для $n=9$ есть блочная матрица Зейделя, она отвечает блочной матрице Белевича C_{10} . По той же причине не существует матрицы Зейделя порядка $n=21$, это число не представимо суммой двух квадратов чисел. Матрицы Зейделя уступают матрицам Мерсенна (и Эйлера) в регулярности появления их порядков на числовой оси.

Целочисленные матричные уравнения

Матрицы Адамара H и Белевича C удовлетворяют матричным уравнениям с целыми коэффициентами вида

$$H^T H = nI; C^T C = (n-1)I.$$

Не ортогональные по столбцам матрицы максимального детерминанта отличаются наличием аддитивной добавки справа, например, матрицы Рагхаварао максимального детерминанта удовлетворяют уравнению $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = n\mathbf{I} + \mathbf{J}$, где \mathbf{J} — матрица с элементами 1. От неоптимальных матриц Якобсталя \mathbf{T} их отличает лишь знак в правой части: $\mathbf{T}^T \mathbf{T} = n\mathbf{I} - \mathbf{J}$.

Квазиортогональные матрицы локального максимума детерминанта связаны с целочисленными матрицами Рагхаварао и близкими к ним, отличаясь лишь уровнями элементов. Точно так же целочисленные матрицы с элементами $\{1, -1\}$ описывают структуру матриц Мерсенна, Эйлера и Ферма отдельно от уровней. Приведем матричные уравнения, которым целочисленные аппроксимации удовлетворяют.

Матричное уравнение Мерсенна. Этому уравнению удовлетворяет округленная до целых значений элементов матрица Мерсенна

$$\mathbf{M}^T \mathbf{M} = (n+1)\mathbf{I} - \mathbf{J}.$$

Матричное уравнение Ферма. Этому уравнению удовлетворяет округленная до целых значений элементов матрица Ферма

$$\mathbf{F}^T \mathbf{F} = (n-1)\mathbf{I} + \mathbf{J} + \mathbf{Q},$$

где \mathbf{Q} — матрица с элементами каймы $\sqrt{n-1}$, исключая первый нулевой элемент, и всеми нулевыми остальными элементами.

Матричное уравнение Эйлера. Этому уравнению удовлетворяет округленная до целых значений элементов матрица Эйлера

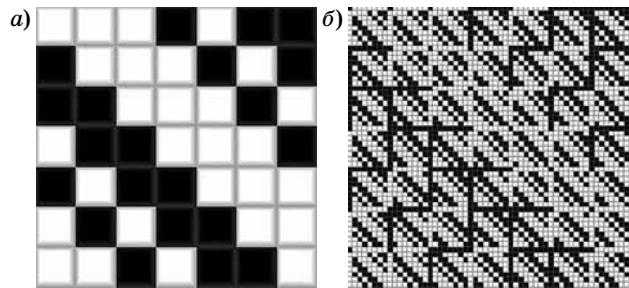
$$\mathbf{E}^T \mathbf{E} = (n+2)\mathbf{I} + 2\mathbf{X},$$

где \mathbf{X} — блочно-диагональная матрица с единичными элементами диагональных блоков.

Матрицы \mathbf{M} , \mathbf{F} , \mathbf{E} играют роль собственных векторов, находимых отдельно от собственных значений — уровней. Двухуровневые матрицы Мерсенна порождают алгебру с двумя образующими, подобную алгебре комплексных чисел.

Аппроксимация матриц Адамара высоких порядков

Матрицы Мерсенна можно использовать при блочном построении матриц Адамара высоких порядков. Любую матрицу \mathbf{M} Мерсенна с округленными до целых значений отрицательными элементами можно вставить на место ее элементов, дополнив каймой из строки и столбца, заполненными вытесняемым элементом, кроме -1 в начале каймы. Полученная матрица будет матрицей Адамара при найденном еще Скарпи [15] условии: строки матрицы ротируются сдвигом, равным произведению индексов элемента (начинающихся с нуля). Пример матриц Мерсенна и



■ Рис. 11. Портреты матрицы Мерсенна \mathbf{M}_7 (а) и матрицы Адамара — Скарпи \mathbf{H}_{56} (б)

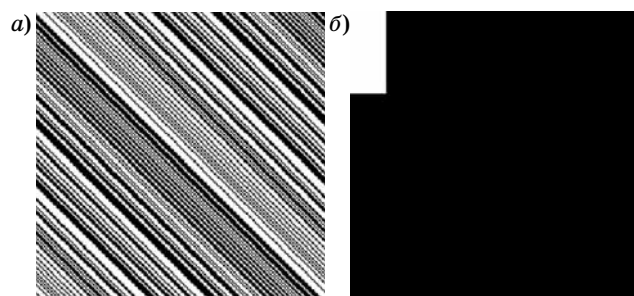
Адамара, полученных модифицированным алгоритмом Скарпи, приведен на рис. 11, а, б.

Такая формулировка фундаментального результата Скарпи мало известна, поскольку мало изучены матрицы локального максимума детерминанта. Округленные до целых значений стартовые матрицы \mathbf{M}_3 Мерсенна и \mathbf{E}_6 Эйлера можно использовать и без ротации их строк непосредственно в качестве матриц Вильямсона для подстановки их в массивы Вильямсона или Гетхальса — Зейделя [10, 20].

На порядках, больших, чем стартовые, для матриц Мерсенна и Эйлера существуют комплементарные матрицы, которыми их можно дополнять, формируя четверку матриц Вильямсона или Гетхальса — Зейделя. Вместо поиска комплементарных матриц несложно добиться выполнения условия ортогональности матрицы учетверенного порядка, сохраняя варьируемым отрицательный элемент только первой матрицы (из четырех).

Это правило настолько общее, что затрагивает порядки 668, 716, 892 и т. п., для которых матрицы Адамара не найдены до сих пор.

Например, матрице Адамара порядка 668 соответствует циклическая матрица Мерсенна \mathbf{M}_{167} (рис. 12, а), которую вычисляет описанный выше модифицированный алгоритм Пэли. Гистограмма элементов квазиортогонального массива Вильямсона \mathbf{W}_{668} отражает близость его к матрице Адамара \mathbf{H}_{668} (рис. 12, б).



■ Рис. 12. Портрет матрицы \mathbf{M}_{167} (а) и гистограмма элементов матрицы \mathbf{W}_{668} (б)

Подобные блочные квазиортогональные матрицы однозначно описываются своими весовыми функциями $\omega(n)$ и сопровождают, как и в случае алгоритма Скарпи, каждую матрицу Мерсенна или Эйлера [10].

К вопросу существования матриц Адамара

Предположение Пэли [14] о том, что проблема построения всех матриц Адамара порядков, кратных четырем, разрешима нахождением алгоритмов, дополняющих результаты применения подходов Сильвестра [11], Скарпи [15] и других, переносит трудности с поиска самих матриц на поиск способов их вычисления.

В различные годы было найдено много вариантов вычисления целочисленных взвешенных матриц и матриц Адамара [20—25], наиболее интересные решения помещены в обзор [26]. За матрицей порядка 268 [24] в 2004 г. была найдена матрица порядка 428 [27], что перенесло границу неизвестности, но не изменило, как отмечено в работе [28], общую ситуацию с поиском матриц комбинаторными методами. Наиболее продуктивный подход поиска циклических блоков массива Гетхальса — Зейделя [20] сопряжен с громоздким перебором вариантов [27]. Таким путем задача Пэли не решается, и это подтвердил столетний период конструирования все новых алгоритмов.

Между тем доказательство существования матриц Адамара вовсе не сводится к умению их находить. Сходная целочисленная проблема теории чисел, например, касается оценки количества простых чисел, меньших или равных заданному числу. Задача дискретной математики получила вторую жизнь, когда Риман, опираясь на предложения Эйлера, перевел задачу на язык функций комплексного переменного. Теперь она звучит как проблема локализации нетривиальных нулей дзета-функции Римана. Адамар принимал в исследовании этой проблемы непосредственное участие. Гипотеза, сформулированная позднее Пэли, едва ли сложнее отмеченной проблемы Римана. Проблема доказательства существования квазиортогональных целочисленных матриц с элементами $\{1, -1\}$ почти вдвое моложе и должна заметно проще решаться.

Переход к выяснению характера локальных максимумов функции детерминанта вместо работы с целочисленными матрицами является таким же ходом формализации, что и у Римана, только вместо комплексной плоскости и нулей речь идет об экстремумах функции, зависящей у матриц Мерсенна от пары аргументов — значений уровней.

Обратим внимание на то, что какой-либо особый порядок никак не выражен в подходе, в ко-

тором модульный уровень $b = \frac{q + \sqrt{4q}}{q - 4}$, $q = n + 1$

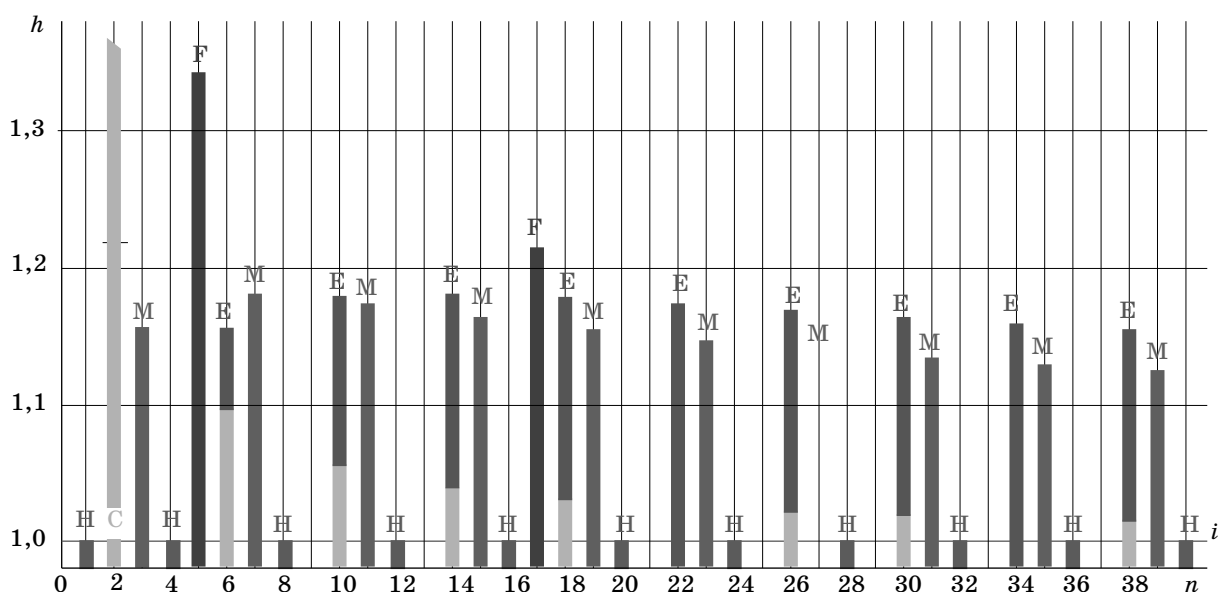
матриц Мерсенна монотонно стремится к единице с увеличением порядка. Эти матрицы, начинаясь на первом неразличимом еще структурами порядке $n = 1$ с матрицы Адамара, матрицей Адамара же и «заканчиваются». Расхождение матриц незначительное и лишь на старте в некоторой окрестности критического порядка 13 (который проявляет себя и в этом). Далее матрицы Мерсенна по значениям их уровней почти не отличаются от матриц Адамара.

Матрицы Адамара и Мерсенна принадлежат к срезу некоторого более крупного, чем они, математического объекта, и если более доступная анализу нецелочисленная матрица существует, то существует и соседняя матрица Адамара. Это положение следует из наличия у обеих матриц объединяющего их структурного признака. Разница положительных и отрицательных элементов каждого столбца матрицы Мерсенна — целочисленный инвариант, равный 1. Следовательно, нормализованную матрицу Адамара, у которой этот структурный показатель равен 0 (помимо, естественно, каймы), можно получить из матрицы Мерсенна, округляя отрицательные и близкие к -1 значения до -1 и добавляя ровно такой же элемент каймы. Что касается вопроса существования матриц Мерсенна, то он решается проще. Целочисленность значений элементов этой матрицы не требуется.

Функция веса матриц Мерсенна не задана жестко — она является следствием воспроизводимых от порядка к порядку условий, которые ничем не выделены на всей числовой оси (не различимы между собой), отражая специфику локального максимума детерминанта. Функция веса — продукт идентификации на базе матриц малого размера. Она не имеет особенностей (делений на ноль), указывающих на проблему нахождения матриц Мерсенна с заранее вычисляемым уровнем для более высоких порядков.

Отсюда следует заключение: такие матрицы существуют для всех выделенных для них порядков на числовой оси [9, 10]. Предложение Пэли, возможно, вполне справедливо для комбинаторного подхода, однако при поиске матриц локального максимума детерминанта никакого различия варианты, выделенные Пэли, Скарпи и т. п., не обнаруживают. Программный комплекс [29], оптимизирующий m -норму, находит все без исключения матрицы, найденные ранее разными способами. Это и матрицы Адамара [12] порядков 12 и 20, и взвешенные матрицы [7], а также отдельные артефактные матрицы [8].

Новый подход решает проблему в значительно более широкой ее постановке и раскрывает ее



■ Рис. 13. h -нормы матриц Эйлера (E), Белевича (C), Мерсенна (M), Адамара (H) и Ферма (F)

ранее неизвестные детали. Вполне возможно, что если бы проблема решалась изначально в такой плоскости, почвы для формулировки «проблемы существования» отмеченных матриц просто бы не возникало.

Заключение

В статье описан единый математический объект, имеющий, как предполагается, ограниченное число особенностей. Они сконцентрированы по порядкам представляющих их матриц в самом начале объекта. Порядки, меньшие или близкие к 13, интересны в этом смысле нахождением на них некоторых редких точечных структур, таких как матрица золотого сечения [8]. С дальнейшим ростом значения порядка число заметных неоднородностей уменьшается, и их можно описать тесно взаимосвязанными структурами.

Наиболее крупное образование представляют собой матрицы Адамара, Мерсенна, Эйлера, к которым примыкают иногда матрицы Ферма и сходные с ними матрицы, полученные ортогонализацией матриц Рагхаварао. Прочие матрицы, такие как матрицы Белевича и Зейделя, тоже образуют тесно связанные, в данном случае, — пары на соседних порядках. Вопрос существования отмеченных троек (четверок) и пар принципиален и, как видится, решается проще в такой расширенной постановке, когда на элементы матриц нет ограничений, в виде их целочисленности.

В заключение обзора матриц локального максимума детерминанта проиллюстрируем зависимость от порядка n детерминантов матриц трех выделенных слоев: Эйлера, Мерсенна, Адамара, — добавив к ним ветви выборочно проявляющих себя матриц Ферма и Белевича. Так как график детерминанта $|\det(A)| = n^{n/2}/h^n$ быстро растет, для иллюстрации достаточно, избавившись от степеней, вывести график делителя — адямаровой нормы $h(n)$. Если делитель стремится к единице, а он стремится к ней у всех отмеченных матриц, то такие матрицы с ростом порядка почти ничем не отличаются от адямаровых с их максимально большим определителем. Графики h -норм рассмотренных в статье матриц приведены на рис. 13.

Квазиортогональные матрицы можно дублировать и распространить вправо по правилу [1], причем адямарова норма h не будет понижаться, но и не будет расти. Это инвариант преобразования Сильвестра. На графиках инвариант виден по h -нормам связанных друг с другом матриц Мерсенна и Эйлера (удвоенного порядка). Данные инварианты описывают равновеликие по h -нормам особенности единого математического объекта и обобщают правило, использованное Пэли для увеличения числа найденных им матриц Адамара. В работе приведена также другая важная константа $B = h_{13}$, касающаяся работы итерационных алгоритмов поиска минимаксных матриц [1, 2, 29].

Литература

1. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. М-матрицы // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1(50). С. 14–21.
2. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. Алгоритм и программа поиска и исследования М-матриц // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3(64). С. 82–86.
3. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. М-матрица 22-го порядка // Информационно-управляющие системы. 2011. № 5(54). С. 87–90.
4. Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А. Вычисление матриц Адамара — Мерсенна // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5(60). С. 92–94.
5. Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А. Вычисление матриц Адамара — Ферма // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6(61). С. 90–93.
6. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. О двух способах построения матриц Адамара — Эйлера // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1(62). С. 7–10.
7. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Взвешенная конференц-матрица, обобщающая матрицу Белевича на 22-м порядке // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5(66). С. 97–98.
8. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрица золотого сечения G_{10} // Информационно-управляющие системы. 2013. № 6(67). С. 2–5.
9. Балонин Н. А. О существовании матриц Мерсенна 11-го и 19-го порядков // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2(63). С. 89–90.
10. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. К вопросу существования матриц Мерсенна и Адамара // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5(66). С. 2–8.
11. Silvester J. J. Thoughts on inverse orthogonal matrices, simultaneous sign successions, and tessellated pavements in two or more colours, with applications to Newton's rule, ornamental tile-work, and the theory of numbers // Philosophical Magazine. 1867. Vol. 34. P. 461–475.
12. Hadamard J. Résolution d'une question relative aux determinants // Bulletin des Sciences Mathématiques. 1893. Vol. 17. P. 240–246.
13. Belevitch V. Theorem of 2n-terminal networks with application to conference telephony // Electr. Commun. 1950. Vol. 26. P. 231–244.
14. Paley R. E. A. C. On orthogonal matrices // J. of Mathematics and Physics. 1933. Vol. 12. P. 311–320.
15. Scarpis U. Sui determinanti di valore Massimo // Rendiconti della R. Istituto Lombardo di Scienze e Lettere. 1898. Vol. 31. P. 1441–1446.
16. Raghavarao D. Some Optimum Weighing Designs // The Annals of Mathematical Statistics. 1959. Vol. 30. N 2. P. 295–303.
17. Orrick W. P. The maximal $\{-1, 1\}$ -determinant of order 15 // Metrika. 2004. Vol. 62. P. 192–219.
18. Shalom Eliahou. La conjecture de Hadamard (I) – Images des Mathématiques // CNRS. 2012. <http://images.math.cnrs.fr/La-conjecture-de-Hadamard-I.html> (дата обращения: 05.01.2014).
19. Seidel J. J. Strongly Regular Graphs with $(-1, 1, 0)$ Adjacency Matrix Having Eigenvalue 3 // Linear Algebra and its Applications. 1968. Vol. 1. P. 281–298.
20. Turyn R. J. Hadamard matrices, Baumert-Hall units, four-symbol sequences, pulse compression, and surface wave encodings // J. Combin. Theory. Ser. A16. 1974. P. 313–333.
21. Hall M. Combinatorial Theory. 2nd ed. – N. Y.: Wiley, 1998. – 464 p.
22. Geramita A. V., Seberry J. Orthogonal Designs: Quadratic Forms and Hadamard Matrices. – N. Y.: Dekker, 1979. – 460 p.
23. Craigen R. Hadamard matrices and designs // CRC Handbook of Combinatorial Designs / C. J. Colbourn and J. H. Dinitz eds. – CRC Press, 1996. – P. 229–516.
24. Sawade K. A Hadamard matrix of order 268 // Graphs Combin. 1985. Vol. 1. N 2. P. 185–187.
25. Koukouvinos C. et al. On sequences with zero autocorrelation // Designs, Codes and Cryptography. 1994. Vol. 4. P. 327–340.
26. Colbourn C. J., Dinitz J. H. Handbook of Combinatorial Designs. Sec. Ed. – Chapman and Hall/CRC, 2007. – 967 p.
27. Kharaghani H., Tayfeh-Rezaie B. A. Hadamard matrix of order 428 // J. of Combinatorial Designs. 2005. Vol. 13. P. 435–440.
28. Horadam K. J. Hadamard Matrices and Their Applications. – Princeton: Princeton University Press, 2007. – 280 p.
29. Балонин Ю. Н. Программный комплекс MMatrix-2 и найденные им М-матрицы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 10(112). С. 58–64.

UDC 519.61:511-33

Local Maximum Determinant Matrices

Balonin N. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, korbendfs@mail.ruSergeev M. B.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, mbse@mail.ru^a Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Basic generalizations of Hadamard matrices are associated with maximum determinant matrices or matrices with orthogonal columns non-optimal by determinant; quasi-orthogonal local maximum determinant matrices have been understudied. The goal of this paper is to consider a theory of these matrices according to preliminary research results. **Methods:** Extreme solutions have been found by minimization of maximum of matrices elements absolute values with their consequent classification according to an amount and values of levels which depend on orders. **Results:** There has been substantiated a conjecture that there are only five non-trivial and strongly optimal low-level matrices of odd order — less than 13. There have been identified and described by weighing functions the main types of quasi-orthogonal local maximum determinant matrices (M-matrices) including Mersenne, Fermat and Euler matrices. A conjecture concerning existence of all Mersenne matrices of odd order has been formulated. The issue of Mersenne and Hadamard matrices existence has been considered. An example of Hadamard matrix of 668th order approximated by block array with Williamson matrices based on Mersenne matrices has been given. M-Matrices determinants dependence on its orders has been illustrated by graphs. **Practical relevance:** Algorithms to construct M-Matrices have been implemented while developing the research software. Mersenne and Fermat Filters used for masking and image compression are based on matrices suboptimal by determinant.

Keywords — Orthogonal Matrices, Hadamard Matrices, Belevich Matrices, Mersenne Matrices, Fermat Matrices, Euler Matrices, Hadamard Conjecture.

References

- Balonin N. A., Sergeev M. B. M-Matrices. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2011, no. 1(50), pp. 14–21 (In Russian).
- Balonin Ju. N., Sergeev M. B. The Algorithm and the Program of Research and Study of M-Matrices. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 3(64), pp. 82–86 (In Russian).
- Balonin Ju. N., Sergeev M. B. M-Matrix of the 22nd Order. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2011, no. 5(54), pp. 87–90 (In Russian).
- Balonin N. A., Sergeev M. B., Mironovskij L. A. Calculation of Hadamard – Mersenne Matrices. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2012, no. 5(60), pp. 92–94 (In Russian).
- Balonin N. A., Sergeev M. B., Mironovskij L. A. Calculation of Hadamard – Fermat Matrices. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2012, no. 6(61), pp. 90–93 (In Russian).
- Balonin N. A., Sergeev M. B. Two Ways to Construct Hadamard – Euler Matrices. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2013, no. 1(62), pp. 7–10 (In Russian).
- Balonin N. A., Sergeev M. B. Weighted Conference Matrix Generalizing Belevich Matrix at the 22nd Order. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2013, no. 5(66), pp. 97–98 (In Russian).
- Balonin N. A., Sergeev M. B. Matrix of Golden Ratio G_{70} . *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2013, no. 6(67), pp. 2–5 (In Russian).
- Balonin N. A. Existence of Mersenne Matrices of 11th and 19th Orders. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2013, no. 2(63), pp. 89–90 (In Russian).
- Balonin N. A., Sergeev M. B. On the Issue of Existence of Hadamard and Mersenne Matrices. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2013, no. 5(66), pp. 2–8 (In Russian).
- Silvester J. J. Thoughts on Inverse Orthogonal Matrices, Simultaneous Sign Successions, and Tessellated Pavements in Two or More Colours, with Applications to Newton's Rule, Ornamental Tile-Work, and the Theory of Numbers. *Philosophical Magazine*, 1867, vol. 34, pp. 461–475.
- Hadamard J. *Résolution d'une question relative aux déterminants* [Resolution of One Problem Related to the Determinants]. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).
- Belevitch V. Theorem of 2n-Terminal Networks with Application to Conference Telephony. *Electrical Communication*, 1950, vol. 26, pp. 231–244.
- Paley R. E. A. C. On Orthogonal Matrices. *Journal of Mathematics and Physics*, 1933, vol. 12, pp. 311–320.
- Scarpis U. *Sui determinanti di valore Massimo* [On the Determinants of Maximum Value]. *Rendiconti della R. Istituto Lombardo di Scienze e Lettere*, 1898, no. 31, pp. 1441–1446 (In Italian).
- Raghavarao D. Some Optimum Weighing Designs. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1959, vol. 30, no. 2, pp. 295–303.
- Orrick W. P. The Maximal $\{-1, 1\}$ -Determinant of Order 15. *Metrika*, 2004, vol. 62, pp. 192–219.
- Shalom Eliahou. *La conjecture de Hadamard (I) – Images des Mathématiques* [The Conjecture of Hadamard (I) – Images of Mathematics]. 2012. Available at: <http://images.math.cnrs.fr/La-conjecture-de-Hadamard-I.html> (accessed 5 January 2014) (In French).
- Seidel J. J. Strongly Regular Graphs with $(-1, 1, 0)$ Adjacency Matrix Having Eigen Value 3. *Linear Algebra and its Applications*, 1968, no. 1, pp. 281–298.
- Turyan R. J. Hadamard Matrices, Baumert-Hall Units, Four-Symbol Sequences, Pulse Compression, and Surface Wave Encodings. *Journal of Combinatorial Theory*, Ser. A16, 1974, pp. 313–333.
- Hall M. *Combinatorial Theory*. 2nd ed. New York, Wiley, 1998. 464 p.
- Geramita A. V. and Seberry J. *Orthogonal Designs: Quadratic Forms and Hadamard Matrices*. New York, Dekker, 1979. 460 p.
- Craigen R. Hadamard Matrices and Related Designs. In: *CRC Handbook of Combinatorial Designs*. C. J. Colbourn and J. H. Dinitz, eds. CRC Press, 1996, pp. 229–516.
- Sawade K. A. Hadamard Matrix of Order 268. *Graphs Combinatorics*, 1985, vol. 1, no. 2, pp. 185–187.
- Koukouvinos C., Kounias S., Seberry J., Yang C. H. and Yang J. On Sequences with Zero Autocorrelation. *Designs, Codes and Cryptography*, 1994, no. 4, pp. 327–340.
- Colbourn C. J., Dinitz J. H. *Handbook of Combinatorial Designs*. Sec. ed. Chapman and Hall/CRC, 2007. 967 p.
- Kharaghani H., Tayfeh-Rezaie B. A. Hadamard Matrix of Order 428. *Journal of Combinatorial Designs*, 2005, vol. 13, pp. 435–440.
- Horadam K. J. *Hadamard Matrices and Their Applications*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2007. 280 p.
- Balonin Ju. N. The Software Complex M-Matrix-2 and Searched Minimax Matrices. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2013, no. 10(112), pp. 58–64 (In Russian).

УДК 004.93

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СЛОЖНОСТИ КАЖДОГО ЭТАПА РАСПОЗНАВАНИЯ

А. Ю. Кручинин^а, канд. техн. наук, доцент

^аОренбургский государственный университет, Оренбург, РФ

Цель: эффективность системы распознавания образов реального времени определяется достоверностью и производительностью процесса распознавания. Целью исследования является разработка модели управления режимом распознавания в реальном времени при исследованиях особых классов объектов — протяженных объектов. **Результаты:** приведена математическая модель управления режимом распознавания образов в реальном времени. Показано, что на основании оценки сложности распознавания текущего участка протяженного объекта можно принимать решение о режиме распознавания следующего участка. Режим распознавания определяется количеством данных и скоростью движения измерительного устройства относительно протяженного объекта. Управление режимом распознавания подразумевает изменение скорости движения, а соответственно, и объема поступающей информации на участок протяженного объекта в реальном времени. **Практическая значимость:** результаты исследований опробованы на данных геофизических исследований скважин. Описанный подход к управлению процессом распознавания образов протяженного объекта позволяет добиваться оптимальной производительности системы распознавания образов реального времени.

Ключевые слова — распознавание образов, управление процессом распознавания, реальное время, протяженный объект, сложность распознавания образов.

Введение

Вероятность правильного решения (достоверность) является главным критерием эффективности системы распознавания образов [1]:

$$D = \sum_{i=1}^m p_i P(\Omega_i),$$

где m — количество классов образов; p_i — оценка вероятности правильного решения для объектов из класса Ω_i ; $P(\Omega_i)$ — априорная вероятность появления объекта.

Однако при распознавании в реальном времени (РВ) добавляется еще и требование к производительности системы [2], поскольку время распознавания ограничено. Поэтому необходимо исходить из компромисса между двумя этими критериями.

В максимальном приближении эффективность представляется функцией от достоверности и времени распознавания (производительности):

$$E = f(D, T),$$

где D — достоверность распознавания; T — производительность работы системы, определяемая затрачиваемым временем на распознавание. Поиск максимальной эффективности системы распознавания образов РВ является двухкритериальной задачей оптимизации:

$$f_i(x) \rightarrow \max_x, x \in D_R, i \in [1, 2],$$

где x — параметры работы системы распознавания образов; D_R — множество допустимых пара-

метров системы распознавания; f_1 соответствует D , а f_2 соответствует T .

Оптимальное решение задачи следует искать на множестве Парето [3]. И если в некоторых многокритериальных задачах оптимизации можно найти эффективные решения, то в рассматриваемой задаче это невозможно, поскольку нельзя найти решение, одновременно увеличивающее и производительность, и достоверность распознавания образов. В этом случае необходимо выбирать из слабо эффективных решений [3], особенностью которых является то, что они не соответствуют улучшениям по всем критериям.

Для оценки качества работы системы распознавания образов РВ можно использовать следующий критерий минимума затрат:

$$C = \min C(T, D), T \geq T_c, D \geq D_c,$$

где T_c и T — заданная и фактическая производительность работ; D_c и D — заданная и фактическая достоверность результатов распознавания. Ограничения необходимы по той причине, что в системе РВ невозможно ждать результата сколько угодно, а уровень достоверности не может быть очень низким.

Особенности распознавания протяженного объекта

В различных случаях объект распознавания является протяженным, т. е. распределенным в пространстве или времени. Такие объекты нельзя распознать целиком, поскольку для измерения его параметров относительно объекта

(или наоборот) приходится перемещать измерительное устройство. В качестве примера подобного процесса можно рассматривать геофизические исследования скважин.

Протяженный объект может быть представлен последовательностью состояний:

$$O = (o_1, o_2, \dots, o_i, \dots, o_N),$$

где o_i — состояние i -й части протяженного объекта, а N — длина (количество частей) объекта.

С точки зрения распознавания образов объект будет представлен как последовательность образов:

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_M),$$

где каждый образ ω_i соответствует определенному классу из множества возможных образов исследуемого объекта $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_K\}$, K — количество возможных образов. Распознавание протяженного объекта — это получение последовательности образов (рис. 1).

Пусть за время измерения i -го состояния протяженного объекта Δt измерительное устройство получает набор характеризующих его данных

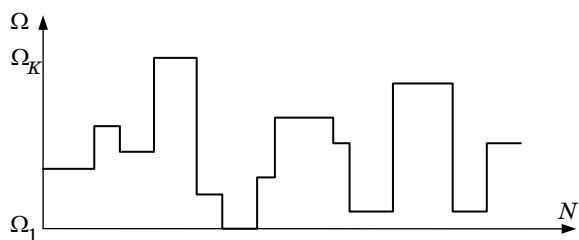
$$X = (x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (1)$$

Тогда за время $2\Delta t$ будет получено $2k$ данных. Понятно, что достоверность распознавания при большем количестве данных может быть больше. Однако при меньшем количестве данных увеличивается производительность. Поэтому управление процессом распознавания протяженного объекта сводится к тому, чтобы на каждом участке протяженного объекта определить оптимальную скорость перемещения измерительного устройства, которое определяет размер выборки X .

Традиционное управление процессом распознавания образов

В работе А. Л. Горелика и В. А. Скрипкина [1] приведена постановка задачи оптимизации распознавания, которая основана на последовательных алгоритмах оптимизации, разработанных В. С. Михалевичем [4]. Суть постановки такова.

Пусть дана совокупность средств наблюдения, обеспечивающих получение апостериорной информации о распознаваемом объекте ω в виде



■ Рис. 1. Состояние протяженного объекта

признаков объекта $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$. Получение этих признаков, обработка для принятия решения связаны с определенными расходами U_ω . Значение этих расходов (усредненное по всем вариантам развития экспериментов) определяется последовательным правилом R , на основании которого производится планирование экспериментов. Каждое последовательное правило строится с учетом ограничений на проведение экспериментов. Качество каждого алгоритма (последовательного правила) характеризуется функционалом, представляющим собой математическое ожидание от значения средних расходов [1]:

$$U_p(R) = M[\bar{U}_\omega(R)],$$

где \bar{U}_ω — усредненное значение расходов по всем возможным цепочкам развития экспериментов, определяемым последовательным правилом R , на принятие решения о принадлежности объекта ω к какому-то классу из множества классов. Иными словами, необходимо минимизировать возможные затраты, связанные с распознаванием образов.

Идея алгоритма управления распознаванием образов на основе последовательных правил заключается в следующем. Если полученный результат эксперимента не удовлетворяет (по каким-либо критериям), то принимается решение о проведении новых экспериментов, и так до тех пор, пока не будет найдено удовлетворяющее решение. То есть данные, полученные на первоначальном этапе анализа, используются для принятия решения о новом эксперименте. Общая запись алгоритма [1]

$$R = \{z_i^0; a_1; z_i^1(x_{a1}); a_2(x_{a1}); z_i^2(x_{a1}, x_{a2}); \dots; a_n(x_{a1}, \dots, x_{an-1}); z_i^n(x_{a1}, \dots, x_{an}), \dots\}, \quad (2)$$

где

$$a_1 \in A_1^{\bar{A}}, a_2(x_{a1}) \in A_2^{\bar{A}}(x_{a1}), \dots, a_n(x_{a1}, \dots, x_{an-1}) \in A_n^{\bar{A}}(x_{a1}, \dots, x_{an-1});$$

A — множество экспериментов; Γ — последовательная система ограничений; a_n — n -й эксперимент; z — окончательные решения на каждом шаге; член z_i^0 показывает, что окончательное решение может приниматься без проведения экспериментов.

Однако здесь есть риск прекращения экспериментов, если они выходят за пределы ограничений, а ограничением в системе РВ является время.

Данный подход не дает рекомендации, что делать в ситуации, когда существует несколько алгоритмов распознавания. Данная задача была сформулирована Ю. И. Журавлевым, который

предложил и подход к ее решению, получивший название алгебраического подхода к решению задач распознавания и классификации [5, 6].

Суть подхода заключается в следующем: когда на вход системы распознавания поступает неизвестный образ, то процедура его отнесения к соответствующему классу может быть подразделена на два этапа.

Этап 1. Вычисляется мера близости неизвестного объекта с каждым классом.

Этап 2. В соответствии с тем или другим правилом на основании информации, полученной на этапе 1, принимается окончательное решение о принадлежности неизвестного образа соответствующему классу.

Однако в системах распознавания образов РВ этого недостаточно. Связано это с тем, что режим РВ может не позволить последовательно проводить эксперименты — время сильно ограничено, и необходимо применить какой-либо метод один раз и выдать результат. Алгоритмы распознавания могут быть настолько разные (например, классификация по Байесу или корреляционный метод), что мера близости для них вычисляется по-разному, что затрудняет применение в чистом виде алгебраического подхода, когда на этапе 1 вычисляется мера близости. Поэтому был разработан подход к управлению процессом распознавания на основе оценки сложности распознавания образов.

Математическая модель управления режимом распознавания протяженного объекта в реальном времени

Пусть каждый этап распознавания характеризуется некоторой выборкой (1), которая описывает неизвестный образ ω_X , принадлежащий множеству $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_K\}$. Идентификация протяженного объекта включает в себя M этапов, на каждом из которых необходимо выбрать оптимальный размер выборки (1):

$$k \in \{1, 2, \dots, k_{\max}\}.$$

Производительность и достоверность исследования протяженного объекта определяются следующим образом:

$$T = \sum_{i=1}^M \frac{1}{k_i}; \quad D = \frac{N_1}{N_2},$$

где N_1 — число правильно распознанных образов; N_2 — общее число контрольных образов.

Для упрощения выберем вероятностную модель распознавания. Тогда по формуле Байеса условная вероятность принадлежности образа ω_X к i -му эталонному образу ($1 \leq i \leq K$) определяется так:

$$P(\omega_i | X) = \frac{P(\omega_i) f_i(X)}{f(X)}, \quad (3)$$

где $P(\omega_i)$ — априорная вероятность появления i -го образа; f_i — вероятностное распределение для i -го образа, а

$$f(X) = \sum_{i=1}^K P(\omega_i) f_i(X).$$

Если считать все измерения в (1) независимыми, то

$$f_i(X) = \prod_{j=1}^k f_{ij}(x_j).$$

Максимальное значение апостериорной вероятности (3) соответствует распознанному образу.

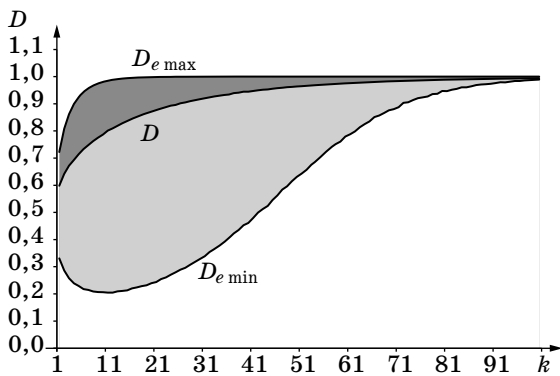
Важным условием при управлении режимом распознавания протяженного объекта является оценка достоверности результатов распознавания. Как отмечено в работах [2, 7], существуют статистическая и единичная достоверности. Статистическую достоверность каждого этапа нет возможности оценить, поскольку для этого необходимо было бы повторять измерения каждого этапа несколько раз (репрезентативное количество). Единичная же достоверность вычисляется по результату распознавания. Любую задачу распознавания в конечном итоге можно свести к задаче распознавания двух образов (даже если для этого придется сравнить каждый образ с каждым), поэтому в вероятностном случае распознавания можно использовать различные варианты вычисления единичной достоверности (D_e):

$$D_e(X) = \frac{P(\omega_{\max} | X)}{\sum_{i=1}^K P(\omega_i | X)},$$

$$D_e(X) = \frac{P(\omega_{\max} | X)}{P(\omega_{\max} | X) + P(\omega_{\max 2} | X)},$$

где ω_{\max} — образ с максимальным значением апостериорной вероятности, второй максимум ($\omega_{\max 2}$) означает эталонный образ со вторым значением апостериорной вероятности. Стоит отметить, что данные критерии вычисления единичной достоверности не являются единственными, и существуют различные подходы к их оценке, например, описанные в работах [1, 8, 9 и др.]. Однако в таких оценках есть общее: связь со статической достоверностью неполная. И только при увеличении количества информации единичная достоверность приближается к статической [7]:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} D_e = D.$$



■ **Рис. 2.** Интервал единичной достоверности $[D_{e \min}, D_{e \max}]$ для уровня значимости 0,1 при некоторой сложности конкретного случая распознавания

Однако при малых значениях k значение D_e может сильно отличаться от D и находиться в интервале значений [7] (рис. 2).

Важным фактором, влияющим на выбор режима распознавания, является сложность распознавания, под которой понимается достоверность распознавания при количестве данных $k=1$:

$$SI = 1 - D(X | k=1). \quad (4)$$

Данную величину (4) достаточно сложно оценить, поскольку требуется определение статистической достоверности. Критерии сложности, рассчитываемые по результатам распознавания (т. е. по единичной достоверности), описаны в ряде работ [1, 9—11 и др.]. Однако они характеризуют только единичную достоверность, погрешность измерения которой увеличивается при увеличении сложности распознавания образов [12]. Другим критерием оценки сложности является оценка идеальной сложности, которая рассчитывается на основе известных характеристик образов. Пусть есть два эталонных образа, D_e которых максимальна. Известны вероятностные распределения этих образов (пусть они будут нормальными), тогда идеальная сложность рассчитывается по следующему выражению:

$$SI_{ideal} = 1 - 0,5 \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-(x-a_1)^2/(2\sigma_1^2)} - \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-(x-a_2)^2/(2\sigma_2^2)} \right| dx,$$

где x — признак, по которому определяется пересечение распределений; σ_1, σ_2 — оценки средних квадратичных отклонений распределений образов; a_1, a_2 — математические ожидания.

Пусть текущий режим распознавания характеризуется k_i , а результат распознавания — D_e и $SI_{ideal}(i)$. Тогда на основании этих данных необхо-

димо выбрать режим k_{i+1} . Если считать, что при оценке D_e используется два образа с наибольшими вероятностями, то тогда значение D_e будет колебаться в интервале от 0,5 до 1. Для выбора режима k_{i+1} этот интервал можно разделить на три:

$$[0,5, D_{et1}], (D_{et1}, D_{et2}], (D_{et2}, 1].$$

Первый интервал характеризует невозможность провести распознавание при режиме k_i . В этом случае, если k_i намного меньше k_{\max} , нужно резко увеличить k_{i+1} . В противном случае небольшое увеличение k_{i+1} не даст результата.

Второй интервал характеризует удовлетворительные условия распознавания. При этих условиях можно руководствоваться SI_{ideal} для оценки статистической достоверности, но режим k определить нельзя, а можно лишь направление смещения — увеличение или уменьшение k .

Третий интервал характеризует идеальные условия распознавания. В этом случае на основании SI_{ideal} можно не только оценить статистическую достоверность, но и определить требуемое k (см. рис. 2). Математически это можно представить в следующем виде:

$$k_{i+1} = \begin{cases} f_1, \text{ \textasciitilde{a}n\textasciitilde{e} } D_e \in [0,5, D_{et1}] \\ f_2, \text{ \textasciitilde{a}n\textasciitilde{e} } D_e \in (D_{et1}, D_{et2}]; \\ f_3, \text{ \textasciitilde{a}n\textasciitilde{e} } D_e \in (D_{et2}, 1] \end{cases} \quad (5)$$

$$f_1 = \begin{cases} k_i, \text{ \textasciitilde{a}n\textasciitilde{e} } k_i + \Delta k_{s1} > k_{\max} \\ k_i + \Delta k_{s1}, \text{ \textasciitilde{a}n\textasciitilde{e} } k_i + \Delta k_{s1} \leq k_{\max} \end{cases};$$

$$f_2 = k_i + \Delta k_{s2} \operatorname{sgn}(D_c - D(SI_{ideal}, k_i));$$

$$f_3 = f_k(D_c, SI_{ideal}),$$

где Δk_{s1} — большой шаг; Δk_{s2} — малый шаг; $D(SI_{ideal}, k_i)$ — функция зависимости достоверности от сложности и объема данных (см. рис. 2), которая строится заранее для эталонных образов; f_k — функция, обратная представленной на рис. 2, позволяющая вычислять требуемое количество данных по достоверности и сложности распознавания.

Описанный подход можно применять совместно с алгоритмом на основе последовательных правил (2), оценивая достоверность и сложность распознавания после каждого измерения. Когда будут достигнуты их заданные значения, то считать участок протяженного объекта достоверно идентифицированным и начинать измерения снова. Однако подобное совместное использование возможно не всегда по причине особенностей получения данных, движения измеряемого объекта, что приводит к низким показателям эффективности системы распознавания.

Управление скоростью при исследовании протяженного объекта

Как уже было отмечено, управление скоростью подразумевает управление размером выборки (1), по которой осуществляется распознавание участка. Если предположить, что идентифицируются участки фиксированной длины L , то скорость перемещения измерительных устройств относительно протяженного объекта определяется как

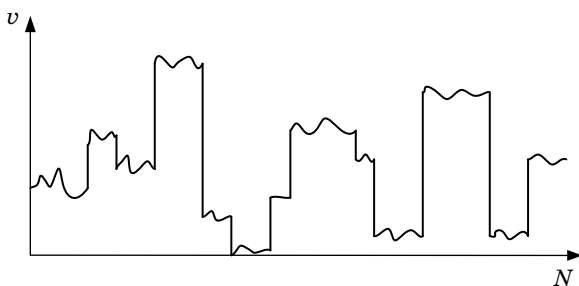
$$v = \frac{L}{k\Delta t},$$

где Δt — период времени между замерах (дискретные измерения).

При управлении скоростью необходимо учитывать тот факт, что текущая скорость v_i и скорость на предыдущем этапе v_{i-1} не могут отличаться сильно, т. е. учитывать ускорение при замедлении и убыстрении. Формально ускорение может находиться в интервале $[0, a_{\max}]$, однако в дальнейшем будем исходить из того, что ускорение фиксировано и равно a_{\max} . Это значит, что невозможно резко сменить режим (количество данных k), и изменение скорости может быть только по шагам, размер шага — Δv . Поскольку при выборе скорости на следующем этапе необходимо исходить из вычисляемого значения k (5), то скорость будет колебаться за счет того, что единичная достоверность не является точным показателем (рис. 3).

Частое изменение скорости может плохо сказаться на оборудовании и затруднить точность результатов идентификации протяженного объекта. Поэтому при изменении скорости следует руководствоваться не мгновенными значениями единичной достоверности распознавания, а взятыми на некотором интервале (окне). При этом для прогноза возможного изменения единичной достоверности и сложности распознавания можно использовать фильтр Калмана [13] или другие механизмы.

При управлении скоростью на основе результатов распознавания традиционное управление



■ **Рис. 3.** График изменения скорости при смене режимов и условии, что образы $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_K\}$ отсортированы по сложности

процессом распознавания образов не может быть использовано по причине того, что необходимо заранее знать размер выборки k на участке протяженного объекта, чтобы выбрать соответствующее значение скорости.

Заключение

Оценка эффективности управления процессом распознавания образов описана в работе [14], а оценка эффективности принятия решения по выбору режима распознавания — в работе [15]. Данные методики применимы и для оценки эффективности управления процессом распознавания образов протяженных объектов. Суть оценки эффективности заключается в том, что по имеющимся результатам исследований строится однородная цепь Маркова, где определяются вероятностные переходы из одного класса состояния участка протяженного объекта в другой. Также строится матрица статистического уровня достоверности для каждого класса состояния протяженного объекта для всех возможных объемов данных k . На основании этих матриц можно оценить вероятность нахождения в той или иной ситуации и соответственно вычислить общую достоверность работ при управлении процессом распознавания образов в РВ. Производительность определяется по вероятности нахождения в режимах с разными значениями k и суммируется для всех режимов. В общем эффективность может быть оценена приведением к стоимостным затратам и доходам от исследований:

$$E = C(D) + C(T),$$

где $C(D)$ — денежные затраты от ошибок и доход от верного распознавания; $C(T)$ — затраты на проведение исследований с данной производительностью. При этом $C(D)$ может вычисляться на основе данных от каждого состояния:

$$C(D) = \sum_{i=1}^N c_i(\alpha(o_i)) + \sum_{i=1}^N c'_i(1 - \alpha(o_i)),$$

где N — количество частей протяженного объекта; α — вероятность ошибки при определении состояния o_i ; c_i, c'_i — соответственно затраты при ошибке и доход при правильном решении.

В большинстве случаев задачи распознавания в том или ином виде можно свести к вероятностному подходу, поэтому описанную модель управления режимом распознавания протяженного объекта можно использовать и в случаях, когда признаки не определяются в чистом виде вероятностными распределениями. Например, корреляционный анализ данных, распознавание графических символов с использованием шабло-

нов дают некоторую оценку близости к эталону (коэффициент парной корреляции, доля совпадения). Эти оценки можно считать единичной достоверностью, а алгоритм управления (5) будет оставаться таким же.

Если использовать другой метод распознавания, например структурный, то общая идея метода останется прежней, однако принципы оцен-

ки сложности и единичной достоверности должны несколько отличаться.

Описанный подход к управлению процессом распознавания был опробован на геофизических исследованиях буровых скважин. Дальнейшее развитие подхода предполагает его применение в задачах идентификации состояния протяженного объекта на основе технологий компьютерного зрения.

Литература

1. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. – М.: Высш. шк., 2004. – 261 с.
2. Кручинин А. Ю. Управление процессом распознавания образов в реальном времени // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 3. С. 33–37.
3. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
4. Михалевич В. С. Последовательные алгоритмы оптимизации и их применение // Кибернетика. 1965. № 1. С. 45–56.
5. Журавлев Ю. И. Корректные алгебры над множествами некорректных эвристических алгоритмов (I) // Кибернетика. 1977. № 4. С. 5–17.
6. Журавлев Ю. И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания и классификации // Проблемы кибернетики. 1978. № 33. С. 5–68.
7. Кручинин А. Ю. Оптимизация систем распознавания образов реального времени // Автоматизация в промышленности. 2010. № 10. С. 6–9.
8. Бериков В. Б. Оценки вероятности ошибки в байесовской логико-вероятностной модели распознавания образов // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. № 6. С. 28–39.
9. Fukunaga K. Introduction to statistical pattern recognition. – Academic Press, 1972. – 369 p.
10. Кручинин А. Ю., Аралбаев Т. З. Оценка сложности идентификации объектов по параметру надежности распознавания // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике: материалы 6-й Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием), Оренбург, 2007. С. 243–244.
11. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical J. July 1948. Vol. 27. P. 379–423.
12. Кручинин А. Ю. Управление процессом распознавания образов на основе оценки его сложности // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сб. ст. X Междунар. науч.-техн. конф., Пенза, 2009. С. 143–149.
13. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // J. of Basic Engineering. 1960. Vol. 82. N 1. P. 35–45.
14. Кручинин А. Ю. Особенности разработки программных систем распознавания образов реального времени // Автоматизация в промышленности. 2011. № 7. С. 53–56.
15. Кручинин А. Ю. Управляемые системы распознавания образов в адаптивных АСУ // Автоматизация в промышленности. 2013. № 3. С. 60–63.

UDC 004.93

Control of an Extended Object Recognition Process in Real Time Based on Evaluation Complexity of Each Stage of Recognition

Kruchinin A. Yu.^a, PhD, Tech., Associate Professor, kruchinin-al@mail.ru

^aOrenburg State University, 13, Pobedy St., 460018, Orenburg, Russian Federation

Purpose: Efficiency of a real-time pattern recognition system is determined by reliability and performance of the recognition process. The aim is to develop a model of control of a recognition mode in real time researching specific classes of objects — extended objects. **Results:** There has been proposed a mathematical model of pattern recognition control in real time. It is shown that based on assessment of recognition complexity of a current section of an extended object one can make a decision on a recognition mode for the next section. An amount of data and a velocity of a measuring device in relation to an extended object determine a recognition mode. Recognition mode control involves changing the speed of movement and, subsequently, the volume of information incoming to a section of an extended object in real time. **Practical relevance:** The research results have been tested on data from geophysical boreholes. The

described approach to control the process of pattern recognition of an extended object allows achieving optimal performance of the real time pattern recognition system.

Keywords — Pattern Recognition, Recognition Process Control, Real Time, Extended Object, Complexity of Pattern Recognition.

References

1. Gorelik A. L., Skripkin V. A. *Metody raspoznavaniia* [Methods of Recognition]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 261 p. (In Russian).
2. Kruchinin A. Yu. Control of Real-Time Pattern Recognition. *Avtomatizatsiia i sovremennye tekhnologii*, 2010, no. 3, pp. 33–37 (In Russian).
3. Podinovskii V. V., Nogin V. D. *Pareto-optimal'nie resheniya mnogokriterial'nykh zadach* [Pareto-Optimal Solutions of Multi-Criteria Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 256 p. (In Russian).
4. Mikhalevich V. S. Sequential Optimization Algorithms and their Application. *Kibernetika*, 1965, no. 1, pp. 45–56 (In Russian).
5. Zhuravlev Yu. I. Correct Algebras on Sets of Incorrect Heuristic Algorithms (I). *Kibernetika*, 1977, no. 4, pp. 5–17 (In Russian).
6. Zhuravlev Yu. I. On an Algebraic Approach to Solving the Problems of Pattern Recognition and Classification. *Problemy kibernetiki*, 1978, no. 33, pp. 5–68 (In Russian).
7. Kruchinin A. Yu. Optimization of Real-Time Pattern Recognition Systems. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2010, no. 10, pp. 6–9 (In Russian).
8. Berikov V. B. Estimations of Misclassification Probability in Bayes Logical-and-Probabilistic Model of Pattern Recognition. *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2008, no. 6, pp. 28–39 (In Russian).
9. Fukunaga K. *Introduction to statistical pattern recognition*. Academic Press, 1972. 369 p.
10. Kruchinin A. Yu., Aralbaev T. Z. Assessment of the Identification of Objects in the Parameter Recognition Reliability. *Materialy 6 Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem) "Sovremennye informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i praktike"* [Materials of the 6th All-Russia Scientifically-Practical Conf. (with the international participation) "The Modern Information Technology in a Science, Formation and Practice"]. Orenburg, 2007, pp. 243–244 (In Russian).
11. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, July 1948, vol. 27, pp. 379–423.
12. Kruchinin A. Yu. Management of Process of Pattern Recognition on Base of the Estimation to its Difficulties. *Sbornik statei X Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Informatsionno-vychislitel'nye tekhnologii i ikh primenenie"* [Collection Article X Int. Research Conf. "Information-Computing Technologies and Their Exhibits"]. Penza, 2009, pp. 143–149 (In Russian).
13. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, no. 1, pp. 35–45.
14. Kruchinin A. Yu. Specifics of Development of Software Systems for Real-Time Pattern Recognition. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, Sept. 2013, vol. 74, iss. 9, pp. 1599–1605 (In Russian).
15. Kruchinin A. Yu. Control Systems of Pattern Recognition in the Adaptive Control System. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2013, no. 3, pp. 60–63 (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Национальная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь 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.

УДК 004.934

АЛГОРИТМ ПОФОНЕМНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ УСТНОЙ РЕЧИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НЕЧЕТКОГО ФОНЕТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ-ДЕКОДИРОВАНИЯ СЛОВ

Л. В. Савченко^{а, 1}, аспирант

^аНижегородский государственный лингвистический университет им. Н. А. Добролюбова, Нижний Новгород, РФ

Цель исследования: повышение точности автоматического распознавания русской речи в системах голосового управления. **Методы:** предложена модификация метода нечеткого фонетического кодирования-декодирования слов, использующая известные признаки согласных звуков, которые классифицируются с помощью алгоритмов машинного обучения на основе приближенных множеств и деревьев решений. Приведены наиболее характерные правила классификации (ЕСЛИ..., ТО ...) для каждого типа звука. **Результаты:** представлены результаты экспериментального исследования в задаче распознавания голосовых команд для широко используемых в автоматической обработке речи мер близости (Кульбака — Лейблера, Евклида, Spectral distortion) совместно с популярными признаками речевого сигнала (оценки спектральных плотностей мощности, коэффициенты линейного предсказания, кепстральные коэффициенты). Показано, что точность распознавания речи для предложенной модификации на 3–7, 1–7 и 1,5–24 % выше точности известного аналога — метода фонетического декодирования слов, современной библиотеки CMU Sphinx и популярной системы Google Voice Search соответственно. **Практическая значимость:** увеличение степени принадлежности входного сигнала к эталонному слову за счет предложенного алгоритма классификации согласных звуков приводит к увеличению точности и к уменьшению количества альтернативных решений на выходе алгоритма распознавания.

Ключевые слова — автоматическое распознавание изолированных слов, нечеткие множества, приближенные множества, деревья решений, метод нечеткого фонетического кодирования-декодирования слов.

Введение

Задача распознавания изолированных слов/словосочетаний в области автоматического распознавания речи (АРР), в частности для систем голосового управления, в настоящее время становится все более актуальной [1–3]. Эффективным инструментом построения голосового интерфейса с быстрой настройкой на нового диктора и автоматической адаптацией словаря [2] является метод фонетического декодирования слов (ФДС) [4], основанный на пофонемном распознавании изолированно произнесенных фраз [5]. К сожалению, метод ФДС характеризуется невысокой точностью распознавания для коротких по длительности слов [4], что связано в первую очередь с тем, что близкие по звучанию звуки объединяются в один кластер. Для повышения точности распознавания нами был предложен метод нечеткого фонетического кодирования-декодирования слов (НФКДС) [6], в котором каждой минимальной звуковой единице (МЗЕ) ставится в соответствие не один информационный центр-эталон, как в методе ФДС, а нечеткое множество эталонных МЗЕ. К сожалению, методы ФДС и НФКДС для распознавания используют только гласные зву-

ки (так как точность их распознавания наиболее высока [3]). В настоящей работе для повышения точности распознавания предложена модификация НФКДС, использующая признаки согласных звуков для уточнения решения. Полученные результаты и сделанные по ним выводы рассчитаны на широкий круг специалистов в области обработки и распознавания речи.

Метод нечеткого фонетического кодирования-декодирования слов

Пусть задано множество из $L > 1$ эталонных слов $\{X_l\}$, где $l = 1, L$ — номер слова-эталона. Согласно фонетическому подходу, каждое эталонное слово разбивается на последовательность фонем (транскрипцию) $X_l = \{r_{l,1}, r_{l,2}, \dots, r_{l,L_l}\}$ [4]. Здесь L_l — длительность слова/словосочетания (в фонемах), а числа $r_{l,j} \in \{1, \dots, R\}$ — номера фонем из фонетического алфавита $\{x_r^*\}$, $r = \overline{1, R}$, где

R — количество фонем в алфавите; x_r^* — вектор отсчетов сигнала r -го эталонного звука. Задача состоит в том, чтобы поступившему на вход речевому сигналу (слову) X поставить в соответствие наиболее близкое к нему слово-эталон X_l .

Сведем задачу распознавания изолированных слов/словосочетаний к распознаванию гласного звука в слоге — поступающему на вход речевому сигналу x с частотой дискретизации F [Гц] следует поставить в соответствие одну из R эталонных МЗЕ. Вначале x разбивается на непересека-

¹ Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой математики и информатики Нижегородского лингвистического университета им. Н. А. Добролюбова Д. Ю. Акатьев.

ющиеся фреймы $\{\mathbf{x}(t)\}$, $t = \overline{1, T}$ длиной $\tau \approx 0,01 \dots 0,03$ с, где T — общее число фреймов в анализируемом речевом сигнале. После этого каждый полученный парциальный сигнал $\mathbf{x}(t) = \|x_1(t) \dots x_M(t)\|$ (здесь $M = \tau F$ — количество отсчетов в сегменте) рассматривается в пределах конечного списка МЗЕ $\{\mathbf{x}_r^*\}$ и отождествляется с той $\mathbf{x}_{v(t)}$ из них, которая отвечает принципу минимума некоторого рассогласования $\rho(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*)$ между сигналом $\mathbf{x}(t)$ и эталоном \mathbf{x}_r^* :

$$v(t) = \underset{r = \overline{1, R}}{\operatorname{argmin}} \rho(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}_r^*), \quad t = \overline{1, T}. \quad (1)$$

Согласно методу ФДС, каждой МЗЕ \mathbf{x}_r^* ставится в соответствие некий числовой код $c(r) \in \{1, \dots, C\}$, где в общем случае $C \leq R$. Для каждого фрейма в момент времени t решение принимается по принципу минимума информационного рассогласования. Итоговое решение принимается в пользу наиболее часто встречающегося кода c^* :

$$c^* = \underset{c = \overline{1, C}}{\operatorname{argmax}} \sum_{t=1}^T \delta(c(v(t)) - c),$$

где $\delta(x)$ — дискретная дельта-функция, а $v(t)$ определяется согласно (1).

Для повышения точности распознавания обычно близкие между собой звуки (для русского языка, например, пары звуков, соответствующие произнесенным буквам {а, я}, {у, ю}, {о, ё}, {э, е}, {ы, и}) объединяют в один кластер. Такое объединение приводит к значительному сокращению количества различных МЗЕ и, как следствие, к увеличению числа альтернативных решений на выходе алгоритма АРР, особенно для коротких по длительности слов [2].

Предположим, что в качестве меры близости применяется рассогласование Кульбака — Лейблера [7] для сопоставления отсчетов спектральных плотностей мощности (СПМ), оцененных на основе авторегрессионной (АР) модели речевого сигнала порядка p [8]. Тогда отмеченный недостаток может быть устранен с помощью предложенного нами ранее метода НФКДС [6], в котором каждому слогу ставится в соответствие нечеткое множество $\{(\mathbf{x}_r^*, \mu_j(\mathbf{x}_r^*))\}$, где $\mu_j(\mathbf{x}_r^*)$ — степень

принадлежности эталона \mathbf{x}_r^* к j -й МЗЕ, определяемая как $\mu_j(\mathbf{x}_r^*) = P(\mathbf{x}_j^* / \mathbf{x}_r^*)$. Для оценки условной вероятности $P(\mathbf{x}_j^* / \mathbf{x}_r^*)$ принадлежности \mathbf{x}_r^* к j -й фонеме воспользуемся известным свойством [7]: рассогласование Кульбака — Лейблера между объектами классов j и r в асимптотике с точностью до постоянного множителя $\alpha = \text{const} > 0$ имеет нецентральное хи-квадрат распределение с числом степеней свободы, определяемым количеством независимых параметров классифицируемого объекта ($K = M - p$ для АРР и гауссова сигнала [4]) и параметром нецентральности $\alpha \cdot \rho(\mathbf{x}_j^* / \mathbf{x}_r^*)$. Тогда, если M достаточно велико, воспользуемся центральной предельной теоремой и определим вероятность $P(\mathbf{x}_j^* / \mathbf{x}_r^*)$ из известного распределения минимума независимых нормальных величин [9] следующим образом [10]:

$$P(\mathbf{x}_j^* / \mathbf{x}_r^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^R \left(\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{t \sqrt{8\alpha \cdot \rho(\mathbf{x}_r^* / \mathbf{x}_j^*) + p - 1 + 2\alpha(\rho(\mathbf{x}_r^* / \mathbf{x}_j^*) - \rho(\mathbf{x}_r^* / \mathbf{x}_i^*))}}{\sqrt{8\alpha \cdot \rho(\mathbf{x}_r^* / \mathbf{x}_i^*) + p - 1}}\right)\right) dt, \quad (2)$$

где $\Phi(\cdot)$ — интеграл вероятностей. Каждому фрейму входного сигнала $\mathbf{x}(t)$ также ставится в соответствие нечеткое множество вида $\{(\mathbf{x}_r^*, \mu(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*))\}$. Мы предполагаем, что степень принадлежности $\mu(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*)$ определяется как апостериорная вероятность $P(\mathbf{x}_r^* / \mathbf{x}(t))$ принадлежности фрейма $\mathbf{x}(t)$ к r -й гласной [7]:

$$\mu(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*) = P(\mathbf{x}_r^* / \mathbf{x}(t)) = \frac{\exp(-\alpha \cdot \rho(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*))}{\sum_{i=1}^R \exp(-\alpha \cdot \rho(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_i^*))}. \quad (3)$$

Последнее выражение численно эквивалентно известной оценке апостериорной вероятности на выходе вероятностной нейронной сети [11].

Далее, используя операцию нечеткого пересечения множеств $\{(\mathbf{x}_r^*, \mu_j(\mathbf{x}_r^*))\}$ и $\{(\mathbf{x}_r^*, \mu(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*))\}$, получаем результирующее множество $\{(\mathbf{x}_r^*, \mu(r, t))\}$:

$$\mu(r, t) = \min(\mu_{v(t)}(\mathbf{x}_r^*), \mu(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*)), \quad (4)$$

где $v(t)$ определяется согласно (1). Операция нечеткого пересечения (4) приводит к существенному понижению степеней принадлежности фонем в случае ошибки распознавания, таким образом, их вклад в результирующее решение будет незначительным. На основе всех $\mu(r, t)$ каждому слогу ставится в соответствие нечеткое множество $\{(\mathbf{x}_r^*, \mu(r))\}$, где применяется простое голосование: $\mu(r) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mu(r, t)$. В свою очередь при распознавании слов получается нечеткое множество $\{(X_l, \mu_l)\}$, где степень принадлежности μ_l определяется как среднее арифметическое степеней принадлежности сло-

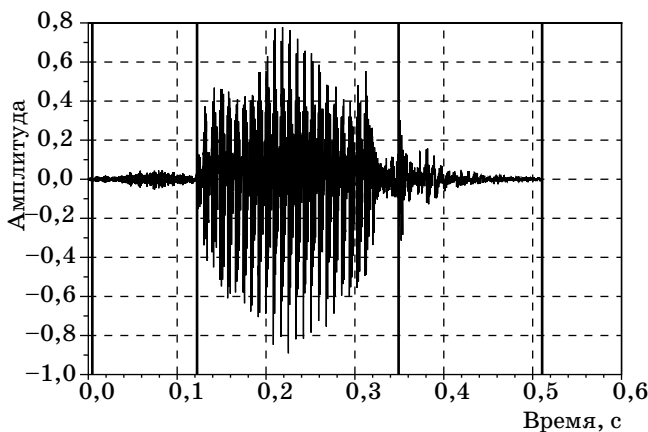
гов $\mu(r)$, составляющих слово. Итоговое решение принимается в пользу слова X^* с максимальной степенью принадлежности μ_i (так называемая дефаззификация [12]).

Автоматическое выделение согласных звуков

Как говорилось во введении, для метода ФДС (и, соответственно, НФКДС) фонетический алфавит $\{X_r\}$ состоит только из гласных, а остальные фонемы игнорируются [13]. В настоящей работе для повышения точности распознавания слов предлагается выделять в анализируемом речевом сигнале не только гласные, но и согласные. Для этого распознаваемый речевой сигнал разбивается на стационарные сегменты (фонемная сегментация) [14, 15]. Предположим, что известен способ классификации таких сегментов на множестве классов (гласный, сонорный и т. п.). Если каждой фонеме слова-эталона X_i по его текстовому представлению поставить в соответствие определенный тип (широкий фонетический класс в терминологиях работы [16]), то после распознавания гласных в слогах входного слова на основе метода НФКДС (1)–(4) выделенная в распознаваемом слове последовательность типов сегментов сопоставляется с последовательностью типов фонем эталонной фразы X_i . Количество совпадений фонетических классов k_i умножается на некоторое фиксированное значение $\Delta\mu = \text{const}$, в результате слову/словосочетанию X_i ставится в соответствие нечеткое множество $\{(X_i, \tilde{\mu}_i)\}_i$, где

$$\tilde{\mu}_i = \begin{cases} \mu_i + k_i \Delta\mu, & \mu_i + k_i \Delta\mu < 1 \\ 1, & \mu_i + k_i \Delta\mu \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

Итоговое решение модифицированного таким образом метода НФКДС принимается в пользу слова X^* с максимальной степенью принадлежности $\tilde{\mu}_i$. Таким образом, ожидается, что такая классификация всех однородных сегментов входного слова должна привести к уменьшению числа слов с одинаковой степенью принадлежности и, в свою очередь, к повышению точности распознавания.



■ Рис. 1. Временная диаграмма речевого сигнала «шар»

Таким образом, задача сводится к классификации квазистационарных (однородных) сегментов, выделенных с помощью одного из известных алгоритмов фонемной сегментации [14]. Рассмотрим следующие типы (классы) фонем русского языка по участию в их образовании тона и шума [17]:

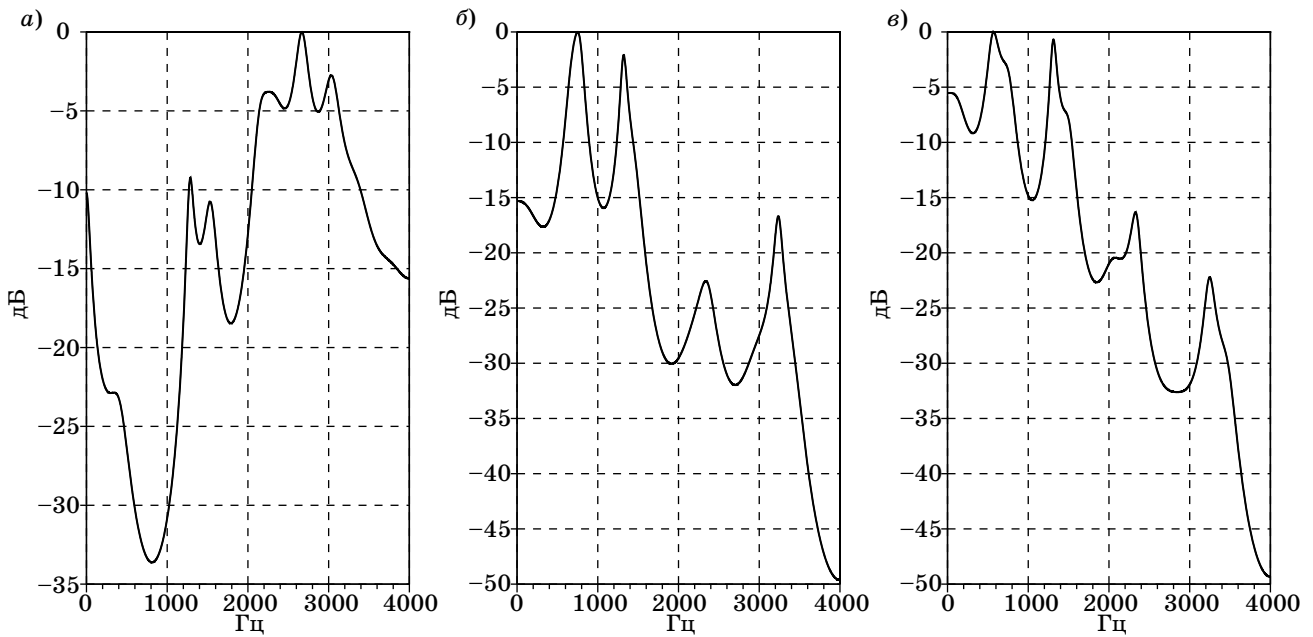
- 1) гласные, чьей акустической основой является только тон;
- 2) сонорные согласные (м, н, л, р), акустической основой которых является тон, шум практически отсутствует, по этому признаку они наиболее близки к гласным;
- 3) звонкие (б, в, д, г, з, й), в которых тон преобладает над шумом;
- 4) глухие (п, к, с, т, ц, ф, х), в которых шум преобладает над тоном;
- 5) шипящие (ш, щ, ж, ч), чьей акустической основой является только шум.

Для всех пяти классов были выявлены три наиболее характерных признака: длительность $t_{\text{сегм}}$ [мс], отношение максимальной амплитуды фонемы к максимальной амплитуде содержащего ее слога X_{max} и частота F_{max} [Гц], при которой СПМ принимает максимальное значение [18].

В качестве примера на рис. 1 приведена временная диаграмма речевого сигнала для слова «шар», где черные вертикальные линии показывают границы звуковых сегментов «ш», «а» и «р», автоматически выделенных с помощью алгоритма сегментации [14], а на рис. 2 представлена зависимость авторегрессионной оценки СПМ от частоты для выделенных фонем «ш», «а» и «р».

По длительности $t_{\text{сегм}}$ гласная фонема «а» в 1,5 раза превосходит сонорную фонему «р» и более чем в 3 раза превосходит шипящую «ш» (см. рис. 1). Также можно заметить, что значение амплитуды X_{max} гласной фонемы принимает наибольшее значение, а шипящей — наименьшее. Из рис. 2 видно, что частота F_{max} для гласной и сонорной фонем принадлежит низкому частотному диапазону ($F_{\text{max}} < 700$ Гц), в то время как для шипящей фонемы $F_{\text{max}} = 2630$ Гц (верхний частотный диапазон).

Для нахождения правил вида ЕСЛИ..., ТО... классификации фонем по выбранным нами признакам применялись два алгоритма машинного



■ Рис. 2. Оценка СПМ фонемы «ш» (а), фонемы «а» (б) и фонемы «р» (в)

обучения: LERS (Learning from Examples Based on Rough Sets) [19] и CART (Classification and Regression Tree) [20]. Для этого шестью дикторами (тремя мужчинами и тремя женщинами) были записаны по 1000 реализаций изолированно произнесенных звуков русского языка (по 200 реализаций на каждый класс, включая гласные), из которых автоматически сформирован текстовый файл, содержащий значения трех признаков

■ Таблица 1. Наиболее характерные правила для каждого класса звуков с использованием алгоритмов LERS и CART

Класс	Правила	
	LERS	CART
Гласные	<ul style="list-style-type: none"> $t_{\text{сегм}} \geq 6$; $0,75 \leq X_{\text{max}} \leq 1$ 	<ul style="list-style-type: none"> $4 \leq t_{\text{сегм}} < 8$; $0,9 \leq X_{\text{max}} \leq 1$; $F_{\text{max}} \geq 385$
Сонорные	<ul style="list-style-type: none"> $t_{\text{сегм}} < 6$; $0,65 \leq X_{\text{max}} \leq 1$ $0,35 \leq X_{\text{max}} \leq 0,65$; $265 \leq F_{\text{max}} \leq 2210$ 	<ul style="list-style-type: none"> $t_{\text{сегм}} < 9$; $0,5 \leq X_{\text{max}} < 0,9$; $F_{\text{max}} < 525$
Звонкие	<ul style="list-style-type: none"> $0,20 \leq X_{\text{max}} \leq 0,40$; $F_{\text{max}} \leq 265$ 	<ul style="list-style-type: none"> $0,19 \leq X_{\text{max}} \leq 0,38$; $F_{\text{max}} \leq 245$ $t_{\text{сегм}} \geq 4$; $0,15 \leq X_{\text{max}} < 0,19$; $F_{\text{max}} < 215$
Глухие	<ul style="list-style-type: none"> $0 < X_{\text{max}} \leq 0,1$; $F_{\text{max}} > 2210$ 	<ul style="list-style-type: none"> $X_{\text{max}} \leq 0,05$; $F_{\text{max}} > 2140$
Шипящие	<ul style="list-style-type: none"> $t_{\text{сегм}} < 5$; $0,1 \leq X_{\text{max}} \leq 0,37$; $F_{\text{max}} > 2210$ 	<ul style="list-style-type: none"> $0,05 < X_{\text{max}} \leq 0,25$; $F_{\text{max}} > 1720$

и истинный класс звука. Этот файл использовался для обучения алгоритмов классификаторов LERS (программа Rough Set Exploration System 2.2.2) и CART (Deductor Studio Academic 5.2). На выходе алгоритм LERS выдал набор из 17 правил, а алгоритм CART — из 18 правил, наиболее характерные из которых приведены в табл. 1, откуда видно, что применяемые нами признаки действительно приводят к следующей классификации звуков, а именно:

- гласные звуки характеризуются наибольшим значением $t_{\text{сегм}}$, наибольшей X_{max} и средним значением F_{max} ;
- для сонорных звуков $t_{\text{сегм}}$, X_{max} и F_{max} принимают средние значения;
- для звонких звуков $t_{\text{сегм}}$ принимает среднее значение, X_{max} — низкое и F_{max} — низкое;
- для глухих звуков X_{max} принимает наименьшее значение, F_{max} принимает наибольшее значение;
- шипящие звуки характеризуются средним значением $t_{\text{сегм}}$, низким значением X_{max} и большим значением частоты F_{max} .

В заключение представим результаты эксперимента для оценки точности классификации звуков. Для тестирования были записаны 100 других реализаций изолированно произнесенных звуков каждого класса для каждого диктора. В табл. 2 приведена точность распознавания для двух применяемых методов обучения.

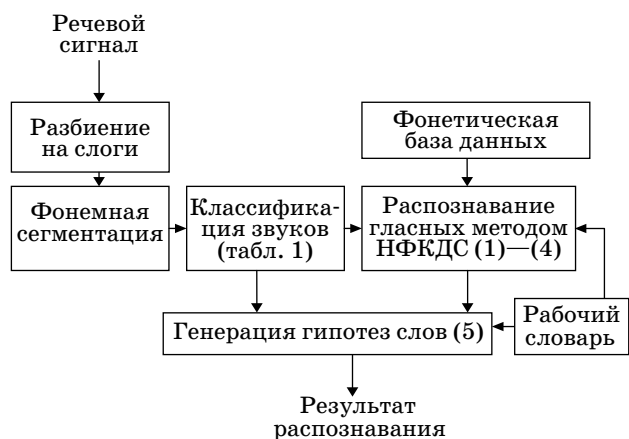
Как видно из этой таблицы, точность классификации для алгоритмов обучения LERS и CART примерно совпадает. Можно заметить, что наиболее хорошо распознаются гласные звуки

■ Таблица 2. Точность распознавания различных классов звуков русского языка, %

Класс	Распознано		Не распознано		Распознано неверно	
	LEERS	CART	LEERS	CART	LEERS	CART
Звонкие	76	73	12	14	12	13
Сонорные	77	74	15	15	8	11
Шипящие	73	72	7	8	20	20
Глухие	28	30	71	68	1	2
Гласные	96	96	2	3	2	1

(≈96 %), а хуже всех — глухие согласные (≈28 %), которые зачастую классифицируются как шум или пауза. Кажется, что такая точность классификации недостаточна для получения надежного решения, однако этот вывод требует уточнения. Действительно, точность классификации изолированных фонем обычно не превышает 40—60 % [6], так как для распознавания используются только фонетические и акустические особенности речевого сигнала. Идентификация фонем является лишь первым этапом при решении задачи распознавания слитной речи, точность решения которой значительно превышает точность распознавания составляющих входной речевой сигнал фонем за счет учета синтаксических, семантических и лексических особенностей языка [3]. В результате любое повышение точности распознавания фонем способно привести к резкому росту точности распознавания речи. Как будет показано далее в экспериментальном исследовании, выделенные признаки можно применять для повышения точности распознавания слов.

Структурная схема метода НФКДС, представленная на рис. 3, является расширением схемы пофонемного распознавания изолированных слов для метода ФДС [2]. Алгоритм распознавания изолированных слов, показанный на этом



■ Рис. 3. Структурная схема алгоритма распознавания изолированных слов методом НФКДС

рисунке, отличается от традиционных методов пофонемного распознавания речи [16, 21] наличием блока распознавания гласных фонем методом НФКДС (1)—(4), а также процедурой (5) генерации гипотез.

Результаты экспериментальных исследований в задаче распознавания слов

В экспериментальной части работы проведем сравнение методов ФДС и НФКДС по точности распознавания изолированных слов русской речи для дикторозависимого и дикторонезависимого режимов. Сравнение сигналов проводилось на основе АР-модели в метрике Кульбака — Лейблера [7]:

$$\rho_{KL}(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*) = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \left(\frac{G_x(f)}{G_r(f)} - \ln \frac{G_x(f)}{G_r(f)} \right) - 1. \quad (6)$$

Здесь $G_x(f)$ — основанная на методе Берга [8] оценка СПМ входного сигнала $\mathbf{x}(t)$ как функция дискретной частоты f , а $G_r(f)$ — СПМ эталона r -й фонемы. Выражение (6) описывает алгоритм АРР на основе сопоставления СПМ в метрике Кульбака — Лейблера.

Важнейшее достоинство АР-модели в задачах АРР — это возможность нормировать речевые сигналы по дисперсии порождающих процессов: $\sigma_0^2 = \sigma_x^2$, где σ_x^2 — дисперсия порождающего процесса. В работе [22] показано, что в таком случае $\rho(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*)$ можно определить на основе выхода обеляющего фильтра (Whitening Filter — WF):

$$\rho_{WF}(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_r^2(\mathbf{x})}{\sigma_0^2} - 1 \right], \quad (7)$$

где $\sigma_r^2(\mathbf{x})$, $r = \overline{1, R}$ — выборочная оценка дисперсии отклика r -го обеляющего фильтра.

Также для сопоставления сигналов использовались мера близости Евклида с традиционными для АРР признаками MFCC (Mel Frequency Cepstral Coefficients) [3] и мера близости SD (Spectral Distortion) между АР-оценками СПМ, эквивалентная расстоянию между кепстральными коэффициентами [23]:

$$\rho_{SD}(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*) = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \left(\ln \frac{G_x(f)}{G_r(f)} \right)^2. \quad (8)$$

Кроме того, в эксперименте для сопоставления точности распознавания гласных применялась современная система распознавания речи CMU Sphinx [24]. Настройка на диктора осуществлялась с помощью программы SphinxTrain на базе акустической модели русского языка из проекта ru4sphinx¹. Система CMU Sphinx поддерживает

¹ <https://github.com/zamiron/ru4sphinx/tree/master>

■ Таблица 3. Оценка вероятности ошибки распознавания, % (словарь наименований лекарств)

Мера близости / система АРР	Признаки	Алгоритм классификации фонем	Дикторозависимый режим		Дикторонезависимый режим	
			ФДС	НФКДС	ФДС	НФКДС
Евклида	Кепстральные коэффициенты (MFCC)	Без признаков согласных	17,5±3	14±3	26±3,4	22±3
		LERS	14±2	11±2,2	22±3,2	19±3,1
		CART	15±3	12±1,8	24±3,1	20±4
Кульбака — Лейблера (6)	Оценка СПМ	Без признаков согласных	15±4	11,5±2	27±2,8	21,5±2
		LERS	12,5±2,3	8±2,4	24±2,7	17±2,4
		CART	13±3,2	9,5±2,3	25±2,1	22±1,9
Метод обеляющего фильтра (WF) (7)	Оценка АР-коэффициентов	Без признаков согласных	19±2,5	16±2,6	30±2,4	27,5±1,7
		LERS	16±2,5	12,5±3,2	27±2,3	25±2,4
		CART	16,5±2,6	12±3,4	26±1,8	24±2,2
Spectral Distortion (SD) (8)	Оценка СПМ	Без признаков согласных	18,5±3,2	16±2,8	29,5±3	27±2
		LERS	15,5±3,3	12±2	27±3,1	24±3,1
		CART	14,5±3,6	12±1,7	26,5±2,2	25±2,1
Pocketsphinx + ФДС	Кепстральные коэффициенты (MFCC)	–	14±8,2		24±7,1	
Google Voice Search	То же	–	–		32±5,2	

возможность автоматической адаптации словаря, поэтому она может быть использована в методе ФДС для распознавания гласных в слогах. Также в эксперименте было проведено сравнение с русскоязычной клиент-серверной версией системы Google Voice Search [25], качество распознавания которой считается для русского языка весьма высоким. В последнем случае все тестовые реализации слов были произнесены слитно (без выделения слогов).

Использовались следующие значения параметров алгоритма АРР: порядок АР-модели $p=15$, частота дискретизации $F=8$ кГц, $\Delta t=0,01$, ко всем тестовым реализациям слов/словосочетаний добавлялся белый гауссовый шум (отношение сигнал/шум 10 дБ). Параметр масштабирования α в методе НФКДС (2), (3) для каждого рассогласования подбирался экспериментально.

Фонетический алфавит $\{x_r^k\}$, $r=1, R$ был составлен из десяти изолированно произнесенных диктором гласных звуков русского языка. Рабочий словарь формировался автоматически из текстового файла, содержащего перечень лекарств из 1910 наименований. Для тестирования другой диктор (дикторонезависимый режим) или тот же диктор (дикторозависимый режим) произносил 3 раза все слова/словосочетания из словаря с четким выделением слогов.

Оценка вероятности ошибки распознавания, усредненная по шести дикторам (трем мужчинам и трем женщинам), представлена в табл. 3. Слово считается распознанным верно, если не

существует ни одного слова с большей степенью принадлежности, чем истинное. Полу жирным шрифтом в таблице выделены наилучшие результаты. В рассматриваемом эксперименте в ошибку распознавания включена ошибка алгоритма сегментации, т. е. неверное определение числа слогов в произнесенном слове. В данном случае ошибка сегментации оказалась равной 4 %.

Здесь метод НФКДС превосходит по точности распознавания метод ФДС на 3—7 % для различных режимов распознавания и для различных рассогласований. Так, например, для дикторозависимого режима и меры близости Кульбака — Лейблера с использованием алгоритма LERS ошибка распознавания для метода НФКДС равна 8 %, что на 4,5 % ниже аналогичного показателя для метода ФДС. Также можно заметить, что вероятность ошибки распознавания наиболее низкая для рассогласования Кульбака — Лейблера и традиционной метрики Евклида с MFCC-признаками. Автоматическое выделение признаков квазистационарных сегментов и их типизация (см. табл. 1) позволяют повысить точность распознавания на 2—6 % по сравнению с библиотекой Pocketsphinx для дикторозависимого режима, на 1—7 % для дикторонезависимого режима и на 4,5—24 % по сравнению с Google Voice Search для дикторозависимого и дикторонезависимого режимов. Между тем качество популярной системы Google Voice Search для словаря лекарств оказалось неудовлетворительным, так как большая часть наименований лекарственных

■ Таблица 4. Оценка вероятности ошибки распознавания, % (словарь с наименованием городов)

Мера близости / система APP	Признаки	Алгоритм классификации фонем	Дикторозависимый режим	
			ФДС	НФКДС
Евклида	Кепстральные коэффициенты (MFCC)	Без признаков согласных	25±4	21±2,8
		LERS	17±2	15±3,1
		CART	18±2,3	14,5±3,2
Кульбака — Лейблера (6)	Оценка СПМ	Без признаков согласных	22±4,2	18±1,8
		LERS	18±1,8	13,5±2,1
		CART	17,5±2,2	13±2,5
Метод обеляющего фильтра (WF) (7)	Оценка AP-коэффициентов	Без признаков согласных	27±2,1	24±2,3
		LERS	20,5±2,3	17±2,2
		CART	22±2,7	18±2,6
Spectral Distortion (SD) (8)	Оценка СПМ	Без признаков согласных	24,5±2,8	19±3,2
		LERS	18,5±2,6	15,5±3,4
		CART	19±3	15±2,2
Pocketsphinx + ФДС	Кепстральные коэффициенты (MFCC)	–	17,0±9,6	
Google Voice Search	То же	–	18±8	

ных препаратов отсутствует в универсальном словаре системы.

Вероятность ошибки распознавания для методов ФДС и НФКДС для словаря наименований 1920 городов РФ показана в табл. 4. Здесь приведены результаты только для дикторозависимого режима, точность которого значительно выше (см. табл. 3) по сравнению с дикторонезависимым режимом, при этом настройка под конкретного диктора занимает несколько минут [2, 4]. Ошибка сегментации составила 3 %.

Здесь вероятность ошибки распознавания без учета признаков достаточно велика (18–27 %), так как в таком случае из-за специфики словаря алгоритм APP выдает много альтернативных решений. Использование признаков согласных позволяет понизить ошибку распознавания на 4,5–8 %. Также можно заметить, что предложенный алгоритм (см. рис. 3) превосходит систему распознавания CMU Sphinx на 1,5–4 %. Действительно, использование нечетких множеств и их пересечение (4) позволяют повысить точность классификации гласных и, как следствие, точность распознавания изолированных слов.

В этом эксперименте с распознаванием названий городов система дикторонезависимого распознавания Google Voice Search показала очень хорошие результаты, однако ее точность оказалась несколько ниже (на 1,5–5 %) точности предложенного подхода (см. рис. 3), что может быть объяснено требованием к послоговому произношению тестовых слов [2].

Заключение

В работе предложена модификация метода НФКДС, основанного на теории нечетких множеств, использующая классы согласных, которые могут быть выделены с помощью алгоритмов LERS или CART по выбранным нами акустическим признакам. Показано, что точность распознавания сонорных и звонких согласных достаточно велика, поэтому алгоритм классификации фонем может применяться для уточнения решения, полученного не только по методу НФКДС, но и по методу ФДС. Также экспериментально продемонстрировано, что метод НФКДС может применяться совместно с различными мерами близости и превосходит по точности распознавания слов традиционный метод ФДС на 3–7 %, библиотеку CMU Sphinx, применяемую для распознавания гласных в слове методом ФДС, — на 1–7 % и современную систему APP Google Voice Search на 1,5–24 %.

Таким образом, увеличение степени принадлежности входного сигнала к эталонному слову за счет предложенного алгоритма классификации согласных звуков приводит к увеличению точности и к уменьшению количества альтернативных решений на выходе алгоритма распознавания. Одним из возможных направлений дальнейшего исследования метода НФКДС (2), (3) является его применение не только к гласным, но и к согласным звукам для их различения внутри одного типа (сонорные, шипящие и т. п.).

Литература

1. Ронжин А. Л., Глазков С. В. Метод автоматического распознавания голосовых команд и неречевых акустических событий // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 74–77.
2. Савченко А. В. Адаптивный алгоритм распознавания речи на основе метода фонетического декодирования слов в задаче голосового управления // Информационные технологии. 2013. № 4. С. 34–39.
3. Benesty J., Sondh M., Huang Y. (eds.) Springer Handbook of Speech Recognition. – N. Y.: Springer, 2008. – 1159 p.
4. Савченко В. В., Савченко А. В. Метод фонетического декодирования слов в информационной метрике Кульбака — Лейблера для систем автоматического анализа и распознавания речи с повышенным быстродействием // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 7–12.
5. Козлов А. В., Саввина Г. В., Шелепов В. Ю. Система пофонемного распознавания отдельно произносимых слов // Искусственный интеллект. 2003. № 1. С. 156–165.
6. Савченко Л. В., Савченко А. В. Алгоритм автоматического распознавания фонем на основе логики нечетких множеств в информационной метрике Кульбака — Лейблера // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 3. С. 36–41.
7. Kullback S. Information Theory and statistics. – Dover Pub., 1997. – 399 p.
8. Marple S. L. (Jr.). Digital spectral analysis and with application, Englewood Cliffs. – New Jersey: Prentice-Hall, 1987. – 492 p.
9. Hill J. E. The Minimum of n Independent Normal Distributions. <http://www.untruth.org/~josh/math/normalmin.pdf> (дата обращения: 03.10.2013).
10. Savchenko A. V., Savchenko L. V. Fuzzy Phonetic Decoding Method in a Phoneme Recognition Problem // NOLISP-2013 Int.Conf, LNCS/LNAI 7911, Mons, Belgium, 2013. P. 176–183.
11. Specht D. F. Probabilistic neural networks// Neural Networks. 1990. Vol. 3. P. 109–118.
12. Zadeh L. A. Fuzzy Sets// Information Control. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
13. Матвеев Ю. Н. Исследование информативности признаков речи для систем автоматической идентификации дикторов // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 2. С. 47–51.
14. Сорокин В. Н., Цыплихин А. И. Сегментация и распознавание гласных// Информационные процессы. 2004. Т. 4. № 2. С. 202–220.
15. Ронжин А. Л. и др. Фонетико-морфологическая разметка речевых корпусов для распознавания и синтеза русской речи// Информационно-управляющие системы. 2006. № 6. С. 24–34.
16. Дорохина Г. В. Методы пофонемного распознавания, использующие свойства языка и речи// Искусственный интеллект. 2008. № 4. С. 332–338.
17. Шанский Н. М., Иванов В. В. Современный русский язык: в 3 ч. – М.: Просвещение, 1987. Ч. 1. – 192 с.
18. Савченко Л. В., Акатьев Д. Ю. Выделение признаков речевого сигнала на основе теории приближенных множеств в методе нечеткого фонетического декодирования слов// Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2013: Всерос. конф., Н. Новгород, 24–27 сентября 2013 г. С. 148–151.
19. Grzymala-Buss J. W. A system for learning from examples based on rough sets (LERS)// Intelligent Decision Support: Handbook of Application and Advances of the Rough Sets Theory/ Slowinski R. (ed.) – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992. – P. 3–18.
20. Jordan M. I. A statistical approach to decision tree modeling// Proc. of the Seventh Annual ACM Conf. of the Computation Learning Theory. N. Y.: ACM Press, 1994. P. 254–282.
21. Ниценко А. В., Шелепов В. Ю. Алгоритмы пофонемного распознавания слов наперед заданного словаря// Искусственный интеллект. 2004. № 4. С. 633–639.
22. Савченко В. В., Акатьев Д. Ю., Карпов Н. В. Автоматическое распознавание элементарных речевых единиц методом обеляющего фильтра// Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2007. Вып. 4. С. 11–19.
23. Wei B., Gibson J. D. Comparison of distance measure in discrete spectral modeling // Proc. of IEEE 9th Digital Signal Processing Workshop. 2000. P. 1–4.
24. Система распознавания речи CMU Sphinx. <http://cmusphinx.sourceforge.net/> (дата обращения: 28.10.2013).
25. Schuster M. Speech Recognition for Mobile Devices at Google// LNCS. 2010. Vol. 6230. P. 8–10.

UDC 004.934

Recognition Algorithm on the Basis of the Fuzzy Phonetic Coding-Decoding Method

Savchenko L. V.^a, Postgraduate Student, LyudmilaSavchenko@yandex.ru^aNizhny Novgorod State Linguistic University, 31a, Minin St., 603155, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Purpose: To increase accuracy of automatic recognition of Russian language in voice control applications. **Methods:** There has been proposed a modification of the fuzzy phonetic coding-decoding method which involves the known consonant features classified by means of machine learning algorithms on the basis of rough sets and decision trees. There have been demonstrated the most characteristic classification rules (IF..., THEN...) for each phoneme type. **Results:** There have been shown the experimental study results concerning

the problem of recognition of voice commands largely used in automatic speech processing for similarity measures (Kullback — Leibler information discrimination, Euclidean distance, Spectral distortion) and popular voice signal features (estimation of power spectral densities, coefficients of linear prediction, Mel frequency cepstral coefficients). It is shown that the accuracy of speech recognition for the proposed approach is 3—7%, 1—7%, 1.5—24% higher than the accuracy of the conventional phonetic word decoding, the modern speech recognition library CMU Sphinx and the popular Google Voice Search, respectively. **Practical relevance:** The increase of a degree of membership of an input signal to a reference word due to the proposed algorithm of consonant classification allows to increase the accuracy of recognition and to decrease an amount of output alternative words.

Keywords — Automatic Recognition of Isolated Words, Fuzzy Sets, Rough Sets, Decision Trees, Fuzzy Phonetic Coding-Decoding Method.

References

- Ronzhin A. L., Glazkov S. V. The Method of Automatic Recognition of Voice Commands and Non-Speech Acoustic Events. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2012, no. 4, pp. 74–77 (In Russian).
- Savchenko A. V. Adaptive Speech Recognition Algorithm on the Basis of the Words Phonetic Decoding Method in a Remote Control Problem. *Informatsionnye tekhnologii*, 2013, no. 4, pp. 34–39 (In Russian).
- Benesty J., Sondh M., Huang Y. *Springer Handbook of Speech Recognition*. New York, Springer, 2008. 1159 p.
- Savchenko V. V., Savchenko A. V. The Method of Words Phonetic Decoding Using Kullback — Leibler Information Discrimination for High-Speed Performance Systems of Automatic Speech Analysis and Recognition. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2013, no. 2, pp. 7–12 (In Russian).
- Kozlov A. V., Savvina G. V., Shelepov V. Yu. Isolated Word Recognition System Based on Phoneme Recognition. *Iskusstvennyi intellekt*, 2003, no. 1, pp. 156–165 (In Russian).
- Savchenko L. V., Savchenko A. V. Algorithm of Automatic Phoneme Recognition Based on the Fuzzy Sets Theory in the Kullback — Leibler Information Metric. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2013, no. 3, pp. 36–41 (In Russian).
- Kullback S. *Information Theory and Statistics*. Dover Publ., 1997. 399 p.
- Marple S. L. (Jr.). *Digital Spectral Analysis and with Application*. Englewood Cliffs. New Jersey, Prentice-Hall, 1987. 492 p.
- Hill J. E. *The Minimum of n Independent Normal Distributions*, 2010. Available at: <http://www.untruth.org/~josh/math/normalmin.pdf> (accessed 3 October 2013).
- Savchenko A. V., Savchenko L. V. Fuzzy Phonetic Decoding Method in a Phoneme Recognition Problem. *NOLISP-2013 Int. Conf. LNCS/LNAI 7911*. Mons, Belgium, 2013, pp. 176–183.
- Specht D. F. Probabilistic Neural Networks. *Neural Networks*, 1990, vol. 3, pp. 109–118.
- Zadeh L. A. Fuzzy Sets. *Information Control*, 1965, vol. 8, pp. 338–353.
- Matveev Yu. Study of Informative Speech Features for Automatic Speaker Identification. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. 2, pp. 47–51 (In Russian).
- Sorokin V. N., Tsjplihin A. I. Segmentation and Recognition of Vowels. *Informatsionnye protsessy*, 2004, vol. 4, no. 2, pp. 202–220 (In Russian).
- Ronzhin A. L., Karpov A. A., Lobanov B. M., Tsurulnik L. I., Jokisch O. Phonetic-Morphological Mapping of Speech Corpora for Recognition and Synthesis of Russian Speech. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2006, no. 6, pp. 24–34 (In Russian).
- Dorohina G. V. Speech Recognition Methods Based on Phoneme Recognition that Use Features of Language and Speech. *Iskusstvennyi intellekt*, 2008, no. 4, pp. 332–338 (In Russian).
- Shanskij N. M., Ivanov V. V. *Sovremennyi russkii iazyk* [Modern Russian Language]. Moskow, Prosveshchenie Publ., 1987. 192 p. (In Russian).
- Savchenko L. V., Akatjev D. Yu. Features Action of Speech Signal which is Based on Rough Sets Theory in Fuzzy Phonetic Decoding Method. *Vserossiiskaia konferentsiia "Nelineinaiia dinamika v kognitivnykh issledovaniiaxh"* [All-Russian Conf. "Nonlinear Dynamic in Cognition Research"]. Nizhny Novgorod, 2013, pp. 148–151 (In Russian).
- Grzymala-Buss J. W. A System for Learning from Examples Based on Rough Sets (LERS), In: *Intelligent Decision Support: Handbook of Application and Advances of the Rough Sets Theory*. Slowinski R. (ed.), Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1992, pp. 3–18.
- Jordan M. I. A Statistical Approach to Decision Tree Modeling. *Proceeding of the Seventh Annual ACM Conference of the Computation Learning Theory*. New York, ACM Press, 1994, pp. 254–282.
- Nitsenko A. V., Shelepov V. Yu. The Algorithms of the Phonetic Recognition of Isolated Words for a Given Dictionary. *Iskusstvennyi intellekt*, 2004, no. 4, pp. 633–639 (In Russian).
- Savchenko V. V., Akatjev D. Yu., Karpov N. V. Automatic Recognition of the Minimal Speech Units by the Whitening Filter Method. *Izvestiia vuzov. Radioelektronika*, 2007, no. 4, pp. 11–19 (In Russian).
- Wei B., Gibson J. D. Comparison of Distance Measure in Discrete Spectral Modeling. *Proceedings of IEEE 9th Digital Signal Processing Workshop*, 2000, pp. 1–4.
- The Speech Recognition System CMU Sphinx*. Available at: <http://cmusphinx.sourceforge.net/> (accessed 28 October 2013).
- Schuster M. Speech Recognition for Mobile Devices at Google. *LNCS*, 2010, vol. 6230, pp. 8–10.

УДК 602-53.55

ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЕЗДНОЙ РАБОТОЙ

С. А. Браништов^а, канд. техн. наук

Д. А. Тумченко^а, инженер-программист, аспирант

А. М. Ширванян^а, инженер-программист, аспирант

^аИнститут проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, РФ

Постановка проблемы: на примерах известных систем управления движением поездов на крупной железнодорожной станции показано, что функции оперативного персонала на уровне станции автоматизированы слабо. Целью работы является разработка алгоритмов для автоматизации ряда задач оперативного управления. **Методы:** исследованы задачи планирования маневровых работ, формирования суточного плана-графика станции, выбора и приготовления маршрутов движения. **Результаты:** разработаны и описаны алгоритмические решения для автоматизации процесса формирования суточного плана-графика работы станции, что позволило сделать удобным и простым этот процесс, а также гибким и эффективным — принятие решения по обработке поездов в сложных и нестандартных ситуациях. **Практическая значимость:** результаты исследований и алгоритмические решения использованы при разработке программ для автоматизированного рабочего места дежурного и технолога станции. Они позволяют упростить работу персонала, снизить долю его ошибок и повысить безопасность управления.

Ключевые слова — система поддержки принятия решения, суточный план-график работы станции, поездная и маневровая работа, местная работа.

Введение

Управление движением и обеспечение безопасности — это всегда важные и сложные задачи на железной дороге. С каждым годом наблюдается рост заказов на перевозки, повышается интенсивность движения, а возможности инфраструктуры сохраняются прежние. Для повышения уровня обслуживания на железной дороге эффективное составление расписания и стратегия управления движением в режиме реального времени играют ключевую роль. Проблеме проектирования расписания уделяется много внимания. Формирование расписания — длительная процедура, включающая интенсивные переговоры между заинтересованными сторонами и опирающаяся на доступные производственные ресурсы. В то же время системам поддержки принятия решения при управлении движением в реальном времени внимание почти не уделяется. Между тем автоматизированные системы позволяют находить лучшие варианты решения и полнее использовать возможности железнодорожной инфраструктуры. Сложность создания таких систем заключается в реализации большого количества взаимозависимых операций в режиме реального времени при частом возникновении отклонений от расписания и ограниченных сроках времени для принятия решения. На станции регулярно регистрируются небезопасные ситуации. Например, внезапная остановка поезда по стоп-крану создаст аварийную ситуацию, а задержка поезда приведет к нарушению графика движения и повлияет на расписание последующих поездов. Организация движения

поездов на станции — сложный многосвязный процесс, результат которого зависит от надежности технических устройств, квалификации работников и даже от случайных событий внешней среды.

Анализ систем автоматизации диспетчерского управления

Для организации движения поездов и местной работы разрабатывается суточный план-график работы станции, включающий время приема и отправления поездов, маршруты движения, маневровые, погрузо-разгрузочные, ремонтные работы и пр. Расписание предусматривает распределение во времени и пространстве всех движущихся через станцию поездов, а также резервирование путей для поездов, которые могут быть назначены дополнительно.

В настоящее время функции организации движения, ответственность за исполнение расписания и обеспечение безопасности возложены на дежурного по станции [1]. Он выполняет следующую работу:

— оценивает поездную обстановку и фактическое положение на станции, принимает оптимальные решения по организации движения поездов и маневровой работы с учетом сложившейся ситуации, осуществляет планирование движения по станции в пространстве и во времени на перспективу;

— выполняет операции по приготовлению маршрутов приема, отправления, пропуска поездов и маневровых передвижений с пульта управления устройствами электрической централиза-

ции стрелок или сигналов или дает распоряжения на приготовление маршрутов работникам исполнительных постов;

— осуществляет непрерывный контроль передвижения поездов, принимая оперативные меры в случае каких-либо отклонений от нормального движения, ведет переговоры с машинистами;

— заблаговременно информирует работников станции об опоздании пассажирских поездов, изменении времени их стоянки и путей приема;

— отмечает время прибытия, отправления и проследования поездов в журнале движения поездов, ведет другую поездную документацию.

В работе дежурного требуется точность самостоятельных управляющих действий и точность передачи распоряжений персоналу станции и машинистам, максимальная сосредоточенность и контроль всех процессов, глубокий анализ ситуации и способность прогнозировать ее развитие. В периоды высокой интенсивности движений требуется еще и скорость принятия решения. А в случае аварий технических средств управления, неисправности транспортных средств и нарушения графика движения объем и скорость работы возрастают.

На практике отмечается, что 80 % всех нарушений безопасности движения в перевозочном процессе так или иначе связаны с виной дежурных по станции. Замечены случаи, когда вместо требуемого управляющего действия выполнялось другое действие или оператор вообще не счел нужным совершать какое-либо действие. Наблюдались ошибки вследствие нарушения восприятия информации, усталости, забывчивости, рассеянности, неспособности выполнить требуемое действие по причине сильной растерянности, оцепенения, испуга; отмечались слишком быстрые или слишком медленные действия, несоблюдение требуемой последовательности действий [2].

В целях автоматизации и централизации диспетчерского управления перевозками получили широкое распространение различные компьютерные системы управления движением поездов, заменившие аппаратуру диспетчерской и станционной электрической централизации.

В США, Канаде, Японии, Италии и других странах созданы автоматизированные диспетчерские центры управления с индивидуальными автоматизированными рабочими местами (АРМ) для диспетчеров [3]. С помощью таких центров обеспечивается руководство эксплуатационной работой на крупных железнодорожных полигонах, а в Италии — на территории всей страны.

В США компанией Union Pacific Railways внедрена система автоматизации управления работой сортировочных станций и диспетчерской централизации. Управление движением поездов

в диспетчерском центре осуществляется автоматически. Система позволила повысить скорость и безопасность движения поездов, производительность труда обслуживающего персонала и обеспечила более эффективное использование энергоресурсов [4].

С 1991 г. в Канаде функционирует Центр управления перевозками. На большой экран выводится информация обо всех поездах, находящихся на участках между выделенными станциями. В зависимости от величины отклонения от графика движения поезда помечаются четырьмя различными цветами, поезда с опасными грузами отмечаются особо. Моделирование позволяет периодически корректировать график движения поездов. Используются автоматизированные системы планирования поездной работы (ТОРС) и составления графика оборота локомотивов и привязки их к поездам (MPS). Диспетчеры могут просматривать текущее поездное положение, оперативный архив за последние 24 ч и вперед на срок до 48 ч [5].

В Японии до 1995 г. использовались системы COMTRAC (система автоматизированного управления движением) и SMIS (информационно-управляющая система) [6], однако они не справлялись с нагрузками в нештатных ситуациях. В 1995 г. компанией JR EAST была внедрена новая информационно-управляющая система COSMOS. Интегрированная система COSMOS состоит из семи подсистем, включая управление, техобслуживание и энергоконтроль. Подсистема управления движением поездов выполняет такие функции, как вывод на экран информации о местоположении поезда и опозданиях, управление маршрутами и поддержка при восстановлении нормального хода перевозочного процесса. Основываясь на данных исполненного графика, система COSMOS позволяет создать график-прогноз движения поездов, в котором рассчитаны времена прибытия и отправления [7].

В Италии автоматика центрального диспетчерского поста работает в двух режимах. Первый — режим жесткого программирования, который заключается в выборе маршрутов в строгом соответствии с графиком. Второй — режим консультирования, при котором диспетчеру предлагается несколько вариантов решения для каждой конкретной ситуации и предоставляется право выбора любого из них. Особенностью системы является представление на экранах графика движения поездов, рассчитанного с помощью ЭВМ. Модуль информации о движении поездов и состоянии инфраструктуры предоставляет в режиме реального времени следующие сведения: местоположение, скорость и опоздание поездов; маршруты, установленные для прохода поездов через станции; состояние

переездов. Существуют также средства прогнозов по движению поездов, поддержки принятия решений, статистического анализа. Система контроля и управления движением поездов предоставляет диспетчеру инструменты анализа графиков движения и подготовки суточных отчетов по поездной работе [8].

В России в начале 80-х гг. прошлого века были развернуты работы по совершенствованию, организационно-функциональной перестройке и автоматизации диспетчерского управления перевозочным процессом на железных дорогах бывшего СССР по нескольким направлениям. Одним из направлений является создание и внедрение современных компьютерных систем диспетчерской централизации, диспетчерского контроля и АРМ поездных и узловых диспетчеров, АРМ дорожных диспетчеров и дежурных по станциям на базе автоматического съема информации с устройств сигнализации, централизации, блокировки и связи с автоматизированной системой оперативного управления перевозками. Примером такой системы является Ebilock-950 компании «Бомбардье Транспортейшн», которая предназначена для автоматизации задания маршрутов, управления и контроля объектами на станции. Ebilock-950 обладает рядом преимуществ по сравнению с централизацией релейного типа [9]. Она более надежна, функциональна, информативна, проста в эксплуатации и более рентабельна.

Развитие информационных систем на железных дорогах России направлено на автоматизацию следующих производственных и технологических процессов:

- прогнозирование, планирование, контроль, учет и анализ процесса перевозок;
- оперативное управление движением поездов и местной работой;
- обеспечение поездов локомотивами, бригадами и вагонными парками;
- планирование работ по ремонту и содержанию технических средств.

Установлен курс на переход от информационных систем к информационно-управляющим интегрированным системам на базе аналитических и прогнозных моделей. Тем не менее на текущий момент большинство автоматизированных систем (ГИД «УралВНИИЖТ» [10], «ДИСПАРК», «ДИСКОН» и др.) на российских железных дорогах являются информационными, т. е. они предоставляют всеобъемлющую информацию по положению поездов и состоянию объектов инфраструктуры, но не предлагают интеллектуальных алгоритмов автоматизированного управления — принятие решения и выдача управляющих воздействий в прежнем объеме сохраняются за человеком.

Функции программного обеспечения АРМ дежурного по станции

Проблема выбора маршрута в том, что необходимо учитывать пункты следования и маршруты движения последующих в расписании поездов. Выбираемый маршрут должен занимать горловину станции так, чтобы не блокировать движение других поездов. В периоды высокой интенсивности движения контролировать это непросто, могут возникать ситуации, когда использование путевого развития таково, что нет больше возможности найти свободные пути для движения поезда. В таком случае должны применяться и другие меры по управлению поездами, например: допустимое манипулирование временем движения поездов по станции, планирование маневровых перемещений, смена платформы приема, использование сложных маршрутов со сменой направления движения и др. [11].

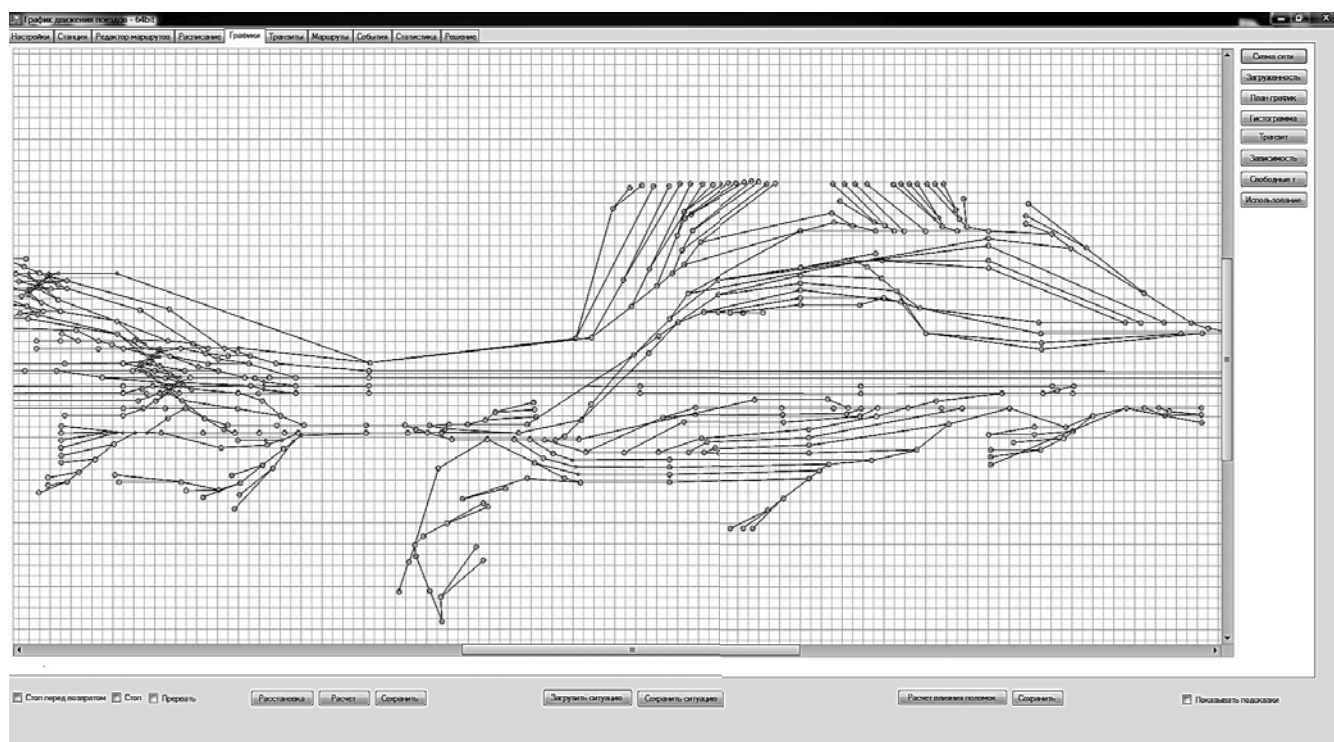
Для выбора маршрутов необходимо одновременно решать следующие задачи: прогнозировать занятость путей во времени; проверять на соответствие тип поезда и специализацию пути приема; учитывать зависимости стрелок и сигналов, ограничение скорости движения на участках и стрелках и направления движения на перегонах; обеспечивать интервалы безопасности между поездами.

Выбор и приготовление маршрутов приема/отправления поезда и маневровых перемещений

Для крупных железнодорожных станций характерна разветвленная схема путей и, как правило, существует несколько возможных маршрутов движения между двумя точками станции. Имеющаяся система сигнализации, централизации, блокировки предлагает дежурному основной маршрут движения. Она помогает проверить маршрут на скрещении с уже занятыми и зависимыми путями и приготовить его — установить в нужное положение стрелки и сигналы светофора. Если требуется альтернативный маршрут, то дежурный вручную переключает стрелки так, чтобы сформировать иной маршрут.

При назначении маршрута дежурный осуществляет выбор самостоятельно на основании текущей ситуации и личного опыта. Для автоматизации этого процесса авторами был разработан и реализован в программном обеспечении алгоритм выбора маршрута. Пример окна со схемой станции показан на рис. 1.

В реальном времени при эксплуатации на этой схеме могут отображаться установленные маршруты движения и варианты для вновь организуемых маршрутов. Чтобы избежать полного перебора возможных вариантов в алгоритме, принято



■ **Рис. 1.** Схема путевого развития станции

использовать следующий критерий выбора лучшего маршрута. Во-первых, маршрут следует выбирать такой, который не является враждебным уже выбранным ранее маршрутам. Во-вторых, для каждого поезда находится такой маршрут, который перекрывается меньше всего раз по общим участкам пути с вероятными маршрутами других поездов в течение времени его движения. Так найденный маршрут будет иметь наименьшую вероятность скрещения с последующими поездами.

Алгоритм реализован следующим образом. Вначале находится множество вариантов маршрутов для рассматриваемого поезда и вычисляется время движения поезда по каждому из них с учетом профиля скорости вдоль маршрута (Δt_{dr}). Чтобы учесть влияние этого поезда на максимально возможное число последующих поездов, берется наибольшее время.

Определим время движения. Пусть t — момент начала движения (маршрута) поезда по станции. Для поездов, отправляющихся со станции, этот момент соответствует указанному в расписании t_{dep} , а для прибывающих поездов — это момент времени входа в горловину станции, он должен быть рассчитан так, чтобы поезд прибыл на платформу не позднее указанного в расписании момента времени t_{arr} . Таким образом, максимальное время движения по станции

$$[t, t + \Delta t_{dr}],$$

где $t = t_{dep}$ — для отправляющихся поездов, $t = (t_{arr} - \Delta t_{dr})$ — для прибывающих.

На втором этапе отбрасываются те варианты маршрутов, которые пересекаются с уже подготовленными маршрутами других поездов по общим элементам сети. Оставшимся вариантам движения рассматриваемого поезда раздаются веса в соответствии с влиянием на последующие поезда. Вес вычисляется как сумма числа использования элементов маршрута всеми поездами в рассматриваемом интервале времени. Выбирается тот маршрут, чей вес наименьший. На исследуемой пассажирской станции обнаруживались такие моменты времени, когда в движении находилось одновременно 7 поездов. Пример такой ситуации представлен на рис. 2. Эти поезда выделены рамками.

Шкала времени и моменты движения поездов показаны на рис. 3. Для поезда № 7116 на отрезке времени [07:45; 07:53] задан маршрут № 252, и этот поезд находится в движении (см. рис. 2). У рассматриваемого поезда № 6207 имеется 23 варианта маршрута, и необходимо выбрать один из них. Максимальное время его движения 7 мин (с 07:46 до 07:53), в этот период начнут свое движение поезда 6809, 6610, 5552, 6703, 6611. Выбираемый маршрут должен менее остальных влиять на движение этих поездов и не пересекаться с поездом 7116. После выбора маршрута для каждого последующего поезда должен быть хотя бы один незаблокированный маршрут.

График движения поездов - 64bit

Настройки | Станция | Редактор маршрутов | Расписание | График | Транзиты | Маршруты | События | Статистика | Решение

РАСПИСАНИЕ | Расчет

Имя: Тест 5 Описание: plml

Номер поезда прибытия	Номер главного пути	Время прибытия поезда	Номер пути	Станция отправления	Оборот составов	Номер поезда отправления	Номер главного пути	Время отправления	Номер пути	Станция назначения
					от 6403	6004		07-34	11	Пушкино
6607	I	07-37	13	Монино						
6205	III	07-38	11		под 6308					
					от 6007	6504	II	07-42	10	Болшево
7201	III	07-43								
6009		07-43	12		под 6006					
					от 7109	7116	IV	07-45		
					от 6203	6610	II	07-48	14	Монино
7111	III	07-48			под 7118					
					от 7107	5552	IV	07-49	4	
6609	I	07-49	15							
6207	III	07-53	8	Сергиев Посад	под 6210					
6809	I	07-55	14		под 6818					
					от 6009	6006	II	07-58	12	
6703	III	07-58	10		под 6706					
					от 7111	7118	IV	08-00		
6611	I	08-00	13							
7113	III	08-03			под 7120					
					от 6807	6208	IV	08-05	7	Сергиев Посад
6011	I	08-06	12		под 6008					
					от 6205	6308	II	08-06	11	

Выбрать расписание | Импорт из файла Excel | Добавить | Удалить | Номер

Стоп перед возвратом Стоп Прервать | Расстановка | Расчет | Сохранить | Загрузить ситуацию | Сохранить ситуацию

Рис. 2. Фрагмент окна с расписанием

При таком подходе, когда выбирается маршрут с наименьшим влиянием на движение других поездов, можно гарантировать нахождение

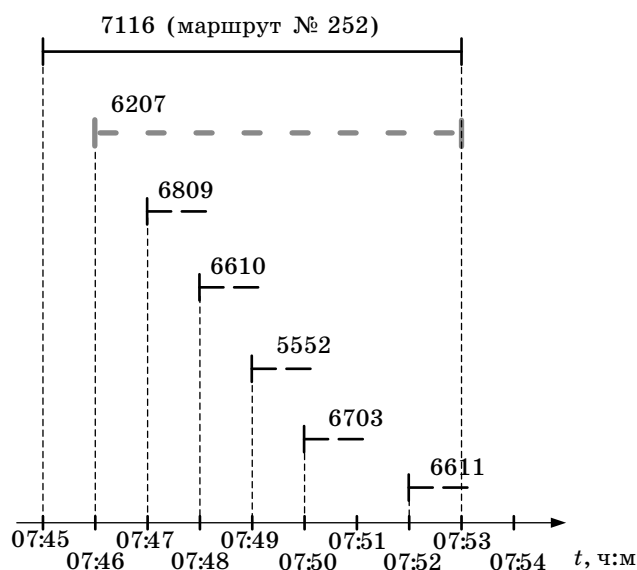


Рис. 3. Диаграмма движения поездов

реализуемого маршрута в условиях высокой загрузки станции.

Контроль исполнения расписания движения

График движения поездов является основным нормативно-технологическим документом, регламентирующим работу всех подразделений железнодорожного транспорта по организации движения поездов. Он определяет технологию эксплуатационной деятельности всей сети железных дорог, объединяет и организует работу всех линейных подразделений, участков и направлений дорог в единую транспортную систему [12].

Следование графику — одно из приоритетных требований к работе дежурного по станции, которое бывает довольно сложно выполнить, особенно при возникновении нештатных и аварийных ситуаций, например при технических неисправностях путей. В эти моменты доступные маршруты движения могут быть резко ограничены. Однако если допустить небольшое смещение времени движения по станции какого-либо поезда, то это позволит существенно упростить задачу поиска свободных маршрутов движения и разрешить сложную ситуацию.

В соответствии с технологическим процессом [13] задержка поезда по прибытию/отправлению до 5 мин не является грубым нарушением графика движения. Это допущение может быть использовано в алгоритме организации движения так, как описано ниже.

В первую очередь следует рассмотреть все варианты маршрутов движения. Затем, если не удастся найти свободный маршрут, проверяется возможность манипулировать временем движения одного или нескольких поездов. А именно, вычисляется величина сдвига времени движения поезда по горловине станции с допуском возможной задержки не более 5 мин (этот допустимый предел определяется экспертно). В случае если эта величина превышает допустимый предел, производится коррекция времени следования нескольких близких по расписанию поездов. На окончательный выбор решения влияет общая величина коррекции, число поездов, подвергшихся изменению.

Если для разрешения сложившейся ситуации не достаточно смещения времени движения одного поезда и ближайших поездов или коррекция вызывает значительные изменения расписания движения, то применяются другие методы поиска свободного маршрута, например, смена платформы приема поезда.

В каждом подобном случае предлагается несколько вариантов решения, среди которых выбирается лучший на взгляд ответственного лица, принимающего решение.

Планирование событий для маневровых работ

В целях предупреждения затруднительных и аварийных ситуаций дежурный обязан планировать заранее как поездную, так и маневровую работу. В большинстве случаев удается запланировать работу на сутки вперед по каждому событию и зафиксировать в суточном плане-графике работы станции. Но бывают периоды большой загрузки станции по поездной и маневровой работе, в которые приходится принимать новые решения в оперативном порядке. Дежурный должен изыскивать все доступные ресурсы времени, инфраструктуры и подвижного состава, чтобы выдерживать график движения.

Например, поезд N по расписанию отправляется со станции в момент времени t_{dep} . В соответствии с технологическим процессом для посадки пассажиров состав должен быть подан на платформу заблаговременно — за t_m мин (для поездов дальнего следования — за 40 мин, для пригородных поездов — за 25 мин). Таким образом, интервал времени, в течение которого может выполняться маневровая работа: $[t_{rel}; t_{dep} - t_m]$, где t_{rel} — время освобождения платформы предыдущим поездом.

Для отправляющихся поездов в парк или депо доступный интервал выглядит следующим образом: $[t_{arr} + t_n; t_{next}]$, где t_{arr} — время прибытия поезда на платформу; t_n — время, необходимое для выгрузки пассажиров, санитарной обработки вагонов и пр.; t_{next} — время прибытия следующего поезда на эту же платформу.

Сложность принятия решения здесь возникает, когда требуется расставить приоритеты и определить порядок выполнения работ. Некоторые маневровые работы должны быть выполнены в ближайшее время, другие могут быть отсрочены и перенесены в свободные временные окна в будущем. Но при этом необходимо учесть, как эти маневры повлияют на выполнение других работ в те моменты времени, в которые переносятся. Кроме этого, алгоритмы автоматического планирования поездной и маневровой работы должны учитывать следующие параметры:

- возможные окна выполнения поездной работы;
- приоритет (чем меньше остается доступный интервал для выполнения поездной или маневровой работы, тем выше приоритет; в отдельных случаях приоритет маневрового события может быть выше приоритета прибывающего/отправляющегося поезда);
- эффективность использования ресурсов;
- текущую ситуацию на станции (при одинаковом приоритете время для маневровой работы преимущественно выбирается в периоды наименьшей плотности движения по станции).

Прогноз положения поезда на станции и времени использования путей.

Обеспечение безопасности

При расчете суточного плана-графика работы станции для каждого поезда прогнозируется время начала движения по горловине станции, маршрут следования, скорость движения с учетом разрешенной скорости и ограничений. Маршруты выбираются так, чтобы они не скрещивались в одно время с другими маршрутами. Особое внимание уделено зависимостям стрелок. Так, положение одной стрелки в замкнутом маршруте определяет состояние других стрелок в охранном положении. При расчете маршрута движения между поездами в большинстве случаев предусматривается свободная секция и обеспечиваются интервалы безопасности следования поездов. Возможно приготовление как полного маршрута, от начала до точки назначения (стояночный путь парка, платформы или выход со станции), так и частичных маршрутов — коротких участков до промежуточной точки (маршрутный, маневровый светофор), что позволяет полнее использовать ресурсы путевого развития для организации свободных маршрутов.

Изменение времени стоянки поездов

Для станций сквозного и комбинированного типов предусмотрена функция, позволяющая сократить время стоянки поезда в случае его опоздания. При коррекции времени стоянки учитываются последовательность и тип поездов, движущихся по перегону до следующей станции. Необходимость учета типа поезда обусловлена разными скоростями движения по перегонам и приоритетом поездов. Сокращение времени стоянки пассажирских поездов на промежуточных станциях применяется для компенсации отставания от графика. Ограничить стоянку менее величины опоздания нельзя, так как недопустимо отправлять поезд раньше его времени отправления.

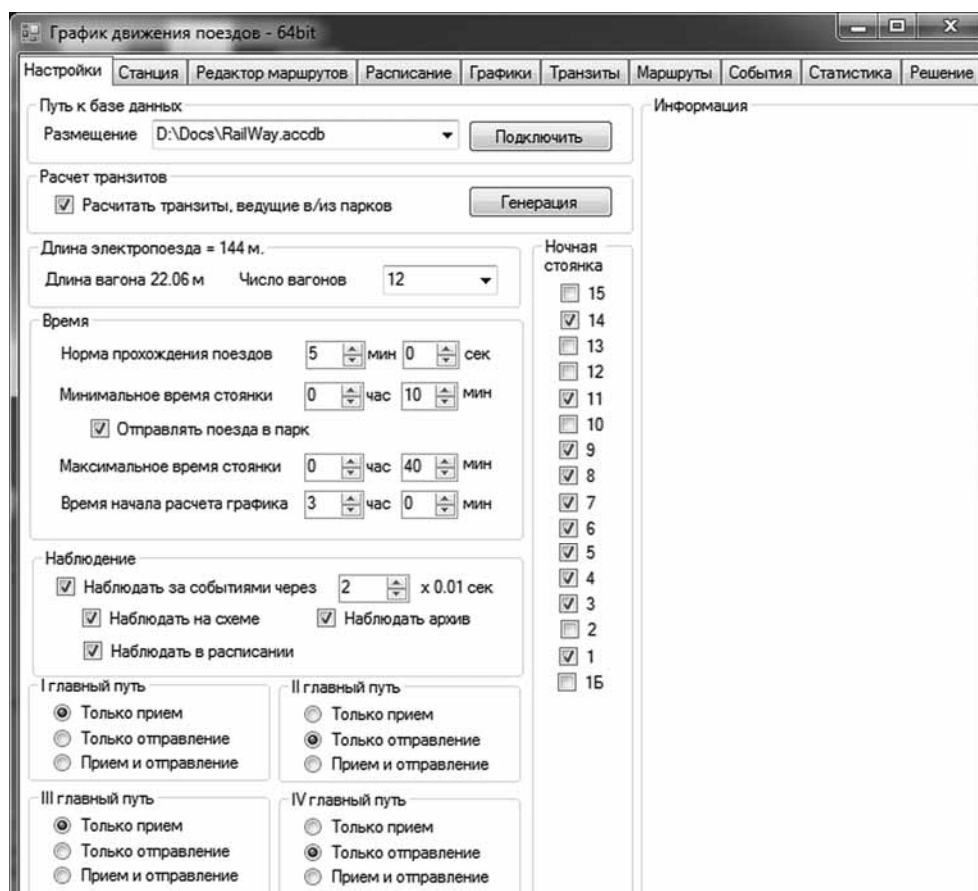
Для некоторых поездов, наоборот, может быть добавлено время стоянки, например, для пропуска скоростных поездов или сокращения общего отставания от графика.

Выбор пути приема для прибывающего поезда

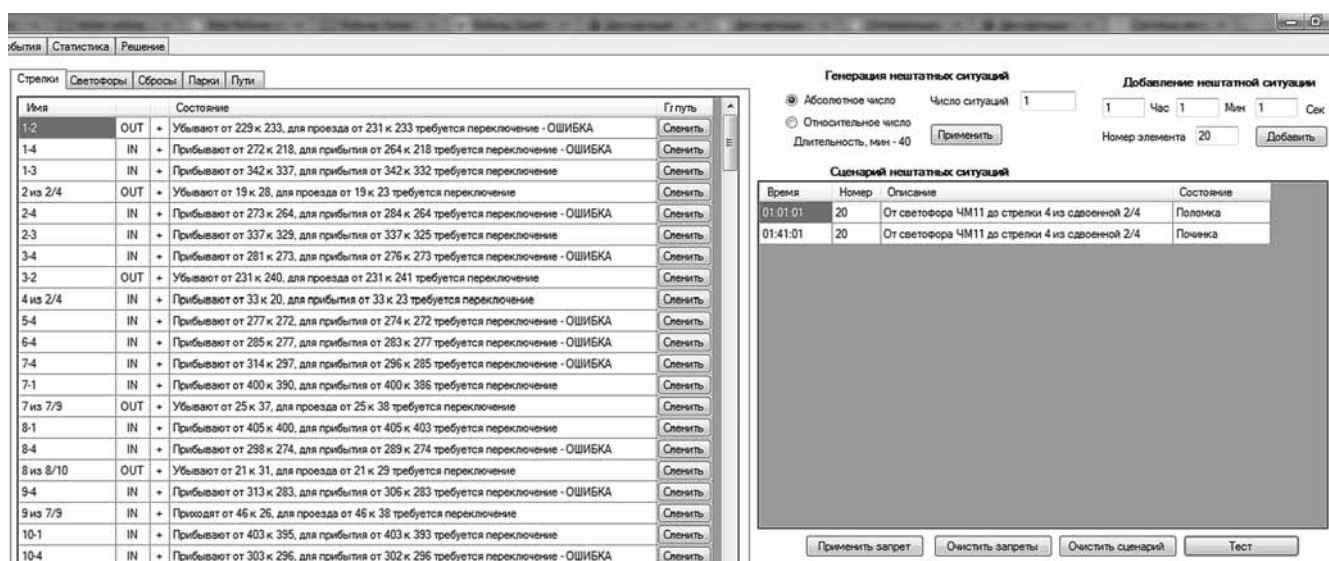
График движения поездов сейчас является основным технологическим документом по организации перевозочного процесса. На железных дорогах России и стран СНГ действуют два

типа графиков — нормативный и исполненный. Нормативный график составляется на длительный срок инженерами-графистами, как правило, с использованием компьютерных программ. Тем не менее имеет место расхождение между нормативным и исполненным графиком. Оно возникает вследствие того, что составленный на длительный срок нормативный график не может учесть реальную эксплуатационную обстановку, соответствующую текущей работе. Дежурному приходится в оперативном режиме подстраивать работу станции под исполняемый график [14]. В сложных ситуациях не всегда возможно принять поезд на запланированный в расписании путь (платформу), тогда необходимо выбрать другой путь, найти и приготовить свободный маршрут.

В разработанном алгоритме для дежурного предусмотрена функция динамического расчета обработки поездов на ближайшее время с указанием преимущественных путей приема. Эта функция также позволяет технологу автоматизированно формировать расписание станции на сутки и более, рассматривая условия и удобство приема на различные пути. Алгоритм анализирует график движения и оборот локомотивов, назначает необходимые маневровые работы по



■ Рис. 4. Панель настроек



■ Рис. 5. Пример моделирования нештатной ситуации

станции, при этом вычисляет наиболее целесообразные места размещения поездов на станции с учетом специализации путей, их длины, последующей работы, длин и типов поездов и других параметров (рис. 4).

Принятие решения в нештатных и аварийных ситуациях

Интерфейс АРМ дежурного предоставляет информацию обо всех поездах на конкретном участке, состоянии всех сигналов и стрелок и контролирует движение поездов в соответствии с графиком движения. В штатном режиме работы заблаговременно для каждого поезда автоматически выполняются поиск и приготовление маршрута движения. Как только оптимальный маршрут для этого поезда найден, он предлагается для подтверждения дежурному по станции, и если дежурный согласен с выбором, то выдаются управляющие команды на аппаратуру сигнализации, централизации, блокировки. В другом случае дежурный имеет возможность вручную задать необходимый маршрут движения поезда. Таким образом, при ежедневном исполнении повторяющегося графика движения установка маршрута выполняется автоматически, что снижает нагрузку на дежурного. При возникновении нештатной ситуации может потребоваться изменение плана обработки поездов. В этом случае программное обеспечение позволяет рассчитать моменты приема и обработки поездов, маршруты движения, пути приема и прочее до момента восстановления графика движения. В процессе перерасчета суточного плана-графика учитываются приоритеты обработки и категории поездов, выбираются оптимальные маршруты движения

с учетом развития ситуации и прогнозов движения по критерию наискорейшего восстановления штатного режима работы станции.

Были промоделированы следующие нештатные ситуации:

- неисправность стрелочного перевода;
- остановка состава в горловине станции на 10, 30, 60 мин;
- обрыв контактного провода;
- опоздание поезда дальнего следования по прибытию на 20, 40, 90 мин в разное время суток;
- опоздание пригородного поезда на 10, 20 мин в час пик.

Интерфейс имитации нештатной ситуации — поломки пути длительностью 40 мин — представлен на рис. 5.

Здесь показан пример процесса работы алгоритма, в котором оцениваются варианты маршрутов для каждого поезда. Отклоненные варианты отмечены словом «Ошибка». Номерами обозначены элементы путевого развития: стрелки, светофоры, стояночные пути и др. Кнопкой «Сменить» можно задать маршрут вручную.

При имитации нештатных ситуаций обнаружено, что в большинстве случаев локальных непродолжительных нарушений расписания достаточно назначить иной маршрут или пути приема, чтобы реализовать план-график движения. Перерасчет расписания для разрешения моделируемых ситуаций всегда выполнялся за приемлемое время и не превышал 55 с.

Ведение журналов и регистрация действий дежурного

Помимо вышеописанных обязанностей дежурный по станции ведет различную документа-

цию: журнал движения поездов, журнал диспетчерских распоряжений, журнал поездных телефонограмм, журналы осмотра и т. п.

Журнал движения поездов и локомотивов — основной документ для регистрации прибытия, отправления и проследования поездов по станции. Записи в журнал на всех станциях делает дежурный по станции или оператор под непосредственным наблюдением дежурного по станции, опираясь на «Инструкцию по движению поездов и маневровой работе на железных дорогах РФ» [11]. В журнал записываются все без исключения прибывающие, отправляющиеся и проходящие станцию безостановочно поезда, одиночно следующие локомотивы, толкачи и другие подвижные единицы несъемного типа. Запись в журнале — это основание для передачи соседним станциям и поездному диспетчеру сведений о прибытии (возвращении), отправлении и проследовании поездов, при этом только своевременная информация об отправляемых и прибывающих поездах обеспечивает их прием без задержек у входного сигнала и на пути, предусмотренные для этих операций технико-распорядительным актом станции [15].

Для упрощения работы дежурного и повышения эффективности работы введена функция, которая ведет журнал движения поездов в соответствии с инструкцией. Заполненный журнал можно экспортировать в документы Excel или Word для последующего редактирования или печати.

Для контроля качества работы дежурного предусмотрен журнал регистрации его действий. Например, если дежурный не подтверждает предлагаемое автоматизированной системой решение, то он с ее помощью формирует альтернативный маршрут, и его решение будет зафиксировано в журнале.

Заключение

В статье предложено развитие управляющих функций автоматизированной системы для уровня местного управления поездной и грузовой работой. Автоматизированная система помощи дежурному по станции для решения задачи выбора

и приготовления маршрута в штатных и аварийных ситуациях позволит значительно снизить нагрузку на дежурного и повысить безопасность управления. Например, можно автоматизировать анализ путевого развития станции для выбора возможных альтернативных маршрутов движения при неисправности объектов инфраструктуры; автоматизировать процедуру приготовления маршрута; проводить оперативный контроль соблюдения расписания; в случае нарушения графика движения — выполнить перепланирование поездной и маневровой работы для предстоящих событий с целью минимизировать опоздания и пр.

Создано программное обеспечение для АРМ дежурного по станции, которое включает следующие функции:

- интерфейс разработки схемы путевого развития станции. Он позволяет создавать схему станции из библиотеки созданных интерактивных элементов: участки пути, стояночные пути (приема-отправления, парковые, тупики), маневровые и маршрутные светофоры, стрелки и др.;

- расчет суточного плана-графика работы станции (исполняемого расписания) на основании схемы станции и расписания движения поездов. По информации о времени движения поездов и пункте следования автоматически строятся маршруты движения так, чтобы выполнялись требования безопасности (нескрещение маршрутов, интервалы следования, скорость) и точность исполнения расписания;

- динамическое перестроение суточного плана-графика работы станции — выполняется по указанию дежурного в любой момент времени в случае нарушения расписания или для разрешения сложной или аварийной ситуации. При этом алгоритм расчета расписания позволяет выполнять анализ эффективности расписания и использования инфраструктуры станции.

Программное обеспечение АРМ дежурного обладает свойством универсальности и может быть использовано для различных станций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-13207.

Литература

1. Положение о железнодорожной станции от 29.12.2006. <http://www.referent.ru/1/120253> (дата обращения: 06.12.2013).
2. Котик М. А., Емельянов А. М. Природа ошибок человека-оператора: на примере управления транспортными средствами. — М.: Транспорт, 1993. — 251 с.
3. Гапанович В. А., Грачев А. А. Системы автоматизации и информационные технологии управления перевозками на железных дорогах: учебник для вузов железнодорожного транспорта. — М.: Маршрут, 2006. — 544 с.
4. Коган Ю. Л. Ввод в действие крупнейшего в мире центра управления эксплуатационным процессом железнодорожной компании Берлингтон Нортен (США) // Железнодорожный транспорт. Сер. Желез-

нодородный транспорт за рубежом: ЭИ/ЦНИИТЭИ. 1995. № 5. С. 7–11.

5. **Автоматизация** планирования и управления перевозочным процессом на Канадских национальных железных дорогах // Железнодорожный транспорт. Сер. Железнодорожный транспорт за рубежом: ЭИ/ЦНИИТЭИ. 1993. № 3. С. 13–23.
6. **Автоматизация** управления эксплуатационным процессом на высокоскоростной сети «СИНКАН-СЭН» (Япония) // Железнодорожный транспорт. Сер. Железнодорожный транспорт за рубежом: ЭИ/ЦНИИТЭИ. 1992. № 11. С. 16–18.
7. **Йошида Т.** Автоматизированная система управления движением поездов в Японии // Железные дороги мира. 1996. № 12. С. 42–47.
8. **Централизация** управления поездной работой // Железные дороги мира. 1998. № 10. С. 55–58. <http://scbist.com/zhurnal-zheleznye-dorogimira/18793-zhdm-10-1998-centralizaciya-upravleniya-poezdnoi-rabotoi.html> (дата обращения: 06.12.2013).
9. **Фурсов С. И.** МПЦ Ebilog 950 – эволюция системы // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 5. С. 4–7.
10. **Автоматизированная** система ведения и анализа графика исполненного движения ГИД «Урал-

ВНИИЖТ»: руководство по эксплуатации/ ОАО «РЖД». – Екатеринбург, 2004. – 307 с.

11. **Инструкция** по движению поездов и маневровой работе на железных дорогах Российской Федерации от 02.10.1993 № ЦД-206. <http://www.dzd-ussr.ru/doc/norm/idp.html> (дата обращения: 06.12.2013).
12. **Инструкция** по учету выполнения графика движения пассажирских, пригородных и грузовых поездов от 20.05.1996. № ЦЧУ-377. <http://lawru.info/base84/part3/d84ru3341.html> (дата обращения: 06.12.2013).
- О выполнении** расписания движения пригородных поездов по пунктам посадки (высадки) пассажиров: Распоряжение ОАО «РЖД» от 05.01.2013. № 152р. <http://scbist.com/2013-god/22904-152r-ot-25-yanvarya-2013-g-o-vypolnenii-raspisaniya-dvizheniya-prigorodnyh-poezdov-po-punktam-posadki-vysadki-passazhirov.html> (дата обращения: 06.12.2013).
13. **Орлюк А. А., Былинский Ю. В.** Система составления графика движения и способ ее работы // Автоматика, связь, информатика. 2004. № 5. С. 41–43.
14. **Основные** формы поездной и технической документации. <http://scbist.com/zh-d-stati/2012-statya-osnovnye-formy-poezdnoi-i-tehnicheskoi-dokumentacii.html> (дата обращения: 05.08.2013).

UDC 602-53.55

Automation Issues of Train Control

Branishtov S. A.^a, PhD, Tech., Acting Head of Labs, branishtov@mail.ru

Tumchenok D. A.^a, Programmer Engineer, Post-Graduate Student, dmitriy_tumchenok@mail.ru

Shirvanyan A. M.^a, Programmer Engineer, Post-Graduate Student, artshirvanyan@mail.ru

^aV. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, 65, Profsoiuznaia St., 117342, Moscow, Russian Federation

Purpose: The paper deals with the problem of operational control of trains at a large railway junction. Examples of the existing train control systems show that station level of control is poorly automated. The goal of this paper is to develop algorithms to automate a number of tasks of operational control at a station. **Methods:** The problem of planning shunting works, design of daily process schedule of a station, selection and assembling routes have been studied. **Results:** Algorithmic solutions for design of daily process schedule of a station have been developed and described, that makes the process user friendly and easy as well as fosters flexibility and efficiency of decision making on handling trains in complex and contingency situations. **Practical relevance:** Algorithmic solutions and research results have been implemented in developing software for the workstations of a duty officer and a process engineer. They facilitate staff duties, reduce error level and enhance control safety.

Keywords — Train Control, Decision-Making Support System, Daily Schedule, Routing, Shunting Work.

References

1. *Polozhenie o zheleznodorozhnoi stantsii ot 29.12.2006* [The Position of the Railway Station]. Available at: <http://www.referent.ru/1/120253> (accessed 06 December 2013).
2. Kotik M. A., Emel'janov A. M. *Priroda oshibok cheloveka-operatora: na primere upravleniia transportnymi sredstvami* [The Nature of the Human Operator Errors: on the Example of Control Transportation]. Moscow, Transport Publ., 1993. 251 p. (In Russian).
3. Gapanovich V. A., Grachev A. A. *Sistemy avtomatizatsii i informatsionnye tekhnologii upravleniia perevozkami na zheleznykh dorogakh: uchebnik dlia vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Automation Systems and Information Technology of Transportation Control on Railways]. Moscow, Marshrut Publ., 2006. 544 p. (In Russian).
4. Kogan U. L. Commissioning of the World's Largest Management Center of Operational Process by the Railway Company Burlington North (USA). *Zheleznodorozhnyi*

transport. Ser. Zheleznodorozhnyi transport za rubezhom. JeI. CNIITJeI Publ., 1995, no. 5, pp. 7–11 (In Russian).

5. Automation of Planning and Control Traffic of Transportation on Canadian National Railways. *Zheleznodorozhnyi transport. Ser. Zheleznodorozhnyi transport za rubezhom.* JeI. CNIITJeI Publ., 1993, no. 3, pp. 13–23 (In Russian).
6. Automating of Control of the Operational Process in High-Speed Network “Sinkasen” (Japan). *Zheleznodorozhnyi transport. Ser. Zheleznodorozhnyi transport za rubezhom.* JeI. CNIITJeI Publ., 1992, no. 11, pp. 16–18 (In Russian).
7. Yoshida T. Automatic Train Control System in Japan. *Zheleznye dorogi mira*, 1996, no. 12, pp. 42–47 (In Russian).
8. Centralization of Train Operation. *Zheleznye dorogi mira*, 1998, no. 10, pp. 55–58 (In Russian).
9. Fursov S. I. MPC Ebilog 950 – Evolution of the System. *Avtomatika, svjaz', informatika*, 2011, no. 5, pp. 4–7 (In Russian).

10. *Avtomatizirovannaiia sistema vedeniia i analiza grafika ispolnennogo dvizheniia GID "Ural-VNIIZhT"* [Automatic System of Analysis and Graphics of Done of Movement GID "Ural-VNIIZhT"]. Ekaterinburg, JSC "Russian Railways" Publ., 2004. 307 p. (In Russian).
11. *Instruktsiia po dvizheniiu poezdov i manevrovoi rabote na zheleznykh dorogakh RF ot 02.10.1993 N CD-206* [Instruction on the Movement of Trains and Shunting Work on Railways in Russian Federation]. Available at: <http://www.dzd-ussr.ru/doc/norm/idp.html> (accessed 06 December 2013).
12. *Instruktsiia po uchetu vypolneniia grafika dvizheniia passazhirskikh, prigorodnykh i gruzovykh poezdov ot 20.05.1996 N TsChU-377* [Instruction of Account of the Schedule of the Passenger, Commuter and Freight Trains N CCU-377]. Available at: <http://lawru.info/base84/part3/d84ru3341.html> (accessed 06 December 2013).
13. *O vypolnenii raspisaniia dvizheniia prigorodnykh poezdov po punktam posadki (vysadki) passazhirov: Rasporiashenie OAO "RZhD" ot 25.01.2013 N 152r* [On the Implementation Schedule of Commuter Trains on the Point of Landing Passengers]. Available at: <http://scbist.com/2013-god/22904-152r-ot-25-yanvarya-2013-g-o-vypolnenii-raspisaniya-dvizheniya-prigorodnykh-poezdov-po-punktam-posadki-vysadki-passazhirov.html> (accessed 06 December 2013).
14. Orlyuk A. A., Bylinskij Ju. V. The Scheduling System and the Way it Works. *Avtomatika, sviaz', informatika*, 2004, no. 5, pp. 41–43 (In Russian).
15. *Osnovnye formy poezdnoi i tekhnicheskoi dokumentatsii* [The Main Forms of Train and Technical Documentation]. Available at: <http://scbist.com/zh-d-stati/2012-statya-osnovnye-formy-poezdnoi-i-tehnicheskoi-dokumentatsii.html> (accessed 05 August 2013).

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 ссылку 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»), т. к. 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 в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, подающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, подающихся 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 предоставляйте в двух вариантах: первый на языках оригиналов и второй — перевод (не транслитерация, а перевод) списка на английский язык.

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: ius.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru

УДК 61:007; 616-082

МНОГОУРОВНЕВАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ЛИКВИДАЦИИ МЕДИКО-САНИТАРНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

З. М. Юлдашев^а, доктор техн. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, РФ

Цель: разработка структуры многоуровневой пространственно-распределенной измерительно-информационной системы, обеспечивающей повышение эффективности устранения медико-санитарных последствий чрезвычайных ситуаций на различных его этапах. **Методы:** автоматизация сбора, обработки и анализа информации о пострадавших, наличии текущего резерва койко-мест лечебных учреждений; поддержка принятия решений врачей-спасателей медицины катастроф при оценке тяжести состояния пострадавшего; поддержка принятия решений по эвакуации пострадавшего в профильные лечебные учреждения; телемедицинское прослеживание транспортировки пострадавшего; информирование персонала лечебного учреждения о динамике состояния поступающего пострадавшего. **Результаты:** описаны задачи, решаемые на этапах ликвидации медико-санитарных последствий чрезвычайных ситуаций, и предложены пути повышения эффективности их решения. Каждый уровень системы используется при решении задач конкретного этапа ликвидации последствий: поиска пострадавших, неинвазивной регистрации и оценки жизненно важных медико-биологических показателей, оценки тяжести состояния пострадавшего, сортировки, выбора лечебных учреждений для эвакуации, транспортировки и оперативного приема пострадавшего для оказания квалифицированной или специализированной медицинской помощи в лечебном учреждении. Эффективность использования системы обусловлена сокращением времени решения задач на этапах ликвидации медико-санитарных последствий, снижением уровня ошибок врачей-спасателей за счет информационной поддержки, повышением достоверности оценки тяжести состояния пострадавшего. Система содержит носимые измерительно-информационные системы врачей-спасателей для автоматизированной оценки тяжести состояния пострадавших; мобильную информационную систему руководителя бригад спасателей для решения задач сортировки пострадавших и выбора лечебных учреждений для их эвакуации; геоинформационную систему поиска пострадавших при чрезвычайных ситуациях, получающую информацию с web-камер оптического и инфракрасного диапазонов; информационную систему регионального центра медицины катастроф; информационные системы лечебных учреждений, обеспечивающих прием пострадавших и оказание им квалифицированной или специализированной медицинской помощи. **Практическая значимость:** предложенная структура информационной системы позволяет сократить потери времени и исключить ошибки врачей-спасателей на этапах ликвидации медико-санитарных последствий чрезвычайных ситуаций, повысить достоверность оценки тяжести состояния и сортировки пострадавших.

Ключевые слова — информационная система, чрезвычайные ситуации, ликвидация медико-санитарных последствий, эффективность, этапы ликвидации, автоматизация.

Введение

Статистика чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного и природного характера последних десятилетий показывает увеличение количества ЧС в Российской Федерации и во всем мире (тайфуны, землетрясения, аварии на транспорте и промышленных объектах), в которых пострадало большое количество людей. Значительные потери людей при таких ЧС обусловлены сложностью сортировки и эвакуации большого количества пострадавших в течение ограниченного времени и, как следствие, несвоевременным оказанием им необходимой медицинской помощи. Поэтому проблема повышения эффективности ликвидации медико-санитарных последствий ЧС на всех этапах ее проведения является актуальной.

Основные причины, вызывающие снижение оперативности и эффективности устранения медико-санитарных последствий ЧС, — продолжительный поиск пострадавших; ошибки и недостаточный уровень достоверности оценки тяжести состояния пострадавшего из-за работы врачей-спасателей в экстремальных условиях; ошибки

сортировки и выбора профильной клиники для эвакуации пострадавших; потери ценного времени при транспортировке, приеме пострадавших в лечебные учреждения и переходе к оказанию квалифицированной или специализированной медицинской помощи.

Перечисленные причины могут быть устранены разработкой и внедрением на регионально-федеральном уровне многоуровневой пространственно-распределенной информационной системы, позволяющей на всех этапах ликвидации медико-санитарных последствий ЧС оперативно решать задачи поиска пострадавших, достоверной оценки тяжести состояния, сортировки, своевременной эвакуации и транспортировки пострадавших в профильные медицинские учреждения в соответствии с видом и характером полученной травмы за счет автоматизации решения задач этапов, использования информационной поддержки принятия решения врачей-спасателей.

Цель проводимого исследования — повышение эффективности устранения медико-санитарных последствий ЧС на различных этапах за счет использования многоуровневой пространственно-

распределенной измерительно-информационной системы, обеспечивающей автоматизацию сбора, обработки и анализа информации о пострадавших, наличии текущего резерва койко-мест в профильных клиниках лечебных учреждений различных ведомств; поддержку принятия решений специалистов медицины катастроф при оценке тяжести состояния пострадавшего; принятие решений по эвакуации пострадавшего в профильные лечебные учреждения; подготовку медперсонала лечебного учреждения к приему пострадавшего и оказанию ему квалифицированной или специализированной медицинской помощи.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи разработки:

1) геоинформационной системы оперативного поиска пострадавших с использованием web-камер оптического и инфракрасного диапазонов, установленных на беспилотных летательных аппаратах;

2) носимой измерительно-информационной системы врача-спасателя, обеспечивающей в течение ограниченного времени автоматизированный сбор, обработку и анализ жизненно важной медико-биологической информации в целях достоверной оперативной оценки тяжести состояния пострадавшего;

3) мобильной информационной системы (ИС) руководителя бригад спасателей, позволяющей автоматизировать процесс сортировки по тяжести состояния и характеру травмы пострадавших и выбор профильной клиники лечебного учреждения для их эвакуации с учетом вида и характера травм, тяжести состояния, ведомственной принадлежности лечебного учреждения, близости к эпицентру ЧС;

4) ИС регионального центра медицины катастроф, обеспечивающей взаимодействие ИС врачей-спасателей и лечебных учреждений при оценке тяжести состояния, телемедицинское сопровождение пострадавших во время транспортировки, формирование динамически изменяющейся базы данных о резерве койко-мест в лечебных учреждениях различных ведомств, формирование базы данных об эвакуации пострадавших в лечебные учреждения;

5) ИС лечебных учреждений для получения оперативной информации о виде и характере травмы, тяжести состояния и медико-биологических показателях пострадавших, поступающих в профильную клинику, в целях оперативного приема и назначения квалифицированной или специализированной медицинской помощи.

Решение задач исследования

Анализ сформулированных задач показывает, что на всех этапах ликвидации медико-санитарных последствий ЧС используются ИС. Для син-

теза архитектуры ИС, обеспечения необходимых каналов информационного обмена между уровнями и элементами системы, уточнения задач, решаемых на каждом уровне ИС, необходимо рассмотреть, какие задачи решаются на этапах ликвидации медико-санитарных последствий ЧС.

При ЧС, имеющих пространственно-распределенный характер разрушений (землетрясение, наводнение, ураганы и т. д.), на *первом этапе* осуществляется поиск пострадавших. В случае ограниченной в пространстве ЧС первый этап не всегда востребован.

На *втором этапе* спасательной операции врачу медицины катастроф необходимо оценить тяжесть состояния пострадавшего. Для этого он должен определить комплекс жизненно важных медико-биологических показателей пострадавшего: частоту пульса, частоту дыхания, уровень гематокрита, зрачковую реакцию, целостность организма — и на их основе оценить тяжесть состояния, пользуясь известными методиками. Эффективность решения задачи второго этапа (достоверность оценки тяжести состояния, продолжительность этапа) в значительной степени определяется точностью и оперативностью оценки жизненно важных медико-биологических показателей и ошибками, которые допускает врач-спасатель из-за работы в экстремальных условиях [1].

Третий этап — сортировка пострадавших на группы риска по стандартным методикам. Эффективность решения задачи определяется в основном оперативностью и ошибками врача-спасателя при использовании методики разделения на группы риска.

Четвертый этап — выбор лечебного учреждения для оказания медицинской помощи в соответствии с видом и характером травмы пострадавшего, тяжестью состояния и дальнейшая эвакуация пострадавшего в медицинское учреждение. Эффективность решения задачи данного этапа часто снижается из-за отсутствия у спасателя оперативной информации о резерве койко-мест профильных клиник лечебных учреждений различных ведомств, которые находятся вблизи эпицентра ЧС. И как следствие — эвакуация пострадавшего в лечебное учреждение, расположенное дальше, потеря времени на транспортировку пострадавшего.

Пятый этап — транспортировка пострадавшего в лечебное учреждение. Оперативность решения данной задачи зависит от выбора маршрута транспортировки. В связи с этим предлагается использовать систему навигации. На этом этапе целесообразно применять ИС для телемедицинского сопровождения пострадавшего. Это позволит оценивать динамику жизненно важных медико-биологических показателей пострадавших и передавать информацию в лечебные учрежде-

ния, которые будут заранее готовиться к приему пострадавших с конкретным видом травм и состоянием тяжести.

Шестой этап — прием пострадавшего в профильную клинику лечебного учреждения и назначение квалифицированной или специализированной медицинской помощи. Для ее назначения врачи лечебного учреждения должны иметь полную информацию о динамике состояния пострадавшего, характере травмы, подготовить технические средства оказания медицинской помощи. Оперативность решения задачи этапа достигается за счет предварительного информирования врачей лечебного учреждения о времени поступления в клинику конкретного пострадавшего на основе телемедицинского сопровождения и получения информации о динамике состояния пострадавшего, характере изменения жизненно важных медико-биологических показателей.

Пути решения задач разработки многоуровневой информационной системы

Для повышения эффективности поиска пострадавших в случае значительных в пространстве разрушений могут быть использованы беспилотные летательные аппараты, снабженные синхронно работающими web-камерами оптического и инфракрасного диапазонов. Поиск пострадавших осуществляется в инфракрасном диапазоне, а локализация их на месте и скученность будут определяться по снимку местности в оптическом диапазоне. Эта информация будет оперативно передаваться спасателям при их передвижении к эпицентру ЧС через мобильную ИС руководителя бригады врачей-спасателей. Геоинформационная система поиска пострадавших представляет первый уровень системы.

Задача оперативного съема медико-биологической информации с пострадавшего и определения тяжести состояния решается за счет использования беспроводных микропроцессорных средств неинвазивной оценки уровня гематокрита, пульса, частоты дыхания. Показатели целостности организма и дополнительная информация о пациенте вводятся врачом-спасателем с помощью планшета с сенсорным экраном, на который выводятся пиктограммы и необходимые подсказки врачу-спасателю для исключения ошибок в его действиях. Носимая врачом-спасателем измерительно-информационная система представляет собой второй уровень многоуровневой системы [2].

Третий уровень системы — мобильная ИС, расположенная на автомобиле руководителя бригад врачей-спасателей. Она реализуется на вычислительном комплексе высокой производительности и должна обеспечивать получение и обмен информации с носимых систем врачей-спа-

сателей о пострадавших, сортировку пострадавших, а также, имея доступ к ИС регионального центра медицины катастроф по каналу космической связи, — автоматизированный выбор медицинских учреждений для эвакуации пострадавших на основе информации о резерве койко-мест профильных клиник лечебных учреждений.

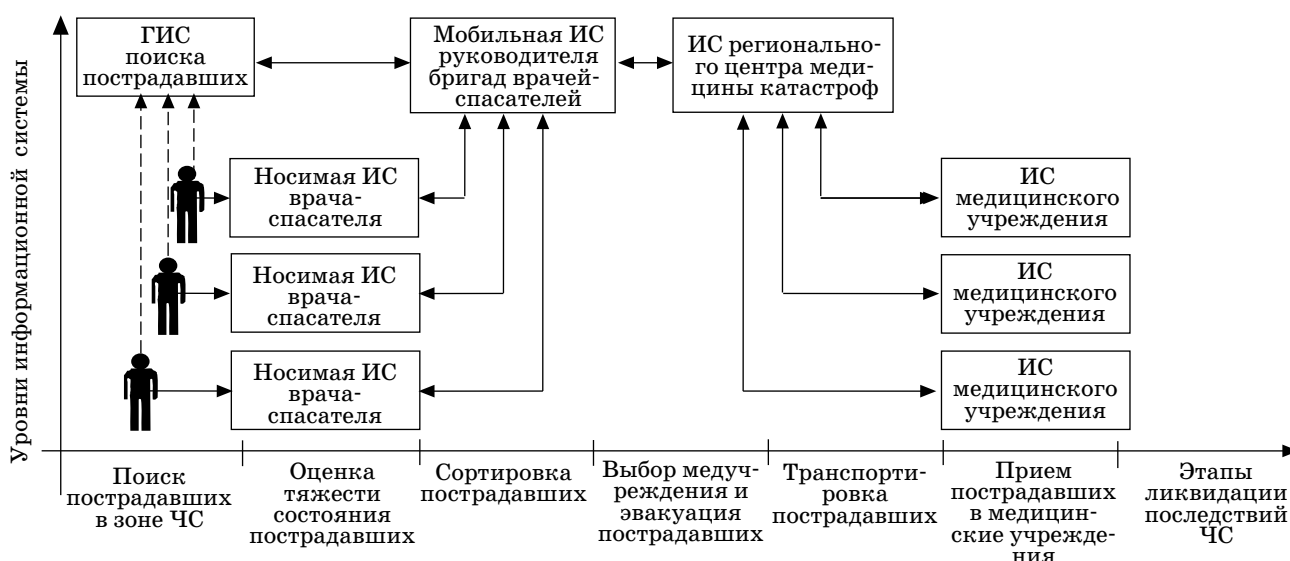
Четвертый уровень системы образован ИС регионального центра медицины катастроф. Система получает от мобильной системы информацию об эвакуации пострадавших в лечебные учреждения, обеспечивает процесс телемедицинского сопровождения при транспортировке пострадавших в лечебные учреждения, направляет информацию в ИС лечебных учреждений о времени поступления пострадавшего, информацию о динамике состояния пострадавшего, формирует базу данных текущего резерва койко-мест профильных клиник лечебных учреждений на основе оперативного запроса этой информации с лечебных учреждений [3].

Пятый уровень системы представлен ИС лечебных учреждений региона. Она используется для обеспечения телемедицинских консультаций врачей-спасателей профильными специалистами лечебного учреждения при затруднениях в оценке тяжести состояния и выборе профильной клиники стационара, предварительного информирования врачей лечебного учреждения о динамике состояния пострадавшего в целях оперативного назначения квалифицированной или специализированной медицинской помощи. Эта система формирует базу данных о динамике резерва койко-мест профильных клиник лечебного учреждения, передает информацию в региональный центр медицины катастроф о динамике состояния здоровья пострадавших, поступивших в стационар.

В соответствии с изложенным структура многоуровневой пространственно-распределенной системы приобретает следующую архитектуру (рисунк).

Носимые измерительно-информационные системы врачей-спасателей и ИС лечебных учреждений образуют пространственно-распределенную архитектуру, а мобильная система руководителя бригады врачей-спасателей и ИС регионального центра медицины катастроф образуют верхний уровень системы.

Обмен информацией между носимыми системами врачей-спасателей и мобильной ИС целесообразно обеспечить по каналу Wi-Fi, так как эти системы работают в эпицентре ЧС. Канал информационного обмена между мобильной системой и системой регионального центра медицины катастроф целесообразно организовать с использованием космической связи, так как в условиях ЧС мобильная сотовая связь, как правило, не работает. Канал информационного обмена между си-



■ Структура многоуровневой пространственно-распределенной системы и этапы ликвидации медико-санитарных последствий ЧС

стемами центра медицины катастроф и лечебных учреждений в условиях ЧС с точки зрения обеспечения надежности работы целесообразно организовать с использованием космической связи.

Заключение

Повышение эффективности ликвидации медико-санитарных последствий ЧС должно осуществляться путем снижения ошибок человеческого фактора — врачей-спасателей при оценке тяжести состояния пострадавшего, сортировке пострадавших, выборе профильной клиники лечебного учреждения для оказания квалифицированной или стационарной медицинской помощи в соответствии с характером и видом травмы; снижения потерь времени на этапах поиска пострадавших, съема и регистрации жизненно важных медико-биологических показателей пострадавших, оценки тяжести их состояния, сортировки, эвакуации, транспортировки пострадавших в профильные лечебные учреждения, назначения квалифицированной или специализированной медицинской помощи.

Многоуровневая пространственно-распределенная система ликвидации медико-санитарных последствий ЧС должна включать носимые измерительно-вычислительные системы врачей-спасателей, обеспечивающие неинвазивную достоверную оперативную регистрацию жизненно важных показателей пострадавших и автоматизированную оценку тяжести состояния пострадавших; мобильную систему руководителя бригад врачей-спасателей, обеспечивающую автоматизированный выбор профильных клиник лечебных учреждений для эвакуации пострадавших;

ИС регионального центра медицины катастроф, формирующую динамически изменяющуюся базу данных резерва койко-мест, телемедицинское прослеживание транспортировки пострадавших; ИС лечебных учреждений, обеспечивающих получение информации об эвакуации пострадавших и динамике тяжести состояния в целях оперативного назначения медицинской помощи.

На всех уровнях системы необходимо использовать возможность информационной поддержки принятия решений врачей-спасателей и телемедицинских консультаций профильными специалистами при оценке тяжести состояния пострадавших и выборе профильных клиник для эвакуации.

Информационный обмен между уровнями системы должен осуществляться на основе использования корпоративных каналов связи, способных сохранять работоспособность в условиях природных и техногенных ЧС.

Литература

1. Садькова Н. А. Некоторые проблемы лечебно-эвакуационного обеспечения населения в ЧС // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 4. С. 69–72.
2. Юлдашев З. М., Абувда А. М. Мобильная система телеметрического сопровождения для задач медицины катастроф // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2005. № 4. С. 30–34.
3. Ильина А. В., Попечителев Е. П., Юлдашев З. М. К вопросу оценки эффективности ликвидации медико-санитарных последствий техногенных аварий // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2003. № 4. С. 8–11.

UDC 61:007; 616-082

A Multilevel Spatially Distributed System for Elimination of Medical-Sanitary Consequences of Emergency Situations

Yuldashev Z. M.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, yuld@mail.ru

^a Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI», 5, Professor Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The objective is to develop a structure of a multi-level spatially distributed measurement-information system enhancing efficiency of elimination of medical-sanitary consequences of emergency situations at its different stages. **Methods:** Automation of collecting, processing and analyzing data on victims, availability of current reserves of beds in medical institutions; decision making support for doctors-rescuers when evaluating severity of victim condition; decision making support concerning evacuation of a victim to central medical institutions; tele-medical monitoring of victim transportation; personnel information of a medical institution on dynamics of a condition of an arriving victim. **Results:** The problems solved at elimination stages of medical-sanitary consequences of emergency situations have been described; the ways to enhance their efficiency have been proposed. Each level of the system is used for solving problems of a particular stage of consequences elimination: search of victims, non-invasive registration and estimation of vitally important biomedical indicators, evaluation of severity of victim condition, triage, selection of medical institutions for evacuation, transportation and prompt reception of a victim for rendering qualified or specialized medical aid at a medical institution. The system efficiency is determined by reduction of time for problems solution at the elimination stages of medical-sanitary consequences, decrease of error level of doctors-rescuers due to information support, increase of reliability of severity estimation of victim condition. The system contains portable measurement-information systems of doctors-rescuers for automated evaluation of victim condition, mobile information system of a head of rescue teams to solve problems of triage and selection of a medical institution for victims evacuation, geo-information system for victims search in case of emergency situations which receives information from optic and infrared range web-cameras, information system of a regional center for disaster medicine, information systems of medical institutions which provide victims reception and rendering qualified or specialized medical aid. **Practical relevance:** The proposed structure of the information system allows to reduce time and to eliminate errors of doctors-rescuers at the elimination stages of medical-sanitary consequences of emergency situations as well as to enhance reliability of evaluation of victim condition severity and triage.

Keywords — Information System, Emergency Situations, Elimination of Medical-Sanitary Consequences, Efficiency, Stages of Elimination, Automated Problem Solution.

References

1. Sadykova N. A. Some Problems of Medical-Evacuation Support of Population in Case of Emergency Situations. *Biomeditsinskaja radioelektronika*, 2010, no. 4, pp. 69–72 (In Russian).
2. Yuldashev Z. M., Abuyda A. M. A Mobile System for Telemetric Support when Solving Disaster Medicine Problems. *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2005, no. 4, pp. 30–34 (In Russian).
3. Il'ina A. V., Popechitelev E. P., Yuldashev Z. M. On the Issue of Elimination Efficiency Assessment of Medical-Sanitary Consequences of Anthropogenic. *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2003, no. 4, pp. 8–11 (In Russian).

УДК 62-50:519.6

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ВО ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА БАЗЕ МЕТОДА ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ

А. И. Шеремет^а, канд. техн. наук, доцент

А. В. Садовой^б, доктор техн. наук, профессор

^аДонбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, Украина

^бДнепродзержинский государственный технический университет, Днепродзержинск, Украина

Постановка проблемы: в ряде случаев при управлении автоматизированными электромеханическими системами необходимо устанавливать регрессионные связи между управляемыми координатами. Метод опорных векторов может успешно применяться не только для решения задач классификации и диагностирования, но и для выполнения регрессионного анализа. Целью работы является обоснование возможности применения метода опорных векторов для установления соотношений между управляемыми координатами во взаимосвязанном электроприводе с дискретными временными эквалайзерами. **Методы:** исследованы особенности и преимущества регрессии на опорных векторах, возможности применения метода опорных векторов во взаимосвязанном электроприводе. **Результаты:** проанализировано математическое описание и аналитическая структура регрессионного алгоритма на базе опорно-векторной машины; предложена функциональная схема электромеханической системы со взаимосвязанным управлением на базе дискретных временных эквалайзеров, целевая функция управления в которой формируется с помощью регрессионной модели; приведен пример выполнения регрессионного анализа программным путем с помощью MatLab SVM Toolbox. Установлено, что эталонная целевая функция, которая формируется в результате SVR-анализа, может быть изменена путем выполнения переобучения алгоритма SVR и не требует подбора специальных регрессионных зависимостей. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть применены при проектировании взаимосвязанных электромеханических систем, целевая функция которых формируется с помощью регрессионного анализа.

Ключевые слова — регрессионный анализ, целевая функция управления, электромеханическая система.

Введение

Во взаимосвязанных электроприводах, реализующих некоторую целевую функцию управления технологическим процессом, часто возникает вопрос установления функциональных, корреляционных или регрессионных связей между управляемыми координатами.

При функциональной связи каждому значению одной из координат ставится в соответствие только одно значение другой. Такую связь целесообразно использовать в детерминированных системах, подлежащих формализации с помощью математического аппарата элементарных функций.

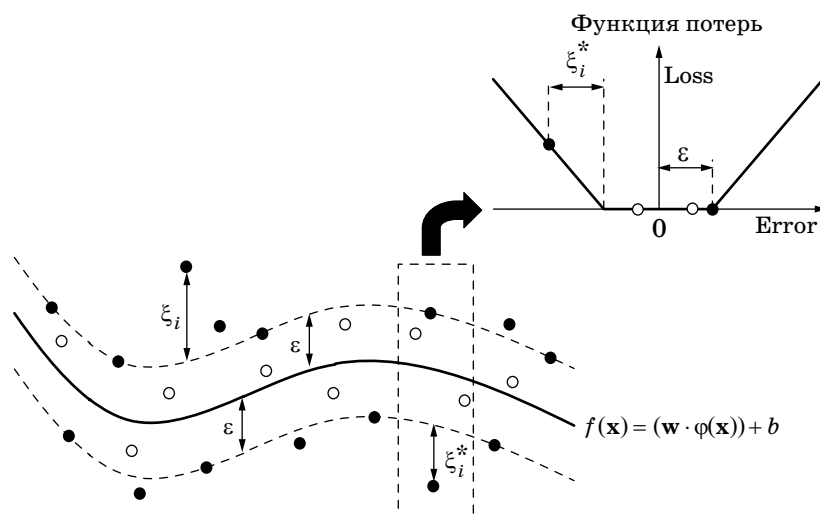
Корреляционные связи между управляемыми координатами используются при наличии статистических взаимосвязей между ними, которые иллюстрируются корреляционным полем или коэффициентом корреляции. Регрессионный анализ, в отличие от корреляционного, не определяет, насколько существенной является связь между величинами, а выполняет поиск модели этой связи в виде некоторой функции регрессии. Регрессионную связь между управляемыми координатами удобно использовать, когда отношение между ними количественно выражается в виде многочисленных комбинаций. Это могут быть как экспериментально полученные данные,

так и некоторые расчетные точки, характеризующие соотношение между управляемыми координатами.

Метод опорных векторов, общие подходы относительно возможностей использования которого в электроприводе рассмотрены в работе [1], можно применять не только для решения задачи классификации или диагностирования, но и для выполнения регрессионного анализа, что дает ряд преимуществ перед традиционными подходами. Поставим задачу применения метода опорных векторов для установления соотношений между управляемыми координатами во взаимосвязанном электроприводе с дискретными временными эквалайзерами [2] в качестве регуляторов.

Особенности и преимущества регрессии на опорных векторах

В своем нынешнем виде метод опорных векторов, или опорно-векторная машина (support vector machine — SVM), был разработан в 1995 г. в американской корпорации AT&T Bell Laboratories под руководством выдающегося ученого в сфере машинного обучения В. Н. Вапника. Изначально SVM позиционировался как алгоритм для решения классификационной задачи, однако с конца 90-х годов XX века его начали использовать и для выполнения регрессионного



■ Рис. 1. Выполнение нелинейного регрессионного анализа с помощью SVM

анализа. Для подчеркивания того, что решается именно регрессионная задача, аббревиатуру метода опорных векторов меняют с SVM на SVR (support vector regression) [3].

Преимуществом SVR перед другими методами регрессионного анализа является определение параметров регрессионной модели путем решения задачи квадратичного программирования, имеющей только одно решение.

При использовании SVM нелинейная регрессия в исходном пространстве F может рассматриваться как задача построения линейной регрессии в некотором расширенном пространстве H , которое имеет большее количество измерений, чем F . Это преобразование выполняется за счет нелинейного отображения $\varphi: F \rightarrow H$. В отличие от формулировки SVM, где гиперплоскость должна была отделять одну группу признаков от другой, в SVR гиперплоскость строится таким образом, чтобы как можно больше точек попали на нее в качестве опорных векторов или хотя бы оказались в некоторой доверительной зоне регрессии. Точки x , лежащие на этой плоскости, будут удовлетворять условию [4]

$$w \cdot x + b = 0,$$

где w — нормальный к гиперплоскости вектор.

Перпендикуляр, определяющий расстояние от гиперплоскости до начала координат, находится как $|b|/\|w\|$, где выражение $\|w\|$ называют евклидовой нормой или длиной [5] вектора w . Исходной информацией для выполнения регрессионного анализа по SVM является обучающая выборка вида $S = ((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n))$. Тогда задача линейной SVR-регрессии состоит в нахождении функции

$$f(x) = (w \cdot x) + b.$$

При нелинейной регрессии, используя нелинейное отображение, эту функцию можно представить в виде

$$f(x) = (w \cdot \varphi(x)) + b.$$

Задачу поиска оптимальной гиперплоскости SVR-анализ сводит к квадратичной задаче минимизации функционала

$$\min_{w, b, \xi, \xi^*} \left(\frac{1}{2} w^2 + C \sum_{i=1}^{\ell} (\xi_i + \xi_i^*) \right)$$

при действии ограничений

$$\begin{aligned} y_i - (w \cdot \varphi(x_i) + b) &\leq \varepsilon + \xi_i; \\ (w \cdot \varphi(x_i) + b) - y_i &\leq \varepsilon + \xi_i^*; \\ \xi_i, \xi_i^* &\geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, \ell, \end{aligned}$$

где C — положительная константа, чем больше ее значение, тем больше будет штраф ошибки; ξ_i, ξ_i^* — переменные, определяющие соответственно верхнюю и нижнюю границы погрешности обучения; ε — функция потерь (чаще всего она является кусочно-линейной — рис. 1).

Векторы выборки входят в задачу регрессии только через скалярные произведения, поэтому можно использовать отображение в пространство признаков и перейти к ядерной версии SVM [5].

На практике зачастую решается так называемая двойственная задача [5], а функция регрессии представляется в следующем виде:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{\ell} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x, x_i) + b,$$

где α_i и α_i^* — двойственные переменные, удовлетворяющие условию $0 \leq (\alpha_i, \alpha_i^*) \leq C$; $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ — ядерная функция.

Разности $\alpha_i - \alpha_i^*$ представляют собой весовые коэффициенты v_i , характеризующие вклад соответствующих опорных векторов в формирование функции регрессии.

Наиболее распространенными ядерными функциями являются следующие: линейная, гауссова радиально-базисная, полиномиальная, сигмоидальная, экспоненциальная радиально-базисная.

Исходя из практического смысла применения SVR-анализа для установления соотношений между управляемыми координатами электро-механической системы, можно порекомендовать применение линейной ядерной функции в том случае, когда является очевидной линейная связь между величинами, а для всех остальных случаев качественные результаты анализа обеспечивает гауссова радиально-базисная функция

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где σ — параметр, от величины которого зависит ширина размаха функции.

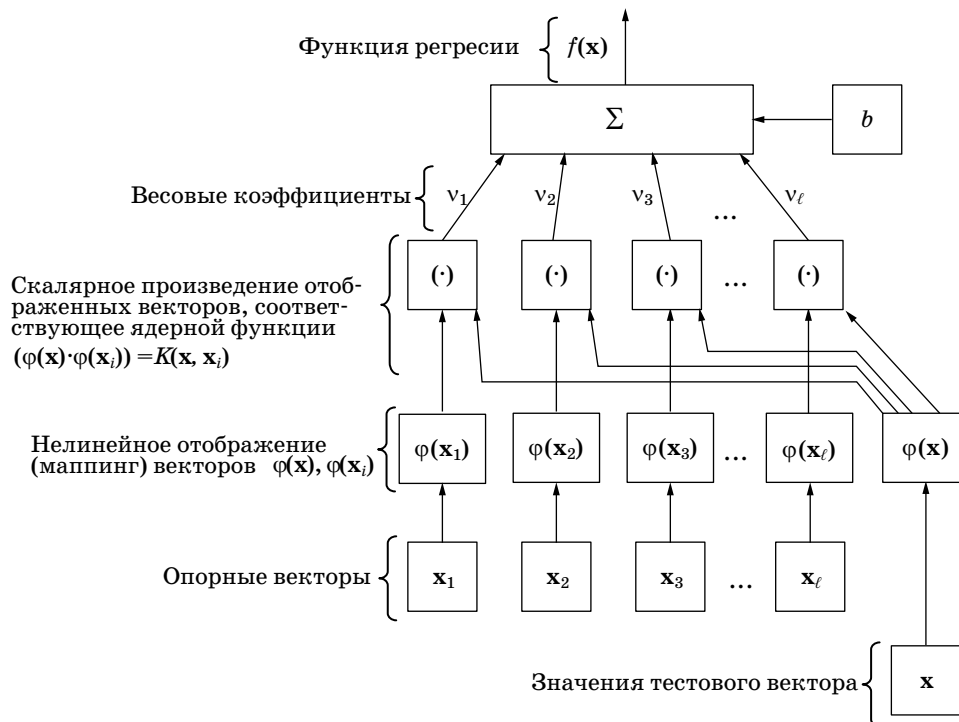
Преимуществом регрессионного анализа с использованием SVM является возможность задавать сразу величину ε , формируя таким образом соответствующую доверительную зону, оказы-

ваясь в которой можно считать погрешность соотношения между управляемыми координатами допустимой.

Аналитическая структура регрессионного алгоритма на базе SVM представлена на рис. 2 [6]. Она иллюстрирует основные этапы обработки данных: задание значений тестового вектора, нелинейное отображение или маппинг векторов, вычисление скалярного произведения или ядерной функции, суммирование полученных результатов с учетом весовых коэффициентов и параметра b .

Для программной реализации SVR-анализа чаще всего используют язык программирования C или Python. Наиболее распространенным программным продуктом для реализации как классификационных, так и регрессионных задач с помощью SVM является SVMlight [7], имеющий интерфейсы для Perl, Python, Ruby, Java, .NET и других языков программирования. Также существуют дополнения к программному пакету MatLab, которые расширяют его функциональные возможности, добавляя поддержку SVM. Среди таких дополнений можно отметить LIBSVM [8], PRTools [9], MatLab SVM Toolbox [10].

Работа MatLab SVM Toolbox хорошо документирована в руководстве [11]. MatLab SVM Toolbox предоставляет возможности для решения классификационных и регрессионных задач в программном пакете MatLab, который широко используется для моделирования автоматизирован-



■ Рис. 2. Аналитическая структура регрессионного алгоритма на базе SVM

ных электромеханических систем. Пользователь программного обеспечения при этом избавляется от необходимости выполнять рутинное программирование и работает с алгоритмом, реализующим SVM через графический интерфейс или через командную строку главного окна MatLab.

Применение метода опорных векторов во взаимосвязанном электроприводе

Во взаимосвязанном электроприводе с помощью SVM можно построить регрессионную эталонную модель поведения многомерного объекта управления таким образом, как показано на рис. 3.

В данном случае под многомерным объектом управления подразумевается сложный технический объект, имеющий некоторое количество неотделимых и взаимосвязанных частей, например моталка прокатного стана, система наведения радиолокационной станции, испытательный стенд механических трансмиссий вертолетов и т. п. Элементы таких объектов связываются между собой различного рода упругими связями и зачастую описываются линейной или линеаризованной системой дифференциальных уравнений.

Объект управления имеет n входов и должен реализовывать некоторую n -мерную целевую функцию R . За формирование каждой из n входных координат объекта управления отвечает отдельный автоматизированный электропривод с дискретным временным эквалайзером [2]. Таким образом, на объект управления поступают сигналы $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$ от локальных электроприводов, а на его выходе образуется некоторая целевая функция $R(y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))$. При этом под действием возмущений $g_1(t), g_2(t), \dots, g_k(t)$ значения целевой функции могут отличаться от желаемых. Электроприводы, формирующие сигналы $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$, реализованы на базе дискретного временного эквалайзера с модифицированным принципом симметрии объекта управления [12]. Каждый из них состоит из следующих элементов (см. рис. 3):

- программы формирования задания и настройки эквалайзера;
- дискретного временного эквалайзера, который отвечает за формирование динамических и статических характеристик привода;
- двух квантователей с периодом T ;
- экстраполятора нулевого порядка, выполняющего цифроаналоговое преобразование и согласовывающего между собой дискретные и аналоговые элементы схемы;
- исполнительной подсистемы (двигателя и управляемого преобразователя);
- обратной эталонной модели исполнительной подсистемы;

— блока модификации обратного преобразования;

— датчика обратной связи.

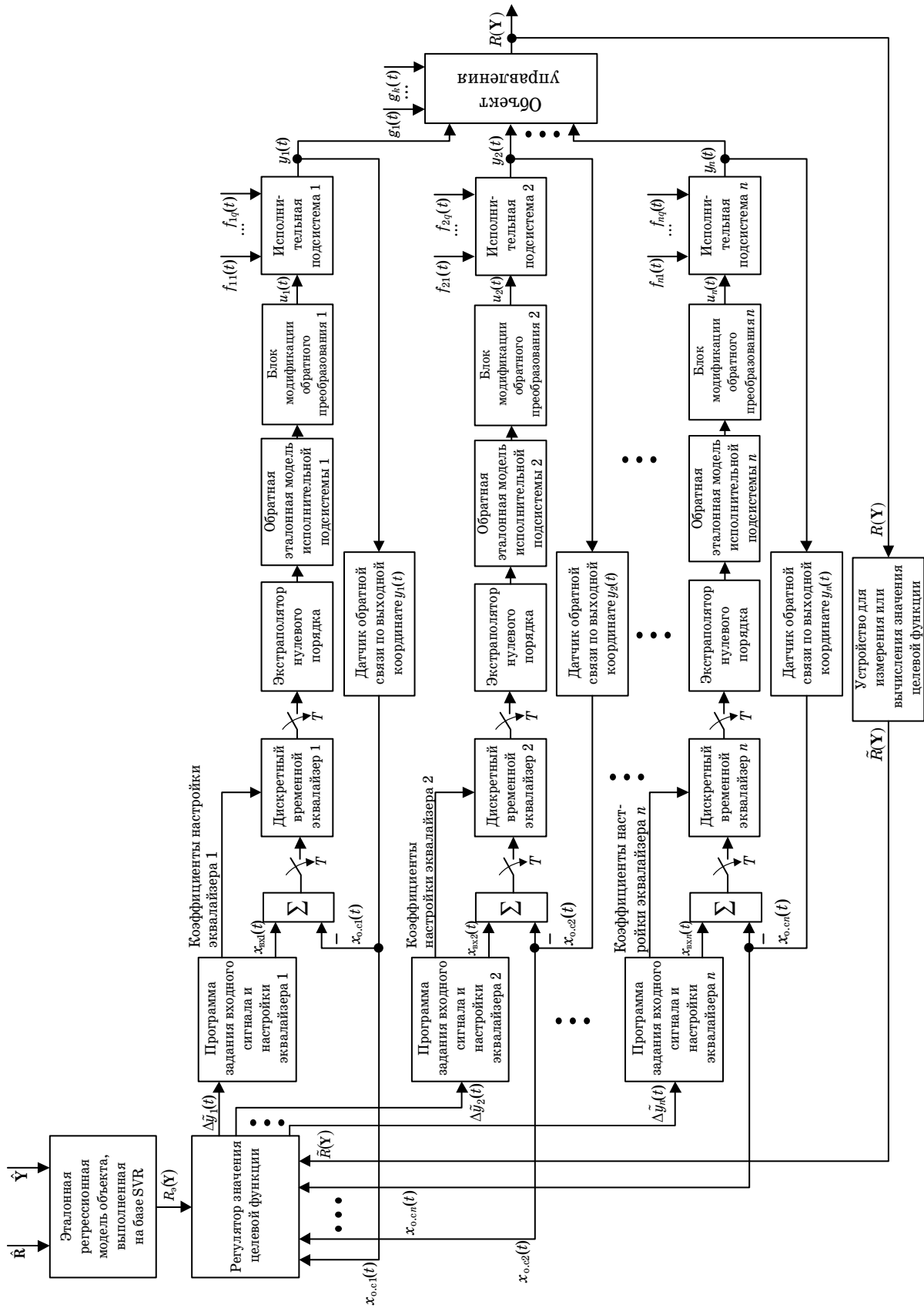
Каждая из n исполнительных подсистем получает свой сигнал управления $u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)$. Также на каждую исполнительную подсистему действует ряд возмущений $f_{11}(t), f_{12}(t), \dots, f_{1q}(t); f_{21}(t), f_{22}(t), \dots, f_{2q}(t); \dots; f_{n1}(t), f_{n2}(t), \dots, f_{nq}(t)$.

Датчики обратных связей выполняют измерение координат $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$ и преобразуют их в сигналы обратных связей $x_{o.c1}(t), x_{o.c2}(t), \dots, x_{o.c n}(t)$, которые подаются на входы сумматоров, где вычитаются от соответствующих входных сигналов $x_{вх1}(t), x_{вх2}(t), \dots, x_{вх n}(t)$.

Значение целевой функции $R(\mathbf{Y})$, зависящей от вектора выходных координат $\mathbf{Y} = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))$, измеряется на выходе объекта управления с соответствующим датчиком (когда целевая функция характеризуется физической величиной, которая поддается измерению) или вычисляется с помощью соответствующего устройства или программного обеспечения (когда целевая функция не является физической величиной, которую можно непосредственно измерить). В результате измерения или вычисления получают значения $\hat{R}(\mathbf{Y})$, которые с определенной точностью воспроизводят реальные значения целевой функции $R(\mathbf{Y})$.

Для того чтобы оценить отклонения измеренных значений целевой функции $\hat{R}(\mathbf{Y})$ от эталонных $R_y(\mathbf{Y})$, используется эталонная модель объекта управления и регулятор значения целевой функции. Эталонная регрессионная модель объекта управления, выполненная с помощью SVR, принимает на вход вектор расчетных или экспериментально полученных значений входов объекта управления $\hat{\mathbf{Y}}$ и соответствующие исходные значения $\hat{\mathbf{R}}$, регрессионная связь между которыми устанавливается путем выполнения SVR-анализа. Эталонная целевая функция может формироваться на подготовительном этапе (перед началом функционирования электромеханической системы в соответствии с технологическими требованиями) или изменяться в процессе работы, что требует некоторого времени на переобучение алгоритма SVR.

Регулятор целевой функции принимает на свой вход измеренную или вычисленную целевую функцию $\hat{R}(\mathbf{Y})$, все сигналы обратных связей с датчиков локальных электроприводов $x_{o.c1}(t), x_{o.c2}(t), \dots, x_{o.c n}(t)$, эталонную целевую функцию $R_y(\mathbf{Y})$ и выполняет вычисления отклонений $\Delta\hat{y}_1(t), \Delta\hat{y}_2(t), \dots, \Delta\hat{y}_n(t)$, поступающих в соответствующие программы для задания входных сигналов и настройки дискретных эквалайзеров.



■ Рис. 3. Функциональная схема электромеханической системы со взаимосвязанным управлением на базе дискретных временных эквалайзеров

Пример выполнения регрессионного анализа в MatLab SVM Toolbox

Проиллюстрируем возможности MatLab SVM Toolbox по формированию регрессионных зависимостей на примере обработки некоторой эллиптической траектории (в относительных единицах)

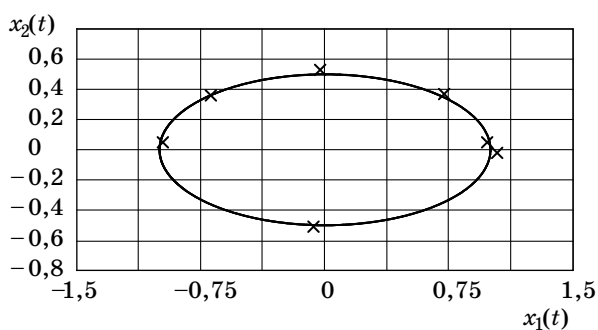
$$\begin{cases} x(t) = \cos(t), \\ y(t) = 0,5\sin(t) \end{cases}$$

двухкоординатным приводом, считая, что нужная траектория была получена эмпирическим путем с некоторой погрешностью по обеим управляемым координатам. Выбор эллиптической траектории обусловлен особенностями функционирования многомерных автоматизированных электромеханических систем, взаимосвязь между управляемыми координатами которых чаще всего описывается в виде непрерывных многомерных функций. Тем не менее существуют современные модификации алгоритма SVR, позволяющие работать с разрывными и кусочно-монотонными функциями, например, разработанный в 2010 г. метод многофазной регрессии на опорных векторах mp-SVR [13].

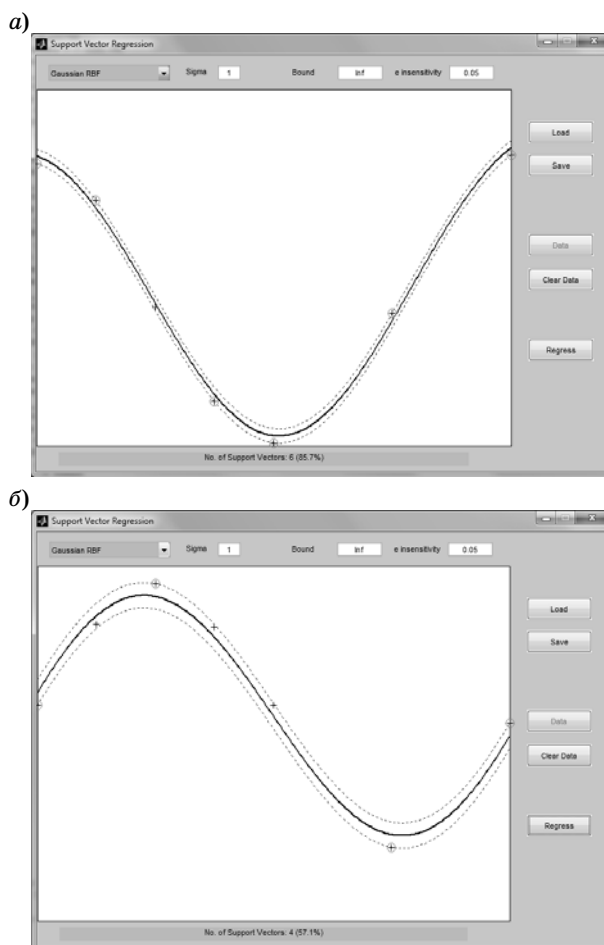
Пусть при изменении параметра t (олицетворяет время) были получены следующие эмпирические значения: $x_1(0)=0,98$, $x_1(\pi/4)=0,72$, $x_1(\pi/2)=-0,03$, $x_1(3\pi/4)=-0,69$, $x_1(\pi)=-0,98$, $x_1(5\pi/4)=-0,07$, $x_1(3\pi/2)=1,04$ и $x_2(0)=0,05$, $x_2(\pi/4)=0,37$, $x_2(\pi/2)=0,53$, $x_2(3\pi/4)=0,36$, $x_2(\pi)=0,05$, $x_2(5\pi/4)=-0,51$, $x_2(3\pi/2)=-0,02$. Ограничения, действующие на управляемые координаты, учитываются с помощью регулятора значений целевой функции (см. рис. 3), а регрессионная траектория строится в области допустимых значений координат.

Эллиптическая траектория с эмпирическими значениями опорных точек показана на рис. 4.

Результаты регрессионного анализа в MatLab SVM Toolbox методом опорных векторов с ис-



■ Рис. 4. Эллиптическая траектория с эмпирическими значениями опорных точек



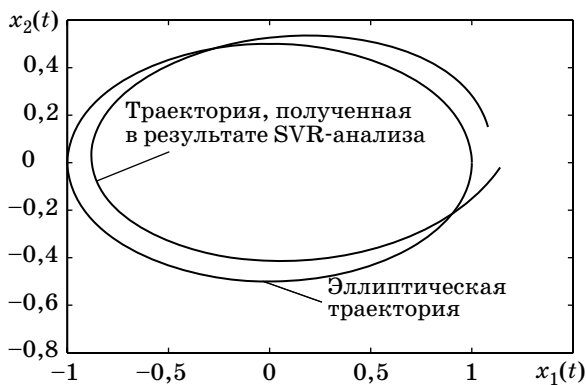
■ Рис. 5. Результаты выполнения SVR-анализа для координаты x_1 (а) и x_2 (б)

пользованием гауссовой радиально-базисной ядерной функции (Gaussian RBF) представлены на рис. 5, а, б. Выбранные настройки: $\sigma = 1$ (стандартное значение для Gaussian RBF); погрешность для задания функции потерь $\epsilon = 0,05$.

Выбранная эллиптическая траектория построена совместно с результатами, полученными после применения SVR-анализа к эмпирическим точкам (рис. 6).

Для получения результатов регрессионного анализа, показанных на рис. 5 и 6, использовались следующие операторы MatLab и MatLab SVM Toolbox: `uiregress` — предоставляет графический интерфейс для выполнения SVR-анализа в среде MatLab; `svrplot` — строит линию регрессии для решения двухмерных регрессионных задач; `plot` — предоставляет возможности для построения траекторий в координатах $x_1(t)$, $x_2(t)$.

Положительной стороной SVR-анализа является однозначная сходимость регрессионного алгоритма, а получаемая ошибка зависит как от точности экспериментальных данных, так и от ширины размаха ядерной функции σ (1).



■ Рис. 6. Траектория изменения управляемых координат, полученная в результате SVR-анализа

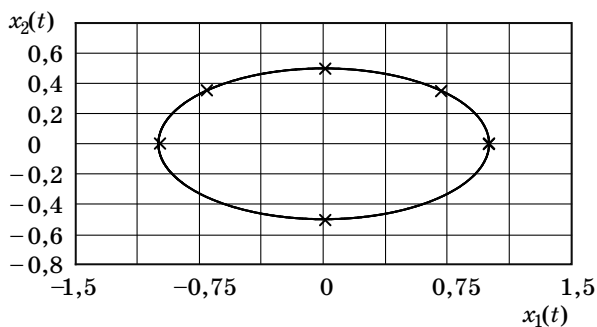
Уменьшение σ следует выполнять при повышении точности экспериментов.

Траектория, полученная по результатам SVR-анализа (см. рис. 6), воспроизводит исходную эллиптическую траекторию с некоторой погрешностью (наблюдается сдвиг вверх и вправо). Выполним повторное обучение алгоритма на более точных экспериментальных данных (рис. 7).

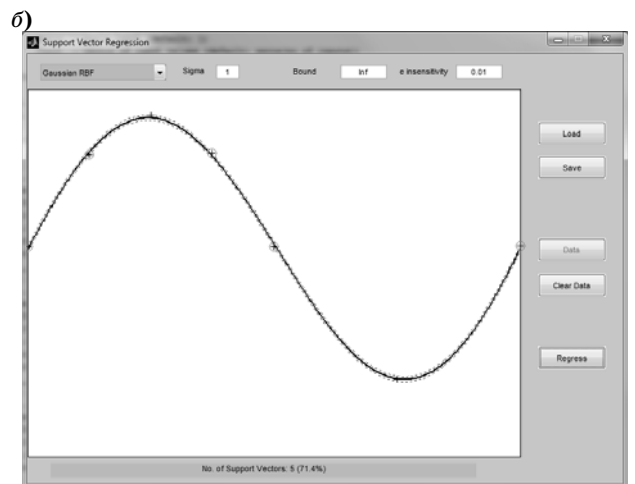
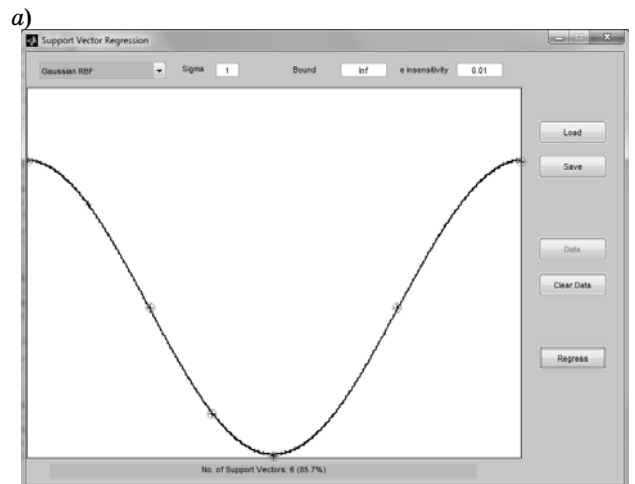
Результаты уточненного регрессионного анализа в MatLab SVM Toolbox методом опорных векторов с использованием Gaussian RBF показаны на рис. 8, а, б. Выбранные настройки: $\sigma = 1$ (стандартное значение для Gaussian RBF); погрешность для задания функции потерь $\epsilon = 0,01$.

Выбранная эллиптическая траектория построена совместно с результатами, полученными после применения SVR-анализа к уточненным эмпирическим точкам (рис. 9).

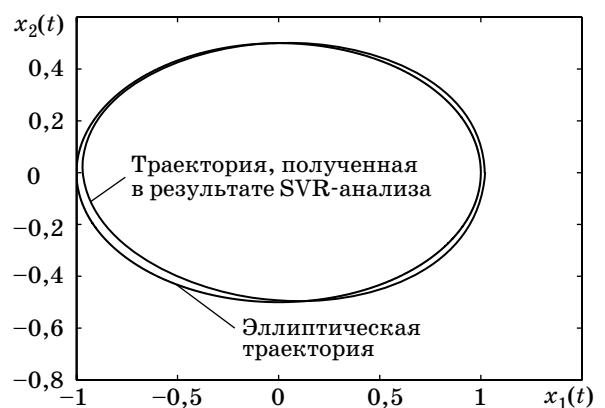
Сравнив результаты SVR-анализа, представленные на рис. 6 и 9, можно сделать вывод, что увеличение точности экспериментальных данных и переобучение алгоритма на уточненных значениях при уменьшении зоны нечувствительности функции потерь в 5 раз (от $\epsilon = 0,05$ до $\epsilon = 0,01$)



■ Рис. 7. Эллиптическая траектория с уточненными эмпирическими значениями опорных точек



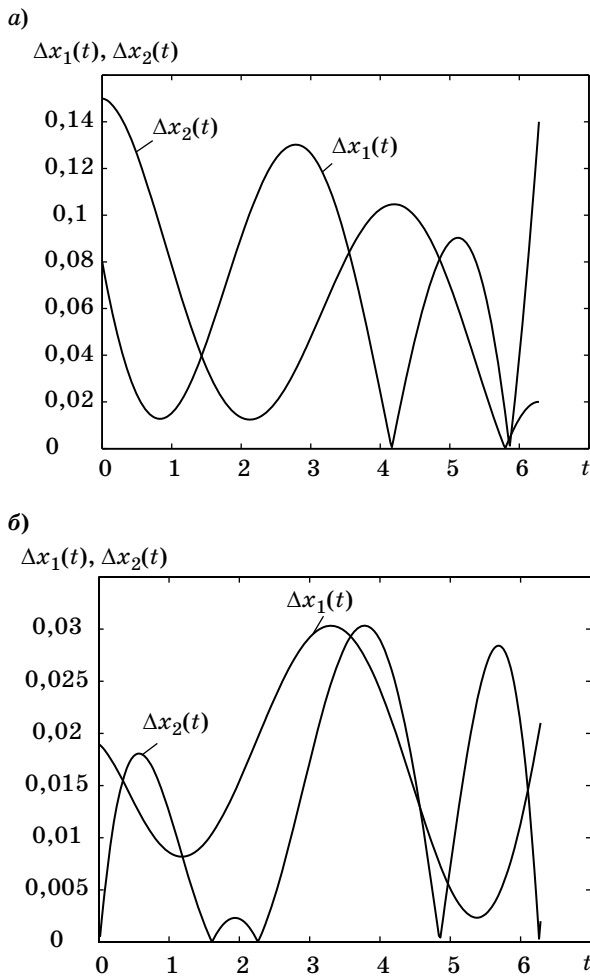
■ Рис. 8. Результаты выполнения уточненного SVR-анализа для координаты x_1 (а) и x_2 (б)



■ Рис. 9. Траектория изменения управляемых координат, полученная в результате уточненного SVR-анализа

приводит к уменьшению отклонения регрессионной траектории от исходной эллиптической.

Зависимости абсолютных значений ошибок от времени $\Delta x_1(t)$, $\Delta x_2(t)$, построенные по результа-



■ **Рис. 10.** Абсолютные значения ошибок по результатам SVR-анализа (а) и уточненного SVR-анализа (б)

там SVR-анализа, и абсолютные значения ошибок после переобучения на уточненных экспериментальных данных, которые использовались для построения линии регрессии, показаны на рис. 10, а и б соответственно.

Проанализировав эти рисунки, можно заключить, что максимальные значения ошибок по результатам SVR-анализа составят $\Delta x_{1\max}=0,14$, $\Delta x_{2\max}=0,15$ (см. рис. 10, а). После уточнения экспериментальных данных соответствующие ошибки составят значения $\Delta x_{1\max}=0,0303$, $\Delta x_{2\max}=0,0303$ (см. рис. 10, б). Таким образом, после переобучения алгоритма для выполнения SVR-анализа по координате x_1 погрешность сократилась в 4,62 раза, а по x_2 — в 4,95 раза. Следовательно, повышение точности экспериментальных данных и сокращение зоны нечувствительности функции потерь ϵ способствует уменьшению ошибки регрессионного анализа после выполнения соответствующего переобучения алгоритма SVR.

Заключение

В тех случаях, когда необходимо использовать регрессионную связь между управляемыми координатами во взаимосвязанных электромеханических системах, значительные перспективы имеет применение SVR-анализа, обладающего следующими преимуществами перед другими методами:

- параметры регрессионной модели определяются с помощью решения задачи квадратичного программирования, имеющей только одно решение;
- можно задавать доверительную зону вокруг основной линии регрессии, оказываясь в которой ошибка соотношения между управляемыми координатами считается допустимой;
- эталонная целевая функция, которая формируется в результате SVR-анализа, может быть легко изменена путем выполнения переобучения алгоритма SVR и не требует подбора специальных регрессионных зависимостей, поскольку весь необходимый функционал уже заложен в ядерной функции (в случае нелинейной регрессии лучшие результаты дает ядерная функция Gaussian RBF).

Литература

1. Шеремет О. І., Садовой О. В. Метод опорних векторів // Математичне моделювання. Науковий журнал. Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2013. № 1(28). С. 13–17.
2. Шеремет О. І. Синтез автоматизованих електромеханічних систем посредством дискретного часового еквайзера // Вісник національного технічного університету «ХПІ»: зб. наукових праць. Сер. Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика / НТУ «ХПІ». Харків, 2013. № 36(1009). С. 110–111.

3. Vapnik V. N. The nature of statistical learning theory (information science and statistics). 2nd ed. – N. Y.: Springer-Verlag, 2000. – 314 p.
4. Burges C. J. C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition // Data mining and knowledge discovery. 1998. Vol. 2. Iss. 2. P. 121–167.
5. Вьюгин В. В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования / Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН. – М., 2013. – 387 с.
6. Smola A. J., Schölkopf B. A Tutorial on Support Vector Regression // NeuroCOLT2 Technical Report Series. 1998. NC2-TR-1998-030. – 71 p.

7. **SVMLight**. <http://svmlight.joachims.org>. (дата обращения: 07.10.2013).
8. **Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin**. LIBSVM. A library for support vector machines. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>. (дата обращения: 07.10.2013).
9. **PRTools**. A MATLAB toolbox for pattern recognition. <http://prtools.org>. (дата обращения: 07.10.2013).
10. **Signals, images, systems (ISIS) Research Group** // Support Vector Machines. <http://www.isis.ecs.soton.ac.uk/resources/svminfo> (дата обращения: 07.10.2013).
11. **Gunn S. R.** Support vector machines for classification and regression // Technical report faculty of engineering, science and mathematics school of electronics and computer science. – Southampton: University of Southampton, 1998. – 54 p.
12. **Садовой А. В.** Система оптимального управления прецизионными электроприводами. – Киев: ИСМО, 1996. – 298 с.
13. **Park J. I., Kim N., Jeong M. K., Shin K. S.** Multiphase support vector regression for function approximation with break-points // J. of the operational research society. 2013. Vol. 64. P. 775–785.

UDC 62-50:519.6

Regression Analysis in Interrelated Electromechanical Systems Based on the Support Vector Method

Sheremet A. I.^a, PhD, Tech., Associate Professor, sheremet-a@mail.ruSadovoy A. V.^b, Dr. Sc., Tech., Professor, sadovoy@dstu.dp.ua^aDonbass State Engineering Academy, 72, Shkadinov St., 84313, Kramatorsk, Ukraine^bDneprodzerzhinsk State Technical University, 2, Dneprostroyevskaia St., 51918, Dneprodzerzhinsk, Ukraine

Purpose: In some cases control of automated electromechanical systems implies installing regression connections between controlled coordinates. The support vector method can be successfully used not only to solve problems of classification and diagnosis but also to conduct a regression analysis. The goal of this paper is to substantiate an opportunity of applying the support vector method to establish relations between controlled coordinates in an interrelated electric drive with a discrete time equalizer. **Methods:** There have been studied particularities and advantages of the support vector regression, ways of using the support vector method in an interrelated electromechanical system. **Results:** Mathematical description and analytical framework of the regression algorithm based on the support vector machine have been analyzed; there has been proposed a functional diagram of an electromechanical system with interrelated control based on discrete time equalizers where a control target function is formed by the regression model; an example of the regression analysis programmatically using MatLab SVM Toolbox has been given. It has been stated that the reference target function which is formed as a result of SVR-analysis can be changed by retraining a SVR algorithm and it does not require selection of special regression dependencies. **Practical relevance:** The research results can be applied in design of interrelated electromechanical systems which target function is formed by means of the regression analysis.

Keywords — Regression Analysis, Target Control Function, Electromechanical System.

References

1. Sheremet O. I., Sadovoy O. V. Method of Support Vectors. *Matematychna modeljuvannja. Naukovyj zhurnal. Dniprodzerzhyns'k, DSTU Publ.*, 2013, no. 1(28), pp. 13–17 (In Ukrainian).
2. Sheremet O. I. Synthesis of Automated Electromechanical Systems by Discrete Time Equalizer. *Visnyk nacional'nogo tehnichnogo universytetu "HPI". Zbirnik naukovyh prac'. Ser. Problemy avtomatyzovanogo elektropryvodu. Teorija i praktyka.* NTU "KhPI" Publ., Kharkov, 2013, no. 36(1009), pp. 110–111 (In Ukrainian).
3. Vapnik V. N. *The Nature of Statistical Learning Theory (Information Science and Statistics)*. 2nd ed. New York, Springer-Verlag, 2000. 314 p.
4. Burges C. J. C. A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, vol. 2, iss. 2, pp. 121–167.
5. Viyugin V. V. *Matematicheskie osnovy teorii mashinnogo obuchenija i prognozirovanija* [Mathematical Foundations of the Machine Learning Theory and Prediction]. Moscow, Institut problem peredachi informatsii im. A. A. Kharkevicha RAN Publ., 2013. 387 p. (In Russian).
6. Smola A. J., Schölkopf B. *A Tutorial on Support Vector Regression*. NeuroCOLT2, Technical Report Series, 1998, NC2-TR-1998-030. 71 p.
7. Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin. *SVMLight*. Available at: <http://svmlight.joachims.org>. (accessed 07 October 2013).
8. *LIBSVM. A Library for Support Vector Machines*. Available at: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>. (accessed 07 October 2013).
9. *PRTools. A MATLAB Toolbox for Pattern Recognition*. Available at: <http://prtools.org>. (accessed 07 October 2013).
10. *Signals, Images, Systems (ISIS) Research Group. Support Vector Machines*. Available at: <http://www.isis.ecs.soton.ac.uk/resources/svminfo> (accessed 07 October 2013).
11. Gunn S. R. *Support Vector Machines for Classification and Regression*. Technical Report Faculty of Engineering, Science and Mathematics School of Electronics and Computer science. Southampton, University of Southampton, 1998. 54 p.
12. Sadovoy A. V. *Sistema optimal'nogo upravljenija precizionnymi jelektroprivodami* [The System of Optimal Control by Precision Electric Drives]. Kiev, ISMO Publ., 1996. 298 p. (In Russian).
13. Park J. I., Kim N., Jeong M. K., Shin K. S. Multiphase Support Vector Regression for Function Approximation with Break-Points. *Journal of the Operational Research Society*, 2013, vol. 64, pp. 775–785.

УДК 629.191

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОГРАММ ДВИЖЕНИЯ ЛА ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА МАСС

И. О. Петров^а, канд. техн. наук^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: анализ известных методов расчета программ движения летательных аппаратов относительно центра масс показал, что они основаны на использовании упрощенных моделей летательных аппаратов и не оптимальны с точки зрения максимизации скорости изменения кинетической энергии вращения. Целью работы является разработка нового метода определения оперативных оптимальных программ движения летательных аппаратов относительно центра масс. **Методы:** использован метод определения управления на основе энергетического принципа. **Результаты:** разработана и описана математическая модель движения летательных аппаратов относительно центра масс при полном составе тензора инерции в виде дифференциальных уравнений Эйлера. Обоснован новый подход к определению оптимальных оперативных программ движения летательных аппаратов относительно центра масс на основе энергетической теории маневрирования. Сущность подхода заключается в максимизации мощности поверхностных управляющих сил относительно мгновенной оси вращения летательных аппаратов. **Практическая значимость:** результаты исследований для синергетических маневров позволяют эффективно использовать их при баллистическом проектировании летательных аппаратов без решения сложных и трудоемких вариационных задач на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина.

Ключевые слова — летательный аппарат, маневрирование, оперативное оптимальное управление, энергетическая теория, кинетическая энергия вращения, мощность поверхностных сил, динамические уравнения Эйлера.

Введение

С сугубо механической точки зрения маневр любого летательного аппарата (ЛА) — это изменение его кинетической энергии под действием соответствующих сил. После этого изменения через какое-то время происходит переход части кинетической энергии в потенциальную или наоборот.

Сущность энергетического подхода к маневрированию ЛА заключается в исследовании на экстремум мощности поверхностных сил, действующих на ЛА в полете, по координатам вектора управления. В этом случае получаются оперативные оптимальные программы движения центра масс ЛА. Если применить энергетический подход к движению ЛА, рассматриваемому как абсолютно твердое тело, то можно получить оперативные оптимальные программы движения ЛА относительно центра масс.

В связи с этим в данной статье рассмотрен нетрадиционный подход к разработке оперативных оптимальных программ движения ЛА относительно центра масс на основе энергетической теории маневрирования [1—7].

Постановка задачи управления движением ЛА относительно центра масс

При рассмотрении движения ЛА как абсолютно твердого тела необходимо в целях выполнения заданной программы движения центра масс определять оптимальные программы движения ЛА относительно центра масс. Оптимальность в этом

случае определяется по критерию быстродействия поворота ЛА из текущего положения в программное положение, заданное на этот момент времени.

Для постановки задачи управления движением ЛА относительно центра масс необходимо вывести динамические уравнения Эйлера, описывающие движение ЛА относительно центра масс в самом общем виде. Это особенно актуально для средств выведения, так как из-за выработки топлива моменты инерции существенно меняются во времени и, кроме того, оси координат связанной системы отсчета в какой-то момент времени перестают совпадать с главными центральными осями инерции.

Согласно работам [8, 9], выражение для главного момента количества движений системы (кинетического момента) \mathbf{K}_0 в векторном виде записывается следующим образом:

$$\mathbf{K}_0 = \mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \mathbf{i} \\ \omega_y \mathbf{j} \\ \omega_z \mathbf{k} \end{bmatrix} =$$

$$= (I_x \omega_x - I_{xy} \omega_y - I_{xz} \omega_z) \cdot \mathbf{i} +$$

$$+ (-I_{xy} \omega_x + I_y \omega_y - I_{yz} \omega_z) \cdot \mathbf{j} +$$

$$+ (-I_{xz} \omega_x - I_{yz} \omega_y + I_z \omega_z) \cdot \mathbf{k}, \quad (1)$$

где $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix}$ — тензор инерции

ЛА, представляющий собой матрицу осевых мо-

ментов инерции и центробежных моментов инерции со знаком «-»;

$\omega = \begin{bmatrix} \omega_x \mathbf{i} \\ \omega_y \mathbf{j} \\ \omega_z \mathbf{k} \end{bmatrix}$ — вектор угловой скорости вращения ЛА относительно мгновенной оси вращения O_l .

Согласно теореме о дифференцировании абсолютного вектора и теореме об изменении главного момента количества движений системы (кинетического момента), можно записать

$$\frac{d\mathbf{K}_0}{dt} = \frac{d\tilde{\mathbf{K}}_0}{dt} + \omega \times \mathbf{K}_0 = \mathbf{M}_0, \quad (2)$$

где $\frac{d\mathbf{K}_0}{dt}$ — абсолютная производная от \mathbf{K}_0 или абсолютная скорость конца вектора \mathbf{K}_0 ; $\frac{d\tilde{\mathbf{K}}_0}{dt}$ — относительная

производная от \mathbf{K}_0 в связанной системе отсчета $O_1x_1y_1z_1$ или относительная скорость конца вектора \mathbf{K}_0 в связанной системе отсчета; \mathbf{M}_0 — главный момент внешних сил относительно центра вращения O .

С учетом (2) запишем уравнение для вычисления производных $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$ в связанной системе отсчета в векторном виде:

$$\mathbf{I} \cdot \dot{\omega} = \mathbf{M}_0 - [\omega \times (\mathbf{I} \cdot \omega)] - \dot{\mathbf{I}} \cdot \omega. \quad (3)$$

Введя обозначение $\mathbf{b} = \mathbf{M}_0 - [\omega \times (\mathbf{I} \cdot \omega)] - \dot{\mathbf{I}} \cdot \omega$, в окончательном виде получим

$$\mathbf{I} \cdot \dot{\omega} = \mathbf{b}. \quad (4)$$

Проекция вектора \mathbf{b} на оси связанной системы отсчета выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} b_x &= b_1 = M_x - (I_z - I_y)\omega_z\omega_y - \\ &- I_{yz}(\omega_z^2 - \omega_y^2) - (I_{xy}\omega_z - I_{xz}\omega_y)\omega_x - \\ &- I_x\omega_x + I_{xy}\omega_y + I_{xz}\omega_z; \\ b_y &= b_2 = M_y - (I_x - I_z)\omega_x\omega_z - \\ &- I_{xz}(\omega_x^2 - \omega_z^2) - (I_{yz}\omega_x - I_{xy}\omega_z)\omega_y + \\ &+ I_{xy}\omega_x - I_y\omega_y + I_{yz}\omega_z; \\ b_z &= b_3 = M_z - (I_y - I_x)\omega_y\omega_x - \\ &- I_{xy}(\omega_y^2 - \omega_x^2) - (I_{xz}\omega_y - I_{yz}\omega_x)\omega_z + \\ &+ I_{xz}\omega_x + I_{yz}\omega_y - I_z\omega_z. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом (5) систему уравнений (4) в скалярном виде можно записать так:

$$\begin{cases} \dot{h}_1 \dot{\omega}_x + \dot{h}_2 \dot{\omega}_y + \dot{h}_3 \dot{\omega}_z = b_1 \\ \dot{h}_2 \dot{\omega}_x + \dot{h}_2 \dot{\omega}_y + \dot{h}_2 \dot{\omega}_z = b_2, \\ \dot{h}_3 \dot{\omega}_x + \dot{h}_3 \dot{\omega}_y + \dot{h}_3 \dot{\omega}_z = b_3 \end{cases} \quad (6)$$

где коэффициенты i_{11}, \dots, i_{33} являются элементами тензора инерции \mathbf{I} , т. е.

$$\begin{aligned} \dot{h}_1 &= I_x, \quad \dot{h}_2 = -I_{xy}, \quad \dot{h}_3 = -I_{xz}, \\ \dot{h}_2 &= -I_{xy}, \quad \dot{h}_2 = I_y, \quad \dot{h}_2 = -I_{yz}, \\ \dot{h}_3 &= -I_{xz}, \quad \dot{h}_3 = -I_{yz}, \quad \dot{h}_3 = I_z. \end{aligned}$$

Разрешая систему (6) по правилу Крамера, получим в самом общем виде динамические уравнения Эйлера

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = \frac{D_{\omega_x}}{D} \\ \dot{\omega}_y = \frac{D_{\omega_y}}{D}, \\ \dot{\omega}_z = \frac{D_{\omega_z}}{D} \end{cases} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} D_{\omega_x} &= b_1(I_y I_z - I_{yz}^2) + b_2(I_{xz} I_{yz} + I_{xy} I_z) + b_3(I_{xy} I_{yz} + I_{xz} I_y); \\ D_{\omega_y} &= b_1(I_{yz} I_{xz} + I_{xy} I_z) + b_2(I_x I_z - I_{xz}^2) + b_3(I_{xz} I_{xy} + I_{yz} I_x); \\ D_{\omega_z} &= b_1(I_{xy} I_{yz} + I_{xz} I_y) + b_2(I_{xy} I_{xz} + I_{yz} I_x) + b_3(I_x I_y - I_{xy}^2); \\ D &= I_x I_y I_z - 2 I_{xy} I_{yz} I_{xz} - I_x I_{yz}^2 - I_y I_{xz}^2 - I_z I_{xy}^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Проанализируем зависимость общих уравнений Эйлера (7) от управления $\mathbf{u}_{\dot{\omega}_i}$, т. е. зависимость угловых ускорений ЛА от положения рулевых органов (рулевых двигателей, рулевых аэродинамических поверхностей), обеспечивающих требуемое вращение ЛА относительно центра масс.

Из анализа выражений (5), (8) для $D_{\omega_x}, D_{\omega_y}, D_{\omega_z}, D$ видно, что величина D не зависит от вектора $\mathbf{u}_{\dot{\omega}_i}$, так как представляет собой определитель тензора инерции \mathbf{I} и зависит только от инерционных характеристик самого ЛА. Следовательно, в дальнейшем с точки зрения управления движением ЛА относительно центра масс рассматриваем только величины $D_{\omega_x}, D_{\omega_y}, D_{\omega_z}$.

Подставив выражения (5) в выражение (8), получим

$$\begin{aligned} D_{\omega_x} &= (I_y I_z - I_{yz}^2) \left[\begin{aligned} &M_x - (I_z - I_y)\omega_z\omega_y - I_{yz}(\omega_z^2 - \omega_y^2) - \\ &-(I_{xy}\omega_z - I_{xz}\omega_y)\omega_x - I_x\omega_x + I_{xy}\omega_y + I_{xz}\omega_z \end{aligned} \right] + \\ &+ (I_{xz} I_{yz} + I_{xy} I_z) \left[\begin{aligned} &M_y - (I_x - I_z)\omega_x\omega_z - I_{xz}(\omega_x^2 - \omega_z^2) - \\ &-(I_{yz}\omega_x - I_{xy}\omega_z)\omega_y + I_{xy}\omega_x - I_y\omega_y + I_{yz}\omega_z \end{aligned} \right] + \\ &+ (I_{xy} I_{yz} + I_{xz} I_y) \left[\begin{aligned} &M_z - (I_y - I_x)\omega_y\omega_x - I_{xy}(\omega_y^2 - \omega_x^2) - \\ &-(I_{xz}\omega_y - I_{yz}\omega_x)\omega_z + I_{xz}\omega_x + I_{yz}\omega_y - I_z\omega_z \end{aligned} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Управлять движением ЛА относительно центра масс можно только за счет изменения проекций моментов M_x , M_y , M_z под действием управляющих сил. Таким образом, анализируя выражение (9) для D_{ω_x} и аналогичные выражения для D_{ω_y} , D_{ω_z} видим, что динамические уравнения Эйлера $\dot{\omega}_x$, $\dot{\omega}_y$, $\dot{\omega}_z$ в виде (7) можно разделить на две части:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = \dot{\omega}_x^{(u)} + \dot{\omega}_x^{(1)} \\ \dot{\omega}_y = \dot{\omega}_y^{(u)} + \dot{\omega}_y^{(1)} \\ \dot{\omega}_z = \dot{\omega}_z^{(u)} + \dot{\omega}_z^{(1)} \end{cases} \quad (10)$$

где $\dot{\omega}_x^{(u)} = f_1(\mathbf{u}_{\Gamma, \dot{\omega}, 1})$, $\dot{\omega}_y^{(u)} = f_2(\mathbf{u}_{\Gamma, \dot{\omega}, 1})$, $\dot{\omega}_z^{(u)} = f_3(\mathbf{u}_{\Gamma, \dot{\omega}, 1})$ — составляющие дифференциальных уравнений Эйлера, которые зависят от вектора управления $\mathbf{u}_{\Gamma, \dot{\omega}, 1}$; $\dot{\omega}_x^{(1)}$, $\dot{\omega}_y^{(1)}$, $\dot{\omega}_z^{(1)}$ — составляющие дифференциальных уравнений Эйлера, которые не зависят от вектора управления $\mathbf{u}_{\Gamma, \dot{\omega}, 1}$ и зависят только от тензора инерции ЛА.

Общие выражения для зависящих от управления $\mathbf{u}_{\Gamma, \dot{\omega}, 1}$ составляющих $\dot{\omega}_x^{(u)}$, $\dot{\omega}_y^{(u)}$, $\dot{\omega}_z^{(u)}$ выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x^{(u)} = \frac{(I_y I_z - I_{yz}^2) M_x + (I_{xz} I_{yz} + I_{xy} I_z) M_y + (I_{xy} I_{yz} + I_{xz} I_y) M_z}{I_x I_y I_z - 2 I_{xy} I_{yz} I_{xz} - I_x I_{yz}^2 - I_y I_{xz}^2 - I_z I_{xy}^2} \\ \dot{\omega}_y^{(u)} = \frac{(I_{yz} I_{xz} + I_{xy} I_z) M_x + (I_x I_z - I_{xz}^2) M_y + (I_{xz} I_{xy} + I_{yz} I_x) M_z}{I_x I_y I_z - 2 I_{xy} I_{yz} I_{xz} - I_x I_{yz}^2 - I_y I_{xz}^2 - I_z I_{xy}^2} \\ \dot{\omega}_z^{(u)} = \frac{(I_{xy} I_{yz} + I_{xz} I_y) M_x + (I_{xy} I_{xz} + I_{yz} I_x) M_y + (I_x I_y - I_{xy}^2) M_z}{I_x I_y I_z - 2 I_{xy} I_{yz} I_{xz} - I_x I_{yz}^2 - I_y I_{xz}^2 - I_z I_{xy}^2} \end{cases} \quad (11)$$

Таким образом, для обеспечения оптимального по быстройдействию поворота ЛА относительно центра масс необходимо найти управление, максимизирующее угловые скорости вращения (11).

Определение оперативных оптимальных программ движения ЛА относительно центра масс на основе энергетической теории

Для обеспечения оперативного поворота ЛА относительно мгновенной оси вращения необходимо максимизировать скорость изменения кинетической энергии вращения ЛА $\dot{T}_{a\dot{\omega}}$ за счет управляющих поверхностных сил, т. е. необходимо оптимально изменять моменты M_x , M_y , M_z за счет координат вектора управления $\mathbf{u}_{\Gamma, \dot{\omega}, 1}$. В качестве координат вектора управления могут выступать отклонения рулевых двигателей, отклонения аэродинамических рулевых поверхностей (руля высоты, руля направления, элеронов, интерцепторов, закрылков, предкрылков и т. п.).

Запишем выражение для кинетической энергии вращения ЛА относительно мгновенной оси вращения [8]:

$$T_{a\dot{\omega}} = \frac{1}{2} I_x \omega_x^2 + \frac{1}{2} I_y \omega_y^2 + \frac{1}{2} I_z \omega_z^2 - I_{xy} \omega_x \omega_y - I_{yz} \omega_y \omega_z - I_{zx} \omega_z \omega_x. \quad (12)$$

Запишем производную по времени:

$$\begin{aligned} \dot{T}_{a\dot{\omega}} &= I_x \omega_x \dot{\omega}_x + I_y \omega_y \dot{\omega}_y + I_z \omega_z \dot{\omega}_z - \\ &- I_{xy} \dot{\omega}_x \omega_y - I_{xy} \omega_x \dot{\omega}_y - I_{yz} \dot{\omega}_y \omega_z - \\ &- I_{yz} \omega_y \dot{\omega}_z - I_{zx} \dot{\omega}_z \omega_x - I_{zx} \omega_z \dot{\omega}_x + \\ &+ \left(\frac{1}{2} \dot{I}_x \omega_x^2 + \frac{1}{2} \dot{I}_y \omega_y^2 + \frac{1}{2} \dot{I}_z \omega_z^2 - \right. \\ &\left. - \dot{I}_{xy} \omega_x \omega_y - \dot{I}_{yz} \omega_y \omega_z - \dot{I}_{zx} \omega_z \omega_x \right). \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом (11) выражение для скорости изменения кинетической энергии вращения можно записать следующим образом:

$$\dot{T}_{a\dot{\omega}} = \dot{T}_{a\dot{\omega}}^{(u)} + \dot{T}_{a\dot{\omega}}^{(1)}, \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{T}_{a\dot{\omega}}^{(u)} &= \dot{\omega}_x^{(u)} (I_x \omega_x - I_{xy} \omega_y - I_{zx} \omega_z) + \\ &+ \dot{\omega}_y^{(u)} (I_y \omega_y - I_{xy} \omega_x - I_{yz} \omega_z) + \\ &+ \dot{\omega}_z^{(u)} (I_z \omega_z - I_{yz} \omega_y - I_{zx} \omega_x); \end{aligned}$$

$$\dot{T}_{a\dot{\omega}}^{(1)} = \dot{T}_{a\dot{\omega}}^{(1_1)} + \dot{T}_{a\dot{\omega}}^{(1_2)},$$

$$\dot{T}_{a\dot{\omega}}^{(1_1)} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \dot{I}_x \omega_x^2 + \dot{I}_y \omega_y^2 + \dot{I}_z \omega_z^2 - \\ - 2 \dot{I}_{xy} \omega_x \omega_y - \\ - 2 \dot{I}_{yz} \omega_y \omega_z - 2 \dot{I}_{zx} \omega_z \omega_x \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_{a\dot{\omega}}^{(1_2)} &= \dot{\omega}_x^{(1)} (I_x \omega_x - I_{xy} \omega_y - I_{zx} \omega_z) + \\ &+ \dot{\omega}_y^{(1)} (I_y \omega_y - I_{xy} \omega_x - I_{yz} \omega_z) + \\ &+ \dot{\omega}_z^{(1)} (I_z \omega_z - I_{yz} \omega_y - I_{zx} \omega_x). \end{aligned} \quad (15)$$

Чтобы найти оптимальное управление вращением ЛА $\mathbf{u}_{\Gamma, \dot{\omega}, 1}$, надо решить систему уравнений

$$\frac{\partial \dot{T}_{a\dot{\omega}}}{\partial \mathbf{u}_{\Gamma, \dot{\omega}, 1}} = 0, \quad (16)$$

что с учетом (14) аналогично системе уравнений

$$\frac{\partial \dot{T}_{a\dot{\omega}}^{(u)}}{\partial \mathbf{u}_{\Gamma, \dot{\omega}, 1}} = 0. \quad (17)$$

При анализе выражений (11) для $\dot{\omega}_x^{(u)}$, $\dot{\omega}_y^{(u)}$, $\dot{\omega}_z^{(u)}$ видно, что у них общий знаменатель, равный D , который можно вынести за скобки. Следовательно, можно записать

$$\dot{T}_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}^{(u)} = \frac{1}{D} \dot{T}_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{T}_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* = & \left[\begin{aligned} & (I_y I_z - I_{yz}^2) M_x + (I_{xz} I_{yz} + I_{xy} I_z) M_y + \\ & + (I_{xy} I_{yz} + I_{xz} I_y) M_z \end{aligned} \right] \times \\ & \times (I_x \omega_x - I_{xy} \omega_y - I_{zx} \omega_z) + \\ & + \left[\begin{aligned} & (I_{yz} I_{xz} + I_{xy} I_z) M_x + (I_x I_z - I_{xz}^2) M_y + \\ & + (I_{xz} I_{xy} + I_{yz} I_x) M_z \end{aligned} \right] \times \\ & \times (I_y \omega_y - I_{xy} \omega_x - I_{yz} \omega_z) + \\ & + \left[\begin{aligned} & (I_{xy} I_{yz} + I_{xz} I_y) M_x + (I_{xy} I_{xz} + I_{yz} I_x) M_y + \\ & + (I_x I_y - I_{xy}^2) M_z \end{aligned} \right] \times \\ & \times (I_z \omega_z - I_{yz} \omega_y - I_{zx} \omega_x). \end{aligned} \quad (19)$$

После преобразований выражение (19) можно записать в виде

$$\dot{T}_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* = D (M_x \omega_x + M_y \omega_y + M_z \omega_z). \quad (20)$$

Следовательно:

$$\dot{T}_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}^{(u)} = M_x \omega_x + M_y \omega_y + M_z \omega_z \quad (21)$$

или в векторном виде

$$\dot{T}_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}^{(u)} = \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\omega}, \quad (22)$$

где $\mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\omega}$ — мощность управляющих сил, действующих на ЛА во вращательном движении.

В окончательном виде систему (22) можно записать в виде

$$\frac{\partial \dot{T}_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}^{(u)}}{\partial \mathbf{u}_{i, \dot{\alpha}, i}} = \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \mathbf{u}_{i, \dot{\alpha}, i}} \cdot \boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}. \quad (23)$$

Из анализа выражения (23) видно, что при оптимальном управлении вращением ЛА с точки зрения максимизации кинетической энергии вращения угол между векторами \mathbf{M} и $\boldsymbol{\omega}$ равен нулю. При заданных органах управления система (23) позволяет получить конкретные программы движения ЛА относительно центра масс и использовать их при баллистическом проектировании ЛА без решения сложных и трудоемких вариационных задач на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина [10].

Для обеспечения оптимального по оперативности вращения ЛА в целях адекватной отработки программного вращения, соответствующего заданной программе движения, в качестве

вектора мгновенной угловой скорости вращения крылатых ЛА относительно центра масс при маневрировании в атмосфере целесообразно выбирать

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}_{i \delta} = \dot{\gamma}_{i \delta} + \dot{\kappa}_{i \delta}, \quad (24)$$

где $\dot{\gamma}_{i \delta}$ — программная скорость изменения скоростного угла крена; $\dot{\kappa}_{i \delta}$ — программная скорость изменения полного угла атаки.

При полете ЛА ракетного типа

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}_{i \delta} = \dot{\alpha}_{i \delta} + \dot{\beta}_{i \delta}, \quad (25)$$

где $\dot{\alpha}_{i \delta}$ — программная скорость изменения угла атаки; $\dot{\beta}_{i \delta}$ — программная скорость изменения угла скольжения.

Полученная система уравнений (23) позволяет оперативно находить оптимальные направления приложения управляющих усилий рулевых органов управления ЛА при любом их расположении и количестве степеней свободы.

Система уравнений (23) совместно с уравнениями Эйлера в общем виде (11) может быть использована при [6]:

- разработке методов управления движением и навигацией, синтезе алгоритмов наведения и навигации, угловой стабилизации;

- математическом моделировании процессов управления ЛА как абсолютно твердого тела для исследования характеристик создаваемых и эксплуатируемых ЛА;

- проектировании и разработке принципиально новых исполнительных органов ЛА, оптимизации их расположения и угловой ориентации относительно ЛА, определении оптимального числа степеней свободы и предельного диапазона отклонений;

- проектировании и изготовлении бортовых цифровых вычислительных систем;

- создании новых аналого-цифровых комплексов для полунатурного моделирования (в том числе в замкнутом контуре) реального процесса управления движением с оптимальным сочетанием методов натурного и математического моделирования;

- проведении отработки бортовых алгоритмов и программного обеспечения на комплексах полунатурного моделирования с детальным определением точностных характеристик системы управления ЛА;

- создании бортовых систем управления;

- создании наземных проверочно-пусковых комплексов контроля бортовой аппаратуры систем управления, подготовки и пуска ракетно-космических комплексов и авиационно-космических комплексов;

- создании методик и алгоритмов электрических и точностных испытаний систем управления ЛА на всех этапах проектирования.

Современное состояние отечественного ракетостроения характеризуется проведением модернизации парка ракет-носителей (РН). Модернизации существующих РН в первую очередь обусловлены необходимостью замены аналоговых систем управления на систему управления на основе бортовых цифровых вычислительных систем с современной элементной базой и унифицированным программным обеспечением.

Основное условие, которое должно быть выполнено в результате отмеченных модернизаций, — сохранение высокого уровня надежности отечественных РН, обоснованно признанных лучшими в мире по результатам уже не одной тысячи пусков. Исходя из этого к актуальным вопросам повышения эффективности РН средствами систем управления движением относятся минимизация зон падения отработавших первых ступеней, повышенная безопасность полета, особенно на начальном участке, а также решение задач контроля параметров движения в целях выявления опасных ситуаций, в первую очередь связанных с отказами отдельных узлов и агрегатов РН, и формирования адекватных команд.

К числу отказов узлов и агрегатов РН относятся, в частности, и отказы гидравлических рулевых машин первых ступеней РН.

Нормальный режим функционирования рулевых органов системы управления ЛА предусматривает реализацию алгоритма формирования управляющих воздействий на каждый сервопривод в виде [6]

$$\begin{aligned} U_{\delta_{\vartheta}} &= U_{\text{н.о}} \left(\vartheta - \vartheta_{i\delta}, \dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_{i\delta}, \dots, \vartheta^{(n)} - \vartheta_{i\delta}^{(n)} \right); \\ U_{\delta_{\psi}} &= U_{\text{н.о}} \left(\psi - \psi_{i\delta}, \dot{\psi} - \dot{\psi}_{i\delta}, \dots, \psi^{(n)} - \psi_{i\delta}^{(n)} \right); \\ U_{\delta_{\varphi}} &= U_{\text{н.о}} \left(\varphi - \varphi_{i\delta}, \dot{\varphi} - \dot{\varphi}_{i\delta}, \dots, \varphi^{(n)} - \varphi_{i\delta}^{(n)} \right), \end{aligned} \quad (26)$$

где ϑ, ψ, φ — углы тангажа, рыскания и собственного вращения РН, являющиеся функциями программных значений углов атаки $\alpha_{\text{пр}}$ и скольжения $\beta_{\text{пр}}$.

Подача управляющего сигнала на соответствующий сервопривод приводит к изменению его состояния в соответствии с дифференциальными уравнениями

$$\dot{\delta}_i(t) = U_{\text{д.и}} \left(\delta_i(t), U_{\delta_{\vartheta}}, U_{\delta_{\psi}}, U_{\delta_{\varphi}} \right), \quad (27)$$

где $i = 1(1)k, k$ — количество рулевых органов ЛА; $U_{\text{р.м}}$ — функция рулевого механизма.

Возникновение неисправности, как правило, рассматривается в виде модели, согласно которой при отказе одной из рулевых машин она фиксируется в определенном положении: $\delta_i = \text{const}$. Номер отказавшего рулевого привода определя-

ется при использовании соответствующих алгоритмов идентификации аномального состояния рулевых приводов.

В этом случае требуемые угловые ускорения $\dot{\omega}_x^{\text{оддд}}, \dot{\omega}_y^{\text{оддд}}, \dot{\omega}_z^{\text{оддд}}$, являющиеся функциями рассогласований фактической угловой скорости вращения ЛА и его программной угловой скорости вращения, можно вычислить следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x^{\text{оддд}} = \omega_x^i \delta - \omega_x^e \\ \dot{\omega}_y^{\text{оддд}} = \omega_y^i \delta - \omega_y^e \\ \dot{\omega}_z^{\text{оддд}} = \omega_z^i \delta - \omega_z^e \end{cases} \quad (28)$$

где $\omega_x^e, \omega_y^e, \omega_z^e$ — проекции измеренной угловой скорости вращения ЛА.

Для известных значений $\dot{\omega}_x^{\text{оддд}}, \dot{\omega}_y^{\text{оддд}}, \dot{\omega}_z^{\text{оддд}}$ решается система уравнений (11) по правилу Крамера и определяются требуемые моменты управляющих сил $M_x^{\text{оддд}}, M_y^{\text{оддд}}, M_z^{\text{оддд}}$.

Углы отклонения работоспособных органов управления ЛА определяются бортовым вычислителем из условия удовлетворения векторного уравнения моментов:

$$M(\delta_k, k \neq j) = M^{\text{оддд}} - M(\delta_j = \text{const}). \quad (29)$$

Таким образом, при отказе отдельных органов управления во внештатных ситуациях можно обеспечить выполнение целевой задачи ЛА.

Заключение

Практические приложения энергетической теории в виде конкретных программ движения ЛА относительно центра масс для синергетических маневров позволяют эффективно использовать их при баллистическом проектировании ЛА без решения сложных и трудоемких вариационных задач на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина.

Разработанный метод определения оперативных оптимальных программ движения ЛА относительно центра масс позволяет на практике решать различные задачи баллистического проектирования перспективных ЛА с новыми органами управления на всех этапах их создания. Данные программы движения относительно центра масс ЛА можно использовать для контроля качества работы систем управления ЛА.

Кроме этого, продемонстрированный принцип в сочетании с принципом определения оптимальных программ движения центра масс ЛА создает единую методологическую базу для исследования различных маневров при рассмотрении ЛА как в виде материальной точки, так и в виде абсолютно твердого тела.

Литература

1. Насонов В. П. Нетрадиционный подход к решению традиционных задач динамики полета ракет-носителей / ВИКИ им. А. Ф. Можайского. – СПб., 1992. – 64 с.
2. Петров И. О. Проблема определения оперативных оптимальных автономных алгоритмов управления ЛА и пути ее решения // *Аэрокосмическое приборостроение*. 2012. № 3. С. 14–20.
3. Петров И. О. Энергетическая теория синергетического маневрирования // *Аэрокосмическое приборостроение*. 2012. № 4. С. 10–20.
4. Петров И. О., Насонов В. П. Принцип применения энергетической теории к определению оптимальных программ движения ЛА относительно центра масс // *Аэрокосмическое приборостроение*. 2012. № 7. С. 3–11.
5. Петров И. О. Математические модели движения летательных аппаратов во вращающейся атмосфере Земли // *Аэрокосмическое приборостроение*. 2012. № 9. С. 10–20.
6. Аверкиев Н. Ф., Волков В. Ф., Петров И. О. Баллистическое проектирование РН: учеб. пособие / ВИКУ им. А. Ф. Можайского. – СПб., 1999. – 72 с.
7. Петров И. О. Принцип применения энергетической теории к выбору оптимальных адаптивных программ движения летательных аппаратов // *Аэрокосмическое приборостроение*. 2013. № 1. С. 13–19.
8. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: учебник для втузов. 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 416 с.
9. Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики. – СПб.: Лань, 2009. – 736 с.
10. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1983. – 392 с.

UDC 629.191

A Method for Determination of Optimal Operational Programs of Aircraft Movement in Relation to the Center of Mass

Petrov I. O.^a, PhD, Tech., Associate Professor, petrovigor63@mail.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The analysis of the known methods of calculation programmes for aircraft movement in relation to the center of mass has shown that they are based on simplified models of aircrafts and they are not optimal in terms of maximizing a rate of change of kinetic energy of rotation. The purpose of the paper is to develop a new method for determination of optimal operational programs of aircraft movement in relation to the center of mass. **Methods:** There has been used a method of determining control based on energy principle. **Results:** There has been developed and described a mathematical model of aircraft movement in relation to the center of mass with full tensor of inertia in a form of Euler differential equations. There has been substantiated a new approach to determination of optimal operational programs of aircraft movement in relation to the center of mass based on the energy theory of maneuvering. The essence of the approach is to maximize power of surface control forces in relation to an instantaneous axis of aircraft rotation. **Practical relevance:** The research results for synergistic maneuvers are effective for ballistic design of aircrafts without addressing complex and labor-consuming variation tasks based on the principle of Pontryagin maximum.

Keywords — Aircraft, Maneuvering, Operative Optimal Control, Energy Theory, Kinetic Energy of Rotation, Power of Surface Forces, Euler Dynamic Equations.

References

1. Nasonov V. P. *Netraditsionnyi podkhod k resheniiu traditsionnykh zadach dinamiki poleta raket-nositelei* [Non-Traditional Approach to the Traditional Tasks of Flight Dynamics of Launch Vehicles]. Saint-Petersburg, VIKI im. A. F. Mozhaikskogo Publ., 1992. 64 p. (In Russian).
2. Petrov I. O. Problem of Definition of Operational Optimum Autonomous Algorithms of Management of Aircraft and Way of its Decision. *Aerokosmicheskoe priborostroenie*, 2012, no. 3, pp. 14–20 (In Russian).
3. Petrov I. O. Power Theory of Synergetic Maneuvering. *Aerokosmicheskoe priborostroenie*, 2012, no. 4, pp. 10–20 (In Russian).
4. Petrov I. O., Nasonov V. P. The Principle of Application of the Power Theory to Definition of Optimum Programs of Movement Aircraft Concerning the Center of Masses. *Aerokosmicheskoe priborostroenie*, 2012, no. 7, pp. 3–11 (In Russian).
5. Petrov I. O. Mathematical Models of Movement of Aircraft in the Rotating Atmosphere of Earth. *Aerokosmicheskoe priborostroenie*, 2012, no. 9, pp. 10–20 (In Russian).
6. Averkiev N. F., Volkov V. F., Petrov I. O. *Ballisticheskoe proektirovanie RN* [Ballistic Design of Launch Vehicles]. Saint-Petersburg, VIKU im. A. F. Mozhaikskogo Publ., 1999. 72 p. (In Russian).
7. Petrov I. O. The Principle of Application of the Power Theory to a Choice of Optimum Adaptive Programs of Movement of Aircraft. *Aerokosmicheskoe priborostroenie*, 2013, no. 1, pp. 13–19 (In Russian).
8. Targ S. M. *Kratkii kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Short Course of Theoretical Mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 416 p. (In Russian).
9. Butenin N. V., Lunch J. L., Merkin D. R. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Course of Theoretical Mechanics]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2009. 736 p. (In Russian).
10. Pontryagin L. S., Boltjanskiy V. G., Gamkrelidze R. V., Mishenko E. F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical Theory of Optimum Processes]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 392 p. (In Russian).

УДК 681.3.067

ОБОСНОВАНИЕ ПЕРИОДА ПЕРЕСМОТРА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИИ

В. Ю. Осипов^а, доктор техн. наук, профессор

И. А. Носаль^а, аспирант

^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

Цель: поиск гибких подходов, позволяющих в зависимости от сложившейся ситуации оперативно находить целесообразный период пересмотра мероприятий по защите информации. **Методы:** для расчета вероятностей нахождения процесса защиты информации в интересующих состояниях при альтернативных значениях периода пересмотра мероприятий использован математический аппарат марковских процессов. При поиске этого периода учитывается структура процесса, неоднократность получения доступа к защищаемым информационным ресурсам, возможности его блокирования, интегральные по времени потери, ценность информации, ее устаревание, другие факторы. **Результаты:** предложена система типовых моделей и алгоритм поиска целесообразного периода пересмотра мероприятий по защите информации, ориентированные на широкий круг условий, отражающих объективные закономерности реальных процессов. Приведены результаты моделирования и сформулированы практические рекомендации по управлению защитой информации. **Практическая значимость:** показано, что за счет гибкой оптимизации процессов защиты информации с учетом изменения текущих целей и условий их достижения можно существенно повысить информационную безопасность, снизить возможные потери. При управлении защитой информации рекомендуется придерживаться предложенного алгоритма действий, предусматривающего использование разработанной системы типовых моделей.

Ключевые слова — защита информации, модель, алгоритм, период, мероприятия.

Введение

Одной из актуальных задач в области информационной безопасности (ИБ) выступает поиск целесообразного периода пересмотра мероприятий (ППМ) по защите информации. От успешности ее решения во многом зависят как расходы на обеспечение ИБ, так и потери от нарушения этой безопасности. Слишком частый пересмотр мероприятий по защите информации влечет дополнительные временные и материальные расходы. При редких пересмотрах этих мероприятий велики риски нарушения ИБ и потерь ценности защищаемых информационных ресурсов.

В настоящее время при определении ППМ по защите информации специалисты руководствуются международными и отечественными стандартами [1—6], требованиями государственных регуляторов и рекомендациями производителей средств защиты. По большей части эти требования основываются на предыдущем опыте и субъективном мнении экспертов.

Известны также математические методы решения этой задачи [7—14]. Однако в этих работах не учитывается ряд особенностей, свойственных реальным процессам обеспечения ИБ, в том числе связанных с многократностью проводимых мероприятий, с изменением внешних и внутренних условий, целей защиты информации. В каждом конкретном случае необходимо рассматривать свои модели ИБ. Не во всех случаях при поиске целесообразного ППМ защиты можно обойтись одним и тем же основным показателем эффек-

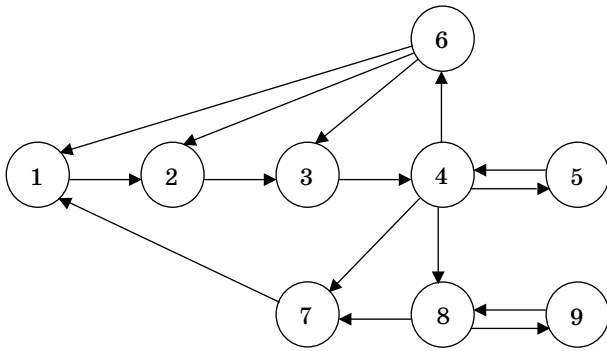
тивности. Условия его расчета также могут существенно отличаться.

Необходимо выработать гибкие подходы, позволяющие оперативно в зависимости от сложившейся ситуации находить целесообразный ППМ по защите информации.

В качестве решения предлагаются система моделей и алгоритм поиска такого периода, ориентированные на широкий круг условий, отражающих объективные закономерности реальных процессов обеспечения ИБ.

Задача обоснования мероприятий информационной безопасности

Известны данные об анализируемом процессе обеспечения ИБ на некотором объекте. К таким данным могут относиться возможные угрозы ИБ; цели и задачи, решаемые объектом и подсистемой защиты информации; текущая ценность защищаемых ресурсов; структура процесса; исходное состояние; некоторые параметры переходов из одного состояния в другое; затраты на реализацию мероприятий защиты. В интересах обеспечения ИБ на объекте периодически должны пересматриваться мероприятия по защите информации. В самых простых случаях в качестве таких мероприятий могут выступать смена паролей доступа лиц к ценным информационным ресурсам; замена карточек доступа (в том числе банковских карточек), специальных электронных ключей. Пример структуры простого процесса обеспечения ИБ по получению доступа к защищенным информационным ресурсам (ЗИР) в одном из уч-



■ Рис. 1. Пример структуры процесса обеспечения информационной безопасности

реждений приведен на рис. 1, где 1 — начальное состояние (проверка соответствия лиц приказу по доступу к ЗИР); 2, 3 — достоверные авторизационные данные выработаны и загружены, соответственно, в систему; 4 — карточки доступа с достоверными данными выданы пользователям; 5 — получен санкционированный доступ к ЗИР; 6 — сообщение об ошибке доступа направлено администратору безопасности; 7 — состояние необходимости пересмотра мероприятий по защите информации; 8 — несанкционированные пользователи ознакомлены с авторизационными данными; 9 — получен несанкционированный доступ (НСД) к ЗИР.

Опираясь на предельную теорему теории вероятностей для потоков событий, рассматривая этот процесс как марковский, дугам графа на рис. 1 можно поставить в соответствие интенсивности переходов из состояния в состояние. Согласно этому графу, чем меньше процесс находится в состоянии 9, тем выше уровень ИБ. Варьирование уровнем безопасности в соответствии с рисунком возможно путем изменения параметров переходов из состояния 4 в состояния 7, 8, а также из состояния 8 в состояние 7. Однако заметим, что увеличение времени перехода из 4 в 8, как правило, связано с заменой применяемых мер защиты. Период же пересмотра мероприятий по защите информации зависит от времени перехода из 4 и 8 в 7. При этом уменьшение времени перехода из 4 в 7 приводит к снижению вероятности нахождения процесса в состоянии 5 (получение санкционированного доступа), причем на изменение параметров этих переходов требуются также затраты ресурсов.

Общими как для приведенной структуры, так и для других структур процесса обеспечения ИБ являются противоречия между уровнем защищенности и доступности информационных ресурсов; уровнем защищенности и затратами на обеспечение ИБ; затратами на обеспечение ИБ и возможными информационными ущерба-

ми со стороны несанкционированных пользователей и др.

В зависимости от преследуемых целей обеспечения ИБ и условий-ограничений, свойственных реальным системам, могут представлять интерес различные по математическим формулировкам задачи поиска целесообразного ППМ по защите информации.

С учетом этих факторов необходимо разработать систему моделей и алгоритм поиска такого периода, ориентированные на широкий круг условий, отражающих объективные закономерности реальных процессов обеспечения ИБ.

Модели информационной безопасности

Принимая во внимание особенности анализируемого процесса, поиск целесообразного ППМ по защите информации предлагается осуществлять в рамках оптимизационных моделей.

Модель 1. В случаях, когда требуется найти такой период Δt_0 , при котором на интервале времени T достигается минимум интегральных потерь $S_0(\Delta t_0, T)$, рекомендуется решать задачу следующим образом:

$$S_0(\Delta t_0, T) = \min_{k \in Q} \int_0^T L_k(\Delta t_k, t) dt; \quad (1)$$

$$L_k(\Delta t_k, t) = B_k(\Delta t_k, t) + V(t) \cdot P_{k_f}(\Delta t_k, t); \quad (2)$$

$$P_{k_n}(\Delta t_k, T) \geq P_{\zeta}; \quad (3)$$

$$P_{k_f}(\Delta t_k, T) \leq P_{\text{дiт}}, \quad (4)$$

$$k = 1, 2, \dots, K.$$

В модели (1)–(4) приняты обозначения: Q — область допустимых ППМ по защите информации; $L_k(\Delta t_k, t)$ — суммарные потери при k -м значении периода Δt_k пересмотра мероприятий на момент времени t ; $B_k(\Delta t_k, t)$ — суммарные затраты на защиту информации при k -м значении периода; $V(t)$ — ценность защищаемых информационных ресурсов; K — число возможных значений ППМ по защите информации; $P_{k_c}(\Delta t_k, T)$, $P_{k_н}(\Delta t_k, T)$ — вероятности санкционированного и несанкционированного доступа к ЗИР при k -м значении ППМ защиты на момент T ; P_{ζ} — заданная нижняя граница вероятности санкционированного доступа; $P_{\text{доп}}$ — допустимое значение для вероятности НСД.

Суммарные затраты на защиту информации и ценность ЗИР в (2) могут выражаться в виде функций от времени как

$$B_k(\Delta t_k, t) = b_{0k} + at / \Delta t_k; \quad (5)$$

$$V(t) = V_0 \cdot \exp(-\gamma t), \quad (6)$$

где a, γ, V_0 — константы; b_{0k} — суммарные затраты на $t=0$, в частном случае они могут не зависеть от Δt_k .

В результате вместо (2) имеем

$$L_k(\Delta t_k, t) = b_{0k} + at / \Delta t_k + V_0 \cdot \exp(-\gamma t) \cdot P_{k_i}(\Delta t_k, t). \quad (7)$$

Из (5) следует, что чем меньше Δt_k , тем больше затраты. Выражение (6) отражает эффект устаревания информации во времени без учета НСД. Величину V_0 можно определить с использованием известного подхода [14]. В частном случае она равна минимуму затрат на восстановление утраченной информации, если нет других последствий.

Особенность этой модели в том, что она учитывает как затраты на реализацию мероприятий по защите информации, так и возможный информационный ущерб от нарушения ИБ. Кроме этого, интеграция возможных потерь осуществляется по времени.

Модель 2. Когда интерес представляет минимум суммарных потерь на конкретный момент времени T , при ограничениях на вероятность НСД и на время блокирования доступа в чрезвычайных ситуациях поиск Δt_0 можно осуществлять с использованием следующей модели:

$$L_0(\Delta t_0, T) = \min_{k \in Q} L_k(\Delta t_k, T); \quad (8)$$

$$P_{k_i}(\Delta t_k, T) \leq P_{\text{аиі}}; \quad (9)$$

$$T_{k_a} \leq T_{\text{аиі}}, \quad (10)$$

$$k = 1, 2, \dots, K.$$

Здесь T_{k_a} — время блокирования доступа при k -м ППМ защиты (в качестве его применительно к структуре процесса на рис. 1 может выступать время перехода из состояния 8 в состояние 7); $T_{\text{доп}}$ — допустимое время блокирования доступа. Другие обозначения такие же, как и в (1)–(4). Заметим, что при решении задачи (8)–(10) в частных случаях можно ограничиться только потерями в виде возможного информационного ущерба [второе слагаемое в правой части выражения (2)].

Модель 3. В ситуации, когда требуется найти Δt_0 , исходя из максимума оставшейся ценности защищаемой информации на конкретный момент времени T при ограниченных суммарных затратах на ее защиту, с учетом (5), (6) применима модель

$$V_{\text{opt}}(\Delta t_0, T) = \max_{k \in Q} (V_0 \cdot \exp(-\gamma T)(1 - P_{k_i}(\Delta t_k, T)); \quad (11)$$

$$B_k(\Delta t_k, T) = b_{0k} + aT / \Delta t_k \leq B_c. \quad (12)$$

Модель 4. Когда предоставляется возможность иметь интегральные потери, не превышающие допустимых $S_{\text{доп}}$, а наибольший интерес представляет минимизация вероятности НСД, для определения Δt_0 предлагается использовать модель

$$P_{0_i}(\Delta t_0, T) = \min_{k \in Q} P_{k_i}(\Delta t_k, T); \quad (13)$$

$$\int_0^T L_k(\Delta t_k, t) dt \leq S_{\text{аиі}}, \quad (14)$$

$$k = 1, 2, \dots, K.$$

Специфика модели (13), (14) состоит в расчете основного показателя и в проверке условия (14). Причем основу интегральных потерь в ней составляют, прежде всего, суммарные затраты на защиту информации [первое слагаемое в выражении (2)]. Что касается второго слагаемого в $L_k(\Delta t_k, t)$, то при минимизации вероятности НСД к ЗИР одновременно минимизируются возможные потери ценности этих ресурсов.

Модель 5. В ситуации, когда трудно определить суммарные или частные потери, связанные с защитой информации, для поиска Δt_0 можно использовать модель

$$\Delta t_0 = \max_{k \in Q} \Delta t_k; \quad (15)$$

$$P_{k_i}(\Delta t_k, T) \leq P_{\text{аиі}}, \quad (16)$$

$$k = 1, 2, \dots, K.$$

В соответствии с (15), (16) ищется наибольший ППМ по защите информации, при котором вероятность НСД на момент T не превышает допустимого значения $P_{\text{доп}}$. В этой модели максимизация ППМ в какой-то мере равносильна минимизации текущих расходов на защиту информации.

Кроме приведенных моделей, возможны также и другие варианты, учитывающие при поиске целесообразного ППМ по защите информации ограничения на время восстановления доступа, на длительность однократного доступа и другие, от которых зависят вероятности санкционированного и несанкционированного доступа к ЗИР. Системообразующим ядром всех этих оптимизационных моделей выступает модель процесса ИБ в виде графа состояний.

В интересах обеспечения ИБ с использованием этих оптимизационных моделей рассмотрим обобщенный алгоритм действий.

Алгоритм

Этот алгоритм можно представить в виде следующей последовательности шагов.

1. Анализ текущей ситуации с защитой информации на объекте.

2. Уточнение или пересмотр целей защиты информации и условий их достижения на качественном уровне.

3. Выбор в соответствии с этими целями и условиями адекватной оптимизационной модели ИБ из имеемого конечного множества. В нашем случае это пять моделей (1)—(16).

4. При необходимости — уточнение или разработка новой марковской модели процесса ИБ в виде графа состояний.

5. Определение текущих параметров переходов процесса из одних состояний в другие.

6. Задание начальных и интересующих состояний процесса.

7. Генерация альтернативных значений ППМ защиты или параметров отдельных переходов, от которых они зависят.

8. Расчет вероятностей нахождения процесса в интересующих состояниях при альтернативных значениях ППМ защиты и определение значений других показателей эффективности процесса, входящих в выбранную оптимизационную модель.

9. Проверка выполнимости условий, связанных с этими вероятностями и другими показателями, зависящими от значений ППМ защиты.

10. Поиск экстремума основного показателя эффективности (целевой функции), удовлетворяющего всем условиям задачи.

11. Принятие в качестве целесообразного периода того значения, при котором достигнут экстремум целевой функции.

12. Практический пересмотр параметров защиты информации в соответствии с этим периодом.

13. Если отсутствует необходимость защиты информации, то завершение процесса.

14. Если есть необходимость защиты информации и ситуация с ИБ изменилась, то переход к шагу 1.

В соответствии с этим алгоритмом выбор конкретной оптимизационной модели следует осуществлять, исходя из наибольшего соответствия ее реальной ситуации с учетом возможностей и неопределенностей.

При необходимости уточнения или разработки новой марковской модели процесса ИБ в виде графа состояний следует исходить из целесообразного уровня формализации. Излишняя детализация влечет за собой повышение затрат на разработку модели процесса и определение ее параметров. Грубая формализация позволяет оперативно получать интересующие оценки, однако не обеспечивает необходимой точности результатов.

Определение текущих параметров (интенсивностей) переходов процесса из одних состояний в другие осуществимо путем сбора и обработки статистических данных. В ряде случаев, когда

известны начальные и конечные состояния процесса на некотором интервале времени, определить исходные интенсивности можно также путем подбора параметров с использованием метода наименьших квадратов.

Для расчета вероятностей нахождения процесса в интересующих состояниях при альтернативных значениях ППМ защиты в соответствии с построенным графом составляется система дифференциальных уравнений. Затем она разрешается относительно заданных начальных и интересующих состояний. Для этого применимы пакеты прикладных программ MatLab, MathCad и др.

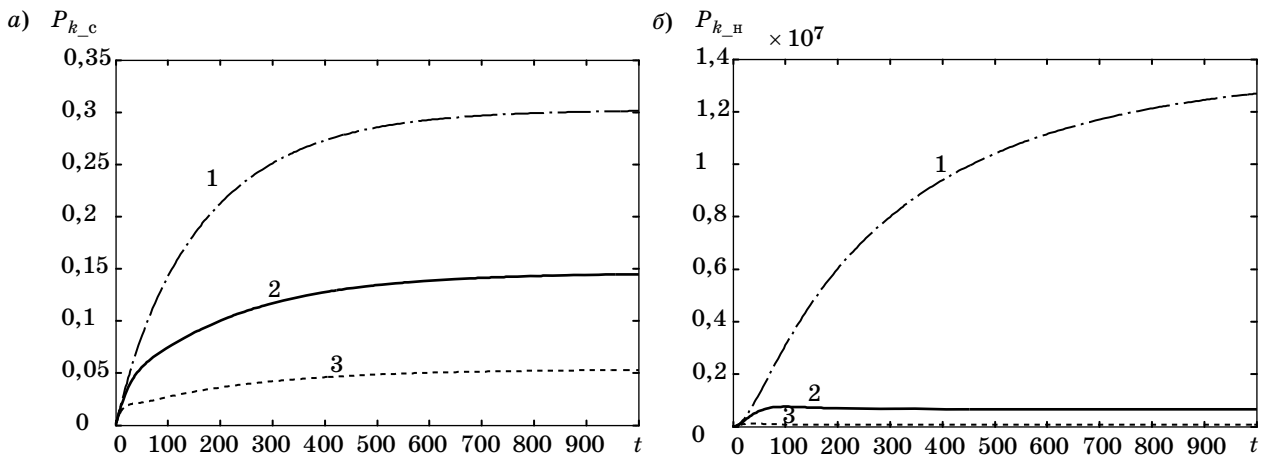
Расчет показателей $L_k(\Delta t_k, t)$, $S_k(\Delta t_k, T)$ в зависимости от этих вероятностей производится по формулам (1), (2).

Результаты моделирования

В целях раскрытия особенностей развития процесса ИБ при различных ППМ защиты осуществлялось математическое моделирование. В качестве структуры процесса в виде графа состояний использовалась модель, представленная на рис. 1. Особенность этой модели в том, что она учитывает многократность санкционированного и несанкционированного доступа к защищаемым информационным ресурсам, возможность пересмотра мероприятий защиты, а также блокирования доступа в случаях нарушения ИБ. Основные интенсивности переходов были определены исходя из средних временных затрат, при стандартном (не экстренном) предоставлении доступа к ЗИР.

Обосновывался целесообразный ППМ защиты в соответствии с моделью (1)—(4).

Результаты моделирования представлены на рис. 2, а, б и 3, а, б. На рис. 2 отражены зависимости вероятностей санкционированного $P_{k,c}(\Delta t_k, t)$ и несанкционированного $P_{k,n}(\Delta t_k, t)$ доступа к ЗИР от времени для трех различных значений ППМ защиты, которым соответствуют различные интенсивности переходов процесса на рис. 1 из состояния 4 в 7: кривая 1 получена при $\lambda_{47}=0,0022$; кривая 2 — при $\lambda_{47}=0,022$; кривая 3 — при $\lambda_{47}=0,088$. Напомним, что санкционированному доступу на рис. 1 соответствует состояние 5, а НСД — состояние 9. Для результатов, приведенных на рис. 2, процесс на момент $t=0$ находился только в состоянии 4. Из анализа этих результатов видно, что с увеличением ППМ защиты (с уменьшением соответствующей интенсивности) растет не только вероятность санкционированного доступа $P_{k,c}(\Delta t_k, t)$, но и вероятность НСД $P_{k,n}(\Delta t_k, t)$. При этом суммарные потери $L_k(\Delta t_k, t)$ согласно (2) с учетом (5), (6) изменяются по-разному (рис. 3, а).



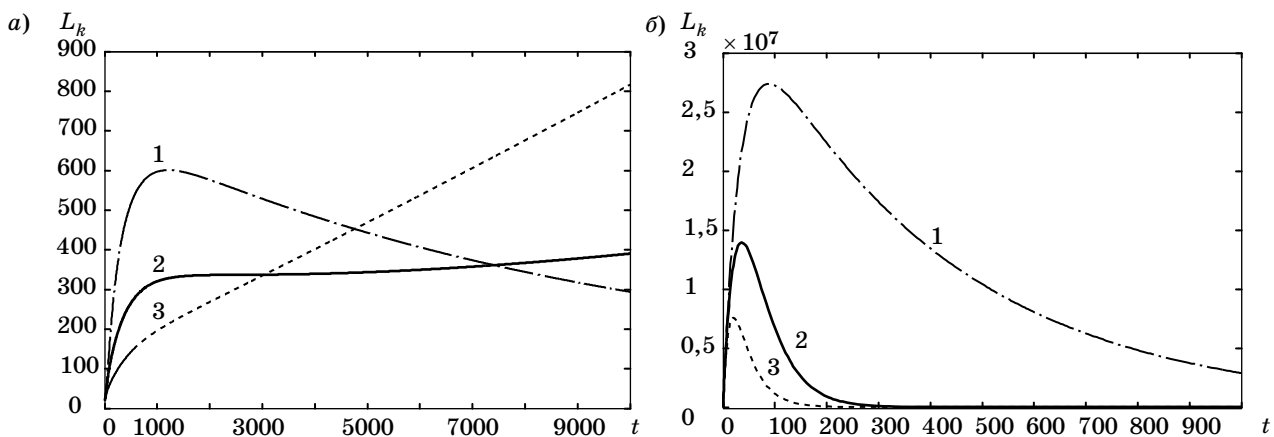
■ **Рис. 2.** Зависимость вероятности санкционированного (а) и несанкционированного (б) доступа от времени для различных значений ППМ защиты

Когда $\lambda_{47}=0,0022$ (кривая 1), суммарные потери $L_k(\Delta t_k, t)$ сначала резко растут из-за редкого пересмотра мероприятий защиты, однако затем они снижаются. Это снижение обусловлено устареванием защищаемой информации. При $\lambda_{47}=0,022$ (кривая 2) потери на интервале от 0 до 1000 условных временных единиц также резко растут, как и в первом случае. Однако этот прирост почти в 2 раза меньше. Затем, в отличие от первого случая, несмотря на устаревание защищаемой информации, из-за суммарных затрат $B_k(\Delta t_k, t)$ на защиту информации потери увеличиваются, но незначительно. В случае $\lambda_{47}=0,088$ (кривая 3) из-за частых пересмотров мероприятий защиты потери быстро растут на всем интервале времени. Анализируя рис. 3, а, трудно сказать о приоритетности всех ППМ. Однако осуществив интегрирование полученных зависимостей по времени, мы получаем однозначный ответ. Целесообразным является период $\Delta t_o=1/0,022$, при котором получена кривая 2. За ним следует период,

равный $1/0,0022$, свойственный кривой 1, и только затем период $1/0,088$ (для кривой 3). При целесообразном периоде $\Delta t_o=1/0,022$ интегральные потери (1) в 1,29 и в 1,34 раза ниже, чем при $\Delta t_k=1/0,0022$ и $\Delta t_k=1/0,088$ соответственно.

Для других случаев, например, когда процесс на $t=0$ находится в состояниях 4 и 8 с вероятностями, равными 0,5, ситуация с суммарными потерями $L_k(\Delta t_k, t)$ несколько иная. Основной вклад в них вносят потери ценности информации из-за НСД. Причем на величину этих потерь существенное влияние оказывает время блокирования доступа при обнаружении нарушений. Это время перехода процесса на рис. 1 из состояния 8 в состояние 7. На рис. 3, б приведены зависимости $L_k(\Delta t_k, t)$ для интенсивностей $\lambda_{87}=(0,0025; 0,025; 0,075)$ — кривые 1, 2, 3 соответственно.

Из анализа этих кривых видно, что имеет место резкий всплеск потерь из-за утраты авторизационных данных. При этом чем быстрее происхо-



■ **Рис. 3.** Зависимость суммарных потерь от времени для различных значений: а — ППМ защиты при нахождении процесса на $t=0$ в четвертом состоянии с вероятностью $P_4(0)=1$; б — параметров блокирования доступа при $P_4(0)=0,5$ и $P_8(0)=0,5$

дит блокирование доступа, тем ниже суммарные потери $L_k(\Delta t_k, t)$.

С учетом полученных результатов можно сформулировать следующие практические рекомендации по повышению эффективности защиты информации:

— целесообразно на объектах с ценной информацией иметь и оперативно использовать оптимизационные модели ИБ;

— при управлении защитой информации предлагается придерживаться предложенного алгоритма действий;

— при определении целесообразных ППМ защиты необходимо правильно определять цели и условия их достижения;

— рекомендуется при обосновании мероприятий по защите информации учитывать интегральные потери на интересующем интервале времени;

— следует непрерывно накапливать и обрабатывать статистические данные, свойственные процессам ИБ, прогнозировать возможные события.

Заключение

В результате выполненного исследования для поиска целесообразных ППМ по защите информации предложена новая система из пяти оптимизационных моделей. Системообразующим ядром ее выступает марковская модель процесса, учитывающая неоднократность доступа к информационным ресурсам, возможности его блокирования, пересмотра мероприятий защиты. Предложенная система оптимизационных моделей позволяет расширить взгляды на оценку потерь и достижение различных целей, связанных с защитой информации. Разработан алгоритм поиска целесообразного ППМ по защите информации, который включен в алгоритм действий лиц при обеспечении ИБ.

Предложенные решения могут найти применение при обосновании мероприятий по защите ценной информации как в процессе эксплуатации систем ИБ, так и при их проектировании.

Литература

1. **Payment Card Industry Data Security Standard (PCI DSS)** – PCI Security Standards Council LLC, Version 2.0. Oct. 2010. 75 p. <https://www.pcisecuritystandards.org/documents>. (дата обращения: 01.07.2013).
2. **Information Security Forum. Standard of Good Practice 2007 (ISF «SoGP»)** – Information Security Forum Limited (01.05.2007). <http://www.securityforum.org>. (дата обращения: 12.05.2013).
3. **Aceituno V. Information security management maturity model (ISM3) v2.10/Stansfeld E.** – ISM3 Consortium, 2007. http://www.lean.org/FuseTalk/Forum/Attachments/ISM3_v2.00-HandBook.pdf (дата обращения: 18.12.2013).
4. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 13335-1-2006. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Часть 1. Концепция и модели менеджмента безопасности информационных и телекоммуникационных технологий.** Введ. 01.06.2007. – М.: Стандартинформ, 2006. – 23 с.
5. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2006. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования.** Взамен ГОСТ Р ИСО/МЭК 17799-2005; введ. 27.12.2006. – М.: Стандартинформ, 2008. – 26 с.
6. **Стандарт Банка России СТО БР ИББС-1.0-2010. Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Общие положения.** Взамен СТО БР ИББС-1.0-2008; введ. 21.06.2010/ЦСБ РФ. – М., 2010. – 42 с.
7. **Brotby K. Information security governance. A Practical Development and Implementation Approach.** – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 220 p.
8. **Hentea M. Intelligent System for Information Security Management: Architecture and Design Issues // Issues in Informing Science and Information Technology.** 2007. Vol. 4. P. 29–43.
9. **Андреев О. О. и др. Критически важные объекты и кибертерроризм. Часть 1. Системный подход к организации противодействия/ под ред. В. А. Васенина.** – М.: МЦНМО, 2008. – 398 с.
10. **Грибунин В. Г., Чудовский В. В. Комплексная система защиты информации на предприятии.** – М.: Академия, 2009. – 416 с.
11. **Миронов В. В., Носаль И. А. Моделирование и оценка системы обеспечения информационной безопасности на примере ГОУ ВПО «СыктГУ» // Информатика и безопасность.** 2011. № 2. С. 209–211.
12. **Осипов В. Ю. Оценка защищенности информационно-вычислительных ресурсов от несанкционированного доступа // Приборы и системы управления.** 1996. № 7. С. 16–19.
13. **Осипов В. Ю., Емелин В. И. Оптимальное управление информационной безопасностью социально-технических систем// Вопросы защиты информации.** 2009. № 3(86). С. 64–67.
14. **Осипов В. Ю., Носаль И. А. Обоснование мероприятий информационной безопасности // Информационно-управляющие системы.** 2013. № 2(63). С. 48–53.

UDC 681.3.067

Substantiation of the Period of Revision of Information Security MeasuresOsipov V. Yu.^a, Dr. Sc. Tech., Professor, Leading Research Fellow, osipov_vasily@mail.ruNosal I. A.^a, Post-Graduate Student, ironia.i@gmail.com^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, 39, 14th Line, 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: To find flexible approaches providing prompt identification of an expedient period of revision of information security measures depending on a current situation. **Methods:** The mathematical apparatus of Markov processes has been used to estimate possibilities of finding information security actions. Searching this period a process structure, multiplicity of receiving access to protected information resources, possibilities of its blocking, integrated time losses, information value, its obsolescence, and other factors are considered. **Results:** There has been proposed a system of typical models and an algorithm for identification of an expedient period of revision of information security measures which are targeted at a large range of conditions reflecting objective rules of real processes. The results of modeling have been given and practical recommendations on management of information security have been formulated. **Practical relevance:** It has been shown that due to flexible optimization of information security processes with account of change of current goals and conditions of their achievement one can increase significantly information security and reduce possible losses. Managing information security it is recommended to follow the proposed algorithm of actions which implies the use of the developed system of typical models.

Keywords — Information Security, Model, Algorithm, Period, Actions.

References

1. *Payment Card Industry Data Security Standard (PCI DSS) – PCI Security Standards Council LLC, Version 2.0*. October 2010. 75 p. Available at: <https://www.pcisecuritystandards.org/documents> (accessed 1 July 2013).
2. *Information Security Forum. Standard of Good Practice 2007 (ISF “SoGP”) – Information Security Forum Limited (01.05.2007)*. Available at: <http://www.securityforum.org> (accessed 12 May 2013).
3. Aceituno V. *Information Security Management Maturity Model (ISM3) v2.10*. Stansfeld E., ISM3 Consortium, 2007. 96 p. Available at: http://www.lean.org/FuseTalk/Forum/Attachments/ISM3_v2.00-HandBook.pdf (accessed 18 December 2013).
4. State Standard R ISO/MEK 13335-1-2006. Information Technology. Methods and Means of Ensuring of Safety. Concept and Models of Management of Safety of Information and Telecommunication Technologies. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 23 p. (In Russian).
5. State Standard R ISO/MEK 27001-2006. Information Technology. Methods and Means of Ensuring of Safety. Systems of Management of Information Security. Requirements. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 26 p. (In Russian).
6. Standard of Bank of Russia IBBS-1.0-2010. Ensuring Information Security of the Organizations of a Banking System of the Russian Federation. General Provisions. Moscow, CSB RF Publ., 2010. 42 p. (In Russian).
7. Brotby K. *Information Security Governance: A Practical Development and Implementation Approach*. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2009. 220 p.
8. Hentea M. Intelligent System for Information Security Management: Architecture and Design Issues. *Issues in Informing Science and Information Technology*, 2007, vol. 4, pp. 29–43.
9. Andreev O. O., Batov I. S., Bolshakov M. V., Vasenin V. A., Shapchenko K. A., Klimovsky A. A., Markelov K. K., Puchkov F. M., Savkin V. B., Kazarin O. V. *Kriticheski vazhnye ob’ekty i kiberterrorizm. Sistemnyi podkhod k organizatsii protivodeistviia* [Crucial Objects and Cyberterrorism. System Approach to the Counteraction Organization]. Ed. V. A. Vasenin, Moscow, MTsNMO Publ., 2008. 398 p. (In Russian).
10. Gribunin V. G., Chudovsky V. V. *Kompleksnaia sistema zashchity informatsii na predpriiatii* [Complex System of Information Security at the Enterprise]. Moscow, Akademiia Publ., 2009. 416 p. (In Russian).
11. Mironov V. V., Nosal I. A. Modeling and an Assessment of System of Ensuring Information Security. *Informatsiia i bezopasnost’*, 2011, no. 2, pp. 209–211 (In Russian).
12. Osipov V. Yu. Assessment of Security of Information Resources from Unauthorized Access. *Pribory i sistemy upravleniia*, 1996, no. 7, pp. 16–19 (In Russian).
13. Osipov V. Yu., Emelin V. I. Optimum Control of Information Security of Social and Technical Systems. *Voprosy zashchity informatsii*, 2009, no. 3, pp. 64–67 (In Russian).
14. Osipov V. Yu., Nosal I. A. Substantiation of Information Security Measures. *Informatsionno-upravlyayushhie sistemy*, 2013, no. 2, pp. 48–53 (In Russian).

УДК 004.05

ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИТЫ ПРОТОКОЛОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ ОТ АТАК ВТОРЖЕНИЯ В СЕРЕДИНУ КАНАЛА СВЯЗИ

В. Н. Никитин^а, канд. техн. наук, доцент

М. М. Ковцур^а, соискатель

Д. В. Юркин^а, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: алгоритм Диффи — Хеллмана широко применяется во многих протоколах распределения ключей, в том числе в протоколах IP-телефонии. Однако протокол является неустойчивым к атаке активного нарушителя в канал связи, что приводит к компрометации выработанного ключевого материала. Целью работы является разработка методов повышения защиты протоколов распределения ключей, основой которых является протокол Диффи — Хеллмана. **Методы:** исследованы особенности распространения пакетов между узлами глобальной сети Интернет в разных городах при использовании нескольких провайдеров связи. **Результаты:** выполнены оценки вероятностей совпадения пар и троек маршрутов в глобальной сети между разными городами при подключении через нескольких операторов связи. Изложен подход к повышению защищенности протоколов распределения ключей при помощи параллельной передачи сообщений по независимым каналам связи для случая, когда корреспонденты не имеют общего секрета. В работе приведены методы обнаружения и снижения влияния действий нарушителя на работу протоколов распределения ключей. Представлены оценки вероятностей успешной атаки, обнаружения атаки активного нарушителя, успешной генерации общего секрета. **Практическая значимость:** результаты исследований позволяют повысить безопасность существующих протоколов распределения ключей.

Ключевые слова — криптографические протоколы, протоколы распределения ключей.

Введение

Схема распределения ключей Диффи — Хеллмана, лежащая в основе многих криптографических протоколов, получила широкое распространение среди схем распределения ключей между корреспондентами и позволяет корреспондентам выработать общий секретный ключ для симметричного шифрования данных. Данная схема является основой безопасного распределения ключевого материала для протоколов обеспечения безопасности IP-телефонии ZRTP [1–3], MIKEY [4], DTLS [5] и др.

Вместе с тем схема Диффи — Хеллмана может быть полностью компрометирована активным нарушителем при реализации атаки вторжения в середину канала связи. Поэтому при реализации алгоритма распределения ключей необходимо обеспечить подлинность сообщений протокола [6]. С этой целью схему Диффи — Хеллмана обычно реализуют в защищенном канале передачи данных, для которого невозможно выполнить подмену передаваемых сообщений [7, 8]. При этом для аутентификации передаваемых сообщений, как правило, используют цифровые сертификаты.

Однако в случае необходимости выработки общего секретного ключа корреспондентов, которые не имеют общего доверенного удостоверяющего центра, требование обеспечения аутентичности сообщений протокола Диффи — Хеллмана не обеспечивается.

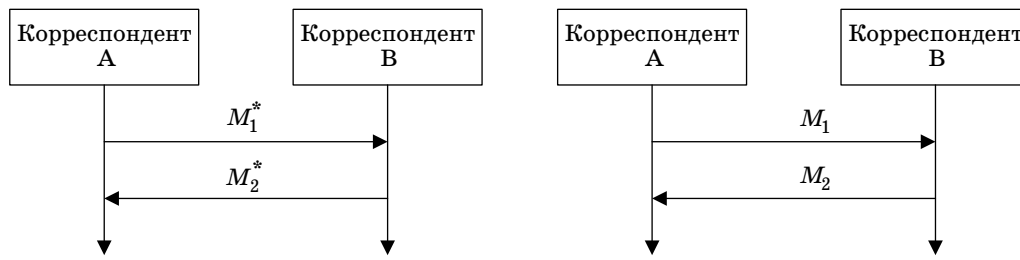
Способ обнаружения атак вторжения в середину протокола Диффи — Хеллмана

В настоящее время наличие у одного корреспондента двух и более подключений к транспортной сети является обычным явлением. Для обнаружения нарушителя предлагается модифицировать протокол распределения ключей так, чтобы выполнять обмен сообщениями с использованием нескольких каналов связи одновременно.

Рассмотрим ситуацию, когда корреспонденты, имеющие по два или более подключений к транспортной сети, пытаются установить защищенное соединение IP-телефонии без участия посредников. Подключения выполняются через разных операторов связи с различными публичными IP-адресами для каждого из сетевых подключений. Для организации защищенного соединения корреспонденты обмениваются IP-адресами, создавая два или более виртуальных каналов.

При выполнении протокола, как показано на рис. 1, передаются одинаковые сообщения по каждому из каналов. При этом респондент, получив сообщения, проверяет их на совпадение. Если обнаружено несовпадение — имеет место атака MITM (Man in the Middle) в одном из каналов [9, 10].

Респондент отвечает, отправляя по двум каналам связи ответные сообщения. Инициатор получает сообщения и выполняет аналогичную проверку. Если сообщения одинаковые, значит либо отсутствует активный нарушитель в двух



■ Рис. 1. Обмен сообщениями по двум каналам связи

каналах связи, либо присутствует активное воздействие одного нарушителя на оба канала связи одновременно.

Очевидно, что подготовка к атаке вторжения требует значительных ресурсов нарушителя, поэтому вероятность вторжения в несколько каналов меньше, чем вероятность вторжения в один из каналов. Наиболее критична ситуация, когда трассы используемых каналов в некоторых узлах сходятся, поскольку нарушитель, атакуя такой узел, может воздействовать на все каналы.

При модификациях протокола распределения ключей, заключающихся в использовании нескольких каналов связи, возрастает актуальность оценки вероятностей успешной атаки MITM, обнаружения атаки MITM и успешной генерации общего секрета.

Реализация протокола Диффи — Хеллмана по двум независимым каналам

Введем вероятность $P_{y.a1}$ того, что нарушитель выполняет атаку MITM в одном из каналов. Под успешной атакой на модифицированный протокол будем понимать событие успешной атаки MITM в каждом из каналов. Это возможно в том случае, когда один и тот же нарушитель контролирует используемые каналы и может выполнять синхронную модификацию сообщений в каждом из каналов. Тогда вероятность успешной атаки $P_{y.a2}$ соответствует модификации сообщений в двух каналах связи одновременно:

$$P_{y.a2} = (P_{y.a1})^2.$$

Обнаружение нарушителя определим как событие несовпадения сообщений протокола в различных каналах. Вероятность обнаружения нарушителя $P_{o.n2}$ для двухканальной схемы соответствует вероятности нахождения нарушителя в одном канале связи при отсутствии в другом:

$$P_{o.n2} = 2(1 - P_{y.a1}) P_{y.a1}.$$

Успешная выработка ключа возможна только в случае необнаружения нарушителя ни в одном канале связи. Однако совпадение сообщений возможно и в том случае, когда нарушитель присут-

ствует в обоих каналах и производит согласованную подмену сообщений. Поскольку эти события несовместны, вероятность успешной выработки ключа равна разности вероятностей отсутствия и присутствия нарушителя в обоих каналах:

$$P_{y.k2} = (1 - P_{y.a1})^2 - P_{y.a2}^2 = 1 - 2P_{y.a1}.$$

Следует отметить, что необходимость синхронной модификации сообщений в двух каналах связи требует от нарушителя дополнительных ресурсов по сравнению с модификацией сообщений по отдельности в каждом из каналов связи.

Реализация протокола Диффи — Хеллмана по трем независимым каналам

Пусть по трем каналам связи будут передаваться одинаковые сообщения схемы Диффи — Хеллмана, тогда результатом работы протокола является одно из нескольких событий:

- 1) все принятые сообщения совпадают;
- 2) одно сообщение отличается от других;
- 3) все сообщения разные.

В первом случае протокол не обнаруживает нарушителя.

Во втором случае протокол позволяет обнаружить нарушителя без определения атакованного канала или определить такой канал и исключить его при формировании ключа.

В третьем случае атака обнаруживается, но атакованные каналы не идентифицируются.

Поэтому возможно выделить два режима работы протокола — с обнаружением и исключением нарушителя.

При работе в режиме *обнаружения* нарушителя протокол завершается с ошибкой, уведомляя пользователя о наличии нарушителя в канале связи.

В случае работы в режиме *исключения* нарушителя при обнаружении отличий в одном из сообщений протокол уведомляет о наличии нарушителя в конкретном канале связи, при этом он продолжает работу и учитывает сообщения лишь из тех каналов связи, где не обнаружен нарушитель. Вероятность правильного исключения на-

рушителя $P_{пр.и}$ для трехканального протокола соответствует событию нахождения нарушителя в одном из каналов связи при его отсутствии в двух других:

$$P_{пр.и} = 3P_{y.a1}(1 - P_{y.a1})^2.$$

При воздействии нарушителя одновременно на два канала связи из трех возможных, с синхронной модификацией сообщений механизм исключения может вызвать некорректное определение канала с нарушителем, что приведет к ошибочному выбору надежных каналов. Это позволит нарушителю успешно выполнить обмен ключами с корреспондентами, осуществив атаку MITM.

Вероятности ошибочного исключения соответствуют вероятности события, что нарушителем выполнена одновременная подмена сообщений сразу в двух каналах связи:

$$P_{ош.и} = 3P_{y.a1}^2(1 - P_{y.a1}).$$

Расчет вероятностей трехканального протокола в режиме обнаружения нарушителя.

Вероятность успешной атаки $P_{y.a3_{o.n}}$ соответствует вероятности того, что нарушитель перехватил и выполнил модификацию сообщений сразу в трех каналах одновременно:

$$P_{y.a3_{o.n}} = P_{нзк} = (P_{y.a1})^3.$$

Определим вероятность обнаружения нарушителя $P_{o.n3_{o.n}}$.

Вероятность наличия нарушителя в одном из каналов при отсутствии нарушителя в двух других каналах связи

$$P_{нар1к_{нет}_{нар23к}} = 3(1 - P_{y.a1})^2P_{y.a1}.$$

Вероятность наличия нарушителя в двух каналах при отсутствии нарушителя в третьем равна

$$P_{нет_{нар1к}_{нар23к}} = 3(1 - P_{y.a1})^2P_{y.a1}^2;$$

$$P_{o.n3_{o.n}} = P_{нар1к_{нет}_{нар23к}} + P_{нет_{нар1к}_{нар23к}} = 3(1 - P_{y.a1})^2P_{y.a1} + 3(1 - P_{y.a1})^2P_{y.a1}^2.$$

Вероятность успешного формирования общего ключа $P_{y.k3_{o.n}}$ для трехканального протокола в режиме обнаружения нарушителя соответствует вероятности отсутствия нарушителя в трех каналах связи. Следовательно:

$$P_{y.k3_{o.n}} = P_{нет_{нар}}^3 = (1 - P_{y.a1})^3.$$

Расчет вероятностей трехканального протокола в режиме исключения нарушителя.

Вероятность успешной атаки $P_{y.a3_{и.н}}$ соответствует вероятности события перехвата и модификации сообщений нарушителем в двух или трех каналах связи одновременно, которая равна

$$P_{y.a3_{и.н}} = (P_{y.a1})^3 + 3(1 - P_{y.a1})P_{y.a1}^2.$$

Вероятность обнаружения нарушителя $P_{o.n3_{и.н}}$ соответствует вероятности нахождения нарушителя в одном канале связи при отсутствии нарушителя в двух других каналах связи.

Вероятность наличия нарушителя в одном из каналов связи при отсутствии нарушителя в двух других каналах связи будет иметь вид

$$P_{o.n3_{и.н}} = 3(1 - P_{y.a1})^2P_{y.a1}.$$

Вероятность успешного формирования общего ключа $P_{y.k3_{и.н}}$ соответствует вероятности отсутствия нарушителя в двух или трех каналах связи. Следовательно:

$$P_{y.k3_{и.н}} = (1 - P_{y.a1})^3 + 3(1 - P_{y.a1})^2P_{y.a1}.$$

Зависимости рассмотренных вероятностей от вероятности успешной подмены сообщений в одном из каналов связи для исходного протокола и модифицированного в двух- и трехканальном варианте показаны на рис. 2, а–в.

Экспериментальная оценка вероятности совпадения виртуальных каналов транспортной сети

Структура глобальной транспортной сети описана в различных источниках [11]. Маршрутизация пакетов осуществляется динамическими протоколами и зависит от многих параметров [12]. Предположим, что структура глобальной сети является случайной.

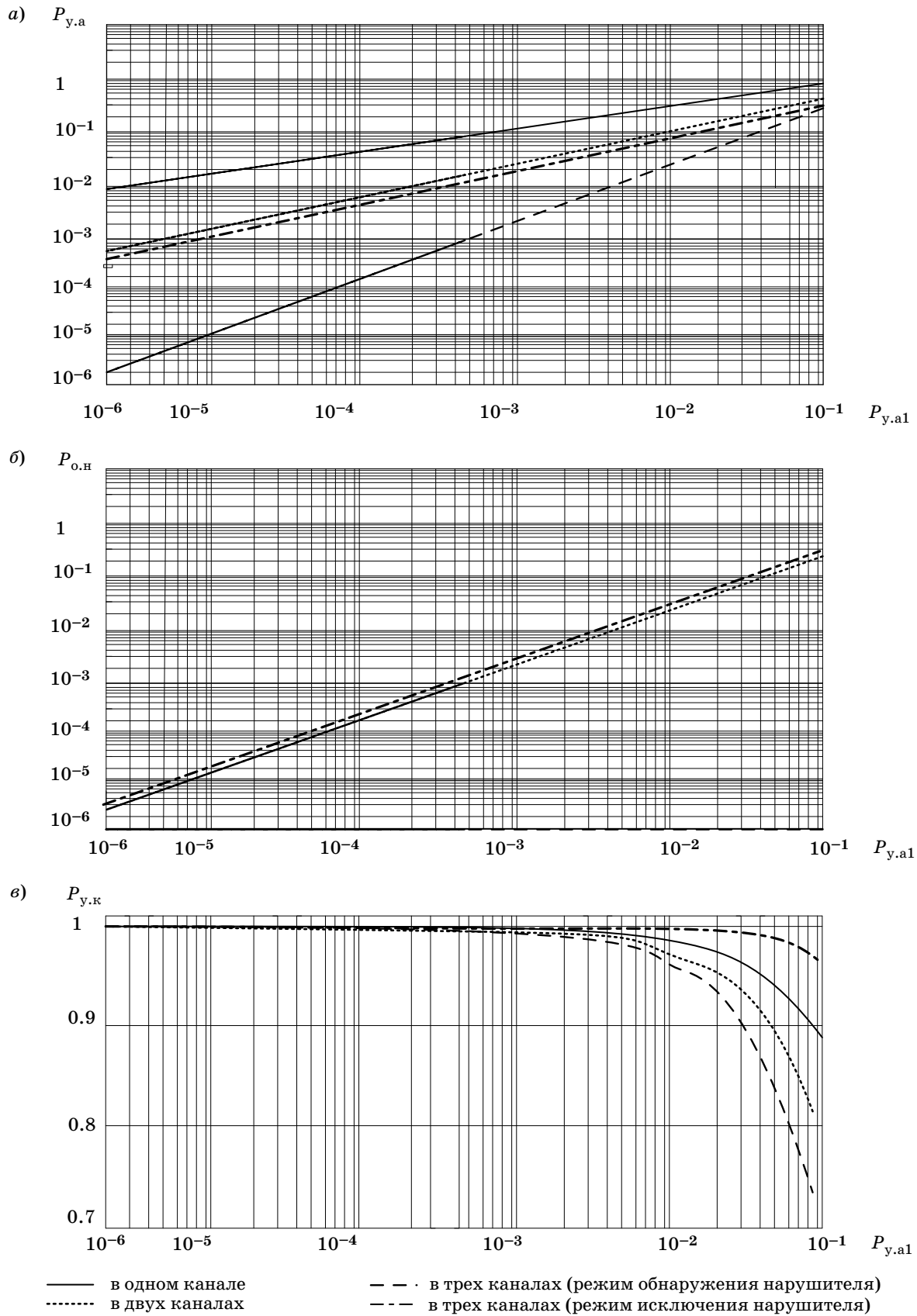
Максимальное число групп независимых маршрутов W определяется соотношением

$$W = \prod_{i=0}^{n_s-i} (N_s - i)(N_d - i)(n_s!)^{-1},$$

где N_s — число начальных точек маршрутов; N_d — число удаленных точек маршрутов; n_s — количество независимых маршрутов, сравниваемых для анализа числа совпадений.

Для трассировки маршрутов от начальной до удаленной точки использовались программно-аппаратные средства, состав и конфигурация которых остается за рамками данной работы. В результате сравнения маршрутов было получено число пар и троек непересекающихся маршрутов, а также количество маршрутов, на которых встречались общие точки. При сравнении троек маршрутов дополнительно оценивалось число маршрутов без общих точек, а также число троек маршрутов с одной, двумя или тремя общими точками. Итоговые данные эксперимента представлены в таблице.

Из общего числа пар маршрутов 2478 в 122 обнаружены совпадения. Таким образом, только



■ **Рис. 2.** Вероятность: а — успешной атаки МПТМ; б — обнаружения нарушителя; в — успешной выработки ключа

■ Число независимых пар и троек маршрутов

Страна	Город	Число точек в городе	Для пар маршрутов/для троек маршрутов			
			общее число маршрутов	число маршрутов без общих точек	число маршрутов с общей точкой	совпадение маршрутов, %
Россия	Барнаул	3	60/60	59/57	1/3	1,67/5,00
Россия	Москва	3	60/60	60/60	0/0	0,00/0,00
Россия	Новосибирск	3	60/60	60/60	0/0	0,00/0,00
Германия	Берлин	3	60/60	57/51	3/9	5,00/15,00
Германия	Мюнхен	3	60/60	60/60	0/0	0,00/0,00
США	Нью-Йорк	4	120/240	119/234	1/6	0,83/2,50
США	Эдисон	3	60/60	59/57	1/3	1,67/5,00
Австралия	Сидней	3	60/60	58/57	2/3	3,33/5,00
Австралия	Мельбурн	5	200/600	157/116	43/484	21,5/81,07
Россия	Санкт-Петербург	12	1320/13200	1320/13200	0/0	0,00/0,00
США	Даллас	3	60/60	51/33	9/27	15,00/45,00
Япония	Фукуока	3	60/60	34/0	26/60	43,33/100,00
Япония	Токио-Чийода	7	420/2100	384/1576	36/524	8,57/24,95
Всего				2478/15561	122/1119	

4,4 % из всех возможных пар имели общие точки. В результате эксперимента не обнаружено городов, к которым все подходящие пары маршрутов имели бы общую точку. Использование двух или трех каналов связи, предоставляемых разными операторами связи, позволяет с большой вероятностью организовать независимые каналы, не имеющие общих точек, и существенно уменьшить вероятность необнаруженного вторжения.

Заключение

Модификация протокола для работы по нескольким независимым каналам существенно

уменьшает вероятность успешной атаки MITM. Эффективность защиты возрастает с увеличением числа независимых каналов.

Исследования показывают, что при подключении корреспондентов к нескольким операторам связи независимые двойки и тройки маршрутов имеются всегда. Вероятность успешного формирования общего ключа в многоканальной схеме с обнаружением нарушителя уменьшается незначительно. В схеме с исключением нарушителя данная вероятность увеличивается, но при использовании трасс большой протяженности возможно совпадение узлов прохождения маршрутов, что может снизить эффективность работы модифицированного протокола.

Литература

1. Ковцур М. М., Никитин В. Н., Юркин Д. В. Оценка вероятностно-временных характеристик защищенной IP-телефонии // Защита информации. Ин-сайд. 2012. № 4. С. 64–71.
2. Ковцур М. М., Никитин В. Н., Винель А. В. Исследование вероятностно-временных характеристик протокола распределения ключей защищенной IP-телефонии // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 54–63.

3. RFC 6189. ZRTP: Media Path Key Agreement for Unicast Secure. 2011. <http://tools.ietf.org/html/rfc6189> (дата обращения: 20.10.2013).
4. RFC 3830. MIKEY: Multimedia Internet KEYing. August, 2004. <http://tools.ietf.org/html/rfc3830> (дата обращения: 25.10.2013).
5. RFC 5764. Datagram Transport Layer Security (DTLS) Extension to Establish Keys for the Secure Real-time Transport Protocol (SRTP). <http://tools.ietf.org/html/rfc5764> (дата обращения: 29.10.2013).

6. Коржик В. И., Просихин В. П. Основы криптографии: учеб. пособие по специальности 210403 «Защищенные телекоммуникационные системы связи». – СПб.: Линк, 2008. – 256 с.
7. Яковлев В. А., Коржик В. И., Бакаев М. В. Протоколы формирования ключа на основе каналов связи с шумом в условиях активного перехвата с использованием экстракторов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2006. № 1. С. 51–67.
8. Патент 2183348, Российская Федерация G06F12/14, H04L9/32. Способ аутентификации объектов / Молдовян А. А., Молдовян Н. А., Никитин В. Н., Фокин А. О. – № 2000119274/09; заявл. 19.07.2000; опубл. 10.06.2002, Бюл. № 6. – 9 с.
9. Макарова О. С. Методика формирования требований по обеспечению информационной безопасности сети IP-телефонии от угроз среднестатистического «хакера» // Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1. С. 51–67.
10. Говор Т. А. Обеспечение безопасности современных VOIP-сетей // Радиопромышленность. 2011. № 4. С. 37–43.
11. Перфильев Ю. Ю. Российское интернет-пространство: развитие и структура. – М.: Гардарики, 2003. – 272 с.
12. Левин В., Дякив Д. SLA в России пять лет спустя // Журнал сетевых решений LAN. 2013. № 09. С. 35–39.

UDC 004.05

Enhancement of Security of Key Distribution Protocols Against Intruder Attacks in the Middle of a Communication Channel

Nikitin V. N.^a, PhD, Tech., Associate Professor, vnikitin@rdnet.ru

Kovtsur M. M.^a, Post-Graduate Student, maxkovzur@mail.ru

Yurkin D. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, dvyurkin@yandex.ru

^aBonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 22 – 1, Bol'shevnikov St., 193232, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Diffie — Hellman algorithm is widely used in many key distribution protocols including IP-telephony protocols. However the protocol is unstable against an active intruder attack in a communication channel resulting in discrediting generated key material. The goal of the paper is to develop methods to enhance security of key distribution protocols based on Diffie — Hellman protocol. **Methods:** There have been studied particularities of package distribution between different nodes of the global Internet web in different cities using several communication providers. **Results:** There have been carried out estimates of probability of matching pairs and triplets of paths in the global network between different cities using several communication operators. There has been stipulated an approach to enhance security of key distribution protocols by means of distribute message transmission through two or three independent channels in the case when correspondents do not have a shared secret. The paper has revealed techniques to detect and to decrease influence of intruder actions against performance of key distribution protocols. There have been presented estimates of probabilities of a successful attack, an active intruder attack detection and successful generation of a shared secret. **Practical relevance:** The research results allow to enhance security of the existing key distribution protocols.

Keywords — Cryptographic Protocols, Key Distribution Protocols.

References

1. Kovtsur M. M., Nikitin V. N., Iurkin D. V. Estimation of the Time-Probabilistic Characteristics of Secure IP-Telephony. *Zashchita informatsii. In said*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 64–71 (In Russian).
2. Kovtsur M. M., Nikitin V. N., Vinel' A. V. Analysis of the Time-Probabilistic Characteristics of Key Agreement Protocol for Secure IP-Telephony. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 54–63 (In Russian).
3. *RFC 6189. ZRTP: Media Path Key Agreement for Unicast Secure*. 2011. Available at: <http://tools.ietf.org/html/rfc6189> (accessed 20 October 2013).
4. *RFC 3830. MIKEY: Multimedia Internet KEYing*. 2004. Available at: <http://tools.ietf.org/html/rfc3830> (accessed 25 October 2013).
5. *RFC 5764. Datagram Transport Layer Security (DTLS) Extension to Establish Keys for the Secure Real-time Transport Protocol (SRTP)*. 2010. Available at: <http://tools.ietf.org/html/rfc5764> (accessed 29 October 2013).
6. Korzhik V. I., Prosikhin V. P. *Osnovy kriptografii* [Foundations of Cryptography]. Saint-Petersburg, Link Publ., 2008. 256 p. (In Russian).
7. Iakovlev V. A., Korzhik V. I., Bakaev M. V. Protocols for Generating a Key Based Communication Channel with Noise Pickup Conditions Using Active Extractors. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'uternye sistemy*, 2006, no. 1, pp. 51–67 (In Russian).
8. Moldovian A. A., Moldovian N. A., Nikitin V. N., Fokin A. O. *Sposob autentifikatsii ob'ektov* [Object's Authentication Method]. Patent Russian Federation, no. 2000119274/09, 2002.
9. Makarova O. S. Formation Technique Requirements for Information Security IP-Telephony Network from Threats Average "Hacker". *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2012, vol. 25, no. 1, pp. 64–68 (In Russian).
10. Govor T. A. Securing VOIP-Modern Networks. *Radiopromyshlennost'*, 2011, no. 4, pp. 37–43 (In Russian).
11. Perfil'ev Iu. Iu. *Rossiiskoe internet-prostranstvo: razvitie i struktura* [Russian Internet Space: the Development and Structure]. Moscow, Gardariki Publ., 2003. 272 p. (In Russian).
12. Levin V., Diakiv D. SLA in Russia Five Years Later. *Zhurnal setevykh reshenii LAN*, 2013, no. 9, pp. 35–39 (In Russian).

УДК 621.396:621.391.26

БИНАРНЫЕ R2-КОДЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИМЕНЕНИЕ

Ю. В. Чепруков^а, канд. техн. наукМ. А. Соколов^б, доктор техн. наук, профессор^аРоссийский государственный университет туризма и сервиса, филиал, Сочи, РФ^бСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: проведенный обзор показал, что сейчас в различных системах используются в основном давно предложенные и подробно изученные сигналы. Повышение эффективности возможно при использовании более совершенных бинарных кодов и основанных на них сигналов. Среди известных N -элементных бинарных кодов, применяемых в системах связи, радиолокации и управления, отсутствуют такие, которые при изменении N в широких пределах позволяют получать достаточно низкий уровень боковых пиков автокорреляционной функции. Цель работы — синтез бинарных кодов с уровнем R боковых пиков автокорреляционной функции. Задача синтеза представлена в виде системы неравенств, указаны особенности задачи, обоснован выбор метода решения. **Результаты:** приведены результаты синтеза кодов с $R=2$, $N \leq 28$, названных R2-кодами. Они эффективнее лучших кодов Баркера по относительному уровню боковых пиков в 14/13 раза, позволяют получить разнообразные коэффициенты сжатия (22 варианта), и количество их достаточно велико (480). Составлена таблица R2-кодов. Обосновано предположение, что $N=28$ соответствует максимальному порядку R2-кодов. Имеется большое количество пар кодов, при сложении автокорреляционных функций которых осуществляется компенсация боковых пиков. Получены дополнительные последовательности с полной компенсацией боковых пиков, в частности для $N=8$ установлено наличие восьми пар. Представлены различные по численности и корреляционным характеристикам ансамбли. **Практическая значимость:** внедрение R2-кодов в системы связи позволит повысить эффективность систем. В радиолокационных станциях, оснащенных системой селекции движущихся целей, можно повысить эффективность обнаружения сигналов на фоне пассивных помех при использовании пар R2-кодов с компенсацией боковых пиков. R2-коды могут применяться в системах управления и контроля при создании алфавитов передачи данных. Например, для систем управления мобильными роботами в условиях наличия помех, в системах контроля расхода взвесей твердых веществ, жидкостей, газов или плазмы технологических или производственных установок.

Ключевые слова — фазоманипулированные сигналы, бинарные коды, автокорреляционная функция, уровень боковых пиков, корреляционная функция, оптимизация.

Введение

В современных системах управления, связи и радиолокации широко используются шумоподобные сигналы (ШПС). Разновидностью ШПС являются фазоманипулированные сигналы (ФМС) [1], которые состоят из последовательности N радиоимпульсов с одинаковой частотой и амплитудой. Очередность следования радиоимпульсов с различными начальными фазами характеризуется бинарной кодовой последовательностью или просто кодом ФМС. Назовем ФМС, автокорреляционная функция (АКФ) которых в области боковых пиков может изменяться в пределах $\pm R$ ($0 \leq R \leq N-1$, R — целое), сигналами R -го рода (ФМС- R), а соответствующие им коды $G_{R,N}$ — R -кодами. Наибольшую известность получили коды Баркера (КБ) [2], для них $R=1$. Обозначим для N -элементных КБ $B_1 = 1/N$ — относительный уровень боковых пиков (УБП) АКФ; $K_c = N$ — коэффициент сжатия; $N_{\max 1} = 13$ — максимальное значение N ; $N1 = 7$ — общее количество КБ [2].

Проведем краткий обзор литературы, в которой рассмотрены системы с ФМС, разновидности сигналов и используемых кодов, а также задачи их синтеза и обработки.

Широкое применение нашли M -последовательности с УБП $B_2 \approx 1/\sqrt{N}$ [1]. Они сравнительно просто реализуются схемотехнически, количество кодов N^2 велико, но уровень B_2 недостаточно мал.

Фазоманипулированные сигналы применяются в современных системах мобильной связи. В сотовых системах стандарта CDMA (Code Division Multiple Access — системы с кодовым разделением каналов) [3, 4] для повышения помехоустойчивости в кодах используют ортогональные коды Уолша. Здесь главным условием применимости указанной системы сигналов является ортогональность кодов [3]. Вместе с тем применяются бинарные коды Голда и Касами [3], опирающиеся на M -последовательности. В системах с кодовым разделением, где сигналы передаются на уровне шумов, актуальна задача применения более совершенных кодов, имеющих лучшие корреляционные характеристики.

Цифровое кодирование дискретной информации, например Манчестерский код, применяется в технологиях Ethernet и Token Ring [5]. Используется перепад потенциала («1» — перепад от низкого уровня сигнала к высокому, а «0» — наоборот). Этот код не содержит постоянной составляющей тока, что важно при построении

нии сетей, в которых компьютеры связаны линиями передачи.

Дополнительные последовательности в виде бинарных кодов с равным числом N символов [1] представляют собой такие пары, у которых при сложении их АКФ главные пики удваиваются, а боковые пики полностью компенсируются, так что УБП суммарной АКФ равен нулю. В работах [1, 6] приведены примеры кодов с $N=4, 8, 10$ при $R=3$. Даны варианты создания из дополнительных последовательностей разнообразных композиций. Это позволило ввести так называемые E - и D -коды, составляющие коды Велти и четвертичные коды [1]. Заметим, что требования к УБП АКФ отдельных последовательностей не рассматривались, а ключевым свойством сигналов является компенсация пиков суммарной АКФ.

В работе [7] указаны возможности построения ФМС, в которых отдельные дискреты сложного сигнала представляются частотно-модулированными сигналами. Рассмотрено применение ортогональных кодирующих последовательностей на основе E -кодов. Приведены варианты внутридискретной модуляции сигналов (линейной, квадратичной или кубической), причем бинарными кодами всего сигнала являются E -коды. Исследованные сигналы предложено использовать в обзорных радиолокаторах, содержащих систему селекции движущихся целей, где при накоплении сигналов пачки осуществляется выделение полезных сигналов на фоне пассивных помех. Однако в работе отсутствуют рекомендации по выбору дополнительных последовательностей, используемых при построении E -кодов.

В работе [8] обращено внимание на необходимость проведения исследований по возможной интеграции сверхширокополосных систем с другими технологиями и системами, в частности, с теми, в которых используются ФМС и сигналы с линейной частотной модуляцией. Это может позволить снизить влияние межсимвольной интерференции при передаче данных. Следовательно, наличие систем кодов актуально для сверхширокополосных систем.

Совершенствование бинарных кодов для построения ФМС насущно для сверхширокополосных радиолокационных систем [9]. Здесь при обзоре пространства узким лучом антенны в каждом угловом направлении излучается конечное число импульсов, составляющих пачку. Обработка пачки позволяет увеличить выходное отношение сигнал/шум, реализовать доплеровские методы обнаружения движущихся целей на фоне пассивных помех. Для сверхширокополосных систем актуально использование излучения пачек из ШПС, например дополнительных последовательностей, что позволяет улучшить функционирование системы селекции движущихся

целей, повысить качество выделения сигналов на фоне помех.

Краткий анализ показывает актуальность вопроса получения новых бинарных кодов для создания более совершенных одиночных ФМС и ансамблей. По-видимому, за последнее время не появилось новых кодов и ансамблей, которые позволили бы повысить эффективность систем с ФМС.

Особо подчеркнем работу авторов [10], где сформулирована задача, предложен метод решения, представлены результаты синтеза некоторых кодов с $R=2, 3; N \leq 25$. Показаны существенные преимущества синтезированных кодов по сравнению с M -последовательностями.

В представленной работе получены все возможные коды с $R=2, N \leq 28$, выполнен анализ их корреляционных характеристик, даны предложения по применению полученных результатов. Эти коды ($R2$ -коды) позволяют оптимизировать выбор ФМС для систем управления, связи и радиолокации. Показано, что $R2$ -коды составляют замкнутое множество со специфическими свойствами.

Задача и методика синтеза, особенности решения

Рассмотрим последовательность N радиоимпульсов одинаковой длительности T , начальная фаза которых равна 0 или π и которые составляют ФМС. Обозначим $\{G_{R,N}\} = \{P_j, j = \overline{1, N}\}$, $P_j = \pm 1$ бинарные последовательности условных значений начальных фаз импульсов ФМС, которые соответствуют R -кодам. Пусть $B_3 = R/N$ — относительный УБП АКФ этих R -кодов, а $g_{R,N}$ — их количество [10].

Пусть $S(t)$ определяет модуль АКФ бинарных кодовых последовательностей ФМС. В моменты $t_k = kT$, отсчитываемые от начала АКФ, $S(t_k)$ принимает экстремальные или нулевые значения, причем $S(t_N) = N$.

Задача синтеза заключается в определении коэффициентов P_j , для которых выполняются неравенства вида [10]

$$S(t_k) = \left| \sum_{j=1}^k P_j \cdot P_{N+j-k} \right| \leq R_k, \quad k = \overline{1, N-1}, \quad (*)$$

где R_k — заданные по условию синтеза значения АКФ в моменты времени t_k , в частном случае можно для всех t_k в области боковых пиков задать одинаковое максимальное значение АКФ, равное R . Универсальность методики состоит в возможности задания различных, неравных значений R_k . Однако целесообразно сначала найти решения для случая равенства всех этих величин, а потом ввести дополнительные условия в виде различия некоторых из них. Введем некоторые опре-

учтены симметричные и асимметричные коды как самостоятельные.

Для $N=22, 23, 24, 26, 27$ $R2$ -кодов не существует. Представленные коды имеют в $q=(B_2/B_3) \approx 0,5\sqrt{N}$ раз более низкий УБП АКФ, чем M -последовательности. Для систем CDMA рассмотрены [18] возможности синтеза множества бинарных кодов Голда и Касами, относящихся к производным ансамблям [1]. В качестве производного сигнала используются M -последовательности. Благодаря большей эффективности $R2$ -коды потенциально превосходят указанные ансамбли.

3. Найденные $R2$ -коды с $N=28$ эффективнее лучших КБ с $N=13$ по относительному УБП в 14/13 раза, так как для КБ минимальное значение этого уровня $B_1=1/13$, а для $R2$ -кодов $B_3=(1/14) < B_1$. То же справедливо и для следующих по убыванию $R2$ -кодов с $N=25$ и КБ с $N=11$. То есть $B_1=1/11$, $B_3=(2/25) < B_1$, следовательно, отношение равно 25/22. Это соотношение относится и к другим $R2$ -кодам и КБ.

4. Установлено, что среди полученных кодов можно выделить множество таких пар, для которых при сложении их корреляционных функций происходит частичная компенсация боковых пиков.

Например, для $N=25$ выберем первый код из таблицы, а второй — (1,1,-1,-1,-1,1,1,1,1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,-1,1). Их индивидуальные АКФ — (1,0,-1,-2,-1,2,-1,-2,1,-2,-1,0,-1,0,-1,2,-1,2,-1,-2,1,0,25; 1,0,-1,2,-1,-2,-1,2,1,2,1,2,-1,0,-1,0,-1,-2,-1,-2,-1,2,1,0,25). Видно, что полусумма АКФ кодов равна (1,0,-1,0,-1,0,-1,0,1,0,1,0,-1,0,-1,0,-1,0,-1,0,-1,0,1,0,25). Обозначим B_4 УБП суммарной АКФ, тогда $B_4=1/N=1/25$. Это в 2 раза меньше, чем у АКФ этих кодов в отдельности. Всего имеется 4 пары с такими свойствами.

Пусть для $N=21$ первый код выбран из таблицы, а второй — (1,1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,-1,1,1,1,-1,1,-1,1). Половинки АКФ обоих кодов — (1,0,-1,-2,-1,2,-1,0,1,-2,-1,0,1,2,-1,2,-1,2,1,0,21; 1,0,-1,2,-1,-2,-1,0,1,2,-1,0,1,-2,-1,-2,-1,-2,1,0,21), тогда суммарная функция — (1,0,-1,0,-1,0,-1,0,1,0,-1,0,1,0,-1,0,-1,0,-1,0,1,0,21). Здесь $B_4=1/21$, существуют 36 пар таких кодов, причем некоторые суммарные характеристики имеют протяженные последовательности из нулей в окрестности главного пика.

Для $N=19$ выберем первый код из таблицы, а второй — (1,1,1,-1,-1,-1,1,-1,-1,1,-1,-1,1,-1,-1,1), их частные АКФ — (1,0,1,2,-1,2,1,2,1,2,1,2,1,0,1,-2,-1,2,19; 1,0,1,-2,-1,-2,1,-2,1,-2,1,-2,1,0,1,2,-1,-2,19). Тогда очевидно, что полусумма АКФ равна (1,0,1,0,-1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,-1,0,19). Следовательно, $B_4=1/19$ и имеется 4 пары с такими свойствами.

Когда $N=28, 20, 18$, то пар $R2$ -кодов со свойством компенсации пиков не существует, и для суммарной АКФ величина УБП такая, как для одиночных кодов.

Для всех $N < 18$ существуют пары кодов с указанными свойствами, их количество различно (32—528). Близкие к идеалу суммарные АКФ можно получить для множества пар с $N=12$. У них в середине области боковых пиков одно значение равно -1, а все другие значения в этой области равны нулю. Кода с такой же характеристикой, но со значением +1 в середине области боковых пиков для $N=12$ не существует, однако можно рассмотреть задачу поиска четверок кодов, для которых во всей области боковых пиков значения суммарной АКФ равны нулю.

Ранее упоминалось о существовании дополнительных последовательностей [1]. В настоящей работе установлено наличие таковых среди всех $R2$ -кодов при $N=8$. Найденны 8 пар $R2$ -кодов, при сложении АКФ которых боковые пики полностью компенсируются. Например, пусть (1,-1,-1,-1,1,1,-1,1) и (1,-1,-1,-1,-1,-1,1,-1) — $R2$ -коды; (1,-2,1,0,-1,-2,-1,8) и (-1,2,-1,0,1,2,1,8) — индивидуальные АКФ, тогда (0,0,0,0,0,0,0,8) — суммарная АКФ. Кроме того, существует 8 пар $R2$ -кодов, у которых результирующая АКФ имеет лишь одно ненулевое значение в области боковых пиков, например (0,0,0,1,0,0,0,8).

Для всех $N < 8$ также существует множество $R2$ -кодов со свойствами компенсации боковых пиков. Причем при $N=4, 6$ имеется 4 и 12 кодов соответственно с одним ненулевым значением в области боковых пиков, а при $N=3, 4$ имеются коды с полной компенсацией пиков.

Таким образом, установлено наличие пар $R2$ -кодов, для которых имеется полная компенсация боковых пиков АКФ, найдены все дополнительные последовательности среди $R2$ -кодов.

5. Полученные коды можно использовать для составления различных по численности и корреляционным характеристикам ансамблей. Для кодов ансамбля важна взаимная корреляционная функция (ВКФ). Обозначим V_{\max}, V_{\min} — абсолютные значения максимума и минимума модуля ВКФ двух кодов; $B_5=V_{\max}/N$ — максимальное значение ВКФ относительно максимума АКФ; $H(N, r)$ — количество ансамблей, состоящих из r $R2$ -кодов каждый.

Например, при $N=28$ $V_{\min}=8, V_{\max}=27$ (это означает, что коды различаются одним символом). Можно составить $H(28,2)=6$ ансамблей по два кода с V_{\min} , $B_5=8/28$: (1,2), (1,6), (3,4), (4,5), (5,7), (6,8), где цифры в скобках — номера кодов из $\{G_{2,28}\}$.

Для разных пар при $N=25$ значение ВКФ изменяется от $V_{\min}=7$ до $V_{\max}=11$. Из множества кодов с $N=25$ можно составить $H(25,2)=6$ ансамблей по

два кода в каждом с V_{\max} , $B_5=11/25$: (1,2), (1,3), (1,4), (2,3), (2,4), (3,4), где цифры в скобках — номера кодов из третьей колонки таблицы и строки для $N=25$.

Аналогично для троек с V_{\max} и $H(25,3)=4$: (1,2,3), (1,2,4), (1,3,4), (2,3,4). Имеется одна четверка, составленная из всех кодов с V_{\max} . Наименьшие значения $V_{\min}=7$, $B_5=7/25$ можно получить для пар кодов (1,3), (2,4). Чем ниже задается уровень ВКФ, тем меньшее значение $H(N, r)$ получается. Для $N=16$ значения $V_{\min}=5$, $V_{\max}=15$. Имеется $H(16,2)=8$ ансамблей по два кода с V_{\min} , $B_5=5/16$.

В качестве примера ансамблей с малыми значениями N рассмотрим $R2$ -коды с $N=8$, для которых $V_{\min}=3$ и $V_{\max}=7$. Если задать значение V_{\min} , $B_5=3/8$, то можно составить $H(8,2)=40$ ансамблей по два кода. В их число попали и все 8 дополнительных последовательностей, указанных ранее в п. 4. Пример типичной характеристики: (-1,2, -1,0, -1,2,3,0,1, -2, -3,0,1, -2,1) — ВКФ двух указанных ранее дополнительных последовательностей.

Количество $R2$ -кодов максимально при $N=12$. При $N=8...16$ значения $g_{2,N}$ сравнительно велики и можно составить ансамбли, состоящие из десятков кодов. Некоррелированность кодов таких ансамблей невелика. Задача синтеза таких ансамблей может быть решена, но в данной работе не рассмотрена. Итак, имеются обширные возможности построения ансамблей $R2$ -кодов.

Применение

Укажем некоторые варианты использования $R2$ -кодов.

1. Для систем связи, в которых применяется временное и частотное разделение сигналов, а кодовое отсутствует (например, Global System for Mobile communication (GSM) — глобальная система мобильной связи). Существует принципиальная возможность создать параллельно с существующими каналами также каналы с ШПС, реализовав кодовое разделение абонентов. Количество каналов может быть сравнительно малым, они могут предоставляться эксклюзивным пользователям для скрытной связи. Общая пропускная способность возрастет. Телефонные аппараты пользователей должны быть доработаны для приема и передачи ШПС.

2. В системах связи с кодовым разделением. Внедрение более совершенных кодов позволит повысить эффективность. Например, с учетом сказанного ранее относительно кодов Уолша, Касами и Голда целесообразно попытаться использовать $R2$ -коды для синтеза подобных по применению последовательностей.

3. Для радиолокационных станций, оснащенных системой селекции движущихся целей.

Использование в пачке множества пар $R2$ -кодов с $B_3=2/N$, обладающих свойством компенсации боковых пиков суммарной АКФ, позволит повысить эффективность обнаружения сигналов на фоне пассивных помех.

4. В обзорных радиолокационных станциях. В них в качестве зондирующих сигналов возможно применение ФМС с различными кодами, например, содержащими данные о координатах станции. Летательные аппараты, принимая эти зондирующие сигналы от радиолокационных станций, в зоне которых они находятся, могут получать дополнительную информацию для решения своих навигационных задач. То же относится и к пеленгационным средствам, но уже применительно к летательным аппаратам.

5. Для систем управления и контроля. $R2$ -коды могут иметь приложение при создании алфавитов передачи данных. Например, для систем управления мобильными роботами в условиях наличия помех [19], в системах контроля расхода взвесей твердых веществ, жидкостей, газов или плазмы технологических или производственных установок [20].

Для формирования и согласованной фильтрации возможно использование устройств на поверхностных акустических волнах, широко применяемых в системах мобильной связи [3, 4]. Согласованные фильтры для синтезированных сигналов могут быть построены также на микроэлектронных элементах [21]. Для всех R -кодов возможно существенное снижение УБП АКФ путем использования весовой обработки посредством соответствующих фильтров [22].

Заключение

Проведен обзор некоторых современных систем и применяемых в них сигналов. Показано, что сейчас используются в основном давно предложенные и подробно изученные сигналы. Вместе с тем повышение эффективности систем возможно лишь при использовании более совершенных бинарных кодов и основанных на них сигналов. Сформулирована задача синтеза бинарных R -кодов и соответствующих им ФМС- R с заданным характером изменения боковых пиков АКФ. Указаны особенности задачи, обосновано использование метода упорядоченного перебора. Приведены результаты синтеза $R2$ -кодов. Аргументировано предположение, что $N_{\max 2}=28$ соответствует максимальному порядку $R2$ -кодов, приведены доводы необходимости и возможности строгого доказательства этого утверждения. Общее количество $R2$ -кодов равно 480 (без инверсных), а параметр K_c может принимать 22 различных значения, что предоставляет широкие возможности выбора. Лучшие из

$R2$ -кодов эффективнее лучших КБ в 14/13 раза по относительному УБП. Установлено, что множество кодов, найденных для каждого значения N , является совокупностью прямых, зеркальных или зеркально-инверсных прямых кодов, а также симметричных и асимметричных кодов. Исследованы ВКФ различных $R2$ -кодов, что позволило составить множество разнообразных ансамблей. Среди $R2$ -кодов имеется большое количество пар кодов, при сложении АКФ которых осуществляется частичная компенсация боковых

пиков АКФ. Получены дополнительные последовательности с полной компенсацией боковых пиков, в частности для $N=8$ установлено наличие восьми пар. Анализ показывает перспективность развития методов синтеза бинарных R -кодов для их применения в системах управления (при построении алфавитов кодирования для передачи данных), связи (применение более совершенных кодов), в радиолокации (для улучшения характеристик обнаружения целей на фоне пассивных помех и одновременной передачи данных).

Литература

1. **Варакин Л. Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. **Michael J. Mossinghoff.** Wieferich pairs and Barker sequences // *Designs, Codes and Cryptography*. 2009. Vol. 53. N 3. P. 149–163.
3. **Ипатов В. П.** и др. Системы мобильной связи: учеб. пособие для вузов / под ред. В. П. Ипатова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 272 с.
4. **Карташевский В. Г., Семенов С. Н., Фирстова Т. В.** Сети подвижной связи. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. – 302 с.
5. **Олифер В. Г., Олифер Н. А.** Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Питер, 2002. – 672 с.
6. **Complementary sequences** // Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Complementary_sequences. (дата обращения: 23.11.2013).
7. **Литюк Л. В.** Синтез, анализ и обработка систем радиолокационных фазоманипулированных сигналов с внутрискретной частотной модуляцией с заданными свойствами суммарной функции неопределенности: дис. ... канд. техн. наук / ТГРУ. – Таганрог, 2000. – 235 с.
8. **Сперанский В. С., Фролов А. А.** Анализ характеристик многочастотных сверхширокополосных систем связи: материалы Междунар. науч.-техн. конф. INTERMATIC-2011, Москва, 14–17 ноября 2011 г. Ч. 3. С. 64–67.
9. **Чапурский В. В.** Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Э. Н. Баумана, 2012. – 279 с.
10. **Чепруков Ю. В., Соколов М. А.** Синтез фазоманипулированных сигналов с требуемым уровнем боковых пиков АКФ // *Радиотехника*. 1991. № 5. С. 68–70.
11. **Башмакова И. Г.** Диофант и диофантовы уравнения. – М.: ЛКИ, 2007. – 72 с.
12. **Решение уравнений в целых числах.** <http://diofant.na.by/reshenie.htm> (дата обращения: 23.11.2013).
13. **Диофантовы уравнения.** <http://bars-minsk.narod.ru/teachers/diofant.html> (дата обращения: 03.05.2013).
14. **Теория чисел. Диофантовы уравнения.** <http://www.lomonosov-fund.ru/enc/ru/encyclopedia:0156:article> (дата обращения: 03.05.2013).
15. **Диофантовы приближения.** <http://gatchina3000.ru/great-soviet-encyclopedia/bse/028/552.htm> (дата обращения: 03.05.2013).
16. **Пелехатый М. И., Голубев Е. А.** Автокорреляционные свойства некоторых типов двоичных последовательностей // *Проблемы передачи информации*. 1972. Т. VIII. Вып. 1. С. 92–99.
17. **Графоаналитический метод оценки максимальных порядков кодов Баркера** / Ю. В. Чепруков, М. А. Соколов: сб. рефератов депонированных рукописей / ВИМИ. – М., 1991. Вып. № 2. – 18 с. – Деп. в НИИЭИР № 3-8826.
18. **Ipatov V. P.** Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications. – N. Y., John Wiley and Sons Ltd., 2004. – 373 p.
19. **Карпов В. Э., Платонова М. В.** Система навигации мобильного робота // *Информационные средства и технологии: тр. 18-й Междунар. науч.-техн. конф. Москва, 19–21 октября 2010 г.* Т. 2. С. 56–63.
20. **Мелик-Шахназаров А. М., Маркатун М. Г.** Цифровые измерительные системы корреляционного типа. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
21. **А. с. 1709498 СССР, МКИЗ Н 03 Н 15/02, 17/00.** Согласованный фильтр / Ю. В. Чепруков, М. А. Соколов (СССР). – № 1709498; заявл. 06.12.1989; опубл. 30.01.92, Бюл. № 4. – 4 с.
22. **Чепруков Ю. В., Соколов М. А.** Метод оптимизации весовых фильтров сжатия фазоманипулированных сигналов // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1991. № 4. С. 31–37.

UDC 621.396:621.391.26

Binary R2-Codes, Their Features and Application

Cheprukov Yu. V.^a, PhD, Tech., chuv52@mail.ruSocolov M. A.^b, Dr. Sc., Tech., Professor, guap22@mail.ru^aSochi Russian State University of Tourism and Service, 24/a, Kirpichnaia St., 354340, Sochi, Russian Federation^bSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya, 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The implemented survey has shown that today a variety of communication systems mainly applies signals introduced long ago and well studied. In order to enhance efficiency one should use more advanced binary codes and signals based on them. The well-known N-element binary codes which are widely used in systems of communication, radiolocation and control do not allow achieving a low enough level of side peaks of the autocorrelation function in case of N changing in wide limits. The goal of this research is to synthesize binary codes with R level of side peaks of the autocorrelation function. The problem of synthesis has been presented in a form of a system of inequalities; the choice of a solution method has been substantiated. **Results:** There have been demonstrated the results of synthesis of codes with R=2, which are called R2-codes. These codes have proven to be 14/13 times more effective than the best Barker codes according to the relative level of side peaks; they help to get different coefficients of compressibility (22 variants); moreover, there is quite a large amount of such codes (480). The table of R2-codes has been compiled. The assumption that N=28 corresponds to maximum order of R2-codes has been substantiated. There are quite many pairs of the codes where by adding the autocorrelation functions one gets compensation of side peaks. There have been received additional sequences with complete compensation of side peaks, in particular, 8 pairs have been found for N=8. There have given groups different in number and correlation characteristics. **Practical relevance:** Introduction of R2-codes in communication systems provides enhancement of efficiency of these systems. In a radar station equipped with a system of moving targets selection it is possible to enhance efficiency of detecting signals in the background of passive noises using pairs of R2-codes with side peak compensation. R2-codes can also be applied in control systems for creating alphabets for data transmission. For example, they can be used in systems of operating mobile robots in conditions of noises, in control systems supervising expenditure of suspensions of hard materials, liquids, gases or plasma, or technological equipment.

Keywords — Phase-Shift Signals, Binary Codes, Autocorrelation function, Side Peak Level, Correlation function, Optimization.

References

- Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication Systems with Noise Signals]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 384 p. (In Russian).
- Michael J. Mossinghoff. Wieferich Pairs and Barker Sequences. *Designs, Codes and Cryptography*, 2009, vol. 53, no. 3, pp. 149–163.
- Ipatov V. P., Orlov V. K., Samojlov I. M., Smirnov V. N. *Sistemy mobil'noi svyazi* [Mobile Communication Systems]. Ed. V. P. Ipatov. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2003. 272 p. (In Russian).
- Kartashevskij V. G., Semenov S. N., Firstova T. V. *Seti podvizhnoi svyazi* [Networks of Mobile Communication]. Moscow, EKO-TRENDZ Publ., 2001. 302 p. (In Russian).
- Olifer V. G., Olifer N. A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Principles, Technologies, Reports]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2002. 672 p. (In Russian).
- Complementary sequences*. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Complementary_sequences (accessed 23 November 2013).
- Litjuk L.V. *Sintez, analiz i obrabotka sistem radiolokatsionnykh fazomanipulirovannykh signalov s vnutridiskretnoi chastotnoi modulatsiei s zadannymi svoystvami summarnoi funktsii neopredelennosti*. Dis. dokt. tekhn. nauk [Synthesis, Analysis and Processing of Radiolocational Phase-manipulated Signal Systems with Innerdiscreted Frequency Modulation with Given Characteristics of Summary Indefinite Function. Dr. techn. sci. diss.]. Taganrog, TGRU Publ., 2000. 235 p. (In Russian).
- Speranskij V. S., Frolov A. A. Characteristic Analysis of Multifrequency Super Wide-Band Communication Systems. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii INTERMATIC-2011* [Proc. Int. Conf. INTERMATIC-2011, November 14–17, 2011]. Moscow, 2011, part 3, pp. 64–67 (In Russian).
- Chapurskij V. V. *Izbrannye zadachi teorii sverkhshirokopolosnykh radiolokatsionnykh sistem* [Selected Problems of Theory of Super Wide-Band Radiolocation Systems]. Moscow, MGTU im. E. N. Bauman Publ., 2012. 279 p. (In Russian).
- Cheprukov Ju. V., Sokolov M. A. Synthesis of Phasemanipulated Signals with Required Level of Side Peaks ACF. *Radiotekhnika*, 1991, no. 5, pp. 68–70 (In Russian).
- Bashmakova I. G. *Diofant i diofantovy uravneniia* [Diophant and Diophant Equations]. Moscow, LKI Publ., 2007. 72 p. (In Russian).
- Reshenie uravnenii v tselykh chislakh* [Solution of Equations in Whole Numbers]. Available at: <http://diofant.na.by/reshenie.htm> (accessed 23 November 2013).
- Diofantovy uravneniia* [Diophant Equations]. Available at: <http://bars-minsk.narod.ru/teachers/diofant.html> (accessed 3 May 2013).
- Teoriia chisel. Diofantovy uravneniia* [Theory of Numbers. Diophant Equations]. Available at: <http://www.lomonosovfund.ru/enc/ru/encyclopedia:0156:article> (accessed 3 May 2013).
- Diofantovy priblizheniia* [Diophant Approximations]. Available at: <http://gatchina3000.ru/great-soviet-encyclopedia/bse/028/552.htm> (accessed 3 May 2013).
- Pelehatyj M. I., Golubev E. A. Autocorrelation Characteristics of Some Types of Double Sequences. *Problemy peredachi informatsii*, 1972, vol. VIII, no. 1, pp. 92–99 (In Russian).
- Cheprukov Ju. V., Sokolov M. A. Graphoanalytical Method of Evaluation of Maximum Orders of Barker Codes. *Sbornik referatov deponirovannykh rukopisei*, Moscow, VIMI Publ., 1991, vol. 2 no. 3-8826, pp. 1–18 (In Russian).
- Ipatov V. P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*. New York, John Wiley and Sons Ltd., 2004. 373 p.
- Karpov V. Je., Platonova M. V. System of Mobile Robot Navigation. *Trudy XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Informatsionnye sredstva i tekhnologii"* [Proc. XVIII Int. Conf. "Informational Facilities and Technologies"]. Moscow, Izdatel'skii dom MJEI Publ., 2010, vol. 2, pp. 56–63 (In Russian).
- Melik-Shahnazarov A. M., Markatun M. G. *Tsifrovye izmeritel'nye sistemy korrelyatsionnogo tipa* [Figure Measuring Systems of Correlation Type]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 128 p. (In Russian).
- Cheprukov Ju. V., Sokolov M. A. *Soglasovannyi fil'tr* [Matched Filter]. Patent USSR, no. 1709498, 1992.
- Cheprukov Ju. V., Sokolov M. A. Method of Optimization of Weight Compression Filters of Phasemanipulated Signals. *Izvestiia vuzov. Radioelektronika*, 1991, no. 4, pp. 31–37 (In Russian).

УДК 004.057.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО КОММУТИРУЕМОМУ МНОГОКАНАЛЬНОМУ ОПТОВОЛОКОННОМУ СОЕДИНЕНИЮ

В. Г. Шаров^а, канд. физ.-мат. наук

В. С. Никитин^б, канд. техн. наук

А. Н. Ломанов^а, канд. техн. наук

С. В. Чайка^а, инженер-программист, аспирант

^аРыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева, Рыбинск, РФ

^бООО «Научно-технологический центр информационной физики «Интрофизика», Рыбинск, РФ

Постановка проблемы: рассматривается система передачи данных по коммутируемому многоканальному оптоволоконному соединению. Целью работы является программно-аппаратная реализация рассматриваемой системы в виде экспериментальной установки и ее исследование. **Методы:** сопоставлены результаты, полученные на экспериментальной установке, с результатами вычислительного эксперимента на динамической модели той же геометрической конфигурации. Исследовалось поведение системы в режиме передачи данных без перекоммутации, а также функции коммутации каналов и самовосстановления соединения. **Результаты:** подтверждена работоспособность системы передачи данных, построенной на основе коммутируемого многоканального оптоволоконного соединения (в частности, была подтверждена работоспособность функций коммутации каналов, передачи данных и самовосстановления соединения), а также подтверждена адекватность построенной динамической модели. **Практическая значимость:** результаты, полученные в ходе вычислительного эксперимента на динамической модели, позволили оптимизировать геометрическую конфигурацию экспериментальной установки.

Ключевые слова — системы повышенной надежности, многоканальные оптоволоконные соединения, самоорганизующиеся системы, протоколы передачи данных.

Введение

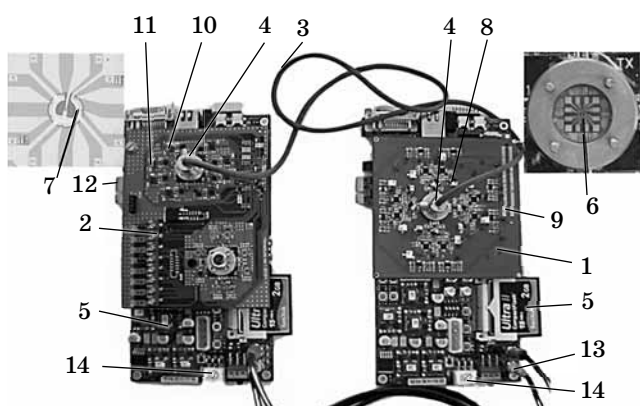
В последние годы все большее внимание при проектировании высокопроизводительных вычислительных систем (сложных микросхем, многопроцессорных суперкомпьютерных систем) уделяется проблеме организации межсоединений [1—3]. Межсоединения определяют организацию обмена информацией между узлами сети и могут быть описаны такими характеристиками, как физическая среда, топология сети, используемые протоколы передачи данных. Если говорить о физической среде, то одним из перспективных направлений развития межсоединений являются многоканальные оптоволоконные соединения.

Основная причина, по которой соединения такого типа до сих пор не получили массового распространения, — это сложность монтажа. Важно, чтобы при монтаже была выполнена строгая юстировка компонентов оптоволоконного соединения (источника и приемника сигнала, а также оптического канала) друг относительно друга. Процедура юстировки и монтажа требует высокоточного, дорогостоящего оборудования. Кроме того, оптоволоконное соединение не обладает достаточной устойчивостью к внешним воздействиям: смещение компонентов друг относительно друга, а также чрезмерный излом оптоволоконных волокон могут привести к трудновосстановимому

нарушению связи. Если говорить о многоканальных оптоволоконных соединениях, то увеличение количества каналов ведет не только к росту производительности соединения, но и к усложнению его монтажа. Наиболее распространенные сегодня многоканальные оптоволоконные соединения — это активные оптические кабели и высокоплотные параллельные оптоволоконные соединения. Разработчики таких соединений решают в основном технологические проблемы высокоточного монтажа, стремясь разместить как можно больше каналов в корпусах небольших размеров.

Возможным альтернативным решением проблемы построения многоканальных оптоволоконных соединений является технология передачи данных по коммутируемому многоканальному оптоволоконному соединению [4]. В данной статье приводятся результаты исследования системы передачи данных, построенной на основе предложенной технологии.

Общая схема системы передачи данных показана на рис. 1. На входы лазерной матрицы 3 подаются электрические импульсы от управляющей микросхемы источника, которые модулируют излучение некоторого множества лазеров 1 (источников сигналов). Это излучение (сигналы 5 и 6) по оптошине (каналу передачи данных) поступает к матрице фотодиодов 10 и активирует некоторое множество фотодиодов 7 и 9 (приемни-

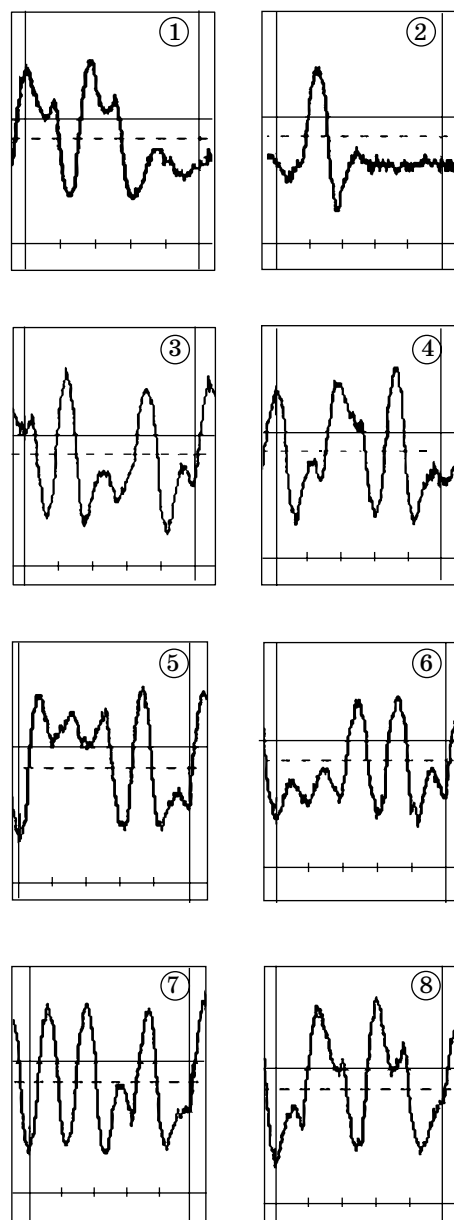


■ **Рис. 3.** Устройство, реализующее коммутируемое многоканальное оптоволоконное соединение: 1 — передающий модуль; 2 — принимающий модуль; 3 — оптошина; 4 — опторазъем; 5 — плата с ПЛИС; 6 — массив VCSEL-лазеров; 7 — массив *pin*-фотодиодов; 8 — драйвер лазера; 9 — LC-фильтр; 10 — трансимпедансный усилитель; 11 — усилитель-ограничитель (10, 11 — драйвер фотодиода); 12 — разъем *PCIe* подключения к ПК; 13 — коаксиальные кабели *GPIO* портов с коннекторами *SMA*; 14 — разъем для кабеля питающего напряжения

Общая схема и параметры экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных исследований системы передачи данных была спроектирована и разработана ЭУ [8]. Серым цветом на рис. 2 условно выделено устройство (так называемый смартлинк), реализующее коммутируемое многоканальное оптоволоконное соединение. Детально оно показано на рис. 3.

Устройство содержит передающий и принимающий модули, соединенные с платой, на которой размещена программируемая логическая интегральная схема ПЛИС *Xilinx Spartan-6 FPGA SP605*, подключенная к шине *PCIe x1*. На внешней поверхности передающего и принимающего модуля размещен оптический разъем, внутри которого в основном находится интегральный массив с соответственно восемью VCSEL-лазерами и восемью *pin*-фотодиодами. Передающий и принимающий модули соединены оптошиной, наконечники (оконечные втулки) которой вставлены в оптические разъемы указанных модулей. Битрейт в *PCIe x1* равен 2,5 Гбит/с, и с учетом избыточности кодирования 8 бит/10 бит теоретическая пропускная способность шины *PCIe x1* может быть рассчитана как $2,5 \cdot 8/10 = 2$ Гбит/с. Передача полезных данных в *PCIe x1* составляет приблизительно 50 % от общего объема передаваемых данных. Таким образом, полезная пропускная способность *PCIe x1* приблизительно равна 1 Гбит/с. Это же подтверждается и анализом разверток осциллографа. На ос-



■ **Рис. 4.** Пиковая активность каналов: 1—8 — информационные каналы передатчика

циллограмме (рис. 4) визуально видно, что в одной клетке (50 нс) помещается 8 информационных бит.

Следовательно, длительность одного информационного бита $T_6 = 50/8 = 6,25$ нс.

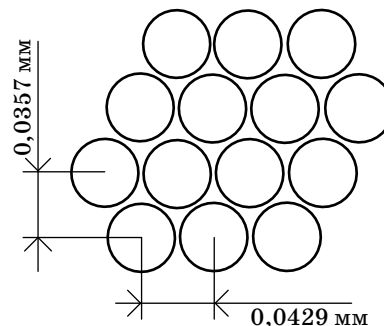
Тогда скорость передачи данных по одному каналу кабеля $G = 1/T_6 = 1/6,25 = 160$ Мбит/с.

Полагая эту скорость передачи одинаковой для всех каналов, получаем суммарную физическую скорость передачи/приема данных по восьми активным каналам кабеля: $G_{\text{сум}} = 160 \cdot 8 = 1280$ Мбит/с.

С учетом избыточности кодирования значащие (полезные) биты передаются с меньшей скоростью: $G_{\text{сум.инф}} = 1280 \cdot 0,8 = 1024$ Мбит/с.



■ Рис. 5. Источники сигналов в координатах X0Y



■ Рис. 6. Разметка каналов

Конфигурация матрицы источников сигналов, используемой в ЭУ, представлена на рис. 5.

Оптоволоконная шина имеет круглую форму сечения входного торца, что дает возможность обеспечить соответствие сечения жгута форме источника излучения. Диаметр оптоволоконной шины по наружной оболочке составляет 3 мм. Оптические волокна собраны в пучок с гексагональной вертикальной раскладкой. Оптоволоконная шина изготовлена с использованием многомодовых оптических волокон из специального стекла с диаметром светопроводящего ядра (сердцевины) 0,03 мм. Диаметр внешнего радиуса оптического волокна составляет 0,04 мм. Принимая коэффициент упаковки каналов в оптошину равным 0,8, количество каналов в оптошине можно рассчитать следующим образом:

$$n_k = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \rho}{\pi \cdot r^2} \times \frac{r^2}{R^2} = \frac{7,0686}{0,0013} \times 0,8 \approx 4500 \text{ шт.}$$

Конфигурация оптических каналов определяется по разметке (рис. 6).

Длина оптошины составляет 817,3 мм.

Конфигурация матрицы источников сигналов, используемой в ЭУ, представлена на рис. 7. Следует отметить, что светочувствительной является только периферийная область окружности приемника, а центральная область — нет. Диаметр внешнего радиуса приемника составляет 0,2 мм, диаметр внутреннего радиуса — 0,13 мм.

Оптошина жестко фиксируется в разъемах приемника и передатчика в плоскости X0Y, но при этом допускается ее свободное позиционирование при юстировке по оси Z (как вдоль оси, так и вокруг оси).

При вращении одной из матриц вокруг оси Z происходит уменьшение количества каналов, участвующих в засветке приемников, что приводит

к снижению интенсивности засветки этих приемников. При этом, очевидно, существует семь положений, в которых интенсивность засветки каждого приемника близка к максимальной. При переходе из одного такого положения в другое должна выполняться перекоммутация каналов.

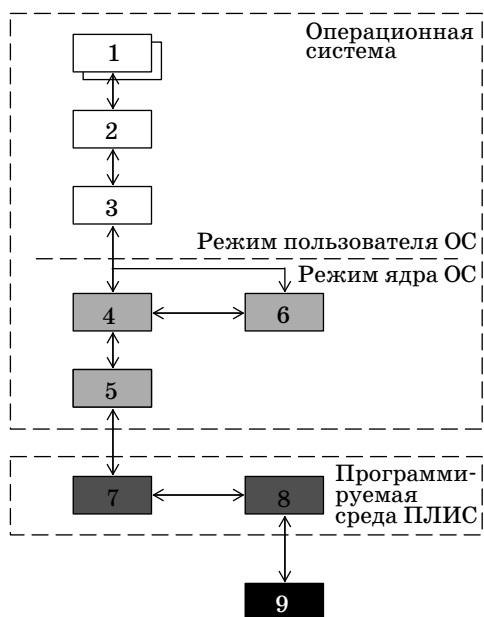
Программное обеспечение системы передачи данных в экспериментальной установке

Программное обеспечение ЭУ включает в себя комплекс программных компонент, реализующих протоколы низкоуровневого и высокоуровневого обмена данными между узлами соединения, драйверы устройств, а также приложения для исследования работы системы передачи данных:

- приложение верхнего уровня, разработанное для исследования и тестирования установки, обеспечивающее прием и передачу данных, а также сбор необходимой статистической информации;



■ Рис. 7. Приемник сигналов в координатах X0Y



■ **Рис. 8.** Общая схема программной реализации: 1 — приложение верхнего уровня; 2 — *user-mode* драйвер устройства; 3 — библиотека базовых функций *Win32 API*; 4 — *kernel-mode* драйвер устройства; 5 — драйвер шины *PCIe*; 6 — ядро операционной системы; 7 — часть прошитого в ПЛИС приложения, обеспечивающая взаимодействие с ПК; 8 — часть прошитого в ПЛИС приложения, работающая с драйверами матрицы лазеров или драйверами матрицы фотодиодов; 9 — программное обеспечение драйверов матрицы лазеров или драйверов матрицы фотодиодов

- *user-mode* драйвер устройства, реализующий протокол управления логическим уровнем соединения;
- *kernel-mode* драйвер устройства, реализующий протокол управления канальным уровнем соединения;
- драйвер шины;
- прошитое в ПЛИС приложение, реализующее протокол управления физическим уровнем соединения;
- драйверы матрицы лазеров и матрицы фотодиодов.

Схема программной реализации системы передачи данных (рис. 8) является общей для приемника и передатчика.

Для реализации приложений верхнего уровня используется стандартная библиотека функций *Win32 API*. В качестве драйвера шины *PCIe* используется стандартный драйвер шины *PCIe* для *Windows XP* и более поздних версий *Windows*, поэтому его специальная реализация не требуется.

Для реализации *kernel-mode* драйвера устройства применен механизм *DMA*-передачи. *DMA*-передача возможна, поскольку используемое устройство является устройством-мастером ши-

ны (*bus-master*). Устройство-мастер шины содержит все необходимые электронные компоненты и логику, чтобы взять управление шиной, к которой оно подключено, и выполнять обмен данными между своим буфером и системной памятью ПК без участия центрального процессора ПК.

Kernel-mode драйвер устройства представляет собой событийно-ориентированную программу (набор обработчиков событий — *IRP*-запросов). Основные *IRP*-запросы, обрабатываемые драйвером:

- *IRP_MN_READ* — чтение данных из буфера ПК в устройство;
- *IRP_MN_WRITE* — запись данных из устройства в буфер ПК.

Алгоритм обработки запроса *IRP_MN_READ* включает в себя 3 шага.

1. Сброс устройства.
2. Инициализация *DMA*-передачи данных. Устанавливаются значения следующих регистров устройства:

- *READ_ADDR_OFFSET* — начальный адрес буфера памяти на ПК, данные из которого должны быть записаны в устройство;
- *READ_SIZE_OFFSET* — размер *TLP*-пакета в байтах;
- *READ_COUNT_OFFSET* — количество *TLP*-пакетов.

Размер одной *DMA*-передачи определяется как произведение значений регистров *READ_SIZE_OFFSET* · *READ_COUNT_OFFSET* и не может превышать 32 КБ.

В случае успешного выполнения функция инициализации *DMA*-передачи должна возвращать статус *PENDING*.

3. Старт *DMA*-передачи, означающий начало копирования данных из буфера памяти на ПК в устройство. При этом буфер памяти на ПК организован как *Scatter/Gather-list*, обеспечивающий максимальный быстрый доступ к данным без участия центрального процессора. При завершении передачи данных генерируется прерывание.

Аналогичную структуру имеет и алгоритм обработки запроса *IRP_MN_WRITE*.

Одна *DMA*-передача размером 32 КБ соответствует одному пакету данных для протокола управления логическим каналом, который реализуется в *user-mode* драйвере устройства. Основные соглашения протокола:

- целостная единица данных — это сообщение (например, файл);
- одновременно передатчик может передавать, а приемник может принимать несколько сообщений, каждое из которых имеет уникальный идентификатор;
- каждое сообщение на стороне передатчика разбивается на пронумерованные пакеты размером 32 КБ, включающие в себя заголовок и основной блок;

- выделяется три основных типа пакетов:
 - информационные пакеты, содержащие передаваемые данные;
 - служебные пакеты для передачи управляющих сигналов протокола логического канала;
 - служебные пакеты для взаимодействия с ПЛИС;

— пакеты могут поступать в приемник в порядке, отличном от того, в котором они были отправлены передатчиком, и собираться в сообщении в соответствии с их порядковыми номерами;

— в том случае, если не все пакеты были приняты, приемник требует от передатчика повторной передачи недостающих пакетов до тех пор, пока сообщение не будет полностью собрано.

Результаты исследования

В ходе исследований сопоставлялись результаты, полученные на ЭУ, с результатами вычислительного эксперимента на динамической РСР-модели той же геометрической конфигурации [7]. Исследовалось поведение системы в режиме передачи данных без перекоммутации, а также функции коммутации каналов и самовосстановления соединения. Для каждого режима определен набор показателей для сопоставления.

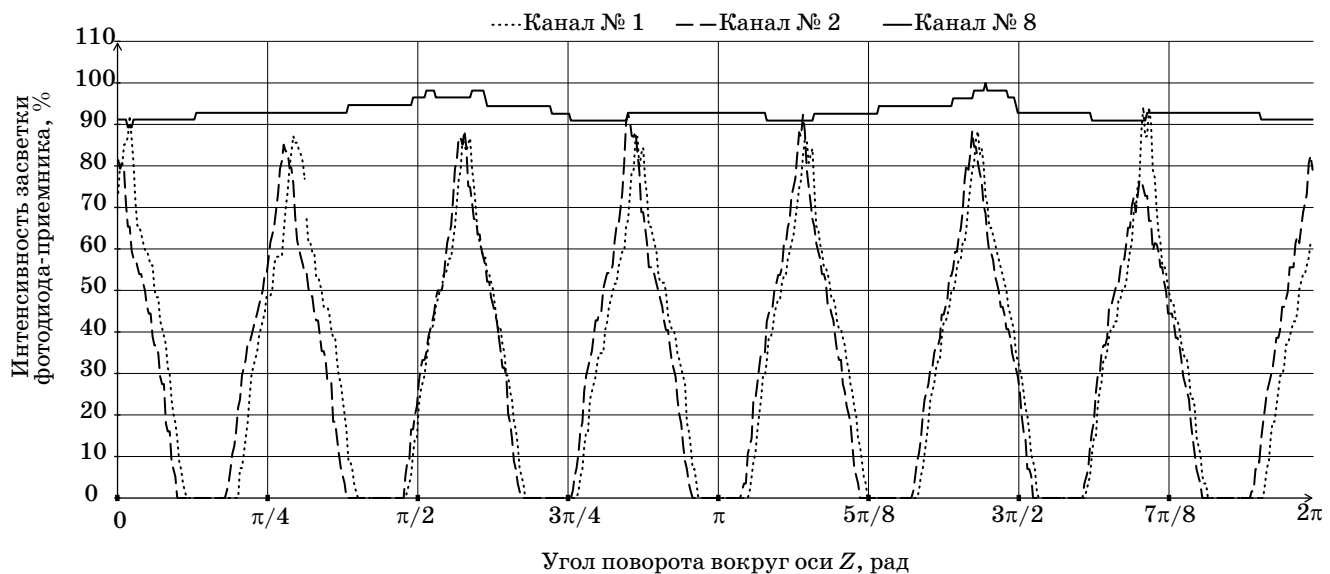
В режиме передачи данных без перекоммутации сравнивались входная и выходная последовательности данных, в режиме коммутации сопоставлялись сформированные множества логических каналов, в режиме самовосстановления исследовалась реакция системы на взаимное смещение источников и приемников (перемещение вдоль и поворот вокруг оси Z).

На графике (рис. 9), полученном в ходе вычислительного эксперимента на динамической РСР-модели, приведена зависимость интенсивности засветки приемников от угла поворота одной из матриц для каналов 1, 2 и 8. Для каналов 3, 4, 5, 6 и 7 зависимости имеют характер, аналогичный характеру для каналов 1 и 2.

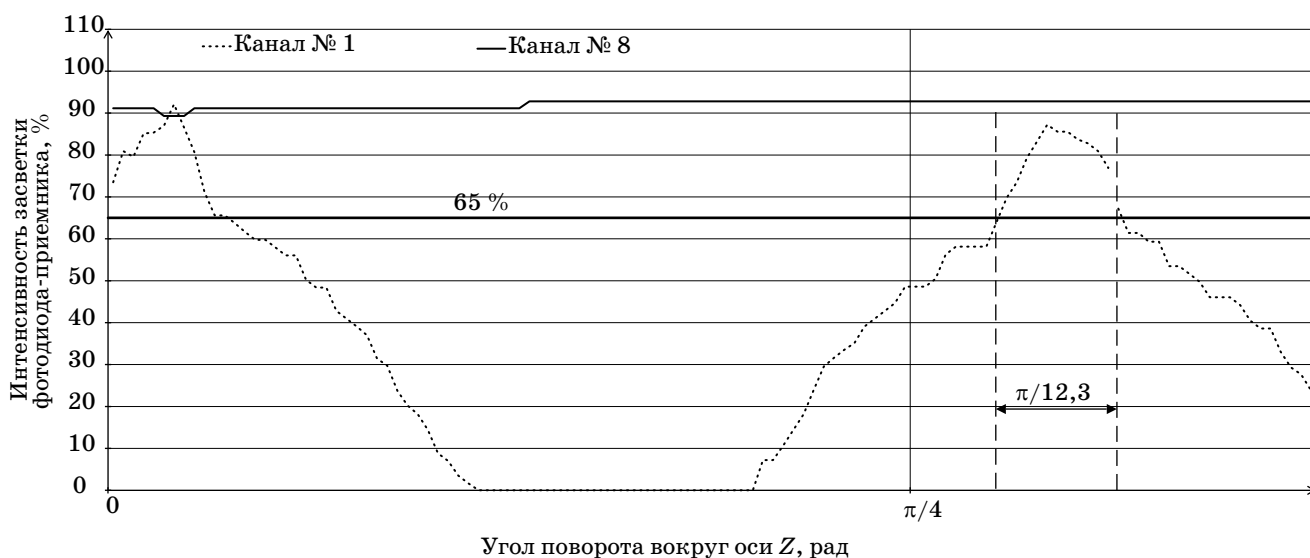
Интенсивность засветки приемника, достаточная для его активации, зависит от типа приемника, и была определена экспериментально. Устойчивая активация приемников наблюдается при интенсивности засветки не ниже 65 % от максимальной. При этих условиях сохраняется возможность самовосстановления соединения.

На графике, полученном в ходе вычислительного эксперимента на динамической РСР-модели (рис. 10), видно, что для достижения допустимой засветки приемника канала 1 угол поворота матрицы источников сигналов или матрицы приемников сигналов не должен превышать $\pi/12,3$. Поскольку характер соответствующих графиков для каналов 2, 3, 4, 5, 6 и 7 аналогичен характеру графика для канала 1, то максимально допустимый угол поворота матрицы источников сигналов или матрицы приемников сигналов для этих каналов также не должен превышать значения, приблизительно равного $\pi/12,3$ ($14,3^\circ$). Полученные результаты подтвердились в ходе проведения исследований на ЭУ, здесь максимальный угол составил приблизительно $13,5^\circ$.

Очевидно, в случае использования матрицы приемников сигналов, равномерно и плотно покрытой фотодиодами, в любом положении матрицы при ее вращении вокруг оси Z интенсивность засветки будет близка к максимальной.



■ **Рис. 9.** Зависимость засветки приемников сигналов от угла поворота вокруг оси Z матрицы источников или приемников сигналов

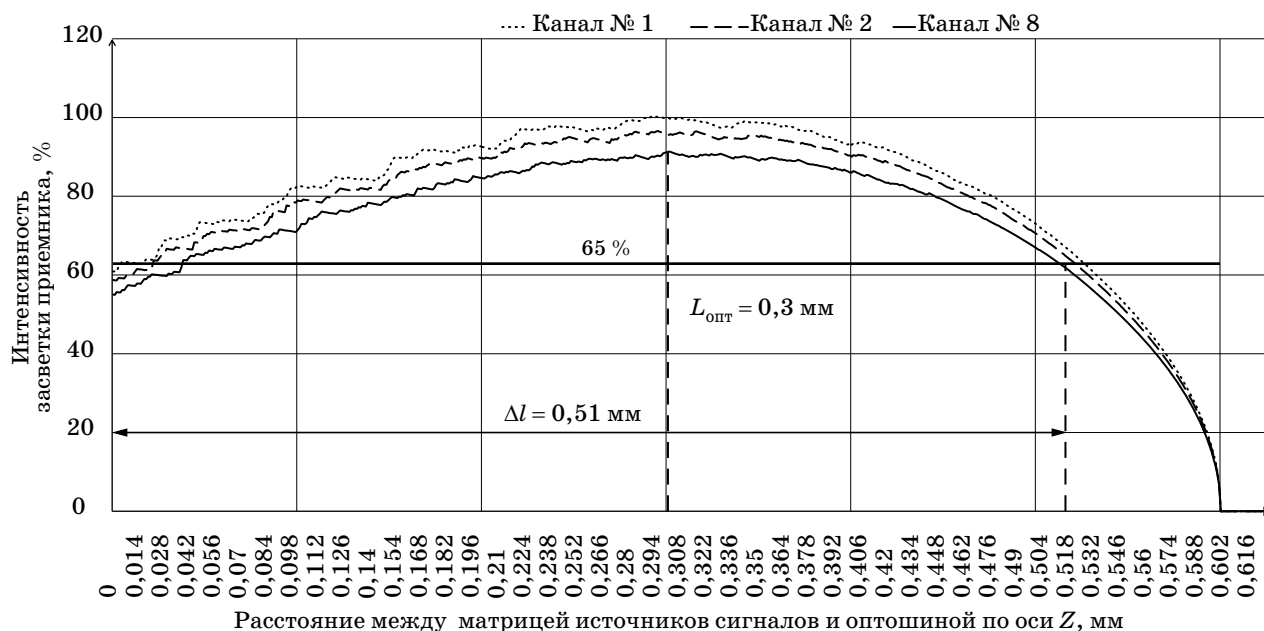


■ **Рис. 10.** Определение максимально допустимого угла поворота матрицы источников сигналов или матрицы приемников сигналов

Увеличение расстояния по оси Z между матрицей источников сигналов и оптоиной приводит, с одной стороны, к снижению интенсивности сигналов, попадающих в каналы, а с другой стороны — к рассеиванию сигналов и увеличению количества задействованных каналов. В ходе проведения вычислительного эксперимента на динамической РСП-модели была исследована зависимость интенсивности засветки приемников от расстояния по оси Z между матрицей источников сигналов и оптоиной (рис. 11). График показывает, что максимальная интенсивность за-

светки приемников достигается при расстоянии между матрицей источников сигналов и оптоиной 0,3 мм. Для получения минимально допустимой засветки на уровне 65 % расстояние не должно превышать 0,51 мм. Полученные результаты подтвердились в ходе проведения исследований на ЭУ, здесь максимально допустимое расстояние между матрицей источников сигналов и оптоиной приблизительно равно 0,55 мм.

Таким образом, результаты исследований на ЭУ и на модели показали, что самовосстановление соединения возможно при повороте матри-



■ **Рис. 11.** Зависимость интенсивности засветки приемников от расстояния по оси Z между матрицей источников сигналов и оптоиной

цы источников или приемников сигналов вокруг оси Z на угол, не превышающий $13\text{--}14^\circ$, и при смещении оптошины относительно матрицы источников сигналов вдоль оси Z на расстояние, не превышающее $0,5\text{--}0,6$ мм.

Увеличение расстояния по оси Z между матрицей приемников сигналов и оптошиной приводит к снижению интенсивности сигналов, попадающих в каналы; возникающее при этом рассеивание сигналов не приводит к изменению количества задействованных приемников. Поэтому для получения максимальной интенсивности засветки приемников матрицу приемников сигналов необходимо размещать максимально близко к оптошине.

При моделировании и в ходе проведения исследований на ЭУ было скоммутировано 8 логических каналов.

При передаче данных в нормальном режиме без необходимости повторной коммутации каналов в ЭУ и на модели отмечено отсутствие потерь при передаче данных, т. е. полное совпадение принятой и отправленной последовательностей. При этом скорость передачи данных на установке $0,8\text{--}0,9$ Гбит/с. В динамической модели скоростные характеристики передачи данных не определялись.

В режиме коммутации каналов было отмечено полное совпадение скоммутированных множеств источников и приемников при расхождении в задействованных физических каналах на $5\text{--}15\%$. Расхождение связано с неточностью моделирования физических факторов, влияющих на прохождение сигналов в оптическом канале, а также на входе и на выходе из него. При этом среднее время коммутации в ЭУ составило $0,34$ мс. В ди-

намической модели временные характеристики передачи данных не определялись.

В режиме самовосстановления моделировалось восстановление соединения при выходе из строя источников и приемников, а также при повороте вокруг и смещении вдоль оси Z . Отключение источников и приемников в ЭУ инициирует выполнение функции перекоммутации, что в свою очередь приводит к формированию нового множества логических каналов. В ходе исследования было установлено, что полученные таким образом на ЭУ множества логических каналов совпали с соответствующими множествами каналов, скоммутированными на динамической модели. Выход из строя физических каналов моделировался только в вычислительном эксперименте.

Заключение

Разработка динамической модели и создание экспериментального стенда позволили провести исследования, по которым сделаны следующие выводы:

- подтверждена работоспособность системы передачи данных, построенной на основе коммутируемого многоканального оптоволоконного соединения, в режимах коммутации каналов, передачи данных и самовосстановления соединения;

- в целом подтверждена адекватность построенной динамической модели передачи данных по сопоставимым параметрам;

- результаты, полученные в ходе вычислительного эксперимента на динамической модели, позволили оптимизировать геометрическую конфигурацию ЭУ.

Литература

1. **10 Gbits/sec and beyond: High speed in the data center.** www.cablinginstall.com/articles/print/volume-16/issue-1/features/10-gbits-sec-and-beyond-high-speed-in-the-data-center.html (дата обращения: 01.12.2013).
2. **comScore Releases Overview of European Internet Usage in September 2011.** http://www.comscore.com/Press_Events/Press_Releases/2011/11/comScore_Releases_Overview_of_European_Internet_Usage_in_September_2011 (дата обращения: 01.12.2013).
3. **IBM Cancels Blue Waters.** <http://insidehpc.com/2011/08/08/ibm-cancels-blue-waters/> (дата обращения: 01.12.2013).
4. **Пат. 2270493 Российской Федерации, Н 01 L 23/525.** Способы самовосстанавливающегося соединения многоконтактных приборов или микросхем и устройство для его осуществления/ В. С. Никитин (Российская Федерация). – № 2004101348; заявл.

- 16.01.04; опубл. 20.02.06. http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/electron_bulletins/inventions_utility_models/ (дата обращения: 24.12.2013).
5. **Шаров В. Г., Чайка С. В.** Оценка надежности системы передачи данных на основе интеллектуальных многоканальных оптоволоконных соединений // Вестник РГАТУ им. П. А. Соловьева. 2012. № 2. С. 169–175.
6. **Шаров В. Г., Никитин В. С., Ломанов А. Н., Чайка С. В.** Адаптивный протокол передачи данных для многоканальных оптоволоконных соединений // Вестник РГАТУ им. П. А. Соловьева. 2011. № 1. С. 104–111.
7. **Шаров В. Г., Ломанов А. Н., Чайка С. В.** Верификация адаптивного протокола передачи данных для многоканальных оптоволоконных соединений // Вестник РГАТУ им. П. А. Соловьева. 2011. № 3(21). С. 113–119.

8. Пат. 125740 Российской Федерации, G 06 F 13/00. Программно-аппаратный комплекс передачи данных по многоканальному оптоволоконному соединению / В. Г. Шаров, В. Н. Никитин, А. Н. Ломанов, С. В. Чайка (Российская Федерация). –

№ 2012130126; заявл. 15.07.12; опубл. 10.03.13. http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/electron_bulletins/inventions_utility_models/ (дата обращения: 24.12.2013).

UDC 004.057.4

Experimental Investigation of a Data Transfer System Based on a Switched Multi-Channel Fiber-Optic Connection

Sharov V. G.^a, PhD, Phys.-Math., sharov@rsatu.ru

Nikitin V. S.^b, PhD, Tech., 505z@mail.ru

Lomanov A. N.^a, PhD, Tech., lepss@yandex.ru

Chaika S. V.^a, Programmer Engineer, Post-Graduate Student, chaika_sv@mail.ru

^aP. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, 53, Pushkin St., 152934, Rybinsk, Russian Federation

^b«NTC «Introfizica», PLC, 59, Apt. 7, Gor'kii St., 152918, Rybinsk, Russian Federation

Purpose: There has been discussed a data transfer system based on a switched multi-channel fiber-optic connection. The goal of the paper is software and hardware implementation of the system (development of a test desk) and its experimental investigation. **Methods:** There have been compared results obtained from the test desk and results of a computational experiment involving a dynamic model of the same geometric configuration. Experimental investigations of the system have been carried out in a mode of steady data transfer as well as applying switching and self-recovering functions. **Results:** There has been confirmed operability of the data transfer system based on a switched multi-channel fiber-optic connection (in particular, high performance of channel commutation, data transfer and connection self-recovering have been proven); adequacy of the constructed dynamic model has been confirmed. **Practical relevance:** The results obtained from the computational experiment engaging the dynamic model allow optimizing the test desk geometric configuration.

Keywords — Enhanced Reliability Systems, Multi-Channel Fiber-Optic Connections, Self-Organizing Systems, Data Transfer Protocols.

References

1. *10 Gbits/sec and Beyond: High Speed in the Data Center*. Available at: <http://www.cablinginstall.com/articles/print/volume-16/issue-1/features/10-gbits-sec-and-beyond-high-speed-in-the-data-center.html> (accessed 1 December 2013).
2. *ComScore Releases Overview of European Internet Usage in September 2011*. Available at: http://www.comscore.com/Press_Events/Press_Releases/2011/11/comScore_Releases_Overview_of_European_Internet_Usage_in_September_2011 (accessed 1 December 2013).
3. *IBM Cancels Blue Waters*. Available at: <http://insidehpc.com/2011/08/08/ibm-cancels-blue-waters/> (accessed 1 December 2013).
4. Nikitin V. S., et al. *Sposoby samovosstanavlivaiushchegosia soedineniia mnogokontaktnykh priborov ili mikroshkem i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia* [The Ways of Building Multicontact Devices or Chips and Device to Implement it]. Patent Russian Federation, no. 2270493/20–06, 2006.
5. Sharov V. G., Chaika S. V. Reliability Evaluation of the Data Transfer System Based on the Intellectual Multi-Channel Fiber Optic Connections. *Vestnik RGATU im. P. A. Solov'eva*, 2012, no. 2, pp. 169–175 (In Russian).
6. Sharov V. G., Nikitin V. S., Lomanov A. N., Chaika S. V. Adaptive Link Protocol for Multichannel Fiber Optic Connections. *Vestnik RGATU im. P. A. Solov'eva*, 2011, no. 1, pp. 104–111 (In Russian).
7. Sharov V. G., Lomanov A. N., Chaika S. V. Adaptive Link Protocol for Multichannel Fiber Optic Connections. *Vestnik RGATU im. P. A. Solov'eva*, 2011, no. 3, pp. 113–119 (In Russian).
8. Sharov V. G., Nikitin V. S., Lomanov A. N., Chaika S. V., et al. *Programmno-apparatnyi kompleks peredachi dannykh po mnogokanal'nomu optovolokonnomu soedineniiu* [Software-Hardware Data Transfer Complex on Multicore Fiber Interface]. Patent Russian Federation, no. 125740/15–07, 2012.

УДК 621.397.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ПРОЦЕССЕ СИМВОЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. И. Лоскутов^а, доктор техн. наук, начальник кафедры

А. А. Бянкин^а, канд. техн. наук, профессор кафедры

А. С. Дуников^а, адъюнкт

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: в процессе совершенствования ракетно-космической техники к радиотелеметрическим системам предъявляются все более высокие требования в отношении достоверности получения данных. Одним из способов обеспечения достоверной передачи результатов телеизмерений является повышение помехоустойчивости работы системы синхронизации. Целью работы является формирование вектора признаков образа двоичного символа группового телеметрического сигнала, необходимого для синтеза системы символьной синхронизации в частотно-временной области. **Методы:** на основе расчета биспектральной плотности фрагмента сигнала формируется вектор признаков, позволяющий демодулировать двоичные символы группового телеметрического сигнала. **Результаты:** определен вектор признаков, проведено моделирование возможности применения биспектрального анализа для демодуляции двоичных символов группового телеметрического сигнала. **Практическая значимость:** результаты исследований использованы для разработки метода символьной синхронизации в частотно-временной области. Сформированный вектор признаков позволяет при малых отношениях сигнал/шум однозначно демодулировать двоичные символы группового телеметрического сигнала. Следовательно, полученные результаты обеспечивают повышение достоверности приема телеметрической информации.

Ключевые слова — биспектральный анализ, групповой телеметрический сигнал, демодуляция, символьная синхронизация.

Введение

Системы символьной синхронизации радиотелеметрических средств решают задачи демодуляции и определения границ двоичных символов в групповом телеметрическом сигнале. Решение данных задач сопровождается значительными трудностями, так как принимаемый групповой телеметрический сигнал искажен помехами различного происхождения и уровня. При этом статистические характеристики шума часто априорно полностью не определены или определены частично и неточно.

Среди традиционных подходов, обеспечивающих подавление помех, используются методы линейной и нелинейной фильтрации [1]. Эффективность применения данных методов в значительной степени зависит от полноты априорных знаний о статистических характеристиках помех, которые на практике имеют далеко не всегда. Помимо этого применимость традиционных методов фильтрации и восстановления сигналов сильно зависит от отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе наземной приемно-регистрирующей аппаратуры. Существующие наземные приемно-регистрирующие станции обеспечивают требуемую вероятность ошибки приема символов при ОСШ, значительно превосходящих единицу. Зачастую потеря телеметрической информации, вызванная сбоем работы системы синхронизации, происходит при ОСШ, имеющем значение,

ненамного превосходящее единицу. Одним из перспективных подходов, который обеспечил бы устойчивую работу системы символьной синхронизации, является подход, основанный на построении системы символьной синхронизации как системы распознавания образов с использованием данных спектрального анализа группового телеметрического сигнала.

Существующие бортовые радиотелеметрические системы используют при передаче информации сигналы с кодово-импульсной модуляцией частотной манипуляцией (КИМ₂-ЧМ) и кодово-импульсной модуляцией фазовой π -манипуляцией (КИМ _{π} -ФМ). При этом информация передается двоичными символами «0» и «1», различающимися значениями частоты и фазы. Законы модуляции описываются следующими формулами [2]:

$$s(t) = A_0 \cos(2\pi f_m t + \varphi_0); \quad (1)$$

$$s(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_m + \varphi_0), \quad (2)$$

где f_m , φ_m — значения частоты и фазы манипуляции двоичных символов группового телеметрического сигнала.

В результате передачи группового телеметрического сигнала передается набор двоичных символов $S = \{s^{(1)}, s^{(2)}, \dots, s^{(n)}\}$, искаженных шумами, представляющих собой множество объектов распознавания.

Необходимо определить:

— пространство признаков $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, определяющих однозначное разделение двоичных символов на классы в спектральной области;

— функцию преобразования $g(s)$, позволяющую выделить из искаженных символов группового телеметрического сигнала признаки классов.

Спектральное оценивание информационных символов группового телеметрического сигнала на основе биспектрального анализа

Основным методом, позволяющим разделить двоичные символы группового телеметрического сигнала на классы и отделить их от шумов, является селекция сигнала.

Аппаратом, способным выполнить селекцию сигнала, является теория цифровой обработки сигналов. Из анализа работ [3—6] определено, что для решения задачи селекции сигнала целесообразно использовать спектральный и частотно-временной анализ сигнала. При использовании данных методов групповой телеметрический сигнал представляется в частотной области. Исходя из (1), (2), одним из определяющих признаков информационных символов является значение частот и фаз манипуляции f_m, φ_m , где $m = 1, 2$, а также значение несущей частоты f_0 , на которых амплитуда спектра имеет максимальное значение. Вместе с тем одним из признаков, позволяющих определить номинал символа, является превышение определенного порогового значения спектральным пиком анализируемого сигнала. Следовательно, пространство признаков, определяющих разделение двоичных символов на классы в спектральной области, имеет вид $P = \{f_{\max}, \varphi_{\text{тек}}, p_{\text{пор}}\}$, где f_{\max} — значение частоты, соответствующей максимальной амплитуде спектра; $\varphi_{\text{тек}}$ — текущее значение фазы спектра; $p_{\text{пор}}$ — показатель превышения максимальной амплитуды спектра порогового значения.

В качестве функции преобразования $g(s)$, позволяющей выделить из искаженных символов группового телеметрического сигнала признаки классов, необходимо использовать алгоритмы спектрального и частотно-временного анализа сигналов. Условием применения функции преобразования является достоверное выделение пространства признаков из сигнала, искаженного шумом при ОСШ, незначительно превосходящем единицу. Анализ методов спектрального оценивания сигнала на основе вычисления амплитудного спектра, спектральной плотности мощности сигнала, псевдоспектра, выполнения оконного преобразования Фурье, авторегрессионного спектрального анализа и биспектрального анализа показал, что наиболее эффективным методом яв-

ляется биспектральный анализ. Биспектральный анализ в настоящее время находит широкое применение при восстановлении радиолокационных изображений, в задачах технической и медицинской диагностики. Биспектральный анализ основан на использовании корреляционных функций третьего порядка.

В цифровой обработке сигналов используются прямой и косвенный методы оценивания биспектральной плотности. Прямой метод обладает более высоким быстродействием за счет применения быстрых алгоритмов преобразования Фурье и исключения трудоемких расчетов оценок корреляционной функции третьего порядка.

Групповой телеметрический сигнал на входе системы синхронизации представляет собой дискретную последовательность $\{s^{(i)}(t)\}$ из $i = 0, 1, 2, \dots, I-1$ отсчетов в виде набора n независимых реализаций $s^{(n)}(t)$, представляющих собой отдельные символы информационных сообщений.

Расчет биспектральной плотности производится по следующему алгоритму.

1. Формирование реализаций группового телеметрического сигнала $s_1 = \{s^{(1)}(i)\}$, $s_2 = \{s^{(2)}(i)\}$, ..., $s_n = \{s^{(n)}(i)\}$, при этом для демодуляции двоичных символов реализации формируются на основе информации, полученной от схемы определения границ символов.

2. Расчет мгновенного спектра каждой реализации группового телеметрического сигнала

$$\begin{aligned} \dot{S}_1(\omega) &= \int_0^{I-1} s^{(1)}(t) e^{-j\omega t} dt, \dots, \dot{S}_n(\omega) = \\ &= \int_0^{I-1} s^{(n)}(t) e^{-j\omega t} dt, \end{aligned} \quad (3)$$

где t определяется длительностью участка, на котором вычисляется мгновенный спектр, а пределы интегрирования — дискретными отсчетами анализируемых реализаций.

3. Формирование выборочной оценки биспектральной плотности с помощью тройного произведения значений, полученных в (3):

$$\dot{B}_S^z(\omega) = \dot{S}_z(\omega) \dot{S}_z(\omega) \dot{S}_z^*(\omega), \quad (4)$$

где $z = 1, 2, \dots, n$.

4. По формуле (4) рассчитывается биспектр каждой реализации группового телеметрического сигнала, представляющего собой

$$\dot{B}_S(\omega) = |\dot{B}_S(\omega)| e^{j\gamma_S(\omega)}, \quad (5)$$

где $\dot{B}_S(\omega)$ и $\gamma_S(\omega)$ — соответственно амплитудный и фазовый биспектры анализируемой реализации.

Из полученных по формуле (5) данных рассчитываются значения показателей пространства признаков.

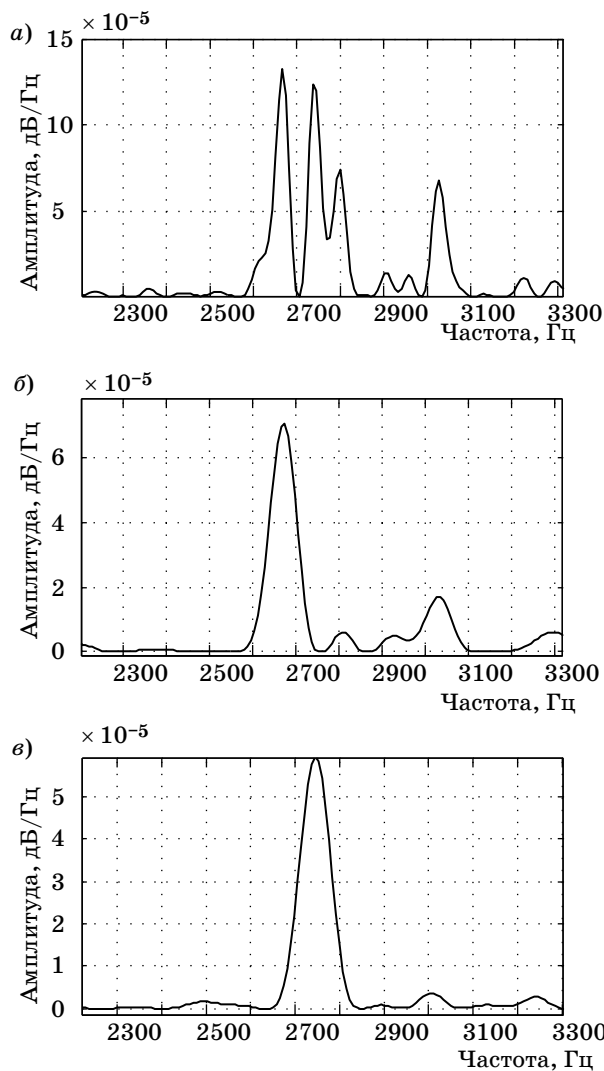
Биспектральный анализ по сравнению с другими методами спектрального оценивания имеет ряд преимуществ [4]:

— биспектральный анализ позволяет сохранить комплексный фурье-спектр сигнала и, следовательно, восстановить информацию о фазовых характеристиках сигнала;

— корреляционная функция третьего порядка гауссова шума стремится к нулю, что позволяет использовать биспектральный анализ при ОСШ, не превышающих единицу;

— биспектр инвариантен к смещению исходного сигнала.

Таким образом, для демодуляции двоичных символов группового телеметрического сигнала целесообразно использовать биспектральный анализ, являющийся более эффективным по сравнению с другими методами спектрального оценивания сигнала за счет сохранения фазовых



■ **Рис. 1.** Модуль биспектра информационных символов «01» (а); «0» (б); «1» (в)

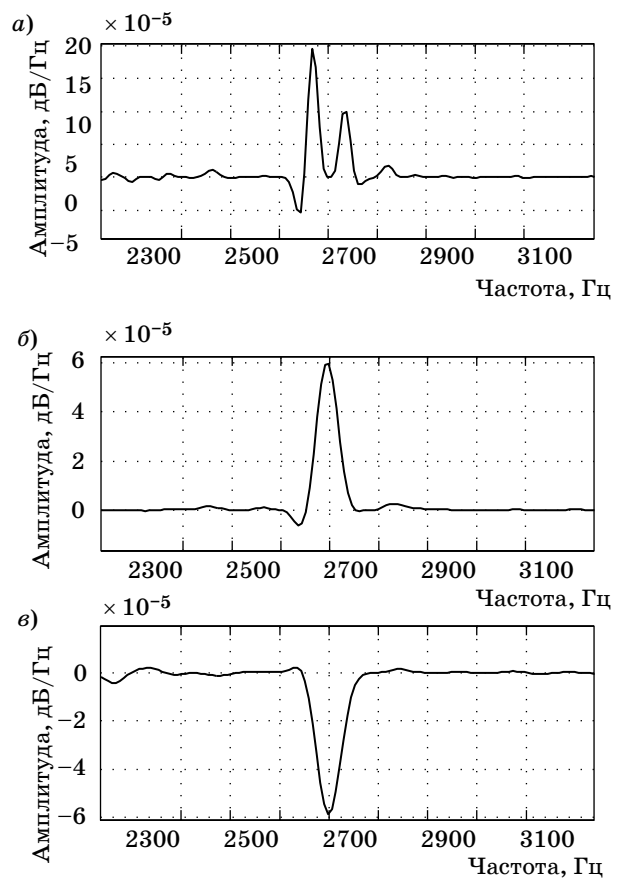
соотношений и возможности его применения при ОСШ, незначительно превышающих единицу.

Моделирование применения биспектрального анализа при распознавании двоичных символов группового телеметрического сигнала

Моделирование возможности использования биспектра при расчете пространства признаков двоичных символов проводилось в среде MatLab. В целях повышения скорости вычисления использовался метод масштабного моделирования, а именно кратного уменьшения параметров радиосигнала, таких как скорость передачи и значения несущей частоты сигнала.

Модуль биспектра двоичных символов группового телеметрического сигнала с модуляцией КИМ₂-ЧМ, искаженных белым гауссовым шумом при ОСШ, равном 2 дБ, представлен на рис. 1; на рис. 2 — биспектр информационных символов группового телеметрического сигнала с модуляцией КИМ_π-ФМ, искаженных белым гауссовым шумом при ОСШ, равном 2 дБ.

Рисунки подтверждают теоретические данные о возможности применения биспектрального



■ **Рис. 2.** Биспектр информационных символов «01» (а); «0» (б); «1» (в)

анализа для выделения пространства признаков, необходимого для разделения информационных символов на классы в целях дальнейшей разработки классифицирующего правила и построения системы символьной синхронизации как системы распознавания образов.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают возможность применения биспектрального анализа для создания систем символьной синхронизации перспективных радиотелеметрических средств.

Заключение

Применение биспектрального анализа позволило сформировать вектор признаков $P = \{f_{\max}, \varphi_{\text{тек}}, p_{\text{пор}}\}$, который обеспечивает однозначное распознавание номиналов двоичных символов группового телеметрического сигнала при малых ОСШ, что подтверждается результатами моделирования в среде MatLab. Современные наземные приемно-регистрирующие станции обеспечивают устойчивый прием телеметрической информации при ОСШ, равном 5 дБ. Использование подхода, основанного на биспектральной обработке фрагментов сигнала, позволяет достичь энергетического выигрыша 3 дБ. Таким образом,

при построении системы символьной синхронизации как системы распознавания образов с использованием данных биспектрального анализа повышает достоверность приема телеметрической информации.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
2. Белицкий В. И., Зверев В. И. Телеметрия/ МО СССР. – Л., 1984. – 465 с.
3. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
4. Басараб М. А., Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. Цифровая обработка сигналов и изображений: монография. – М.: Физматлит, 2007. – 544 с.
5. Солонина А., Улахович Д., Яковлев Л. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 464 с.
6. Swami A., Giannakis G.B. and Zhou G. Bibliography on higher-order statistics//Signal Processing. 1997. Vol. 60. N 1. P. 65–126.

UDC 621.397.5

Use of Bispectral Analysis in Symbol Synchronization of Radio-Telemetric Systems

Loskutov A. I.^a, Dr. Sc., Tech., Head of the Department, rujenz@mail.ru

Byankin A. A.^a, PhD, Tech., Professor of the Department, aab51@mail.ru

Dunikov A. S.^a, Post-Graduate Student, artem.sever1@yandex.ru

^aA. F. Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197082, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: In the course of updating rocket and space technology higher data accuracy requirements should be met by radio-telemetric systems. One way to ensure reliable transmission of telemetric results is to increase noise resistance of synchronization system performance. The goal of the paper is to form a binary symbol image feature vector of a group telemetric signal required for the synthesis of the system of symbol synchronization in a time-frequency domain. **Methods:** Based on calculation of signal fragment bispectral density a feature vector has been formed, it allows demodulating binary symbols of a group telemetric signal. **Results:** The feature vector has been defined, there has been tested a simulation possibility of applying bispectral analysis for demodulation of binary symbols of a group telemetric signal. **Practical relevance:** The results of studies have been used for developing a method of symbol synchronization in a frequency-time domain. The developed feature vector provides certain demodulation of binary symbols of a group telemetric signal at small signal / noise ratios. Therefore, the obtained results ensure enhanced reliability of telemetry data reception.

Keywords — Bispectral Analysis, Group Telemetric Signal, Demodulation, Symbol Synchronization.

References

1. Sklar B. *Tsifrovaia sviaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital Communication. Theoretical Basis and Practical Application]. Moscow, Vil'iams Publ., 2003. 1104 p. (In Russian).
2. Belickij V. I., Zverev V. I. *Telemetriia* [Telemetry]. Saint-Petersburg, MO SSSR Publ., 1984. 465 p. (In Russian).
3. Sergienko A. B. *Tsifrovaia obrabotka signalov* [Digital Signal Processing]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2011. 768 p. (In Russian).
4. Basarab M. A., Volosiuk V. K., Kravchenko V. F. *Tsifrovaia obrabotka signalov i izobrazhenii* [Digital Signal and Image Processing]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 544 p. (In Russian).
5. Solonina A., Ulahovich D., Iakovlev L. *Algoritmy i protsessory tsifrovoi obrabotki signalov* [Algorithms and Processes the Digital Signal Processing]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2001. 464 p. (In Russian).
6. Swami A., Giannakis G. B. and Zhou G. Bibliography on Higher-Order Statistics. *Signal Processing*, 1997, vol. 60, no. 1, pp. 65–126.

УДК 004.81

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕКСТОВЫХ СООБЩЕНИЙ ДЛЯ ОПОВЕЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Р. А. Дурнев^а, доктор техн. наук, доцент

А. В. Лукьянович^а, начальник научно-исследовательского отдела

А. С. Котоснова^а, младший научный сотрудник

^аВсероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, Москва, РФ

Постановка проблемы: опыт свидетельствует о целесообразности оповещения населения при чрезвычайных ситуациях с помощью текстовых сообщений сотовой связи. При этом определенные трудности возникают в ходе восприятия и осмысления этих сообщений, а также инициирования последующих правильных действий по защите в чрезвычайных ситуациях. Для преодоления этих трудностей используется разработанный методический подход к обоснованию рациональных параметров текстовых сообщений. В целях оценки его работоспособности проводилось практическое исследование. **Методы практического исследования:** выполнялся социологический опрос студентов технического университета с разными уровнями подготовки в области безопасности жизнедеятельности. В ходе опроса студентам раздавались анкеты, состоящие из двух частей. Первая часть включала текстовое сообщение о чрезвычайной ситуации, которое для разных анкет отличалось количеством и сложностью отдельных смысловых блоков. Вторая часть содержала перечень защитных действий, из которого студенты, в соответствии с сообщением, должны были выбрать правильные. По результатам заполнения анкет оценивался риск поражения при реализации выбранных защитных действий. Параметры сообщения, для которого данный риск был минимален, считались рациональными. **Результаты:** установлено, что в состав рационального текстового сообщения должны входить смысловые блоки по виду, характеру и динамике опасности, а также инструкции по способу защиты. Добавление к этому сообщению информации по дальнейшим действиям и других сведений приводит к увеличению риска поражения, т. е. является избыточным. **Практическая значимость:** подтверждена работоспособность разработанного методического подхода, который может быть использован при разработке банка типовых сообщений для оповещения различных групп населения в чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова — оповещение при чрезвычайных ситуациях, параметры текстовых сообщений, защитные действия, риск поражения.

Введение

В предыдущей статье [1] была сформулирована задача обоснования рациональных параметров текстовых сообщений сотовой связи. Схема решения данной задачи представлена в виде «черного ящика» [2], для которого в качестве «входа» рассматриваются контролируемые факторы, определяемые параметрами чрезвычайных ситуаций (ЧС), такими как время и место их возникновения, интенсивность поражающих факторов и т. п., и характеристикой реципиента информации; неопределенные факторы, связанные со случайным характером ЧС и нечеткостью восприятия информации, и управляющие факторы, включающие объем, количество и сложность смысловых блоков текстовых сообщений. В качестве «выхода» рассматривался риск поражения населения при реализации действий по защите после получения сообщения. Варьируя управляющими факторами при фиксировании контролируемых и учете неопределенных факторов, можно определить рациональные параметры сообщения для различных типов ЧС и групп населения, т. е. такие параметры, при которых риск поражения населения минимален.

Методика практических исследований

Для апробации данного подхода проведено практическое исследование, в ходе которого выполнялся социологический опрос студентов МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского с разными уровнями подготовки в области безопасности жизнедеятельности. В ходе опроса студентам раздавались анкеты, состоящие из двух частей, — вводной информации о ЧС и перечня защитных действий, из которого они, в соответствии с вводной информацией, должны были выбрать правильные.

Основу указанной информации составлял следующий текст условного SMS-сообщения: «На Рублевской водоочистительной станции произошла авария с большим выбросом хлора, направление ветра в сторону улиц Ярцевская и Партизанская, скорость ветра около 10 м/с. При нахождении в здании не выходите из него, загерметизируйте помещение, подготовьте подручные или штатные средства индивидуальной защиты. Приготовьтесь к эвакуации и будьте внимательны к доводимой информации» [3].

В рамках приведенного сообщения контролируемые факторы определялись параметрами

данной ЧС и уровнем образования студентов (точнее — курсом обучения).

Неопределенные факторы были связаны с нечеткими выражениями «большой выброс хлора», «около 10 м/с», а также недостаточным пониманием студентами семантики словосочетаний «загерметизируйте помещение», «подручные или штатные средства индивидуальной защиты».

Управляющие факторы включали в себя объем, количество и сложность описательных и предписывающих смысловых блоков [4].

К описательным относились следующие блоки:

— вид опасности — «авария на химически опасном объекте»;

— место возникновения, характер опасности — «Рублевская водоочистительная станция» (недалеко от университета), «большой выброс хлора»;

— динамика опасности — «направление ветра в сторону улиц Ярцевская и Партизанская» (в непосредственной близости от университета), «скорость ветра около 10 м/с».

В качестве предписывающих выступали блоки:

— инструкции по способу защиты — «при нахождении в здании не выходить из него», «загерметизировать помещение», «подготовить подручные или штатные средства индивидуальной защиты»;

— дальнейшие меры — «приготовиться к эвакуации», «быть внимательным к доводимой информации».

Варьирование управляющими факторами при фиксации контролируемых и учете неопределенных факторов заключалось в следующем.

Для проведения опроса было разработано пять анкет с вариативной вводной информацией о ЧС и инвариантным перечнем защитных действий. Вариативность вводной информации заключалась в количестве смысловых блоков в условном SMS-сообщении. Так, в первой анкете приводилась информация только по виду опасности, во второй — по виду и характеру опасности. Третья анкета, помимо информации второй, содержала сведения по динамике опасности, четвертая дополнительно включала инструкции по способу защиты. В пятой анкете был приведен полный текст условного SMS-сообщения.

Вторая часть каждой анкеты включала следующий перечень защитных действий [5]:

— закрыть органы дыхания влажным платком;

— двигаться быстро, но не бежать;

— не прислоняться к чему-либо;

— обходить туманоподобные образования;

— одеть противогаз;

— подняться на верхние этажи здания;

— надеть накидку или плащ;

— закрыть окна, воздуховоды с помощью влажных полотенец, скотча и плотной бумаги;

— собрать необходимые вещи для эвакуации;

— выходить перпендикулярно направлению ветра;

— предупредить соседей;

— включить телевизор, радиоприемник, радиоточку.

В качестве «информационного шума» в этом перечне были приведены излишние и неверные действия, например: «Выйти на улицу и ждать там помощи», «Остаться на месте до получения дополнительной информации» и др.

В ходе опроса студентам поочередно предлагались пять анкет, начиная с первой, содержащей только информацию о факте аварии на химически опасном объекте, и заканчивая пятой, в которой был приведен полный текст сообщения. Для того чтобы устранить факторы привыкания и самообучения опрашиваемых [6], выполнялось следующее:

— интервал между доведением отдельных анкет составлял около 7 дней;

— оценка правильности действий не доводилась до опрашиваемых;

— сам опрос проводился в период зачетной и экзаменационной сессий.

Ознакомившись с первой частью анкеты — условным SMS-сообщением, студенты выбирали из перечня действий, представленного во второй части, правильные с их точки зрения ответы, а также указывали очередность выполнения этих действий.

Оценка рациональности параметров текстовых сообщений сотовой связи проводилась в три этапа:

1) оценка риска поражения при определенном составе защитных действий;

2) оценка риска поражения при определенной очередности защитных действий;

3) расчет риска поражения опрашиваемого при реализации (выборе) защитных действий после получения текстового сообщения.

Для выполнения оценки по первым двум этапам экспертами в области химической защиты (далее — эксперты) для каждой анкеты были определены эталонные (правильные) состав и порядок действий с учетом информации, содержащейся в первой части.

Риск поражения определялся следующим образом:

$$R_{i\hat{\sigma}} = R_c \cdot R_i, \quad (1)$$

где R_c — риск поражения при определенном составе защитных действий; R_i — риск поражения при определенной очередности защитных действий.

Очевидно, что для решаемой задачи не важны ни величины, с помощью которых измеряется

■ Таблица 1. Значимость защитных действий

Действие	Значимость
Закрыть органы дыхания влажным платком	0,03
Двигаться быстро, но не бежать	0,11
Не прислоняться к чему-либо	0,01
Обходить туманоподобные образования	0,14
Одеть противогаз	0,22
Подняться на верхние этажи здания	0,11
Одеть накидку или плащ	0,02
Закрыть окна, воздуховоды с помощью влажных полотенец, скотча и плотной бумаги	0,11
Собрать необходимые вещи для эвакуации	0,05
Выходить перпендикулярно направлению ветра	0,10
Предупредить соседей	0,07
Включить телевизор, радиоприемник, радиоточку	0,03
Итого:	1

риск поражения (вероятность, ущерб, математическое ожидание ущерба и т. п.), ни, соответственно, единицы их измерения. Наиболее существенным являются значения $R_{пор}$ — чем они меньше, тем более рациональны сообщения.

В то же время не вызывает сомнения то, что сами действия не равнозначны с точки зрения их влияния на риск поражения. Для оценки этого влияния с использованием метода анализа иерархий [7] эксперты путем парных сравнений определяли относительную значимость защитных действий с точки зрения их вклада в минимизацию риска поражения. Результаты такого сравнения представлены в табл. 1.

Для излишних и неверных действий относительная значимость приравнивалась нулю.

■ Таблица 2. Результаты оценки риска поражения при выбранном составе защитных действий

Номер студента	Риск поражения по анкете				
	A1	A2	A3	A4	A5
1	0,76	0,62	0,48	0,42	0,33
2	0,57	0,45	0,38	0,48	0,33
3	0,9	0,9	0,78	0,38	0,85
4	0,54	0,57	0,5	0,29	0,36
5	0,47	0,5	0,52	0,5	0,47
6	0,86	0,68	0,52	0,49	0,47
7	0,49	0,36	0,41	0,36	0,36
8	0,97	0,77	0,51	0,36	0,61
9	0,74	0,74	0,71	0,47	0,69
10	0,53	0,58	0,57	0,55	0,53

Оценка риска поражения при определенном составе защитных действий находилась как

$$R_c = 1 - \frac{W_i}{W_y} \quad (2)$$

где $W_{прав}$ — суммарная значимость правильных защитных действий, выбранных студентом; W_y — суммарная значимость эталонных защитных действий.

Результаты практических исследований

Результаты оценки риска поражения при выбранном составе защитных действий представлены в табл. 2.

Для оценки риска поражения при определенной очередности защитных действий использовался коэффициент ρ ранговой корреляции (конкордации) Спирмэна, позволяющий найти степень близости (тесноты) между эталонным и выбранным порядком действий [8]. С учетом этого риск поражения при выбранной очередности защитных действий находился по формуле

$$R_i = 1 - \rho. \quad (3)$$

Результаты оценки риска поражения при выбранной очередности защитных действий представлены в табл. 3.

С учетом (1) и табл. 2 и 3 рассчитан риск поражения опрашиваемых студентов при реализации (выборе) защитных действий после получения текстового сообщения. Результаты расчетов представлены в табл. 4 и на рисунке.

На рисунке видно, что сообщение, помещенное в 4-й анкете, имеет наиболее рациональные параметры. В его состав входят смысловые блоки по виду, характеру и динамике опасности, а также инструкции по способу защиты. Добавление

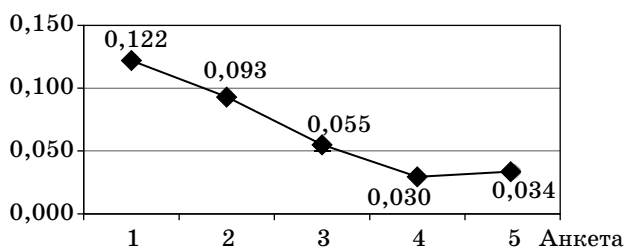
■ Таблица 3. Результаты оценки риска поражения при выбранной очередности защитных действий

Номер студента	Риск поражения по анкете				
	A1	A2	A3	A4	A5
1	0,29	0,25	0,21	0,18	0,06
2	0,09	0,04	0,05	0,14	0,02
3	0,26	0,26	0,13	0,01	0,14
4	0,08	0,05	0,05	0,06	0,02
5	0,10	0,06	0,06	0,07	0,04
6	0,20	0,14	0,03	0,07	0,04
7	0,07	0,07	0,13	0,09	0,07
8	0,23	0,21	0,11	0,03	0,09
9	0,23	0,13	0,08	0,01	0,06
10	0,07	0,12	0,14	0,01	0,04

■ **Таблица 4.** Риск поражения при реализации (выборе) защитных действий после получения текстового сообщения

Номер студента	Риск поражения по анкете				
	A1	A2	A3	A4	A5
1	0,22	0,16	0,1	0,08	0,02
2	0,05	0,02	0,02	0,07	0,01
3	0,23	0,23	0,1	0,004	0,12
4	0,04	0,03	0,03	0,02	0,006
5	0,05	0,03	0,03	0,04	0,02
6	0,17	0,1	0,02	0,03	0,02
7	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03
8	0,22	0,16	0,06	0,01	0,05
9	0,17	0,1	0,06	0,005	0,04
10	0,04	0,07	0,08	0,006	0,02

Средние значения риска поражения



■ Риск поражения в зависимости от параметров текстового сообщения

к этому сообщению информации по дальнейшим действиям приводит к увеличению риска поражения, т. е. является избыточным.

Заключение

Таким образом, представлены результаты апробации методического подхода по обоснованию рациональных параметров текстовых сообщений сотовой связи. Его использование позволяет определить объем, количество и сложность смысловых блоков текстовых сообщений, при восприятии которых население будет выполнять

правильные действия по обеспечению безопасности в ЧС. Это будет способствовать значительному повышению эффективности оповещения граждан при угрозе и возникновении ЧС природного и техногенного характера и существенному снижению риска поражения населения.

В дальнейшем указанный методический подход может быть использован при разработке банка типовых сообщений для различных ЧС и категорий населения, а также создания системы поддержки принятия решений по оповещению и информированию населения с помощью средств сотовой связи.

Литература

1. Дурнев Р. А., Котосонова А. С., Лукьянович А. В. Методический подход к обоснованию параметров текстовых сообщений для оповещения населения при чрезвычайных ситуациях // Информационно-управляющие системы. 2013. № 4. С. 60–66.
2. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 367 с.
3. Информационно-коммуникационные технологии обеспечения безопасности жизнедеятельности/под общ. ред. П. А. Попова/ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). – М.: ИПП Куна, 2009. – 267 с.
4. Поспелов Д. А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов. – М.: Радио и связь, 1989. – 184 с.
5. Дурнев Р. А., Цаликов Р. Х., Акимов В. А. Современные технологии спасения и защиты/МГОФ «Знание». – М., 2008. – 270 с.
6. Эрик дю Плесси. Психология рекламного влияния. Как эффективно воздействовать на потребителя: пер. с англ. – СПб.: Питер, 2007. – 272 с.
7. Саати Т. Принятие решений: метод анализа иерархий: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
8. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 264 с.

UDC 004.81

Practical Results of Text Message Parameters Substantiation for Population Notification in Emergency Situations

Durnev R. A.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, rdurnev@rambler.ru

Lukyanovich A. V.^a, Head of a Research Division, alexey@lukyanovich.ru

Kotosonova A. S.^a, Junior Researcher, kot_alenka@mail.ru

^aAll-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations Problems, EMERCOM of Russia, 7, Davydkovskaia St., 121352, Moscow, Russian Federation

Purpose: The existing experience proves efficiency of emergency public warning via mobile text messages in emergencies. However there are certain difficulties regarding perception and understanding of such messages as well as subsequent initiation of appropriate protective measures in emergency situations. To overcome these difficulties a developed methodological approach to establishing efficient parameters of text messages has been used. A practical research has been conducted to evaluate efficiency of its performance. **Methods:** There has been carried out a sociological survey of students majoring in engineering with different levels of training in the field of civil defense. The students completed two-part questionnaires. The first part included a text message concerning an emergency; messages differed in volume and complexity of individual information units. The second part contained a list of protective measures from which the students had to choose appropriate measures based on a text message. The completed questionnaires have been used to evaluate a risk of injury in case of implementation of chosen protective measures. The parameters of the message associated with the minimum risk have been found efficient. **Results:** It has been found that an efficient text message should include information units on a hazard type, nature and dynamics as well as instructions on protective measures. Any additional information on further actions or including other data increased the risk of injury, i.e. it has been redundant. **Practical relevance:** There has been proven the efficiency of the developed methodological approach which can be used for working out a bank of standard alert messages designed for various groups of population in emergencies.

Keywords — Emergency Public Warning, Text Message Parameters, Protective Measures, Risk of Injury.

References

1. Durnev R. A., Kotosonova A. S., Lukyanovich A. V. Methodical Approach to Substantiation of Parameters Text Messages to Alert the Population in Emergency Situations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2013, no. 4, pp. 60–66 (In Russian).
2. Peregudov F. I., Tarasenko F. P. *Vvedenie v sistemnyi analiz* [Introduction to System Analysis]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 367 p. (In Russian).
3. *Informatsionno-kommunikatsionnye tekhnologii obespecheniia bezopasnosti zhiznedeiatel'nosti* [Information and Communication Technologies of Safety of Activity]. Ed. P. A. Popov. Moscow, VNI GOChS (FTs), IPP Kuna Publ., 2009. 267 p. (In Russian).
4. Pospelov D. A. *Modelirovanie rassuzhdenii. Opyt analiza myslitel'nykh aktov* [Modeling of Reasonings. Experience of the Analysis of Cogitative Acts]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1989. 184 p. (In Russian).
5. Durnev R. A., Tsalikov R. H., Akimov V. A. *Sovremennye tekhnologii spaseniia i zashchity* [Modern Technologies of Rescue and Protection]. Moscow, MGOF Znanie Publ., 2008. 270 p. (In Russian).
6. Plessis E. *The Advertised Mind: Ground-Breaking Insights into How Our Brains Respond to Advertising*. Kogan Page, 2005. 232 p.
7. Saati T. *Decision-Making: Method of the Analysis of Hierarchies*. McGraw Hill, 1980. 288 p.
8. Beshelev S. D., Gurvich F. G. *Matematiko-statisticheskie metody ekspertnykh otsenok* [Mathematics-Statistics Methods of Expert Estimates]. Moscow, Statistika Publ., 1980. 264 p. (In Russian).

УДК 658.511

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ АНАЛИЗЕ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ПРЕЦИЗИОННЫХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Е. Г. Семенова^а, доктор техн. наук, профессор

О. И. Васильев^а, аспирант

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

Постановка проблемы: отсутствие достаточной инфраструктурной базы, недостаток квалифицированных кадров, высокие требования к качеству исполнения внутренних поверхностей и геометрических контуров прецизионных сложнопрофильных конструкций подчеркивают необходимость совершенствования научных и методологических принципов организации и управления производством на основе разработки моделей и процедур информатизации, мониторинга, планирования и оценки устойчивости производственных процессов. **Результаты:** разработаны функциональные модели деятельности производства в нотации IDEF0 на основании международных стандартов качества. Проведены анализ и оптимизация технологических процессов и организационной структуры предприятия, благодаря чему удалось повысить такие качественные характеристики конечного продукта, как плотность осадка, отсутствие образования дендрита и др. **Практическая значимость:** в результате реинжиниринга процессов налажено взаимодействие аналитической лаборатории и опытного производства. Испытан и получен положительные результаты метод воздействия фоновой акустической резонансной регуляции самоорганизации процессов, известный также как тензоимпульсная резонансная регуляция, что позволило увеличить скорость осаждения, плотность и равномерность структуры кристаллической решетки; добиться отсутствия образования дендрита.

Ключевые слова — системный анализ, производство, волновод, радиоэлектронная аппаратура, процессный подход, IDEF0, функциональное моделирование, прецизионные сложнопрофильные конструкции, гальванопластика, электрохимическое формообразование, инфраструктура, технология.

Введение

Технологии производства радиоэлектронной аппаратуры и антенные комплексы двойного назначения включают в себя элементы прецизионных сложнопрофильных конструкций (ПСК) волноводных систем. Высокие требования к качеству внутренних поверхностей и геометрических контуров таких ПСК, высокая стоимость, а зачастую и невозможность использования импортных ПСК в оборонном заказе подчеркивают необходимость планирования, проектирования и организации производства ПСК с использованием методов механической и гальванической обработки.

Увеличение доли отечественных радиоэлектронных изделий, активизация инновационной деятельности и ускорение внедрения результатов научно-технической деятельности, создание современного высокотехнологичного производства актуализируют тему в утвержденном распоряжением Правительства РФ от 15 декабря 2012 г. № 2396-р паспорте Государственной программы РФ «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013—2015 годы».

Для реализации этой цели необходимо решить ряд следующих задач:

— провести анализ особенностей условий и принципов организации процессов производства ПСК элементов волноводных систем;

— раскрыть особенности инфраструктурного обеспечения процессов производства ПСК как элементов сверхвысококачественных устройств;

— разработать функциональные модели, критерии и процедуры технологических процессов изготовления ПСК;

— разработать критерии и процедуры анализа и оптимизации организационных структур производства ПСК;

— организовать нормативно-техническое обеспечение процессов производства ПСК;

— адаптировать принципы менеджмента качества к задаче управления инфраструктурой предприятия;

— разработать модели процедур управления инфраструктурой производства ПСК, определить роль и место инфраструктурного обеспечения в основном технологическом процессе.

Системный подход при анализе процессов производства ПСК

Ввиду реализации планов расширения производственных мощностей ОАО «Технологическое оснащение» предложило авторам организовать системный подход к проблеме реинжиниринга ключевых (основных) процессов и оптимизации организационной структуры. Основная цель исследования заключалась в достижении единства современного уровня производства, методов ор-

ганизации труда и управления, обеспечиваемого применением международных стандартов качества ГОСТ Р ИСО 9001–2008 «Система менеджмента качества. Требования» [1] и ГОСТ Р ИСО 14001–2007 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению» [2].

Были проанализированы все процессы предприятия, входящего в состав концерна «Радиоэлектронные технологии» ОАО «Технологическое оснащение». На основе требований системы менеджмента качества процессы были ранжированы на ключевые (основные), вспомогательные и процессы управления. Внимание исследованию было акцентировано на ключевых процессах, так как основная технология включает в себя методы электрохимического формообразования и механической обработки изделий в совокупности. Некоторые предприятия изготавливают элементы волноводных систем только механической обработкой металла, что усложняет процесс проектирования данных элементов и сказывается на качестве выходного сигнала. В радиолокационных станциях наземного и воздушного типа, работающих на сверхвысокочастотных диапазонах волн, используют высокопрецизионные элементы волноводных систем со сложным геометрическим профилем. Изготовить подобные системы можно только благодаря технологиям электрохимического формообразования. По сравнению с методами механической обработки технология электрохимического формообразования показывает следующие преимущества:

- экономия цветных металлов и сплавов — до 70%;
- сокращение сроков выпуска изделий — в 5–6 раз;
- снижение трудоемкости изготовления — в 4–6 раз;
- сокращение сроков производства новых изделий — в 3–5 раз;
- снижение расхода инструментальной и легированной стали в среднем — в 2 раза;
- сокращение затрат ручного труда — в 3–5 раз;
- снижение расхода электроэнергии — в 8–10 раз;
- сокращение капитальных вложений — в 4 раза.

Для описания процессов гальванического производства авторами была использована методология функционального моделирования IDEF0, предназначенная для анализа системы как множества взаимодействующих и взаимосвязанных функций. Функциональный подход позволил четко отделить проблемы анализа и проектирования от проблем реализации. IDEF0 позволяет выполнять описание сложных объектов с помо-

щью простого графического языка, состоящего из двух символов, — блока и стрелки [3].

Метод функционального описания графической модели в стандарте IDEF0 и IDEF3 может быть предназначен как для выявления наиболее слабых и уязвимых мест существующей деятельности организации, так и для анализа новых технологических процессов в области электрохимического формообразования, их возможных преимуществ и недостатков.

Говоря о системном подходе, можно говорить о некотором способе организации действий, который охватывает любой род деятельности, выявляя закономерности и взаимосвязи в целях их более эффективного использования. При этом системный подход является методом не столько решения, сколько постановки задач. Это качественно более высокий, нежели просто предметный, способ познания. Системный подход — направление методологии научного познания, в основе которого лежит рассмотрение объекта как системы — целостного комплекса взаимосвязанных элементов [4].

Объектом исследования производства ПСК выступает организация, имеющая значительный опыт и инструментальную базу по отработке технологий электрохимического формообразования в сочетании с процессами механической обработки [5]. В организации ежегодно проводятся аудиты системы менеджмента качества по описанным стандартам на соответствие требований ГОСТ Р ИСО 9001–2008, а также ГОСТ РВ 15002 «Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Система менеджмента качества. Общие требования» [6]. В последние годы такие элементы, как волноводные узлы для радиоэлектронной аппаратуры, не подлежали сертификации в последнем стандарте. Это обстоятельство помогло сократить издержки на содержание ряда специализированных отделов без ухудшения качества.

Организация системного подхода началась с опроса участников процессов (экспертов) и первичной обработки данных. На основании нормативной документации была построена модель взаимодействия функций предприятия «как есть» (AS-IS); ее контекстная диаграмма представлена на рис. 1.

При разработке организационной структуры выяснилось, что на одном уровне с основными процессами стоят вспомогательные. Связано это с тем, что службы, обеспечивающие основные процессы, призваны создавать все необходимые условия для работы таких отделов, как научно-исследовательский отдел формообразования, аналитический отдел и опытное производство. В функции отдела формообразования входит постоянное поддержание принципов совершенствования ос-



■ Рис. 1. Пример контекстной диаграммы «Организация производственных процессов изготовления ПСК волноводных систем»: ЭВУ — элемент волноводного узла

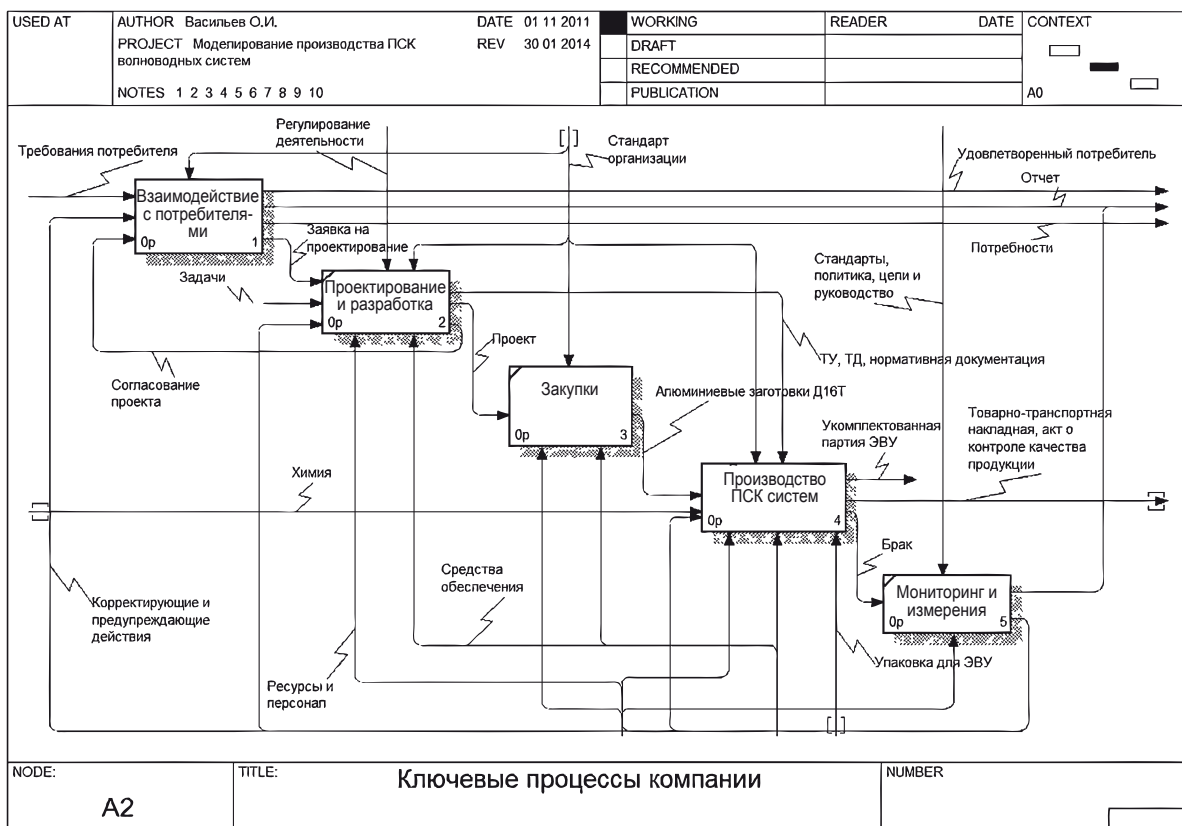
новной технологии, результатом его деятельности являются научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки, заявки на патенты и как следствие — патенты на изобретения, полезные модели или промышленные образцы. Аналитическая лаборатория и экспериментальный участок тесно взаимодействуют с опытным производством в целях внедрения в производство новых технологий, увеличивающих его эффективность и результативность. Эти процессы были также смоделированы, и все взаимодействия документированы. В результате моделирования выявлены наиболее узкие места технологического процесса. Кроме того, группа аналитиков исходила из принципа исключения деятельности, не добавляющей ценности, т. е. были устранены дублирующие процессы и объединены параллельные. Модель декомпозиции ключевых процессов предприятия (рис. 2) состоит из процессов взаимодействия с потребителями, проектирования и разработки, закупок, непосредственно процессов производства ПСК волноводных систем, а также мониторинга, измерения и анализа.

Аналитической лабораторией был испытан и получил положительные результаты метод тензоимпульсной резонансной регуляции, позволивший улучшить ряд качественных показателей конечного продукта [7].

Процесс осаждения металла на модели является одним из наиболее сложных, имеющих ряд отрицательных свойств, таких как низкая рассеивающая способность и низкий выход по току, следствием чего является насыщение водородом металла и большая длительность процесса.

Основная часть заряда при электроосаждении металла расходуется на восстановление водорода, и в производственных условиях выход по току металла в сернокислых электролитах составляет 11—17 %, а во фторсиликатных может достигать 25—30 % [8]. Учитывая то, что покрытия, получаемые во всех известных электролитах, неоднородны по причинам малой рассеивающей способности и, что более существенно, непрерывного и неконтролируемого изменения концентрации электролита в гальванической ванне, к литературным данным о выходе металла по току следует относиться как к ориентировочным, поскольку при расчете плотности тока используется параметр габаритной площади поверхности, который не учитывает ее фрактального характера.

Генератор импульсов электрического тока полной мощностью 10 В позволяет получать однополярные прямоугольные импульсы тока амплитудой до 1 А в выносной петле антенне-вибраторе, что создает в скин-слое проводника, который опущен в раствор для меднения, среднее акустиче-



■ **Рис. 2.** Модель декомпозиции ключевых процессов предприятия

ское давление ~150 Па [9]. Генератор позволяет получать импульсы тока частотой следования от 30 до 3000 кГц, а также контролировать частоту генерации сигналов, которую можно изменять с помощью дискретных и непрерывных регуляторов.

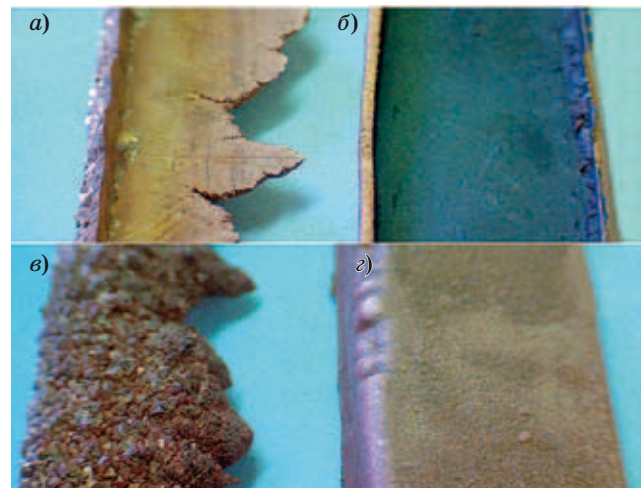
В результате применения метода тензиимпульсной регуляции и при практически равных условиях протекания процесса осаждения металла на модели выявлено:

- увеличение скорости осаждения в 1,5 раза;
- снижение образования дендрита на 48 %;
- увеличение сплошности кристаллической решетки в 9 раз.

Структура изделия до и после применения тензиимпульсного воздействия показана на рис. 3 [10].

Заключение

Проведенные авторами статьи исследования в области организации управления процессами производства ПСК, построение моделей данных процессов, их анализ и оптимизация помогли грамотно произвести реинжиниринг технологических процессов на предприятии государственной корпорации «Ростехнологии», концерна «Радиоэлектронные технологии» ОАО «Технологическое оснащение». Были созданы маршрутные карты для типовых технологи-



■ **Рис. 3.** Структура осадка меди до (а, в) и после (б, г) применения тензиимпульсной регуляции с использованием генератора источника тока

ческих процессов, а также разработаны документированные процедуры в стандарте организации. Это привело к повышению качества конечного продукта и эффективности взаимодействия процессов, сокращению издержек и сроков на разработку и поставку ПСК волноводных систем, о чем

свидетельствуют данные финансовой отчетности и результаты аудита системы менеджмента качества. Исследования также доказали значимость использования современных информационных методов и средств моделирования. Есть все основания полагать, что совершенствование научных и методологических принципов организации и управления производством ПСК на основе разработки моделей и процедур информатизации, мониторинга, плани-

рования и оценки устойчивости производственных процессов позволит этой технологии занять достойное место в решении задач развития электронной и радиоэлектронной промышленности, а также в российском аэрокосмическом приборостроении.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук 2012 года, серия ПСП № 12044.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2008. Система менеджмента качества. Требования. <http://www.ccin.ru/SDSert/GOST9001-2008.pdf> (дата обращения: 15.11.2013).
2. ГОСТ Р ИСО 14001-2007. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. http://www.pqm-online.com/assets/files/standards/gost_r_iso_14001-2007.pdf (дата обращения: 15.11.2013).
3. Туккель И. Л., Голубев С. А., Сурина А. В., Цветкова Н. А. Методы и инструменты управления инновационным развитием промышленных предприятий. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 208 с.
4. Попов В. Н. Системный анализ в менеджменте. – М.: КноРус, 2010. – 304 с.
5. Васильев О. И., Семенова Е. Г. Инновации управления качеством инфраструктуры // Формирование современного общества – проблемы, перспективы, инновационные подходы. 2010. С. 99–104.
6. ГОСТ РВ 15002. Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Система менеджмента качества. Общие требования. http://www.astronomikon.ru/config/gost/gost_11.pdf (дата обращения: 15.11.2013).
7. Васильев О. И., Семенова Е. Г. Обеспечение качества процессов изготовления прецизионных сложнопрофильных конструкций волноводных систем // Вопросы радиоэлектроники. 2011. № 5. С. 103–111.
8. Слодкова Л. Н., Кудрявцев В. Н. Электролитическое хромирование. – М.: Глобус, 2007. – 191 с.
9. Колесников А. А. Фоновая акустическая регуляция физико-химических процессов в конденсированных системах: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2009. – 40 с.
10. Васильев О. И., Васильев И. А. Инновационный эффект применения тензоимпульсной регуляции в процессах изготовления прецизионных сложнопрофильных конструкций // Научная сессия ГУАП. 2012. Т. 1. С. 146–148.

UDC 658.511

Systems Approach to the Analysis of Production Processes of Precision Figurine Structures

Semenova E. G.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, egsemenova@mail.ru

Vasilyev O. I.^a, Post-Graduate Student, innfri@gmail.com

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

Purpose: Lack of sufficient facility base, lack of qualified personnel, high requirements to the quality of implementation of internal surfaces and geometric precision contours of figurine structures highlight the need to update scientific and methodological principles of organization and management of production based on development of models and procedures for informatization, monitoring, planning and evaluation of sustainability of production processes. **Results:** There have been developed functional models of production activities in IDEF0 notation based on the international quality standards. There have been conducted the analysis and optimization of technological processes and organizational structure, as a result, there have been improved qualitative characteristics of a final product such as density of precipitate, no dendrite formation, etc. **Practical relevance:** Due to reengineering of processes interaction of an analytical laboratory and pilot production has been set up. There has been tested and received positive results the method of exposure of background acoustic resonance of self-regulation processes which is also known as tensoimpulse resonant regulation, it allowed to increase deposition rate, density and uniformity of crystal lattice structure, to achieve no dendrite formation.

Keywords — System Analysis, Production, Waveguides, Electronic Equipment, Process Approach, IDEF0, BPwin, Functional Simulation, Precision Figurine Structures, Electroplating, Electrochemical Formation, Technology.

References

1. State Standard R ISO 9001-2008. Quality Management System. Requirement (IDT). Available at: <http://www.ccin.ru/SDSert/GOST9001-2008.pdf> (accessed 15 November 2013).
2. State Standard R ISO 14001-2007. Environmental Management Systems. Requirements with guidance for use (IDT). Available at: http://www.pqm-online.com/assets/files/standards/gost_r_iso_14001-2007.pdf (accessed 15 November 2013).
3. Tukkeli I. L., Golubev S. A., Surin A. V., Tsvetkova N. A. *Metody i instrumenty upravleniya innovatsionnykh razvitiem promyshlennykh predpriyatii* [Methods and Tools of Innovation Development of Industrial Enterprises]. Saint-Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2013. 208 p. (In Russian).

4. Popov V. N. *Sistemnyi analiz v menedzhmente* [System Analysis in Management]. Moscow, KnoRus Publ., 2010. 304 p. (In Russian).
5. Vasiliev O. I., Semenova E. G. Innovation Quality Facility Management. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii "Formirovanie sovremennogo obshchestva – problemy, perspektivy, innovatsionnye podkhody"* [Proc. Int. Conf. "The Formation of Contemporary Society – Problems, Perspectives, Innovation Approaches"]. Saint-Petersburg, 2010, pp. 99–104.
6. State Standard RV 15.002. System of Product Development and Launching into Manufacture. Military Equipment. The Quality Management System. General Requirements. Available at: http://www.astronikon.ru/config/gost/gost_11.pdf (accessed 15 November 2013).
7. Vasiliev O. I., Semenova E. G. Quality Assurance Processes of Precision Figurine Designs of Waveguide Systems. *Voprosy radioelektroniki*, 2011, no. 5, pp. 103–111 (In Russian).
8. Solodkova L. N., Kudryavtsev V. N. *Elektroliticheskoe khromirovanie* [Electrochemical Plating]. Moscow, Globus Publ., 2007. 191 p. (In Russian).
9. Kolesnikov A. A. *Fonovaia akusticheskaiia reguliatsiia fiziko-khimicheskikh protsessov v kondensirovannykh sistemakh*. Dis. dokt. him. nauk [Background Acoustic Regulation of Physical and Chemical Processes in Condensed Systems. Dr. chem. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2009. 40 p. (In Russian).
10. Vasiliev O. I., Vasiliev I. A. Innovative Effect of Acoustic Resonance Regulation in Manufacturing Processes of Precision Figurine Designs. *Nauchnaia sessiia GUAP*, 2012, vol. 1, pp. 146–148 (In Russian).

Уважаемые подписчики!

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2013 гг. в свободном доступе на сайтах журнала (<http://i-us.ru>), Киберленкинки (<http://cyberleninka.ru>) и НЭБ (<http://elibrary.ru>). Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2013 гг. Вы можете заказать в редакции по льготной цене.

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4200 рублей, для подписчиков стран СНГ — 4800 рублей, включая НДС 18 %, почтовые и таможенные расходы.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: Alfimov@viniti.ru, сайт: <http://www.informnauka.com>

«Гал»

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, эл. почта: krasnodar@interpochta.ru

Новороссийск, тел.: (8617) 670-474

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru, сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru, сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

и др.

УДК 004.62

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ УНИФИЦИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛЬНОГО УЧЕТА ХОЛДИНГОВОЙ КОМПАНИИ

В. Н. Дмитриев^а, руководитель Центра по методологическому управлению основными средствами крупных компаний

^аОАО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», Москва, РФ

Цель: повышение эффективности управления системой материально-технического обеспечения в крупных отечественных компаниях. **Результаты:** разработан набор формализованных, представленных в графическом виде процедур и алгоритмов, обеспечивающих формирование унифицированного комплекса организационных мер, операций и приемов, направленных на организацию материального учета в холдинговой компании с номинальным качеством и оптимальными затратами, обусловленными текущим уровнем развития науки, техники и общества в целом. Алгоритмы, источники и потребители данных описаны словами естественного языка (вербальная информационная модель). Методы анализа и синтеза базируются на логике взаимосвязей нормативной и справочной информации, характерной для автоматизированных территориально распределенных информационных систем экономического назначения. **Практическое применение:** системная реализация знаний о процессах и этапах внедрения технологии управления материально-техническим обеспечением крупной компании путем формирования цельной системы классификаторов и справочников, используемых в процедурах единой технологии материального учета, которая использует конкретные и понятные показатели и критерии. Данный подход обеспечивает представление бизнес-процессов в виде, не требующем определенной квалификации и доступном пониманию как специалистам в области системотехники и информационных технологий, так и руководителям различных уровней управления. Технология верифицирована на базе филиальной структуры материально-технического обеспечения крупной российской холдинговой компании в системе железнодорожного транспорта.

Ключевые слова — материально-техническое обеспечение, моделирование единой системы, единая нормативно-справочная информация.

Введение

Написание данной статьи вызвано вопросами повышения эффективности управления системой материально-технического обеспечения (МТО) в крупных отечественных компаниях.

Под материально-техническим обеспечением понимается система организации обращения и использования материальных ресурсов предприятия (основных и оборотных фондов предприятия в виде материалов, сырья, полуфабрикатов, машин и оборудования). Целью МТО на любом предприятии является обеспечение деятельности компании материально-техническими ресурсами (МТР) в необходимом количестве, надлежащего качества, в установленные сроки и с минимальными затратами. Однако на практике любое предприятие, и более всего крупные корпорации и холдинги, сталкиваются с такими проблемами, как неравномерное поступление материальных ресурсов, залежи и неликвид материалов в одной структуре предприятия при недостаточном обеспечении в другой, необоснованные закупки, завышенные затраты на складские или логистические операции и т. д.

В немалой степени эффективность управления процессами МТО зависит от гибкости автоматизированных систем учета в компании, ее адаптивности к бизнес-процессам во всех подразделениях компании.

Повышение эффективности системы МТО в крупной компании, имеющей территориально разобщенную филиальную сеть, может быть достигнуто за счет применения единой технологии материального учета компании совместно с внедрением технологии управления единой нормативно-справочной информацией (ЕНСИ) МТО. Оба направления должны рассматриваться целостно и во взаимосвязи, что является важной и достаточно сложной методологической задачей.

Для успешной реализации данной концепции требуется определить подходы к формированию ЕНСИ и единой технологии материального учета. Эти подходы зависят от специфических особенностей, присущих компании, и определяются:

— наличием большого числа потенциальных пользователей автоматизированной системы МТО (АС МТО), которые в свою очередь зависят от специфики производственных процессов (управленческие и организационные аспекты, система нормирования, планирования и контроля рабочих процессов, система отчетов и пр.);

— разнообразием существующих в сфере МТО бизнес-процессов, требующих установления взаимосвязей между ними, с учетом возможностей используемых автоматизированных систем и корреляционных связей между ними, организации работ специалистов, имеющих отдельные бизнес-процессы или работающих с несколькими бизнес-процессами.

Таким образом, работы по подготовке и внедрению ЕНСИ МТО и единой технологии материального учета – это комплекс работ, разбитых на этапы, и необходимых мероприятий. При организации работы в аналогичном проекте автор использовал требования стандартов как ранее известных в практике построения автоматизированных информационных систем на территории СНГ [1, 2], так и стандартов последнего времени [3, 4], воспринимаемых международным сообществом.

В качестве *основных мероприятий, выполняемых в ходе проекта*, выделены следующие:

1) проведение комплексного анализа АС МТО и действующей нормативно-справочной информации (НСИ) МТО;

2) формирование требований к справочникам и классификаторам и к технологии управления ЕНСИ МТО;

3) определение моделей данных компонентов ЕНСИ МТО (включая формулирование требований к техническому и программному обеспечению ЕНСИ МТО);

4) согласование общих принципов учета МТР в учетной системе компании;

5) разработка правил перехода от используемой системы НСИ к единой системе НСИ МТО (включая разработку тестового образца одного из компонентов ЕНСИ МТО).

Каждая из указанных выше работ характеризуется относительной самостоятельностью. В рамках работ производится разделение объема на более мелкие элементы и процедуры, которые регламентированы специфическими требованиями к результатам работы. Каждый элемент или процедура имеют собственные критерии для оценки качества результатов. Последовательность и взаимосвязь отдельных работ определяются логикой процесса в целом и результатами мониторинга общего хода работ. Целостность проекта обеспечивается взаимной

обусловленностью, содержательной и логической преемственностью работ.

Рассмотрим ключевые этапы формирования ЕНСИ МТО, используемой в целях единой технологии материального учета.

Комплексный анализ АС МТО и НСИ МТО

Для определения текущего состояния АС МТО и ее нормативно-справочной части необходимо:

— проанализировать отчетные формы (выявить соотношение полей каждой формы, содержащих НСИ, полям классификаторов и справочников НСИ);

— провести аудит классификаторов и справочников, используемых в АС МТО (определить методы идентификации, классификации и кодирования объектов, содержащихся в классификаторах и справочниках);

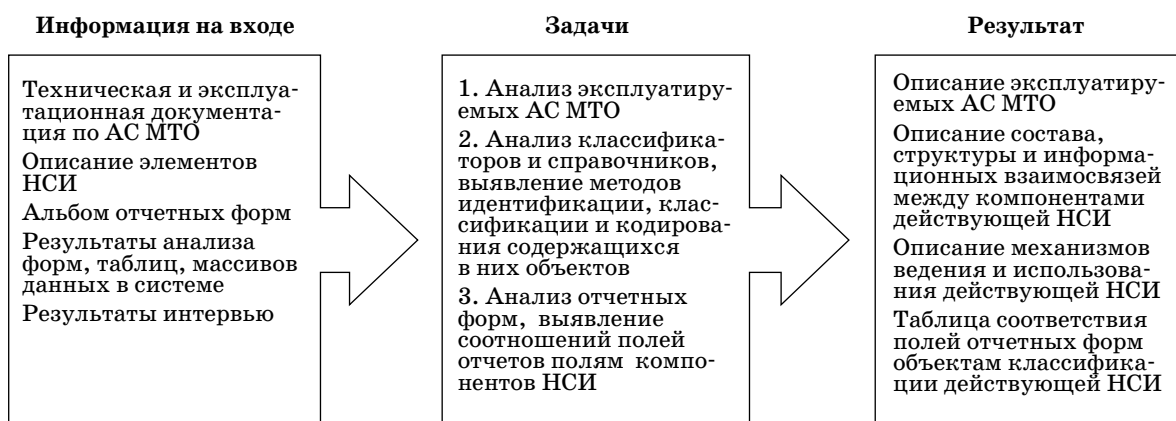
— установить порядок функциональных связей действующих информационных систем (выявить механизм обмена данными между подсистемами АС МТО);

— согласовать перспективы развития системы МТО компании в части использования НСИ (в том числе путем непосредственных консультаций со специалистами функциональных подразделений предприятия).

Выполнение перечисленных работ позволит оценить текущее состояние системы НСИ в сфере МТО и выявить «узкие» места, мешающие качественно выполнению рабочего процесса.

Алгоритм реализации задачи комплексного анализа АС МТО и НСИ МТО можно представить в виде краткой схемы (рис. 1).

В ходе *анализа эксплуатируемых АС МТО* необходимо принимать во внимание, что, как правило, в крупных территориально распределенных компаниях используемые в процессах МТО автоматизированные системы реализованы на разных платформах и не являются однородными.



■ **Рис. 1.** Краткий алгоритм выполнения задачи комплексного анализа АС МТО и НСИ МТО

ми. В то же время для повышения эффективности управления всем объемом разнородных данных, связанных с информационным сопровождением используемых материальных ресурсов, необходимо общее информационное пространство. Поэтому решение данной задачи тесно связано с формированием единой технологии материального учета в АС МТО на базе ЕНСИ.

По результатам анализа эксплуатируемых АС МТО можно:

- установить ключевых пользователей АС МТО и информацию, используемую ими;
- выявить контур процессов материального учета в учетной системе предприятия и определить основные бизнес-процессы МТО в компании;
- наметить комплекс мер по обеспечению информационной совместимости ЕНСИ МТО с эксплуатируемыми АС МТО.

Анализ существующей системы НСИ МТО позволяет сформулировать требования к единой системе НСИ МТО. Подходы к построению систем НСИ корпоративного уровня отрабатываются достаточно давно, и накоплен определенный положительный опыт (например, [5, 6]). Но лишь на основании данных детализированного анализа классификаторов и справочников в сфере МТО, что очень часто не выполняется в силу трудоемкости работ, предприятие может получить их полное описание, установить применяемые методы идентификации, классификации и кодирования элементов НСИ, сформулировать действующий механизм ведения НСИ, а также определить структуру информационных связей между компонентами НСИ.

Итогом выполнения данной задачи будет идентификация процессов материального учета в учетной системе предприятия и разработка основ модели данных компонентов (справочников и классификаторов) ЕНСИ МТО.

Анализ применяемой системы отчетности в области МТО позволяет определить состав информации, фактически используемой ключевыми пользователями, а также обеспеченность требуемой информации существующими справочниками. По результатам анализа формируется таблица соответствия полей отчетных форм объектам классификации действующей НСИ.

Данный анализ дает возможность определить функциональность действующей НСИ и сформировать периметр фактического использования процессов МТО в учетных системах предприятия. Кроме того, он позволяет разработать основу системы показателей, обеспечивающих принятие управленческих решений в сфере МТО.

Формирование требований к технологии управления ЕНСИ МТО, к справочникам и классификаторам МТО

Следующим этапом внедрения на предприятии ЕНСИ для целей ведения единообразного материального учета является формулирование функциональных требований к справочникам и классификаторам проектируемой единой системы.

Требования разрабатываются на основании результатов комплексного анализа АС МТО и НСИ МТО, полученной оценки текущего состояния системы НСИ и выявленных «узких» мест в технологическом процессе МТО.

Схема входов/выходов выполнения задачи получения функциональных требований к ЕНСИ МТО представлена на рис. 2.

Итогом выполнения поставленных задач на данном этапе будут:

- сформированные требования к технологии управления НСИ в рамках единой технологии материального учета (по регламенту и способу ве-



■ **Рис. 2.** Краткий алгоритм выполнения задачи формирования функциональных требований к ЕНСИ МТО

дения ЕНСИ, по составу и структуре классификаторов и справочников);

— уточненные потребности подразделения снабжения компании и приоритеты решения проблемных задач;

— обозначенные границы технологии создания и ведения ЕНСИ;

— выявленные подходы к решению задач МТО;

— урегулированная область решения задачи создания ЕНСИ МТО (включая постановку задачи).

В ходе выполнения работ требования к ЕНСИ МТО могут неоднократно уточняться. Также они могут быть изменены после завершающего этапа по согласованию участников проекта.

В ходе *определения ключевых пользователей АС МТО* такие пользователи группируются в категории, отражающие их причастность или интерес к системе МТО. Для каждой категории однозначно определяются роли, обязанности и полномочия.

Основным итогом *анализа информации, используемой ключевыми пользователями АС МТО*, должны быть сформированные требования к составу и структуре классификаторов и справочников новой ЕНСИ МТО.

Анализ функциональности действующей НСИ является одной из отправных точек проекта. Ведь для обеспечения полной функциональности системы НСИ необходимо, чтобы справочники были интегрированы, использовались комплексно и гарантировали информационную поддержку всех процессов материального учета.

Основным итогом анализа функциональности действующей НСИ должны быть сформированные требования к содержанию и предназначению полей справочников и классификаторов новой ЕНСИ МТО. На основании их предприятие может в дальнейшем получить:

— описание модели данных компонентов (справочников и классификаторов) ЕНСИ МТО, их свойств, значений, атрибутов, а также взаимосвязей между ними;

— предложения по совершенствованию структуры данных НСИ;

— рекомендации по организации системы ЕНСИ МТО и по интегрированному построению справочников для автоматизированных систем компании.

Анализ технологии ведения и использования действующей НСИ. Требования к процессам ведения справочников и классификаторов в ЕНСИ МТО формируются на основании информации об участниках процесса и их роли, методах синхронизации основных данных с локальными системами, а также на основании требований к документационному обеспечению ведения НСИ (созданию записей, их изменению, блокированию и пр.).

В результате анализа системы ведения действующей НСИ будут сформированы требования пользователей к регламенту и способу ведения ЕНСИ МТО. В дальнейшем эти требования могут использоваться при формировании методических рекомендаций по обеспечению и информационной совместимости ЕНСИ МТО с эксплуатируемыми системами.

Разработка моделей данных компонентов ЕНСИ МТО

Разработка моделей данных компонентов ЕНСИ МТО включает в себя описание компонентов, их свойств и атрибутов, взаимосвязей между ними, а также описание рекомендуемой системы классификации и кодирования информации.

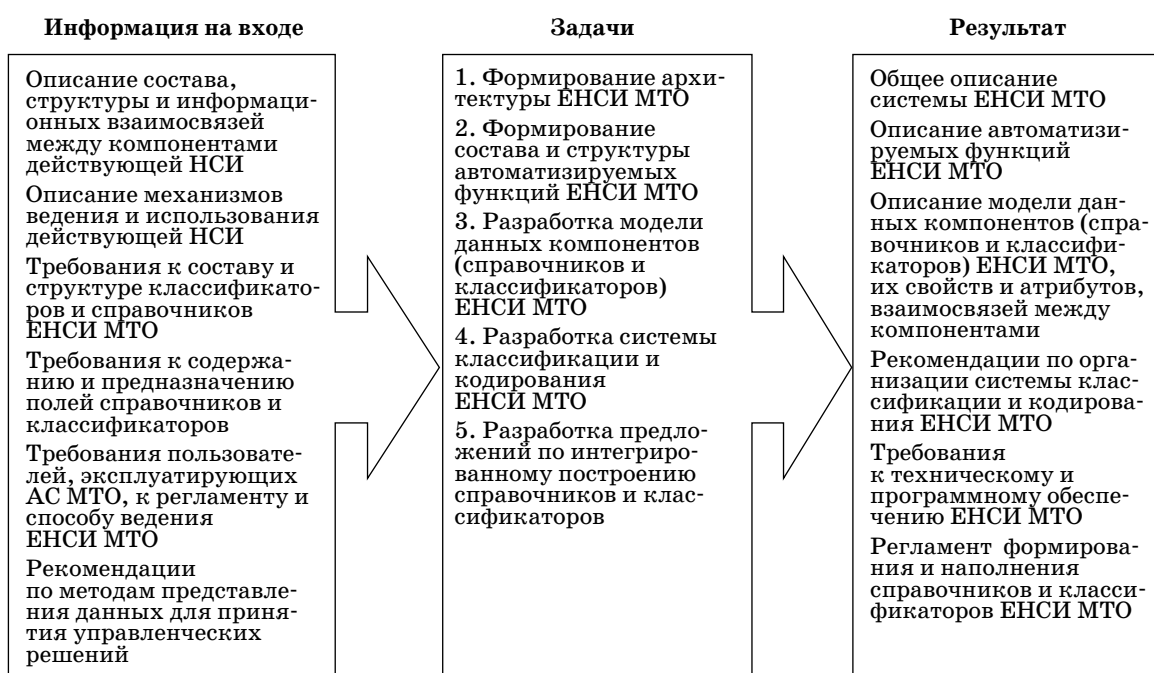
Краткий алгоритм выполнения задачи разработки модели данных ЕНСИ МТО представлен на рис. 3.

Формирование архитектуры ЕНСИ МТО. Единая НСИ МТО представляется в виде совокупности информационно совместимых словарей, справочников, классификаторов, элементы которых используются при решении задач МТО на предприятии вне зависимости от организационных и иерархических структур. Автоматизированные функции единой системы НСИ должны быть направлены на достижение установленных целей в процессах управления МТО.

На основании описаний и требований к НСИ, а также сформированной архитектуры системы разрабатывается *модель данных компонентов (справочников и классификаторов) ЕНСИ МТО*, т. е. регламентируются их свойства и атрибуты, прописываются взаимосвязи между компонентами системы.

Разработка единой системы классификации и кодирования (ЕСКК) ЕНСИ МТО необходима для обеспечения информационной совместимости данных, используемых в смежных задачах АС МТО, а также при обмене данными как внутри предприятия, так и с внешними организациями.

Единая система классификации и кодирования включает множество классификаторов, применяемых для решения задач корпоративного уровня управления, саму автоматизированную систему ведения и использования ЕСКК, средства администрирования процесса формирования и ведения ЕСКК, а также методологию применения ЕСКК в прикладных задачах. ЕСКК обеспечивает консолидацию и группировку данных, единообразие различных выборок (отчетов). Основой ЕСКК может служить тезаурус — словарь, содержащий единые корпоративные формулировки и определения ключевых терминов и понятий.



■ Рис. 3. Краткий алгоритм выполнения задачи разработки модели данных ЕНСИ МТО

Единая система классификации и кодирования позволит решить вопросы работы с объектами классификации в части:

- выделения объектов классификации, учитываемых на уровнях интеграции данных, в системах обмена данными между разными подсистемами и в среде внешнего информационного обмена;

- определения состава классификационных признаков, значения которых должны одинаково восприниматься всеми пользователями;

- оценки множества значений классификационных признаков;

- необходимости гармонизации объектов классификации, их признаков с внешними АС;

- установления способов информационной совместимости действующих задач с формируемыми компонентами ЕНСИ.

При разработке модели данных компонентов ЕНСИ МТО, как следствие, должны быть сформированы *требования к техническому и программному обеспечению ЕНСИ МТО*, т. е. к ресурсам (операционным системам, СУБД, средствам защиты информации, дополнительному программному обеспечению), к качеству программных средств и пр.

Результатом выполнения общей задачи на данном этапе, в том числе, должна стать разработка *регламента формирования и наполнения компонентов ЕНСИ МТО*, устанавливающего общие правила (общий регламентированный порядок) формирования и наполнения классификаторов

и справочников в составе единой системы НСИ МТО. В дальнейшем регламент непосредственно используется при формировании правил перехода от действующей системы НСИ к единой.

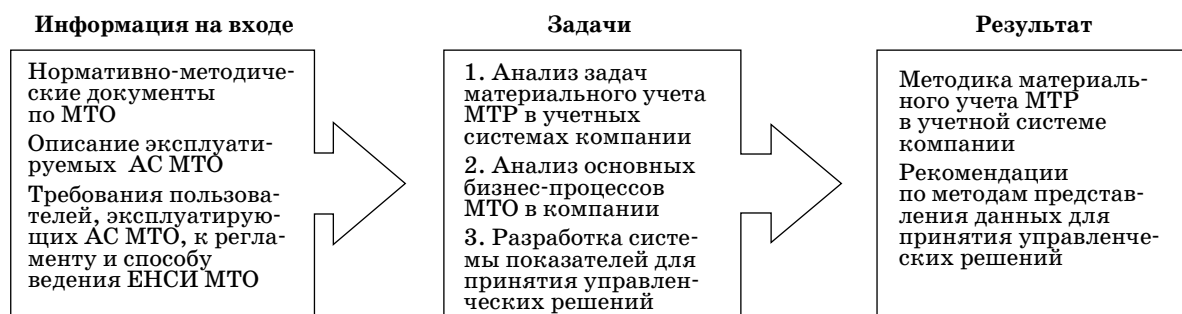
Общие принципы учета МТР в учетной системе компании и формирование концепции системы показателей

Теперь отвлечемся от задач гармонизации НСИ и перейдем к задачам учета МТР.

Для разработки общих принципов учета МТР в учетной системе компании необходимо выделить основные бизнес-процессы поставки МТР и исследовать периметр автоматизации этих процессов. Для этого надо сформировать комплекс задач, решаемых в рамках единой технологии материального учета, и выявить задачи, содержащие проблемные зоны. Также необходимо проанализировать и «привязать» основные характеристики процессов учета МТР к количественным и качественным показателям деятельности компании.

Краткий алгоритм выполнения задачи разработки общих принципов учета МТР в учетной системе компании представлен на рис. 4.

Анализ задач материального учета МТР в компании неразрывно связан с анализом *самых бизнес-процессов* в этой сфере. Во всех подразделениях предприятия учетные процессы необходимо унифицировать исходя как из за-



■ **Рис. 4.** Краткий алгоритм выполнения задачи разработки общих принципов учета МТР в учетной системе компании

дач материального учета, так и задач пообъектной раскрываемости показателей отчетности [7]. Унификация также необходима для обеспечения информационной совместимости данных, используемых в материальном учете в разных локальных системах компании.

На основании полученных результатов анализа предприятие должно выработать единую методику материального учета МТР во всех используемых учетных системах компании.

На данном этапе большое значение придается возможности сформировать *концепцию системы показателей*, позволяющую выработать рекомендации по методам представления данных для принятия управленческих решений в области МТО. Система показателей должна, с одной стороны, базироваться на интегрированных автономных первичных данных из разных систем учета, с другой — использовать объединенные данные в необходимых для анализа аспектах, которые бы служили помощником при принятии управленческих решений или при подготовке отчетности.

При этом с учетом современных подходов к формированию системы показателей [8] автор статьи считает необходимым рассматривать не результаты механистического выполнения функциональных операций, а в целом систему корпоративных взаимоотношений между всеми заинтересованными лицами, соотношенную с задачами мониторинга развития компании и отслеживания выполнения стратегии развития компании. Это позволит не допустить манипулирования одной группой показателей за счет других, например, краткосрочного улучшения финансовых показателей за счет экономии на качестве услуг.

Разработка системы показателей обусловлена выявлением идентификаторов и основных характеристик процессов и хозяйственных операций (операции хранения, отпуск в производство и т. д.) [9]. Все это непосредственно перекликается с моделью данных справочников и классифика-

торов ЕНСИ МТО, так как, лишь имея систему результативных показателей компании в части МТО и методику учета МТР, можно сформировать ту модель данных компонентов НСИ, которая будет удовлетворять потребностям ключевых пользователей и предприятия в целом.

Но вернемся к задаче формирования единой системы НСИ в области МТО.

Разработка правил перехода к ЕНСИ МТО

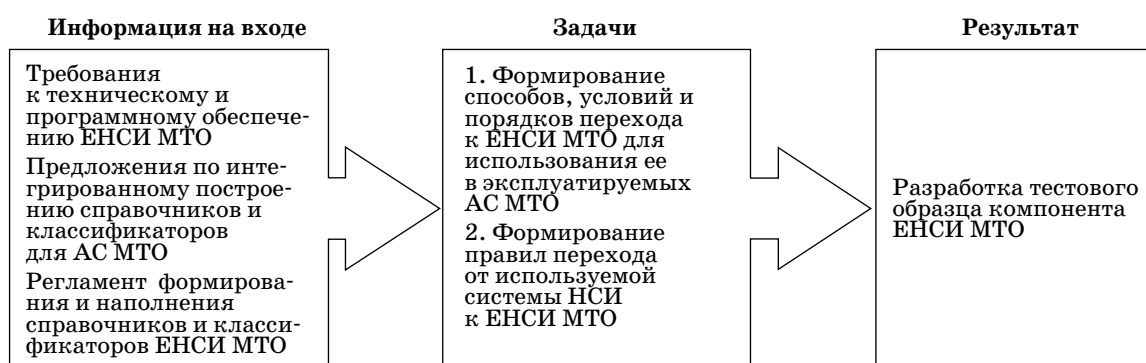
Формирование правил перехода от использования действующей системы НСИ к единой необходимо начинать еще на этапе разработки регламента формирования и наполнения компонентов ЕНСИ МТО. На основе данных правил может быть сформулирован порядок управления ЕНСИ МТО.

Схема задачи разработки правил перехода к ЕНСИ МТО представлена на рис. 5.

Как правило, действующая система НСИ МТО содержит справочники и классификаторы, поля которых могут использоваться в других АС. Вся применяемая в компании система НСИ представляет собой множество справочников, в том числе администрирование которых ведется централизованно. При этом только один из справочников НСИ должен являться носителем первичных значений определенного поля. Другие справочники синхронизируют значения имеющихся у них аналогичных полей с полем справочника-первоисточника.

Таким образом, создается сложная многоступенчатая система взаимосвязей между справочниками, управлять которой непросто, а допущенные ошибки по принципу цепной реакции автоматически распространяются по всем взаимосвязанным задачам.

Для перевода действующей системы НСИ на единую систему НСИ МТО необходимо учитывать индивидуальные особенности использования каждого компонента НСИ. Поэтому и подход к адаптации задач материального учета должен быть индивидуальным.



■ Рис. 5. Схема выполнения задачи разработки правил перехода к ЕНСИ МТО

В зависимости от особенностей действующего программного обеспечения и имеющихся возможностей его доработки на предприятии производятся:

- разработка вариантов перевода задач АС МТО на ЕНСИ МТО;
- регламентация последовательности работ по переходу действующих АС МТО на ЕНСИ МТО;
- определение условий разработки и внедрения новых прикладных задач после перехода АС МТО на базу ЕНСИ МТО;
- закрепление принципов взаимодействия ЕНСИ с АС МТО в процессе эксплуатации в части синхронизации и обслуживания систем.

Для наглядности и демонстрации преимуществ применения единой системы НСИ МТО может быть разработан и показан тестовый образец компонента ЕНСИ МТО. Он представляет собой свод описаний элемента НСИ, предлагаемого в качестве одного из справочников (классификаторов) единой системы.

Заключение

Внедрение полноценного комплекса автоматизированных средств в области материально-технического снабжения позволит создать в компании единую информационную среду, что обеспечит повышение сбалансированности поставок и эффективности использования материальных ресурсов, а также повысит качество работ в сфере обеспечения МТР предприятия в целом.

При разработке технологии управления ЕНСИ в АС МТО холдинговой компании большое значение имеет определение корректных подходов к формированию единой НСИ и единой технологии материального учета. Они зависят от отраслевых особенностей компании и ее уровня информационной оснащенности. Разработка и внедрение рассматриваемых подходов являются приклад-

ными задачами и должны учитывать интересы холдинга.

Литература

1. **ГОСТ 34.601-90.** Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. – М.: Стандартинформ, 2009. – 6 с.
2. **РД 50-34.698-90.** Методические указания. Информационная технология. Комплекс стандартов и руководящих документов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов. – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 26 с.
3. **A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide).** Fourth Ed. – Project Management Institute, 2008. – 467 p.
4. **A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge® (BABOK® Guide).** Version 2.0. – International Institute of Business Analysis, 2009. – 259 p.
5. **Технология управления НСИ корпоративного уровня.** <http://www.pcweek.ru/idea/article/detail.php?ID=70392> (дата обращения: 12.04.2013).
6. **Построение систем НСИ: какой подход выбрать?** http://www.navicongroup.ru/news/info_letters/04_11/nsi.php (дата обращения: 12.04.2013).
7. **Дмитриев В. Н., Поспелова Е. В., Акиншина И. М.** Единый регистр основных средств – инструмент оперативного управления и получения достоверной отчетности // Экономика железных дорог. 2011. № 12. С. 89–90.
8. **Kaplan Robert S., Norton David P.** The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action. – Harvard Business Press, 1996. – 322 p.
9. **Намазалиев Г. И.** Экономический анализ хозяйственной деятельности в материально-техническом обеспечении. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 320 с.

UDC 0004.62

Methods for Development of a Unified Technology of Materials Accounting in a Holding CompanyDmitriev V. N.^a, Head of the Center of Methodological Asset Management in Large Companies, v.dmitriev@gismps.ru^aJSC «Research and Design Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunications on Railway Transport», 5, Orlikov St., 107078, Moscow, Russian Federation

Purpose: Improvement of management effectiveness of material and technical support system in large national companies. **Results:** There has been developed a set of formalized, graphically represented procedures and algorithms providing formation of a unified complex of organizational measures, operations and techniques focused on organization of materials accounting in a holding company with nominal quality and optimal costs associated with a current level of development of science, technology and society as a whole. Algorithms, sources and data users are described in words of natural language (a verbal information model). Methods of analysis and synthesis are based on logics of interconnections of normative and reference information characteristic for automated territory distributed information systems of economic assigning. **Practical application:** System implementation of knowledge on processes and implementation phases of technology management of material and technical support of a large company by forming an integral system of classifiers and guides used in procedures of a unified technology of materials accounting which involves certain and known indices and criteria. This approach provides representation of business processes in a form which does not require any qualification and it is understandable for experts in the field system engineering and information technologies as well as for managers of different administration levels. The technology has been verified on the basis of an affiliated structure of material and technical support of a large Russian company within the railway system.

Keywords — Material and Technical Support, Unified System Modeling, Unified Reference Data.

References

1. State Standard 34.60190. Information Technology. Set of Standards for Automated Systems. Automated Systems. Stages of Development. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 6 p. (In Russian).
2. Guidance Document for Standardization 5034.69890. Methodical Instructions. Information technology. Set of Standards and Guidelines for Automated Systems. Automated Systems. Requirements for Documents Content. Moscow, Standards Publ., 2009. 26 p. (In Russian).
3. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). Fourth Edition.* Project Management Institute, 2008. 467 p.
4. *A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge® (BABOK® Guide). Version 2.0.* International Institute of Business Analysis, 2009. 259 p.
5. *Tekhnologiya upravleniya NSI korporativnogo urovnia* [Technology of Master Data Management of a Corporate Level]. Available at: <http://www.pcweek.ru/idea/article/detail.php?ID=70392> (accessed 12 April 2013).
6. *Postroenie sistem NSI: kakoi podkhod vybrat'?* [Building of the Referenced Data System: What Approach to Choose?]. Available at: http://www.navicongroup.ru/news/info_letters/04_11/nsi.php (accessed 12 April 2013).
7. Dmitriev V. N., Pospelova E. V., Akinshina I. M. Uniform Registry of Fixed Assets – Instrument of Operating Management and Acquisition of Authoritative Reporting. *Ekonomika zheleznykh dorog*, 2011, no. 12, pp. 89–90 (In Russian).
8. Kaplan Robert S., Norton David P. *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action.* Harvard Business Press, 1996. 322 p.
9. Namazaliev G. I. *Ekonomicheskii analiz khoziaistvennoi deiatel'nosti v material'notekhnicheskoi obespechenii* [Economic Analysis of Business Activities in Material and Technical Support]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1990. 320 p. (In Russian).

УДК 338.2

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЛОГИСТИКОЙ В ОСОБЫХ ПОРТОВЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗОНАХ

О. Б. Орлова^{а,1}, старший государственный таможенный инспектор Балтийской таможни, аспирант
^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, РФ

Цель: рассмотреть особенности логистических процессов в особых портовых экономических зонах и дать предложения по организации управления контейнерными терминалами с использованием отечественных программных продуктов. **Результаты:** сформулированы требования к системам логистического управления для особых портовых экономических зон: управление грузами в «сухих портах», регулирование подачи разнородного транспорта, информационная связь с таможенной службой и т. п. — и показано, что комплексная логистическая система управления может быть реализована путем совместного использования системы документооборота (SOLVO.DMS) и системы автоматизации/визуализации (SOLVO.CTMS) разработки российской компании Solvo. **Практическая значимость:** дана рекомендация использовать при проектировании особых портовых экономических зон программные решения, опробованные при управлении терминалами Новороссийского и других морских торговых портов.

Ключевые слова — управление логистическими процессами, особые портовые экономические зоны.

Введение

В условиях расширяющейся глобализации мировой экономики все большее значение приобретает формирование международных логистических цепочек доставки грузов, ключевое значение в которых всегда отводилось морским торговым портам (МТП). В этом месте сталкиваются интересы многочисленных участников процесса товародвижения: продавцов, покупателей, перевозчиков, экспедиторов и т. д., — а также государственных служб, призванных обеспечивать этот процесс: таможни, пограничной службы, санитарных учреждений и т. п. Кроме того, порт является местом, где происходит стыковка разнородных транспортных средств, принадлежащих морскому, железнодорожному и автомобильному транспорту, обладающих принципиально различными характеристиками по грузоподъемности, принципам загрузки, скорости оборота подвижного состава и т. п.

Порт во все времена служил средством согласования грузопотоков, осуществляя временное хранение товаров на своей территории. Однако неуклонное увеличение объема грузопотоков в сочетании с жесткими территориальными ограничениями на развитие портов вынуждает искать пути повышения их пропускной способности как за счет различных организационных мероприятий, так и за счет роста производительности труда портовых комплексов. Попытка реализовать

первое направление связана с созданием особых портовых экономических зон, что должно привести к упрощению взаимоотношений импортеров и экспортеров с таможенной службой и видоизменению в лучшую сторону экономических условий товародвижения через границу [1]. Второе направление реализуется путем повышения информатизации логистических процессов в порту и совершенствования на этой основе планирования товародвижения [2]. Очевидно, что наибольший эффект может дать сочетание этих подходов, однако на этом пути необходимо принимать во внимание согласование интересов хозяйствующих и контролирующих субъектов [3, 4]. Рассмотрим особенности логистических процессов, реализуемых в современных портах.

Логистические процессы в современных морских торговых портах

Современный этап развития МТП характеризуется тем, что наблюдается расширение круга оказываемых на их территории услуг, выходящих за рамки традиционного перечня по обеспечению перевалки груза с одного вида транспорта на другой. Это связано с необходимостью не только хранить более крупные объемы транзитного груза и комплектовать партии товара для его последующей перевозки, но и перерабатывать промышленный и коммерческий экспорт и импорт.

Данные тенденции нашли свое отражение в классификации МТП по принципу их поколений [5] (табл. 1).

Как видно из приведенной таблицы, в XX в. выделяется четыре поколения портов, первое из которых служило людям практически на всем протяжении истории морской торговли.

¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронной коммерции и маркетинга Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения А. П. Ястребов.

■ Таблица 1

Этап развития	Выполняемые функции	Характер деятельности
Первое поколение (до 50-х гг.)	Погрузка-разгрузка морских судов, временное хранение грузов	Порт — перегрузочный центр
Второе поколение (50 — 80-е гг.)	Помимо перевалки грузов — промышленная и коммерческая деятельность	Порт — коммерческий центр
Третье поколение (с 80-х гг.)	Помимо функций второго поколения — расширение услуг по распределению груза на основе комплексной системы сбора и обработки информации	Порт — дистрибьютор
Четвертое поколение (с 90-х гг.)	Преобразование порта третьего поколения в полноценный логистический центр	Порт — логистический центр

Считается, что на этом этапе порты находились в условиях более или менее жесткой административной регуляции и служили единственно в качестве перегрузочных пунктов, хотя история дает нам довольно большое число исключений из этого правила: порто-франко на острове Делос с 166 г. до н. э., а также районы порто-франко в портовых городах Средиземноморья в позднем средневековье: Ливорно (с 1547 г.), Генуя (1595 г.), Венеция (1661 г.), Марсель (1669 г.). Следует отметить, что территории таких районов отделялись особой таможенной границей для реализации беспощлиного ввоза и вывоза товаров.

Дальнейшее развитие портов (переход ко второму поколению) было связано, прежде всего, с активной коммерциализацией их деятельности, направленной на обеспечение увеличения грузооборота за счет как тоннажа принимаемых судов, так и роста числа судозаходов, а также на создание условий для промышленной и коммерческой деятельности на территории порта.

Условия для создания современного порта (порта третьего поколения) возникли как результат разработки компьютерных средств управления, когда появилась возможность осуществлять комплексную обработку информации и формировать информационные потоки, непосредственно связанные с обслуживанием соответствующих грузопотоков. Это расширило возможности МТП как составляющей части логистических цепочек, связывающих между собой участников международной торговли, и повысило его конкурен-

тоспособность. Более широкая гамма функциональных обязанностей порта потребовала также большего уровня организационной интеграции внутри порта, учета взаимосвязи осуществляемых на его территории различных видов деятельности и более тесного взаимодействия с учреждениями федеральной и местной власти. Последнее значимо в свете все большей коммерциализации деятельности портов и, как следствие, видоизменения организационной структуры управления портом. Особенно это важно при функционировании порта в режиме особой портовой экономической зоны, когда согласно мировому опыту свой голос в управлении получают также работающие в ней резиденты [6].

Другой причиной перехода к портам третьего поколения стало широкое применение мультимодальных перевозок в результате интенсивного развития контейнеризации грузовых потоков, что предполагает принципиально иной уровень решения логистических задач в управлении и оптимизацию цепей поставок. Именно в этом качестве развиваются сегодня такие крупнейшие европейские порты, как Роттердам и Гамбург, средиземноморские порты Триест и Пирей, ближневосточные порты Акаба и Абу-Даби и др. Принципиальное отличие этих портов от отечественных состоит в том, что последние в силу своего географического положения являются «терминальными» и служат исключительно для проведения операций ввоза и вывоза товаров на территорию Российской Федерации, в отличие от зарубежных, выполняющих функцию перераспределения грузопотоков и формирующих разветвленную сеть фидерных линий. Единственным исключением здесь мог бы стать порт Мурманск, но только в том случае, если бы Северный Ледовитый океан освободился от ледяного покрова.

Наконец, особенности МТП четвертого поколения в работе [5] практически не указаны, и можно сделать вывод, что эта категория просто оставлена «на вырост», потому что величина портовых логистических центров не может служить классификационным признаком.

Особенности логистических систем управления морских портов

Рассматривая особенности, в которых приходится работать МТП в современных условиях, прежде всего, следует отметить, что все значимые и удобные порты создавались в незапамятные времена, когда объем грузооборота был ничтожен по сравнению с современным. Поскольку, как любой крупный социальный объект, порт служил центром притяжения населения и развития городов, сегодня плотная жилая застрой-

ка подступает непосредственно к территории портов, не оставляя возможности для их развития. Исключение здесь представляют либо вновь строящиеся порты, такие как Усть-Луга, либо перепрофилируемые портопункты, к которым относится, например, Советская гавань, хотя в последнем случае все равно проблем возникает значительно больше, чем в случае нового строительства.

Недостаток площадей для расширения территории портов привел к решению хранить грузы на пространственно удаленных площадках, т. е. осуществить идею, которая в последнее время получила название «сухой порт». Согласно принятой в международной логистике терминологии, под «сухим портом» понимается внутренний терминал, напрямую связанный автомобильным или железнодорожным сообщением с морским портом. Такой «сухой порт» выполняет функции склада временного хранения и центра для перевалки морских грузов на внутренних направлениях, а также может оказывать услуги по таможенному оформлению товаров. Предложенная схема заслужила большую популярность среди участников транспортного рынка, поскольку предполагалось, что в соответствии с ней терминал, имеющий статус «сухого порта», приобретает право организовывать таможенный склад временного хранения и оформлять с контейнерной линией фрахт не до порта, а до терминала. Однако с учетом таможенных оформлений применение «сухих портов» не позволяет существенно упростить процесс перевозки, поскольку перемещение груза по российской таможенной территории производится на основе внутреннего таможенного транзита и требует оформления соответствующих документов. С точки зрения логистики использование «сухих портов» означает необходимость согласованного управления движением груза вместо одной площадки непосредственно самого порта еще и на площадке «сухого порта».

Кроме того, логистическая система управления современным МТП должна включать в себя как управленческий, так и информационный аспекты взаимодействия различных видов транспорта, т. е. исходя из плана судозаходов обеспечивать полноценное информирование всех заинтересованных сторон процесса товародвижения о сроках, составе и объемах перемещаемых грузов, а также регулировать подачу вагонов, автомобилей, перегрузочной техники к местам перевалки грузов и согласовывать вопросы транспортного обслуживания потребителей в случае смежных перевозок. Таким образом, в порту должна быть создана единая информационная среда для заблаговременного планирования и реализации синхронного взаимодействия различных видов транспорта и участников транспортировки грузов.

Создание такой логистической системы управления должно позволить:

- увеличить объем грузопереработки морских портов;

- повысить эффективность процесса товародвижения;

- сократить транспортные издержки и уменьшить совокупную инвестиционную нагрузку за счет увеличения фондоотдачи существующей инфраструктуры порта.

Внедрение системы логистического управления следует сопровождать разработкой ряда организационных, методических и иных мероприятий, к которым относятся, например:

- согласование графиков перемещения, в первую очередь, массовых экспортных и транзитных грузов;

- рост доли контейнерных поездов в общем обороте железнодорожного подвижного состава;

- использование электронного документооборота, в том числе совместно с таможенными учреждениями, для совершенствования контроля за перемещаемыми грузами и сокращения времени оформления документов;

- применение средств слежения за перемещаемыми транспортными местами как на территориях морского и «сухих» портов, так и между ними.

Актуальность создания подобного логистического центра управления была отмечена на Шестом Международном транспортном форуме «Югтранс-2010» применительно к порту Новороссийск. Этот порт характеризуется слабой развитостью припортовой железнодорожной инфраструктуры, относительно небольшой длиной причальных линий и крайним дефицитом свободных площадей для создания «сухого порта», поэтому высказанная инициатива служит единственным средством обеспечить дальнейшее развитие порта в условиях растущих грузопотоков.

Системы управления логистическими процессами в морских торговых портах

В настоящее время территории МТП оборудуются большим количеством разнообразных информационных систем, осуществляющих как учетные функции, так и функции слежения. Однако они не ориентированы на управление логистикой и по большей части имеют вспомогательное назначение. Применительно к задачам логистического управления наибольший интерес представляют системы автоматизации контейнерных терминалов как наиболее сложные по специфике учитываемых объектов.

Среди систем этого целевого назначения различаются системы двух основных классов:

системы документооборота, поддерживающие традиционное управление товародвижением по инициативе человека, и системы визуализации и автоматизации управления [7]. Первые служат для учета и составления документов в процессе обработки груза на терминале. Они, как правило, не включают в себя функции бухгалтерского учета, хотя и имеют шлюзы для передачи информации в специализированные учетные системы. Ряд таких систем имеет дополнительную опцию сопряжения с радиотерминалами для обработки грузов непосредственно на площадке.

Системы визуализации и автоматизации, как следует из названия, позволяют в реальном времени наблюдать работу терминала на его модели (распределение грузов, работников и техники, заполнение мест хранения и т. п.) и управлять ими в автоматизированном режиме в соответствии с заданной программой. Эти системы помимо решения собственно задач текущего управления выполняют также много других полезных функций: формируют статистику работы порта в разрезе обрабатываемых грузов, сроков обработки, амортизации оборудования и т. п., а также позволяют получить ключевые показатели эффективности работающего персонала. Обеспеченность российских МТП управлением логистическими процессами (в процентах) следующая:

— системы документооборота: «Контерра» — 27; Cargo Prime — 18; Solvo.DMS — 18; Cosmos — 10; разработка МТП — 27;

— системы визуализации и автоматизации: Solvo.CTMS — 45; Cosmos — 10; оставшиеся 45 % МТП такими системами не обеспечены.

Система «Контерра» создана компанией «Ролис», входящей в холдинг под управлением Национальной контейнерной компании с участием ЗАО «Первый контейнерный терминал» и ОАО «Морской порт Санкт-Петербург», и служит базовым решением для всех контейнерных терминалов Национальной контейнерной компании.

Системы Solvo.DMS и Solvo.CTMS разработаны отечественной компанией Solvo и в настоящее время помимо России эксплуатируются на Украине в Ильичевском МТП и в Эстонии на контейнерном терминале Muuga.

По имеющимся сведениям, в настоящее время компания Solvo начала внедрение своих систем на контейнерном терминале порта Усть-Луга.

Система «CargoPrime: Управление Контейнерным терминалом» реализована на базе продукта «1С:Предприятие 8.0» франчайзи фирмы 1С компанией «Диалог ИТ» и используется на контейнерном терминале «Моби Дик» в Кронштадте и на контейнерном терминале Калининградского МТП.

Система Cosmos разработана бельгийской компанией Cosmos N.V. и имеет единственное

■ Таблица 2

Компания, город	Система документооборота	Система визуализации и автоматизации
ЗАО «Первый контейнерный терминал», Санкт-Петербург	Контерра	Solvo.CTMS
ОАО «Петролеспорт», Санкт-Петербург	Cosmos	Cosmos
ОАО «Калининградский МТП», Калининград	CargoPrime	Нет
ОАО «Новороссийский МТП», Новороссийск	Solvo.DMS	Solvo.CTMS
ОАО «Новорослесэкспорт», Новороссийск	Solvo.DMS	Solvo.CTMS
ООО «Владивостокский контейнерный терминал», Владивосток	Разработка МТП	Нет
ЗАО «Восточная стивидорная компания», Находка	Разработка МТП	Solvo.CTMS

внедрение в России на контейнерном терминале ОАО «Петролеспорт» в Санкт-Петербурге.

Данные по используемым на крупнейших контейнерных терминалах российских портов комплексным системам управления логистикой приведены в табл. 2.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что отечественные МТП в достаточной степени обеспечены автоматизированными системами учета грузовых операций, однако лишь в половине из них применяются средства визуализации этих операций, позволяющие достичь современного уровня качества грузообработки и увеличить пропускную способность контейнерных терминалов.

Заключение

Полноценное управление МТП в составе особой портовой экономической зоны возможно лишь с использованием комплексной системы логистического управления, реализующей функции документооборота и визуализации нахождения грузов на территории порта. Отечественные разработки подобных систем на сегодняшний день отсутствуют, однако требуемый функционал может быть обеспечен сочетанием программных продуктов фирмы Solvo, предназначенных для решения обеих этих задач. Дальнейшее повышение качества управления может быть достигнуто путем глубокой интеграции разнородных информационных средств в порту, что позволит помимо решения всех указанных выше логистических задач достичь

принципиально иного уровня обслуживания клиентов (например, совмещение информации о перемещениях контейнеров по территории пор-

та с записью камер видеонаблюдения дает возможность проследить за ними и выявить вероятные случаи их повреждения).

Литература

1. Орлов Р. А., Орлова О. Б. Проблемы создания портовых особых экономических зон // Надежность и качество 2009: Междунар. симп., Пенза, 25–31 мая 2009 г. Т. 1. С. 28–32.
2. Чекаловец В. И., Колодин А. Л., Столяров Г. П. Совершенствование управления морскими торговыми портами: учеб. пособие/ ОНМУ. – Одесса, 2002. – 142 с.
3. Орлова О. Б. Использование электронного документооборота при управлении грузопотоками в особых портовых зонах // Уч. зап. Санкт-Петербургского им. В. Б. Бобкова филиала Российской таможенной академии. 2010. № 3(37). С. 34–47.
4. Орлова О. Б., Ястребов А. П. Особенности проектирования портовых экономических зон // Изв. вузов. Поволжский регион. Общественные науки. 2012. № 2(22). С. 167–174.
5. Барышникова В. В. Современный порт в логистической цепочке доставки грузов // Экономика та управління підприємствами машинобудівної галузі: проблеми теорії та практики. 2009. № 4(8). С. 15–26.
6. Орлова О. Б. Соотношение государственного и корпоративного участия в управлении портовыми особыми экономическими зонами // Вестник ИНЖЭКОН. Сер. Экономика. 2011. № 3. С. 406–409.
7. Максимов М. Системы автоматизации контейнерных терминалов морских портов России и Украины // Deliver. 2009. № 10. С. 1–3.

UDC 338.2

Peculiarities of Logistics Management in Special Seaport Economic Areas

Orlova O. B.^a, Post-Graduate Student, Senior State Customs Inspector of the Baltic Customs, boksa007@gmail.com

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

Purpose: To consider peculiarities of logistic processes in special seaport economic areas and to make proposals concerning organization of container terminal management using national software. **Results:** There have been formulated requirements for logistics management systems in special seaport economic areas: freight management at “dry ports”, arrangement of provision of various means of transportation, information connection with customs institutions etc. It has been shown that a complex logistic management system can be implemented by means of joint application of document workflow system (SOLVO.DMS) and automation/visualization system (SOLVO.CTMS) produced by the Russian-based company Solvo. **Practical relevance:** There has been given a recommendation to use the tested software verified by experience of terminal management in Novorossiysk and other trade seaports while designing special seaport economic areas.

Keywords — Logistic Processes Management, Special Seaport Economic Areas.

References

1. Orlov R. A., Orlova O. B. The problems of the port special economic area foundation. *Trudy Mezhdunarodnogo Simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo 2009»* [Proc. Int. Symp. «Reliability and quality 2009»], Penza, 2009, vol. 1, pp. 28–32 (In Russian).
2. Chekalovets V. I., Kolodin A. L., Stoliarov G. P. *Sovershenstvovanie upravleniia morskimi trgovymi portami* [The management improvement of sea trade ports: tutorial]. Odessa, ONMU Publ., 2002. 142 p.
3. Orlova O. B. The electronic document management utilization for the goods traffic control at the special economic areas. *Uchenye zapiski Sankt-Peterburgskogo imeni V. B. Bobkova filiala Rossiiskoi tamozhennoi akademii*, 2010, no. 3 (37), p. 34–47 (In Russian).
4. Orlova O. B., Jastrebov A. P. Features of port special economic area projection. *Izvestiia vuzov. Povolzhskii region. Obshchestvennye nauki*, 2012, no. 2 (22), pp. 167–174 (In Russian).
5. Baryshnikova V. V. Modern port at the logistic chain of freight transfer. *Ekonomika ta upravlinnja pidpriemstvamy mashynobudivnoi galuzi: problemy teorii ta praktyky*, 2009, no. 4 (8), pp. 15–26 (In Russian).
6. Orlova O. B. Correlation between state and corporate participation at the port special economic zone management. *Vestnik INZhEKON. Seriya Ekonomika*, 2011, no. 3, pp. 406–409 (In Russian).
7. Maksimov M. The container terminals automation systems of Russian and seaports. *Deliver*, 2009, no. 10, pp. 1–3 (In Russian).

БАЛОНИН
Николай
Алексеевич



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 80 научных публикаций, в том числе трех монографий. Область научных интересов — теория динамических систем, теория идентификации, теория операторов, теория матриц, вычислительные методы, интернет-робототехника, интернет-книги с исполняемыми алгоритмами, научные социальные сети. Эл. адрес: korbendfs@mail.ru

БЯНКИН
Александр
Александрович



Доцент, профессор кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 1974 году окончил Ленинградскую военно-инженерную академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы». В 1985 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 16 патентов на изобретения. Область научных интересов — бортовые и наземные информационно-телеметрические системы, теория протоколов передачи информации. Эл. адрес: aab51@mail.ru

ДМИТРИЕВ
Владимир
Николаевич



Руководитель Центра по методологическому управлению основными средствами крупных компаний Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва. В 1983 году окончил Высшее военное инженерное училище по специальности «Эксплуатация летательных аппаратов», в 1995 — Военную академию им. Петра Великого по специальности «Управление оперативно-тактическими объединениями». Является автором семи научных публикаций. Область научных интересов — управление в социальных и экономических системах. Эл. адрес: v.dmitriev@gismps.ru

БРАНИШТОВ
Сергей
Александрович



Исполняющий обязанности заведующего лабораторией систем логического управления Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва. В 1997 году окончил Чувашский государственный университет по специальности «Электроника и микропроцессорная техника». В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 25 научных публикаций. Область научных интересов — системы автоматизации, искусственный интеллект, робототехника. Эл. адрес: branishtov@mail.ru

ВАСИЛЬЕВ
Олег
Игоревич



Аспирант кафедры инноватики и управления качеством Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Инноватика системы менеджмента качества». Является автором 14 научных публикаций. Область научных интересов — управление инновационными проектами, инновационный менеджмент, методы менеджмента качества, системный анализ, оптимизация и автоматизация, информационные технологии, стандартизация. Эл. адрес: innfri@gmail.com

ДУНИКОВ
Артем
Сергеевич



Адъюнкт кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2008 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Эксплуатация бортовых радиоэлектронных систем». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов, теория классификации образов. Эл. адрес: artem.sever1@yandex.ru

ДУРНЕВ
Роман
Александрович



Доцент, заместитель начальника Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий), Москва.
В 1990 году окончил Московское высшее командное училище дорожных и инженерных войск по специальности «Оперативно-тактическая инженерных войск». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 120 научных публикаций, 11 патентов на изобретения и полезных моделей. Область научных интересов — поддержка принятия решений в области безопасности жизнедеятельности.
Эл. адрес: rdurnev@rambler.ru

КОВЦУР
Максим
Михайлович



Аспирант кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
В 2008 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы». Является автором семи научных публикаций. Область научных интересов — обеспечение безопасности в сетях IP-телефонии, протоколы IP-телефонии, информационная безопасность, обеспечение качества обслуживания в IP-телефонии.
Эл. адрес: maxkovzur@mail.ru

ЛОМАНОВ
Алексей
Николаевич



Доцент кафедры вычислительных систем Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П. А. Соловьева.
В 2003 году окончил Рыбинскую государственную авиационную технологическую академию им. П. А. Соловьева по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 41 научной публикации и двух патентов на изобретения. Область научных интересов — управление технологическими процессами в вакууме, системы сбора данных и управления на базе микроконтроллеров и ПЛК, интеллектуальные оптические интерфейсы.
Эл. адрес: lepss@yandex.ru

КРУЧИНИН
Александр
Юрьевич



Доцент кафедры вычислительной техники и защиты информации Оренбургского государственного университета, генеральный директор ООО «ИнтБуСофт», Оренбург.
В 2003 году окончил Оренбургский государственный педагогический университет по специальности «Учитель физики». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 35 научных публикаций. Область научных интересов — теория распознавания образов, компьютерное зрение, искусственный интеллект, автоматизированные системы управления и др.
Эл. адрес: kruchinin-al@mail.ru

КОТОСОНОВА
Алёна
Сергеевна



Студентка Московского авиационно-технологического института Российского государственного технического университета им. К. Э. Циолковского. Область научных интересов — поддержка принятия решений в области безопасности жизнедеятельности.
Эл. адрес: kot_alenka@mail.ru

ЛОСКУТОВ
Андрей
Иванович



Начальник кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.
В 1997 году окончил Военную инженерную космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы космических аппаратов». В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 60 научных публикаций и двух патентов на изобретения. Область научных интересов — теория нечеткой логики и нейросетевые технологии в применении к техническому диагностированию бортовых радиоэлектронных систем летательных аппаратов.
Эл. адрес: rujenz@mail.ru

ЛУКЬЯНОВИЧ
Алексей
Викторович



Начальник научно-исследовательского отдела Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий), Москва.
В 2004 году окончил Академию гражданской защиты МЧС России по специальности «Прикладная математика».
Является автором 20 научных публикаций, одной монографии и двух патентов на полезную модель.
Область научных интересов — поддержка принятия решений в области безопасности жизнедеятельности.
Эл. адрес:
lukianovich@mail.ru

НИКИТИН
Валерий
Николаевич



Доцент кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
В 1982 году окончил Военную Краснознаменную академию связи им. С. М. Буденного по специальности «Радиоэлектронная связь».
В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором более 50 научных и учебных публикаций и семи патентов на изобретения.
Область научных интересов — системы радиосвязи и защиты информации, криптографические протоколы, методы согласования работы дискретных автоматов.
Эл. адрес: vnikitin@rdnet.ru

НИКИТИН
Владимир
Степанович



Директор ООО «Научно-технологический центр информационной физики “Интрофизика”», Рыбинск.
В 1976 году окончил Тбилиское высшее военное артиллерийское училище по специальности «Инженер по эксплуатации артиллерийского вооружения».
В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором 112 научных публикаций и 48 патентов на изобретения, полезные модели и программы для ЭВМ.
Область научных интересов — оптико-информационные системы, робототехника.
Эл. адрес: 505z@mail.ru

НОСАЛЬ
Ирина
Алексеевна



Аспирант Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.
В 2010 году окончила с отличием Сыктывкарский государственный университет по специальности «Информационная безопасность».
Является автором четырех научных публикаций.
Область научных интересов — информационная безопасность.
Эл. адрес: ironia.i@gmail.com

ОРЛОВА
Оксана
Баировна



Старший государственный таможенный инспектор Балтийской таможни, аспирант кафедры электронной коммерции и маркетинга Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 2004 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «Юриспруденция».
Является автором 13 научных публикаций.
Эл. адрес:
boksa007@gmail.com

ОСИПОВ
Василий
Юрьевич



Профессор, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.
В 1981 году окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники им. А. С. Попова по специальности «Радиотехнические средства».
В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 100 научных публикаций.
Область научных интересов — интеллектуальные системы, моделирование, информационная безопасность.
Эл. адрес: osipov_vasily@mail.ru

**ПЕТРОВ
Игорь
Олегович**



Доцент кафедры компьютерной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1985 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Баллистика», в 2006 году — Санкт-Петербургский инженерно-экономический университет по специальности «Юриспруденция». В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 60 научных публикаций. Область научных интересов — энергетическая теория маневрирования летательных аппаратов, методы оперативного решения краевых задач динамики полета и др.
Эл. адрес: petrovigor63@mail.ru

**САДОВОЙ
Александр
Валентинович**



Гражданин Украины. Профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой электротехники и электромеханики Днепродзержинского государственного технического университета, Украина. В 1967 году окончил Киевский политехнический институт по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». В 1993 году защитил диссертацию на соискание научной степени доктора технических наук. Является автором более 300 научных публикаций. Область научных интересов — системы оптимального управления электромеханическими объектами и технологическими комплексами и др.
Эл. адрес: sadovoy@dstu.dp.ua

**СЕРГЕЕВ
Михаил
Борисович**



Профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, директор НИИ информационно-управляющих систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 1980 году окончил «ЛЭТИ». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 14 патентов на изобретения. Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления и др.
Эл. адрес: mbse@mail.ru

**САВЧЕНКО
Людмила
Васильевна**



Преподаватель, аспирант кафедры математики и информатики Нижегородского государственного лингвистического университета им. Н. А. Добролюбова. В 2008 году окончила Нижегородский государственный технический университет по специальности «Прикладная математика и информатика». Является автором шести научных публикаций. Область научных интересов — автоматическое распознавание речи, новые информационные технологии.
Эл. адрес: LyudmilaSavchenko@yandex.ru

**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 математико-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

**СОКОЛОВ
Михаил
Александрович**



Профессор кафедры бортовой радиоэлектронной аппаратуры Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1947 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Инженер-электрик по авиационному приборостроению». В 1972 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 127 научных публикаций, 50 авторских свидетельств и пяти патентов на изобретения. Область научных интересов — теория радиолокации и связи, методы проектирования радиоприемных устройств, вычислительные и информационные системы.
Эл. адрес: guap22@mail.ru

ТУМЧЕНОК
Дмитрий
Александрович



Аспирант, инженер-программист лаборатории систем логического управления Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва.
В 2013 году окончил Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана по специальности «Информационные системы и технологии». Область научных интересов — теория графов, теория автоматов, сети Петри.
Эл. адрес:
dmitriy_tumchenok@mail.ru

ЧАЙКА
Сергей
Владимирович



Ассистент кафедры математического и программного обеспечения электронных вычислительных средств Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П. А. Соловьева.
В 2009 году окончил Рыбинскую государственную авиационную технологическую академию им. П. А. Соловьева по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем». Является автором девяти научных публикаций и одного патента на изобретение.
Область научных интересов — интеллектуальные оптические интерфейсы.
Эл. адрес: chaika_sv@mail.ru

ЧЕПРУКОВ
Юрий
Васильевич



Доцент кафедры сервиса инженерных систем и естественно-научных дисциплин Российского государственного университета туризма и сервиса, филиал, Сочи.
В 1976 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Радиофизика и электроника».
В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 17 научных публикаций и трех авторских свидетельств на изобретения.
Область научных интересов — теория радиолокации и связи, методы проектирования устройств формирования и обработки сложных сигналов, вычислительные и информационные системы.
Эл. адрес: chuv52@mail.ru

ШАРОВ
Владимир
Григорьевич



Профессор, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой математического и программного обеспечения электронных вычислительных средств Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П. А. Соловьева.
В 1971 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Аэродинамика и термодинамика».
В 1974 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.
Является автором 80 научных публикаций и двух патентов на изобретения.
Область научных интересов — модели и алгоритмы в системах обработки информации и управления.
Эл. адрес: svg45@mail.ru

ШЕРЕМЕТ
Алексей
Иванович



Гражданин Украины.
Доцент кафедры электромеханических систем автоматизации Донбасской государственной машиностроительной академии, Краматорск, Украина.
В 2001 году окончил Донбасскую государственную машиностроительную академию по специальности «Автоматизация производственных процессов».
В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 35 научных публикаций.
Область научных интересов — аналитический синтез автоматизированных электромеханических систем и др.
Эл. адрес:
sheremet-a@mail.ru

ШИРВАНЯН
Артем
Мартирович



Аспирант, инженер-программист лаборатории систем логического управления Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва.
В 2013 году окончил Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана по специальности «Информационные системы и технологии». Область научных интересов — теория графов, теория автоматов, сети Петри.
Эл. адрес:
artshirvanyan@mail.ru

ЮЛДАШЕВ
Зафар
Мухамедович



Профессор, заведующий кафедрой биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», член Академии медико-технических наук, Метрологической академии, почетный работник высшего профессионального образования. В 1978 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Электронно-медицинская аппаратура». В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 170 научных публикаций, двух монографий, 17 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Область научных интересов — биомедицинская инженерия, медицинская метрология.
Эл. адрес: yuld@mail.ru

ЮРКИН
Дмитрий
Валерьевич



Доцент кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Защищенные системы связи». Является автором более 30 учебных и научных публикаций. Область научных интересов — системы радиосвязи и защиты информации, криптографические протоколы, методы согласования работы дискретных автоматов.
Эл. адрес: DVYurkin@yandex.ru

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.

ISSN 1684-8853



24 – 25 апреля 2014

Турция • Стамбул
Гостиница «Хилтон Стамбул»



13-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯМ И ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ
ДЛЯ КАСПИЙСКОГО И ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНОВ И СТРАН СНГ



ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ



ITE Moscow LLC
Наталья Ситникова
Тел.: +7 (495) 935 7350 (доб. 4174)
Факс: +7 (495) 935 7351
E-mail: sitnikova@ite-expo.ru



ITE Turkey / EUF
Acelya Bayraktar
Тел.: +90 (212) 291 8310 (доб. 168)
Факс: +90 (212) 240 4381
E-mail: acelyab@ite-turkey.com



ITECA Caspian LLC
Рена Абулалыева
Тел.: +994 12 404 1000
Факс: +994 12 404 1001
E-mail: telecoms@iteca.az



GULF FZ LLC

ITE Gulf FZ LLC
Яна Сартунова
Тел.: +971 4 4332974
Факс: +971 4 4471797
www.ite-gulf.com

www.caspiantelecoms.com