

ISSN 1684–8853

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2(69)/2014

2(69)/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. Blaunstein

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: N. Karavaeva

Contact information

The Editorial and Publishing Center, SUAI

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

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

Tel.: +7 - 812 494 70 02

The Journal was registered in the Ministry of Press, Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation. Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002. Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR) due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd., JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

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 AND CONTROL SYSTEMS

Chubraeva L. I., Shyshlakov A. V. *Synthesis of Electromechanical Automatic Control Systems Using an Analytical Approximation of Nonlinear Component Characteristics* 2

Matyushin M. M., Vakurina T. G., Kotelya V. V., Skobelev P. O., Lakhin O. I., Kozhevnikov S. S., Simonova E. V., Noskova A. I. *Methods and Software for Creation of Ontologies for Visualizing Connected Information Objects of Random Nature in Complex Information-Analytical Systems* 9

Loskutov A. I., Patrakov S. S., Schestopalova O. L. *Intellectual Information-Diagnostic System for Evaluating Technical Condition of Space Vehicles Onboard Equipment during Pre-Launching Activities* 18

SYSTEM AND PROCESS MODELING

Britov G. S. *A Method for Formal Definition of PFDD-Diagrams of IDEF3-Technology* 25

Maltsev G. N., Nazarov A. V., Yakimov V. L. *A Reconstruction Algorithm for a Dynamic System Phase Space and its Application for Development of Predictive Models* 33

HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES

Andreyev A. V. *Methods of Optimizing the Directory Service* 40

INFORMATION SECURITY

Yurkin D. V., Nikitin V. N. *Intrusion Detection Systems in IEEE 802.11 Local Wireless Networks* 44

INFORMATION CODING AND TRANSMISSION

Sukhov T. M. *Scalable Video Coding in Digital CCTV* 50

Akmalkhodzhaev A. I. *A Joint List Decoder of a Turbo Coder and AMR-NB Vocoder for Cellular Networks of the Fourth Generation* 63

INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM

Tsvetov K. U., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. *Forming Reserve Paths Based on Dijkstra Algorithm in Order to Enhance Stability of Telecommunication Networks* 71

Novikov E. A. *Operative Distribution of Satellite Repeater Radio Resource in Terms of Non-Stationary Ingress Flow with Account of Time Lagged Control* 79

INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS

Khanykov I. G. *Invariant Relations for Averages in Case of Three Measurements* 87

INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION

Freyman V. I. *An Algorithm of Conditional Search of Competence Elements with Insufficient Level of Development* 93

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Andriychuk V. P. *Methods for Determination of Time Standards and Optimal Composition of Control Bodies* 103

BRIEF SCIENTIFIC REPORTS

Balonin N. A., Sergeev M. B. *Two-Circulant M-Matrix of the 22nd Order* 109

REVIEWS

Voronov M. V. *Referee's Report on the monography by K. V. Grigorieva "Conflict-dynamical systems. Part 2. Statistical coalition models of making decision and their applications".* 112

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

114

Submitted for publication 18.02.13. Passed for printing 15.04.14. 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: Н. Н. Караваева

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

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Чубраева Л. И., Шишлаков А. В. Синтез электромеханических систем автоматического управления при аналитической аппроксимации характеристик нелинейных элементов 2

Матюшин М. М., Вакурина Т. Г., Котеля В. В., Скобелев П. О., Ляхин О. И., Кожевников С. С., Симонова Е. В., Носкова А. И. Методы и средства построения онтологий для визуализации связанных информационных объектов произвольной природы в сложных информационно-аналитических системах 9

Лоскутов А. И., Патраков С. С., Шестопалова О. Л. Интеллектуальная информационно-диагностическая система оценивания технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов при подготовке их к запуску 18

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ
Бритов Г. С. Метод формального описания PFDD-диаграмм IDEF3-технологии 25

Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л. Алгоритм реконструкции фазового пространства динамической системы и его применение для разработки прогнозных моделей 33

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА
Андреев А. В. Методика оптимизации работы службы каталогов 40

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ
Юркин Д. В., Никитин В. Н. Системы обнаружения вторжений в сетях широкополосного радиодоступа стандарта IEEE 802.11 44

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ
Сухов Т. М. Об иерархическом кодировании в цифровой системе видеонаблюдения 50

Акмалходжаев А. И. Совместный списочный декодер турбокода и вокодера AMR-NB для сетей четвертого поколения 63

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ
Цветков К. Ю., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей 71

Новиков Е. А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении 79

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
Ханьков И. Г. Инвариантные соотношения для средних в случае трех измерений 87

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ
Фрейман В. И. Реализация одного алгоритма условного поиска элементов компетенций с недостаточным уровнем освоения 93

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
Андрейчук В. П. Методики определения временных нормативов и оптимального состава органов управления 103

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Двуматричная M-матрица 22-го порядка 109

РЕЦЕНЗИИ
Воронов М. В. Рецензия на монографию К. В. Григорьевой «Конфликтно-динамические системы. Часть 2. Статические коалиционные модели принятия решений и их приложения» 112

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 114

Сдано в набор 18.02.14. Подписано в печать 15.04.14. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,7. Уч.-изд. л. 17,2. Тираж 1000 экз. Заказ 127.

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 681.51

СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ АППРОКСИМАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Л. И. Чубраева^а, член-корр. РАН, доктор техн. наук, профессор

А. В. Шишлаков^б, инженер-программист

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

^бОАО «Концерн «НПО «Аврора», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: рассматривается решение задачи синтеза параметров регуляторов электромеханических систем автоматического управления при аналитической аппроксимации характеристик нелинейных элементов. В качестве математического аппарата решения применяется обращение прямого вариационного метода анализа — обобщенного метода Галеркина. **Результаты:** получены рекуррентные аналитические соотношения вида «вход-выход», определяющие интегралы Галеркина для нелинейных характеристик, аппроксимированных аналитически, при экспоненциальных процессах на их входах. Применение соотношений позволило полностью алгебраизировать решение задачи синтеза непрерывных систем автоматического управления с данным видом аппроксимации нелинейных характеристик. **Практическая значимость:** обобщенный метод Галеркина распространен на новый класс объектов управления с нелинейными характеристиками, аппроксимированными аналитически. Показано преимущество данного способа аппроксимации нелинейностей для электромеханических и электроэнергетических устройств, исключающее необходимость определять точки переключения нелинейных характеристик при работе алгоритма.

Ключевые слова — аналитическая аппроксимация, нелинейные характеристики, обобщенный метод Галеркина.

Введение

При решении задачи синтеза нелинейных систем автоматического управления (САУ), в том числе электромеханических и электроэнергетических, не всегда целесообразно использовать кусочно-линейную аппроксимацию, поскольку адекватность данного вида аппроксимации в случае гладких нелинейных характеристик связана с двумя обстоятельствами:

1) допустимостью данного вида аппроксимации для реальной характеристики;

2) ограничением числа участков аппроксимации кусочно-линейной характеристики, определяющим точность интегрирования вычислительной модели или используемый метод синтеза системы.

Электромеханические и электроэнергетические устройства, как правило, имеют гладкие нелинейные статические характеристики, а применимость кусочно-линейной аппроксимации к гладким нелинейным характеристикам связана как с физикой процесса функционирования исследуемой системы, так и с видом нелинейной характеристики. Теоретически любую характеристику можно аппроксимировать кусочно-линейными участками, однако с точки зрения функционирования системы подобная модель может оказаться не адекватной реальной САУ.

Для решения задачи синтеза нелинейных САУ произвольной структуры и порядка при

кусочно-линейной аппроксимации нелинейных характеристик хорошо зарекомендовал себя метод, математическую основу которого составляет обращение на решение задачи синтеза одного из прямых вариационных методов анализа — обобщенного метода Галеркина [1–6]. Его применение дает возможность с единых математических, методологических и алгоритмических позиций решать задачу синтеза параметров регулятора по заданным показателям качества работы САУ в переходном режиме для широкого класса линейных и нелинейных систем управления: непрерывных, импульсных (различными видами модуляции сигнала), дискретных (с несколькими импульсными элементами, работающими как синхронно, так и не синхронно, с одной и несколькими частотами прерывания), дискретно-непрерывных, в том числе со звеньями чистого запаздывания. Метод позволяет решать задачу параметрического синтеза САУ указанных классов при минимальных вычислительных затратах, что достигается путем алгебраизации решения задачи и сведения ее к задаче нелинейного программирования с целевой функцией, построенной на основе уравнений Галеркина.

С помощью данного метода были решены задачи параметрического синтеза:

— одномерных линейных и нелинейных систем управления приводами наведения перископического зеркала большого наземного радиотелескопа РТ-70 (динамика САУ описывается дифференциальным уравнением 10-го порядка) [1, 2];

— одномерной линейной САУ с амплитудно-импульсной модуляцией большой наземной антенной установкой (уравнение движения САУ 17-го порядка) [1, 2];

— регуляторов как непрерывных, так и импульсных многорежимных систем управления торможением колес тяжелых самолетов Ил-86, Ил-96-300 (уравнения, описывающие модель торможения, 10–15-го порядка) [1–3].

Поэтому целесообразно распространить данный подход на решение задачи синтеза нелинейных САУ при аналитической аппроксимации нелинейных характеристик.

Постановка задачи синтеза и общая схема ее решения

Задача синтеза САУ, содержащих аналитически аппроксимированные нелинейные характеристики, рассматривается в следующей постановке: параметры регулятора при известной структуре определяются из условия приближенного обеспечения заданных показателей качества работы САУ при ее переходе из одного установившегося состояния в другое при гарантии абсолютной устойчивости и грубости системы по варьируемым параметрам.

Задача синтеза САУ, как любой технической системы, решается при ограничениях, которые накладываются на значения варьируемых параметров из условия их технической реализуемости:

$$c_k^- \leq c_k \leq c_k^+, \quad k=1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где c_k^- , c_k^+ — минимально и максимально допустимые значения варьируемых параметров.

Ограничения на грубость системы по варьируемым параметрам имеют вид

$$\Delta = \frac{\delta c_k}{c_k} \leq \Delta^0, \quad (2)$$

где δc_k — вариации параметров, в пределах которых обеспечивается устойчивость системы; Δ^0 — заданное значение грубости системы.

Для определенности задачу синтеза рассмотрим при внешнем скачкообразном входном воздействии $f(t) = H1(t)$ и нулевых начальных условиях для момента времени $t = -0$, т. е. до приложения к системе воздействия амплитудой H :

$$x_{-0} = 0; \dot{x}_{-0} = 0; \ddot{x}_{-0} = 0, \dots, x_{-0}^{(n-1)} = 0. \quad (3)$$

При синтезированных параметрах система должна быть устойчива, поэтому

$$x(\infty) = H; \dot{x}(\infty) = 0; \ddot{x}(\infty) = 0, \dots, x^{(n-1)}(\infty) = 0. \quad (4)$$

Выбираем систему из m непрерывно дифференцируемых линейно-независимых координатных функций

$$\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_q(t), \dots, \varphi_m(t). \quad (5)$$

В соответствии с требуемыми показателями качества работы синтезируемой системы управления в переходном режиме зададимся желаемым программным движением в виде

$$x^0(t) = \Omega_0(t) + \sum_{i=1}^l a_i \Omega_i(t), \quad i=1, 2, \dots, l, \quad (6)$$

где $\Omega_0(t) = \omega_0(t)1(t)$ — функция, удовлетворяющая заданным граничным [начальным (3) и конечным (4)] условиям; $\Omega_i(t) = \omega_i(t)1(t)$ — функции, удовлетворяющие однородным граничным условиям; a_i — известные коэффициенты.

Динамика непрерывной САУ, содержащей один нелинейный элемент с однозначной статической характеристикой, описывается дифференциальным уравнением вида

$$Q(c_k, D)x(t) + R(c_k, D)y(t) = S(c_k, D)f(t), \quad y(t) = F[x(t)], \quad (7)$$

где $x(t)$ — исследуемая координата на входе нелинейного элемента, относительно которой записано уравнение движения синтезируемой САУ; $f(t)$ — внешнее входное воздействие; $y(t) = F[x(t)]$ — нелинейные функции;

$$Q(c_k, D) = \sum_{i=0}^n a_i(c_k)D^i; \quad R(c_k, D) = \sum_{i=0}^u b_i(c_k)D^i; \\ S(c_k, D) = \sum_{i=0}^v e_i(c_k)D^i$$

— полиномы оператора обобщенного дифференцирования D с вещественными постоянными коэффициентами степеней n, u, v соответственно.

Необходимо отметить, что запись уравнения движения относительно координаты входа нелинейного звена, которая впервые была предложена И. А. Огурком, дает несомненные преимущества при реализации метода синтеза систем на основе обобщенного метода Галеркина. Это связано с упрощением процедуры определения соотношений вида «вход-выход» интегралов Галеркина, что подробно показано в работах [1, 2].

Поставим желаемое программное движение (6) в уравнение движения системы (7) и образуем невязку

$$\psi(c_k, t) = Q(c_k, D)x^0(t) + R(c_k, D)F[x^0(t)] - S(c_k, D)f(t). \quad (8)$$

Если предположить, что система с синтезированными параметрами заведомо устойчива, то значения искомым параметров определяются из условия ортогональности невязки (8) координатным функциям $\varphi_q(t)$:

$$\int_0^{\infty} \psi(c_k, t) \varphi_q(t) dt = 0, \quad k, q = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

что приводит к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} Q(c_k, D) x^0(t) \varphi_q(t) dt + \\ & + \int_0^{\infty} R(c_k, D) F[x^0(t)] \varphi_q(t) dt - \\ & - \int_0^{\infty} S(c_k, D) f(t) \varphi_q(t) dt = 0, \\ & k, q = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (10)$$

После определения интегралов Галеркина система (10) будет иметь вид

$$\sum_{i=0}^n a_i(c_k) A_{qi} + \sum_{i=0}^u b_i(c_k) B_{qi} - \sum_{i=0}^v e_i(c_k) C_{qi} = 0, \quad q = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} A_{qi} &= \int_0^{\infty} D^i \{x^0(t)\} e^{-\rho q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, n; \\ B_{qi} &= \int_0^{\infty} D^i \{F[x^0(t)]\} e^{-\rho q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, u; \\ C_{qi} &= \int_0^{\infty} D^i \{f(t)\} e^{-\rho q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, v. \end{aligned} \quad (12)$$

Решая систему из m алгебраических уравнений (11), определяем значения варьируемых параметров оператора управления. Однако задача синтеза решается при ограничениях на значения искомым параметров, наложенных исходя из возможности их технической реализации; ограничениях на устойчивость и грубость САУ с синтезированными параметрами, а также, как правило, имеет место нелинейная зависимость между варьируемыми параметрами. Поэтому строго равенство (9) выполняться не будет, в силу чего задача синтеза параметров обобщенным методом Галеркина в вычислительном плане представляет собой задачу нелинейного программирования с целевой функцией, построенной на основе уравнений (10) и имеющей вид

$$J = \sum_{q=1}^m \left\{ \int_0^{\infty} \psi(c_k, t) \varphi_q(t) dt \right\}^2, \quad \min_{c_k} J \rightarrow 0, \quad (13)$$

оптимум которой определяется при ограничениях, отмеченных выше, путем использования известных методов поиска экстремума функционала [7, 8].

Задание программного движения и координатных функций

Для электромеханических и электроэнергетических систем и комплексов характерным является экспоненциальное движение, поэтому в соответствии с рекомендациями по аппроксимации движения систем [2], описываемых дифференциальными уравнениями высокого порядка основными составляющими, зададим желаемый процесс в виде

$$x^0(t) = (x_y + H^* e^{-\alpha t}) \mathbf{1}(t), \quad (14)$$

где x_y — значение желаемого процесса $x^0(t)$ при $t = \infty$; $H^* = x_0 - x_y$; x_0 — начальное значение желаемого процесса в момент времени $t = +0$, а показатель затухания процесса α определяется исходя из соотношения

$$\alpha = \frac{3 \div 4}{T_{п.п}},$$

где $T_{п.п}$ — время переходного процесса.

Систему из m непрерывно дифференцируемых линейно-независимых координатных функций выбираем в виде ряда вещественных экспонент [1–8], представляющих собой полную систему функций

$$e^{-\rho_1 t}, e^{-\rho_2 t}, \dots, e^{-\rho_q t}, \dots, e^{-\rho_m t}, \quad q = 1, 2, \dots, m.$$

Опыт проектирования САУ показывает, что для наилучшего приближения желаемого программного движения $x^0(t)$ к реальному процессу, протекающему в системе с синтезированными параметрами, коэффициент затухания ρ_1 координатных функций целесообразно выбрать в виде $\rho_1 = \alpha$.

Остальные коэффициенты затухания ряда ρ_{m-1} следует выбрать в виде геометрической прогрессии (со знаменателем прогрессии $r = 2$), т. е.

$$\rho_q = \rho_1 r^{q-1} = \rho_1 2^{q-1}, \quad q = 1, 2, \dots, m,$$

что обеспечивает меньшее время затухания каждой из $m - 1$ экспонент по сравнению со временем затухания первой координатной функции.

Аппроксимация нелинейных характеристик

Если при решении задачи синтеза САУ обобщенным методом Галеркина используется кусочно-линейная аппроксимация нелинейных харак-

теристик, то алгоритм программного комплекса, реализующего данный подход, имеет в своем составе модуль, определяющий точки переключения нелинейной характеристики для процесса заданного вида на ее входе. В процессе работы данного модуля формируется массив данных о значениях моментов переключения (переход с одного линейного участка на другой) для любой типовой кусочно-линейной характеристики. Причем значения моментов переключения можно определить с точностью до половины величины приращения координаты времени, т. е. наибольшее значение погрешности будет составлять $\delta = \frac{\Delta t}{2}$. Погрешность в определении моментов переключения нелинейных характеристик [2], особенно если число переключений велико, приводит к снижению точности в вычислении интеграла B_{qi} , а следовательно, и результатов, получаемых при синтезе параметров регулятора САУ.

Несомненное достоинство аналитической аппроксимации нелинейных характеристик, которую целесообразно использовать для различных электромеханических и электроэнергетических устройств (асинхронных и синхронных электрических машин (при асинхронном пуске) и т. д.), состоит в том, что для подобных характеристик и монотонных процессов на их входах точки переключения будут отсутствовать. Это не только повысит точность определения значений варьируемых параметров, но и ускорит работу программного комплекса.

Широко используемая в электротехнике аналитическая, в частности полиномиальная, аппроксимация статических экспериментально полученных характеристик элементов и устройств в теории автоматического управления не нашла широкого применения. Для синтеза нелинейных САУ был разработан метод гармонического баланса (гармонической линеаризации), дающий возможность рассматривать нелинейные САУ в виде гармонически линеаризованных. Несмотря на очевидные, достаточно приближенные допущения, связанные, прежде всего, с тем, что эквивалентное прохождение первой гармоники разложения сигнала произвольной формы в ряд Фурье далеко не в полной мере дает возможность учитывать влияние нелинейных характеристик на динамические свойства САУ в целом, данный подход был вполне пригоден для инженерных расчетов. Совершенно очевидно, что широкое применение метода гармонического баланса для нелинейных САУ сопряжено, преимущественно, с тем, что данный подход позволил получить для инженерных расчетов практический результат, с использованием которого были реализованы проекты по построению САУ различной степени сложности. Кроме того, требовалась реализация

соответствующих уровню научно-технического прогресса (в определенной степени опережающего теоретическую базу) технических задач при отсутствии достаточной вычислительной мощности.

Таким образом, решение любой поставленной задачи, связанной с синтезом и исследованием динамических свойств нелинейной САУ, требует необходимого и достаточного времени (которое всегда ограничено).

Как было отмечено выше, аналитическая аппроксимация экспериментальных нелинейных статических характеристик широко применяется в электротехнике, поэтому распространение данного подхода к САУ кажется целесообразным.

В этом случае статическая характеристика нелинейного звена представляется в виде конечной комбинации аналитических функций, например вида

$$F[x(t)] = \sum_{g=0}^l z_g(x(t))^g, \quad g = 0, 1, \dots, l,$$

где z_g — вещественные постоянные коэффициенты, значения которых определяются, как показано, в частности, в работе [9].

Определение интегралов Галеркина

Алгебраизация решения задачи синтеза САУ обобщенным методом Галеркина достигается тем, что в функционале (13), построенном на основе уравнения (11), используются рекуррентные аналитические соотношения (12), определяющие интегралы Галеркина.

Соотношения C_{qi} для различных видов внешних входных воздействий были определены ранее [1, 2] и для внешнего скачкообразного входного воздействия имеют вид

$$C_{qi} = \int_0^{\infty} D^i \{H1(t)\} e^{-\rho_q t} dt = C_q \rho_q^{i-1},$$

$$i = 1, 2, \dots, v, \quad q = 1, 2, \dots, m,$$

где $C_q = H$.

Интеграл A_{qi} был получен [1, 2] для колебательного затухающего процесса, от которого легко перейти к желаемому программному движению вида (14)

$$A_{qi} = \int_0^{\infty} D^i \{(x_y + H^* e^{-\alpha t})1(t)\} e^{-\rho_q t} dt = A_q \rho_q^{i-1},$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где

$$A_q = x_y + \frac{H^* \rho_q}{\alpha + \rho_q}, \quad q = 1, 2, \dots, m.$$

Таким образом, для решения задачи синтеза САУ с аналитической аппроксимацией нелиней-

ной характеристики требуется вычислить интеграл

$$B_{qi} = \int_0^{\infty} D^i \{ F[x^0(t)] \} e^{-\rho_q t} dt = \int_0^{\infty} D^i \left\{ \sum_{g=0}^l z_g(x^0(t))^g \mathbf{1}(t) \right\} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, u, \quad (15)$$

который по виду соответствует аналитическому представлению эквивалентных преобразований нелинейных характеристик [1] применительно к кусочно-линейным элементам

$$F[x^0(t)] = \sum_{g=1}^l F_g[x^0(t)],$$

где $F_g[x^0(t)]$ — типовые кусочно-линейные элементы, алгебраическая сумма характеристик которых дает возможность синтезировать обобщенным методом Галеркина кусочно-линейные САУ с характеристиками, отличными от типовых.

Таким образом, соотношение

$$F[x^0(t)] = \sum_{g=0}^l z_g(x^0(t))^g, \quad g = 0, 1, \dots, l \quad (16)$$

представляет собой распространение принципа эквивалентных преобразований на нелинейные характеристики при их аналитической аппроксимации, что существенно упрощает вычисление интеграла (15).

Для вычисления интеграла (15) необходимо определять обобщенную производную i -го порядка от непрерывной функции $x^0(t)$:

$$D^i \{ F[x(t)] \mathbf{1}(t) \} = F[x(t)]^{(i)} \mathbf{1}(t) \mathbf{1}(t) + F[x(0)]^{(i-1)} \delta(t) + \dots + F[x(0)] \delta^{(i-1)}(t),$$

а также использовать фильтрующее свойство δ -функции, существующей в момент времени $t = 0$:

$$\int_0^{\infty} f(t) \delta^{(k)}(t) dt = (-1)^k f^{(k)}(0), \quad k = 0, 1, \dots$$

В результате проведенных вычислений для процесса

$$x^0(t) = x_0 e^{-\alpha t} \mathbf{1}(t),$$

соответствующего записи уравнения движения системы относительно сигнала ошибки, действующего на входе нелинейного элемента, получаем

$$B_{qi} = \int_0^{\infty} D^i \left\{ \sum_{g=0}^l z_g [x_0 e^{-\alpha t}]^g \mathbf{1}(t) \right\} e^{-\rho_q t} dt = B_{qg} \rho_q^{i-1},$$

$$i = 1, 2, \dots, u, \quad q = 1, 2, \dots, m, \quad g = 1, 2, \dots, l. \quad (17)$$

где $B_{qg} = \sum_{g=0}^l \frac{z_g x_0^g \rho_q}{g\alpha + \rho_q}, \quad g = 1, 2, \dots, l.$

Сложнее обстоит дело с вычислением интеграла Галеркина, если в случае записи на входе нелинейного элемента будет процесс

$$x^0(t) = x_y (1 - e^{-\alpha t}) \mathbf{1}(t). \quad (18)$$

Тогда интеграл будет иметь вид

$$B_{qi} = \int_0^{\infty} D^i \left\{ \sum_{g=0}^l z_g [x_y (1 - e^{-\alpha t})]^g \mathbf{1}(t) \right\} e^{-\rho_q t} dt = \int_0^{\infty} D^i \{ z_0 \mathbf{1}(t) \} e^{-\rho_q t} dt + \sum_{g=1}^l z_g \int_0^{\infty} D^i \{ [x_y (1 - e^{-\alpha t})]^g \mathbf{1}(t) \} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, u, \quad q = 1, 2, \dots, m, \quad g = 1, 2, \dots, l. \quad (19)$$

Первый интеграл суммы (17) аналогичен C_{qi} и равен

$$\int_0^{\infty} D^i \{ z_0 \mathbf{1}(t) \} e^{-\rho_q t} dt = z_0 \rho_q^{i-1}, \quad i = 0, 1, \dots, u, \quad q = 1, 2, \dots, m. \quad (20)$$

Рассмотрим вычисление второго интеграла суммы (17) для различных значений g :

— при $g = 1$

$$z_1 \int_0^{\infty} D^i \{ [x_y (1 - e^{-\alpha t}) \mathbf{1}(t)] \} e^{-\rho_q t} dt = z_1 \left[\frac{x_y \alpha}{(\alpha + \rho_q)} \right] \rho_q^{i-1}, \quad i = 0, 1, \dots, u, \quad q = 1, 2, \dots, m;$$

— при $g = 2$

$$z_2 \int_0^{\infty} D^i \{ [x_y (1 - e^{-\alpha t}) \mathbf{1}(t)]^2 \} e^{-\rho_q t} dt = z_2 \left[\frac{2x_y^2 \alpha^2}{(\alpha + \rho_q)(2\alpha + \rho_q)} \right] \rho_q^{i-1}, \quad i = 0, 1, \dots, u, \quad q = 1, 2, \dots, m;$$

— при $g = 3$

$$z_3 \int_0^{\infty} D^i \{ [x_y (1 - e^{-\alpha t}) \mathbf{1}(t)]^3 \} e^{-\rho_q t} dt = z_3 \left[\frac{6x_y^3 \alpha^3}{(\alpha + \rho_q)(2\alpha + \rho_q)(3\alpha + \rho_q)} \right] \rho_q^{i-1}, \quad i = 0, 1, \dots, u, \quad q = 1, 2, \dots, m;$$

— при $g = 4$

$$z_4 \int_0^{\infty} D^i \left\{ [x_y (1 - e^{-\alpha t}) \mathbf{1}(t)]^4 \right\} e^{-\rho_q t} dt = \\ = z_4 \left[\frac{24 x_y^4 \alpha^4}{(\alpha + \rho_q)(2\alpha + \rho_q)(3\alpha + \rho_q)(4\alpha + \rho_q)} \right] \rho_q^{i-1}, \\ i = 0, 1, \dots, u, \quad q = 1, 2, \dots, m.$$

Обобщая приведенные соотношения, с учетом (20) получаем рекуррентное выражение, определяющее интеграл Галеркина для нелинейной характеристики вида (16) при сигнале на входе нелинейности (18):

$$B_{qi} = \int_0^{\infty} D^i \left\{ z_0 \mathbf{1}(t) + \sum_{g=1}^l z_g [x_y (1 - e^{-\alpha t})]^g \mathbf{1}(t) \right\} e^{-\rho_q t} dt = \\ = B_{qg} \rho_q^{i-1}, \\ i = 0, 1, \dots, u, \quad q = 1, 2, \dots, m, \quad g = 1, 2, \dots, l, \quad (21)$$

где

$$B_{qg} = z_0 + \sum_{g=1}^l \frac{z_g (x_y \alpha)^g g!}{\prod_{k=1}^g (g\alpha + \rho_q)}, \\ g = 1, 2, \dots, l, \quad k = 1, 2, \dots, g.$$

Таким образом, полученные рекуррентные соотношения (17), (21) дают возможность полностью алгебраизировать решение задачи синтеза параметров регуляторов нелинейных непрерывных САУ, динамика которых описывается дифференциальными уравнениями произвольно высокого порядка и содержащих нелинейные элементы, характеристику которых целесообразно аппроксимировать аналитически.

Заключение

В ходе решения поставленной задачи обобщенный метод Галеркина был распространен на решение задачи синтеза непрерывных САУ при аналитической аппроксимации нелинейных характеристик. Показаны преимущества аналитической аппроксимации перед кусочно-линейной при использовании синтеза параметров регулятора обобщенного метода Галеркина в качестве математического аппарата. Получены рекуррентные выражения вида «вход-выход» для аналитической аппроксимации нелинейностей при монотонных процессах на их входах.

Литература

1. Шишляков В. Ф. Синтез нелинейных САУ с различными видами модуляции: монография / СПбГУАП. — СПб., 1999. — 268 с.
2. Никитин А. В., Шишляков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография / под ред. В. Ф. Шишлякова; СПбГУАП. — СПб., 2003. — 358 с.
3. Никитин А. В., Шишляков В. Ф. Параметрический синтез системы автоматического управления торможением колес транспортного средства // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. № 5. С. 24–29.
4. Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления обобщенным методом Галеркина // Информационно-управляющие системы. 2006. № 3. С. 51–62.
5. Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления во временной области // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2006. № 12. С. 49–54.
6. Цветков С. А., Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Синтез многосвязных систем автоматического управления во временной области // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. № 12. С. 13–17.
7. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / под ред. А. А. Воронова и И. А. Огурка. — М.: Наука, 1984. — 340 с.
8. Алгоритмы динамического синтеза нелинейных автоматических систем / под ред. А. А. Воронова и И. А. Огурка. — СПб.: Энергоатомиздат, 1992. — 334 с.
9. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1988. — 239 с.

UDK 681.51

Synthesis of Electromechanical Automatic Control Systems Using an Analytical Approximation of Nonlinear Component Characteristics

Chubraeva L. I.^a, Corr. Member of RAS, Dr. Sc., Tech., Professor, kaf_32@aanet.ru
Shyshlakov A. V.^b, Programmer Engineer, shyshlakov@yahoo.com

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

^bGroup of companies RSC «Aurora», OJSC, 15, Karbyshev St., 194021, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: There has been considered a solution of the problem of electromechanical automatic control systems synthesis by analytical approximation of nonlinear component characteristics. The mathematical apparatus applied for the problem solving is represented by a conversion of a direct variation analytical method – the extended Galerkin technique. **Results:** There have been obtained recurrent analytical “input/output” relations defining Galerkin integrals for analytically approximated nonlinear characteristics in case of exponential processes at their inputs. Application of the relations has provided complete algebraization of a solution of the problem of continuous automatic control systems synthesis using the given type of the approximation of nonlinear characteristics. **Practical relevance:** The generalized Galerkin technique has been extended to a new class of control objects with analytically approximated nonlinear characteristics. There have been demonstrated the benefits of the technique of nonlinearities approximation for both electromechanical and electric power devices excluding the necessity to define switch points of nonlinear characteristics during the algorithm operation.

Keywords — Analytical Approximation, Nonlinear Characteristics, Extended Galerkin Technique.

References

1. Shishlakov V. F. *Sintez nelineinykh SAU s razlichnymi vidami moduliatsii* [Synthesis of Nonlinear Systems with Different Types of Modulation]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 1999. 268 p. (In Russian).
2. Nikitin A. V., Shishlakov V. F. *Parametricheskii sintez nelineinykh sistem avtomaticheskogo upravleniia* [Synthesis of the Parameters of Nonlinear Automatic Control Systems]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2003. 358 p. (In Russian).
3. Nikitin A. V., Shishlakov V. F. Parametric Synthesis of the System of Automatic Control of the Braking of the Wheels of the Vehicle. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 24–29 (In Russian).
4. Shishlakov V. F., Shishlakov D. V. Parametric Synthesis of Multiply Connected Automatic Control Systems by a Generalized Galerkin Method. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2006, no. 3, pp. 51–62 (In Russian).
5. Shishlakov V. F., Shishlakov D. V. Parametric Synthesis of Multiply Connected Systems of Automatic Control in the Time Domain. *Izvestiia vuzov. Problemy energetiki*, 2006, no. 12, pp. 49–54 (In Russian).
6. Cvetkov S. A., Shishlakov V. F., Shishlakov D. V. Synthesis of Multiply Connected Systems of Automatic Control in the Time Domain. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2007, no. 12, pp. 13–17 (In Russian).
7. *Analiz i optimal'nyi sintez na EVM sistem upravleniia* [Computer Analysis and Optimal Synthesis Automatic Control Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 340 p. (In Russian).
8. *Algoritmy dinamicheskogo sinteza nelineinykh avtomaticheskikh sistem* [Algorithms of Dynamic Synthesis of Nonlinear Automatic Control Systems]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992. 334 p. (In Russian).
9. L'vovskii E. N. *Statisticheskie metody postroeniia empiricheskikh formul* [Statistic Methods of Designing Empirical Equations]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 239 p. (In Russian).

УДК 005.8:615.478

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ ОНТОЛОГИЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СВЯЗАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПРИРОДЫ В СЛОЖНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

М. М. Матюшин^а, начальник отдела сменных руководителей полета

Т. Г. Вакурина^а, ведущий инженер отдела формирования и реализации программ эксплуатации ракетно-космических систем и управления проектами

В. В. Котеля^а, начальник сектора сопровождения и развития информационной инфраструктуры управления полетами

П. О. Скобелев^б, доктор техн. наук, генеральный директор

О. И. Лахин^б, руководитель направления

С. С. Кожевников^б, директор аналитического центра

Е. В. Симонова^{б, в}, канд. техн. наук, доцент, ведущий аналитик

А. И. Носкова^б, аналитик

^аОАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева, Королев, РФ

^бООО «Научно-производственная компания «Разумные решения», Самара, РФ

^вФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева (национальный исследовательский университет)», Самара, РФ

Постановка проблемы: разнородные знания в интеллектуальных системах поддержки принятия решений слабо формализуемы, что затрудняет использование автоматизированных систем для оперативного управления сложными объектами и процессами. Целью работы является разработка методов и программных средств онтологического представления знаний в сложных информационно-аналитических системах. **Методы:** рассмотрен подход к описанию сложных предметных областей на основе метаонтологии «модель Аристотеля». **Результаты:** разработаны и описаны алгоритмические и программные решения, позволяющие создавать онтологии деятельности на основе данного подхода, а также средства визуализации и хранения знаний в предметных онтологиях. Создана онтология систем и элементов Международной космической станции для решения задач управления ее ресурсами, а также онтология для поддержки принятия решений при использовании бортовых ресурсов станции в процессе парирования аварийных ситуаций «Разгерметизация» и «Пожар». Выделены три уровня описания предметной области: «онтология» — «модель» — «сцена» для повышения эффективности обработки связанных информационных объектов произвольной природы в сложных информационно-аналитических системах. Для редактирования, визуализации и навигации по онтологиям, моделям и сценам разработан конструктор онтологий, позволяющий извлекать исходные информационные объекты и их связи из информационно-аналитических систем; визуально представлять качественные и количественные характеристики информационных объектов на двумерной поверхности; выделять подмножества информационных объектов и их связей из общего множества извлеченных объектов по определенным характеристикам и критериям; выполнять свертку подмножеств информационных объектов и их связей в единый гиперобъект по определенным характеристикам и критериям. **Практическая значимость:** модель знаний и алгоритмические решения обеспечивают индивидуальную онтологическую настройку разработанных инструментальных средств на конкретную сферу деятельности и используются для ситуационного управления в интеллектуальных системах поддержки принятия решений в аэрокосмических приложениях.

Ключевые слова — методы визуализации, онтология, метаонтология Аристотеля, «модель Аристотеля», конструктор онтологий, онтология Международной космической станции.

Введение

Современные автоматизированные системы управления стремительно усложняются, что вызвано растущими требованиями бизнеса, высокой неопределенностью и динамикой изменения спроса/предложения в новой глобальной экономике знаний. Одним из подходов к решению данной проблемы является создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений в реальном времени.

В этой связи в настоящее время резко возросла потребность в представлении, визуализации, формализации, интеграции, хранении и повторном использовании больших объемов знаний

и данных в различных областях деятельности. Основная проблема заключается в том, что не все знания можно легко описать и запрограммировать, так как они обычно являются разнородными, многосвязными, неполными, могут содержать некорректную информацию, быть как декларативными, так и процедурными, связанными не только иерархическими, но и сетевыми структурами, и т. д. Поэтому важнейшие и специфические знания для принятия решений во многом остаются неформализованными, что затрудняет использование автоматизированных систем для управления сложными объектами и процессами. Характерный пример этого — Международная космическая станция (МКС).

Другой трудностью является жесткое кодирование данных в тексте программы, изменение которых ведет к перепрограммированию всей системы. Поэтому необходимо разрабатывать варианты представления знаний, менее зависящие от кода и позволяющие пользователям описывать предметные области в более понятном им виде.

Современные интеллектуальные системы используют в качестве источников информации базы знаний вместо баз данных. Основными преимуществами использования баз знаний являются:

- возможность хранить сложные разнородные сведения;
- возможность расширять и дополнять описание предметной области без перепрограммирования;
- наглядность и доступность представления знаний пользователю.

В статье рассматриваются методы и средства построения онтологий для визуализации связанных информационных объектов произвольной природы в сложных информационно-аналитических системах, которые позволяют описывать знания о предметной области, строить концептуальные модели деятельности предприятий, а также формировать модели ситуаций (сцены), используемые для ситуационного управления в интеллектуальных системах поддержки принятия решений нового класса на основе мультиагентных технологий, базирующихся на принципах самоорганизации и эволюции.

В качестве примера рассматривается модель знаний МКС, разрабатываемая для ряда конкретных практических приложений.

Онтологический подход к представлению знаний в сложных информационно-аналитических системах

На данный момент для представления знаний в сложных информационных системах широко используется ряд методов: семантические сети [1], фреймы [2], формальные логические модели [3], продукционные модели [4]. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и недостатками, а также ограничениями на описываемые знания, предметную область и системы, в которых он может использоваться.

Онтологический подход к визуализации и хранению знаний позволяет с помощью онтологий описать любую разнородную, сколь угодно сложную предметную область. С точки зрения разработки интеллектуальных систем, используя этот подход, можно формализовать специфические предметные знания в виде, допускающем компьютерную обработку, и отделить знания от программного кода системы. Возможность для пользователей онтологии добавлять и изменять

объекты, атрибуты и классы по мере уточнения целей и задач делает этот метод оптимальным в практическом использовании.

Применительно к интеллектуальным системам под онтологией понимаются знания, формально представленные на базе концептуализации. Концептуализация предполагает описание множества объектов и понятий, знаний о них и связей между ними [5]. Таким образом, онтологии на базовом уровне должны, прежде всего, обеспечивать словарь понятий (терминов, концептов) для представления и обмена знаниями о предметной области, а также множество связей (отношений), установленных между понятиями в этом словаре.

Для формализации знаний в онтологии необходимо выбрать базис, в котором будут описываться концепты. В зависимости от описываемой предметной области, а также от интеллектуальной системы, использующей конкретную онтологию, базис (метаонтология) может содержать различный набор компонент. Например, при построении онтологий для поддержки принятия решений используется набор «классы» — «отношения» — «функции» — «аксиомы» — «экземпляры» или набор «объекты» — «отношения» — «роли» — «атрибуты». Еще одним примером онтологического базиса может служить формальная онтология свойств, в которой свойство рассматривается как центральная сущность.

В развитие идеи универсального базиса нами предложена метаонтология, позволяющая наиболее подробно описывать сложные предметные области — так называемая «модель Аристотеля», основными концептами которой являются «объект», «свойство», «процесс», «отношение» и «атрибут» [6].

Главным отличием этой метаонтологии является ориентация на создание моделей предметных областей в виде «моделей миров» — самозавершенных, взаимосвязанных и взаимообусловленных систем знаний, способных «работать» и «выполняться» для моделирования ситуаций, что особенно важно в целях дальнейшего создания «моделей деятельности» людей (специалистов, управленцев и т. д.), имеющих дело с исполнимыми или интерпретируемыми знаниями.

Согласно этой модели:

- существуют объекты, которые обладают свойствами и характеризуются состояниями;
- свойства выражают способность объектов вступать в процессы взаимодействия на основе законов мира;
- отношения между объектами могут отражать структурные, функциональные, временные или любые другие виды связей;
- чтобы выполнить действие над объектом, необходимо соблюдать определенные условия, которые задаются свойствами и отношениями;

— действия (процессы) изменяют состояния объектов, их свойства и отношения;

— свойства, отношения и действия характеризуются значениями атрибутов;

— атрибуты объекта/отношения являются качественной или количественной характеристикой понятия;

— правила являются обобщенными понятиями для формализованных условий вида «если-то» (предикатов) и высказываний (утверждений, аксиом, фактов).

Примеры классов понятий и отношений в модели знаний МКС:

— классы понятий: «Модуль», «Отсек», «Люк», «Средство наддува», «Экипаж»;

— свойства: Отсек «имеет» Объем, Объект «имеет» Горючесть;

— отношения: Средство наддува «находится в» Отсеке, Экипаж «использует» Средство наддува, Модуль «стыкуется» с Модулем;

— атрибуты полета: «Текущее давление», «Темп падения давления», «Резервное время», «Текущая масса»;

— процессы: «Падение давления» в Отсеке, «Перемещение» Космонавта, «Пожар» в Отсеке.

В создаваемых моделях «все связано со всем» и любой объект может запускать связанные с ним процессы (в том числе, приводящие к авариям). На этой основе одновременно развиваются процессы моделирования возникающей аварийной ситуации, которые могут быть легко визуализированы, использованы для прогнозирования ее развития и т. д.

Конечной целью создания и использования онтологий является обеспечение поддержки деятельности по накоплению, разделению и повторному использованию знаний. Исходя из этой цели, введем критерии, которым должна отвечать онтология [6]:

— прозрачность — подразумеваемое значение определенного термина должно передаваться доступно и однозначно, исключая двойные толкования;

— связность — онтология должна позволять делать выводы, которые согласуются с исходными определениями понятий, не вызывая противоречий;

— расширяемость — онтология должна позволять пополнять базу знаний, не затрагивая уже имеющуюся в ней информацию;

— независимость от синтаксиса — концептуализация должна быть специфицирована на уровне знания максимально независимо от представления понятий на уровне символов;

— минимальный базис при высокой выразительности — онтология должна иметь минимальный базовый набор понятий, но их должно быть достаточно, чтобы описывать сложные разнородные предметные области;

— удобство для пользователя — онтология должна позволять выражать знания в привыч-

ном для пользователя виде, быть понятной, обзорной и связанной;

— эффективность машинной обработки — онтология должна быть приведена к виду, допускающему эффективную компьютерную обработку.

С помощью современных инструментов инженерии онтологий можно строить онтологии, отвечающие всем этим критериям. Наиболее популярными инструментами являются Protégé, OntoEdit, OilEd, WebOnto [7]. Инструменты инженерии онтологий выполняют поддержку документирования онтологий, импорт и экспорт онтологий разных форматов и языков, графическое редактирование, управление библиотеками онтологий и т. д.

Однако ни один из существующих программных инструментов для работы с онтологиями не использует «модель мира», позволяющую строить и исполнять различные конкретные миры, в частности, метаонтологию «модель Аристотеля». Данная модель является наиболее адекватной для описания сложных разнородных знаний, поэтому был разработан подход к построению онтологий предметных областей на основе модели мира Аристотеля, новый инструмент, реализующий данный подход и позволяющий создавать онтологии деятельности, используя основные концепты «модели Аристотеля», а также методы и алгоритмы визуализации данных, упрощающие работу и восприятие создаваемой онтологии.

Разработка методов и программных средств управления онтологиями в интеллектуальных системах

Онтология представляет собой описание мира на основе набора базовых концептов (понятий) и связей между ними. Структура предметной онтологии отображается в виде семантической сети, вершинами которой являются базовые понятия, а стрелки выражают отношения (связи) между ними.

Для создания предметных онтологий (миров) и управления семантической сетью разработан конструктор онтологий, моделей и сцен (КО), представляющий собой набор инструментов, которые позволяют пользователю построить модель предметной области, описать некоторую исходную ситуацию, задав начальную сцену. В дальнейшем КО должен позволять создавать ручную или автоматически сценарии действий/рассуждений и исполнять их по шагам или в реальном времени для получения результата.

Конструирование онтологий

Для удобства использования в КО выделяются три уровня описания предметной области: «онтология», «модель», «ситуация (сцена)».

Онтология описывает понятия и отношения (подобно толковому словарю), необходимые для описания знаний в любой предметной области (аэрокосмические организации, биотехнологии, медицина, наносистемы, живые системы и т. д.); на основе онтологии в дальнейшем строится модель деятельности.

Модель описывает устойчивые конфигурации объектов, упрощающие создание формализованных описаний сцен в конкретных ситуациях (например, не следует каждый раз описывать конфигурацию МКС, достаточно сохранять эти сведения в модели для дальнейшего использования).

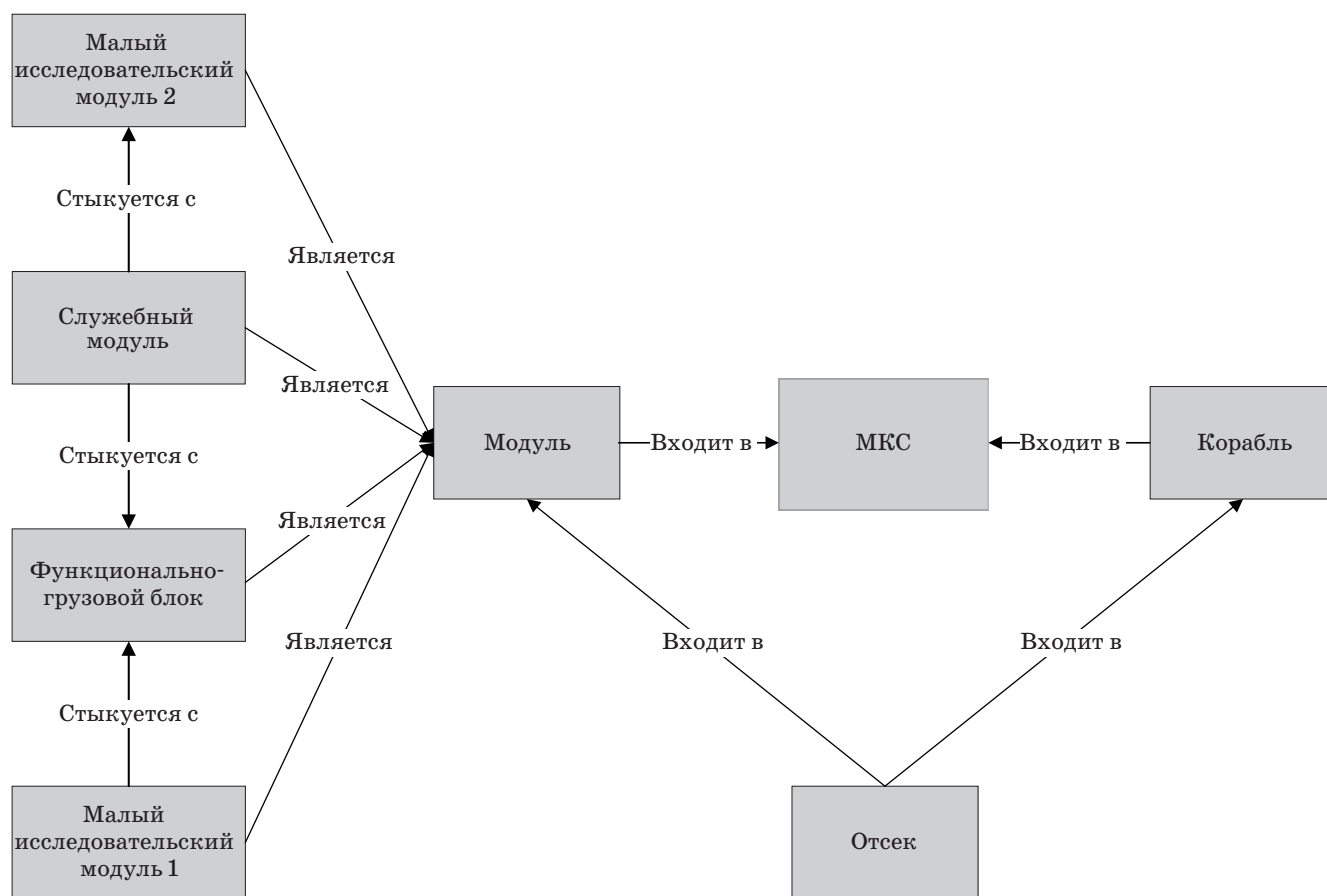
Ситуация (сцена) описывает экземпляры понятий и отношений в заданный момент времени (набор фактов); сцена подобна мгновенной «фотографии» ситуации в заданный момент времени.

Так, в мире МКС можно описать все возможные конфигурации МКС с состояниями объектов (оборудование, физическую структуру, системы и т. д.). В онтологию вносятся базовые концепты, описывающие предметную область (без конкретики), например: объекты — «Корабль», «Люк», «Отсек», «Космонавт», «Груз»; отношения — «Стыкуется с», «Входит в»; свойства — «Может гореть», «Тушить пожар»; процессы — «Перемещение»,

«Тушение пожара» и т. д. Фрагмент онтологии МКС представлен на рис. 1, где в качестве объектов изображены МКС и ее основные составные части — модули. Объекты «Модуль», «Корабль», «Отсек» являются базовыми онтологическими концептами. Объекты, описывающие конкретные модули, которые входят в МКС, — это экземпляры объекта «Модуль», поэтому они связаны с «Модулем» отношением «Является». Все модули связаны с МКС логическим отношением «Входит в». Между собой модули связаны физическим отношением «Стыкуется с».

Таким образом, описание мира может быть построено не как «закрытая» программная модель, которую при каждом вносимом изменении необходимо перепрограммировать, а как открытая модель физических или абстрактных сущностей, позволяющая моделировать процессы их взаимодействия.

Для того чтобы расширить возможность описания предметных областей за счет включения в онтологию не только объектов, но и их качественных и количественных характеристик, в КО реализованы средства создания свойств объектов и добавления атрибутов для всех концептов. В данном случае свойства отвечают за качествен-



■ Рис. 1. Фрагмент онтологии МКС

ные характеристики, а атрибуты — за количественные. Наличие такой возможности увеличивает объем знаний, которые пользователь может описать с помощью онтологии, так как задание свойств объектов влечет за собой появление следующего уровня детализации онтологии, а именно создание и описание процессов, в которые могут вступать объекты.

Процессы неразрывно связаны со свойствами объекта, так как условием возникновения и протекания какого-либо процесса является наличие у объекта определенного свойства с определенными количественными характеристиками. Любой процесс состоит из последовательности действий, каждое из которых по определенному закону изменяет текущую ситуацию, а значит, изменяет качественные и количественные характеристики объектов, участвующих в данном процессе. Процесс — это не просто единичный концепт онтологии, но целое подмножество взаимосвязанных объектов и свойств, видоизменяющихся с течением времени. Основной отличительной особенностью «модели Аристотеля» является описание процессов с позиции взаимодействия объектов, обладающих определенными свойствами. Так как любая предметная область характеризуется конкретными процессами, их описание с присущими им условиями и особенностями позволяет пользователю яснее и прозрачнее представлять предметную область, а также отслеживать причинно-следственные связи, возникающие во время протекания различных процессов, что подтверждает актуальность использования в КО онтологии Аристотеля в качестве метаонтологии.

Визуализация качественных и количественных характеристик объектов и процессов на основе онтологии

Конструктор онтологий, моделей и сцен представляет собой систему визуального проектирования семантических сетей предметных онтологий, в которой пользователь может в удобной форме создавать и редактировать различные миры, специфицируя свои концепты и устанавливая связи между ними, а в дальнейшем формируя сценарии действий и «проигрывая» ситуации в этих мирах посредством исполняющей системы, реализующей законы мира.

Для упрощения восприятия пользователем онтологии в рамках создания КО были также разработаны и использованы методы и алгоритмы визуализации данных. В первую очередь, для облегчения визуального восприятия общей структуры занесенных в онтологию объектов пользователю предоставляется возможность изменять вариант отображения онтологий, моделей и сцен. Доступны следующие варианты:

- словарь, в котором собраны все концепты онтологии или модели (в виде гиперссылок);

- карточка концепта/модели, в которую заносятся данные для конкретного концепта онтологии или модели;

- структурированное текстовое описание, которое является наиболее привычным вариантом представления знаний для человека;

- семантическая сеть, имеющая вид ориентированного графа, вершины которого соответствуют объектам предметной области, а дуги (ребра) задают отношения между ними, и являющаяся основным вариантом представления знаний в КО.

Рассмотрим алгоритм визуализации качественных и количественных характеристик объекта, а также протекания процесса на примере ситуации «Возникновение пожара на МКС» через свойство объекта «Может гореть» [8]:

- для объектов МКС вводится свойство «Может гореть», которому задаются атрибуты («Температура загорания», «Теплоемкость» и др.);

- свойство «Может гореть» связывается с процессом «Пожар», в котором пересчитывается температура соседних объектов;

- при возникновении пожара автоматически запускается процесс «Пожар», в котором агент пожара находит ближайшие объекты в модуле и проверяет их на наличие свойства «Может гореть». Если температура выше заданной (загорания), происходит возгорание этих объектов и создаются новые агенты горящих объектов, продолжительность сгорания которых обусловлена их теплоемкостью;

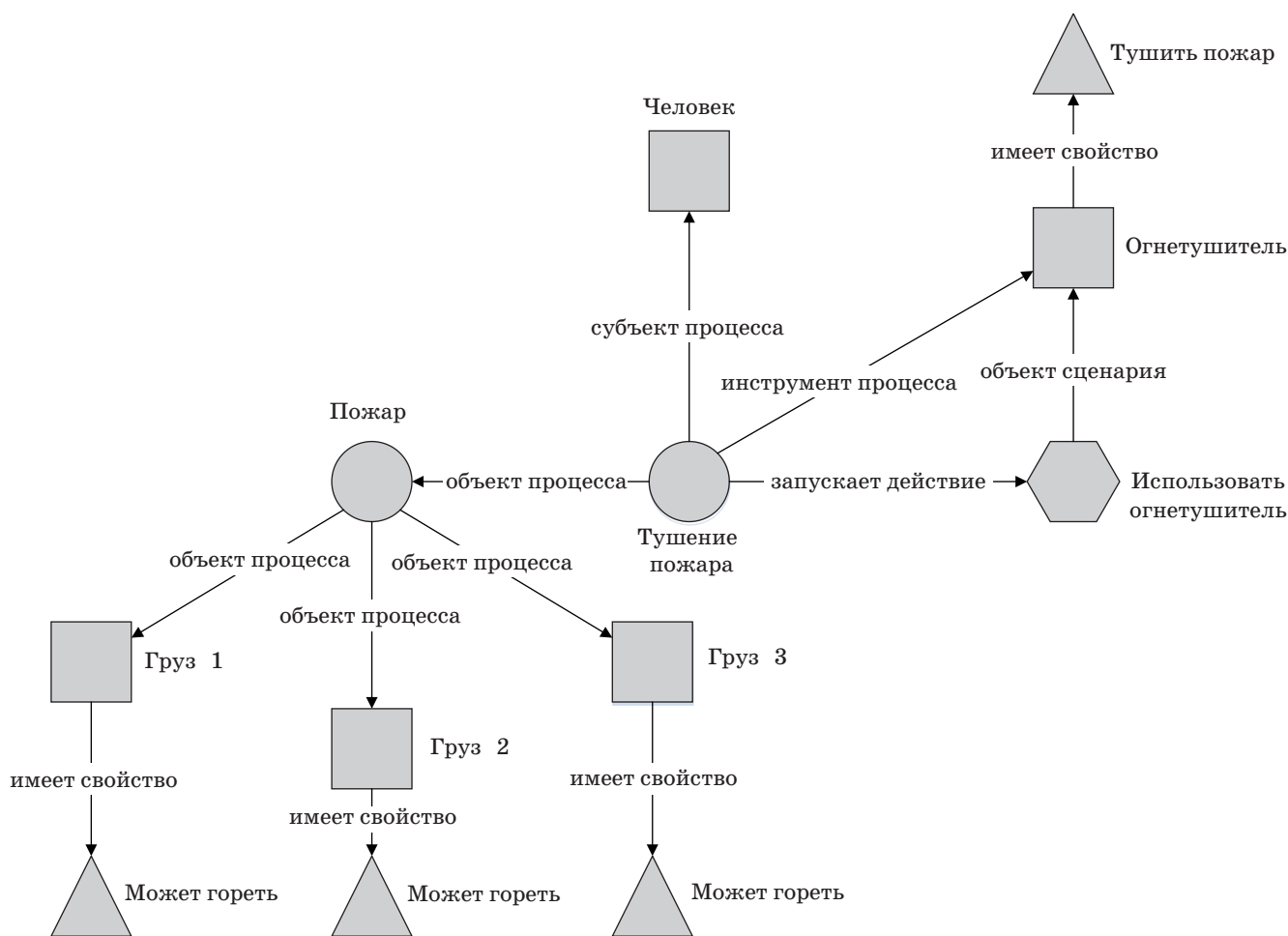
- объект «Огнетушитель» в режиме использования создает пенную массу, которая противостоит горению и останавливает горение при определенных параметрах;

- в случае отсутствия кислорода/горючих объектов или при использовании средств тушения пожар завершается;

- напротив, от горящих объектов возгораются другие — пожар рекурсивно (в зависимости от конфигурации станции) распространяется в заданном объеме, поднимая температуру, выжигая воздух и т. д.

Онтологическое описание ситуации «Возникновение пожара на МКС», представленное в виде семантической сети, дано на рис. 2.

С увеличением количества концептов и связей семантические сети становятся нечитаемыми и трудными для восприятия, поэтому возникла необходимость выделения подмножества объектов из общей сети онтологии. Пользователь может выделить и сгруппировать объекты из общего множества по любому необходимому ему критерию. Для разделения подмножеств выделенных объектов в разработанном КО пользователю предоставляется возможность создавать слои и выносить на них сгруппированные объекты, при этом создание послышной структуры повышает



■ **Рис. 2.** Онтологическое описание ситуации «Возникновение пожара на МКС», представленное в виде семантической сети

эффективность работы со сложными онтологиями, подобными онтологии МКС. На данный момент все объекты онтологии МКС разделены на следующие группы:

- физическая структура МКС;
- основные системы МКС;
- система обеспечения жизнедеятельности;
- система и средства газового состава;
- система энергосбережения;
- система управления движением и навигацией;
- объединенная двигательная установка;
- система пожаробнаружения и пожаротушения.

Таким образом, иерархия слоев МКС построена от общего к частному, от общей физической структуры станции к объектам систем и подсистем. Такое разделение облегчает навигацию по онтологии. Например, если пользователю необходимо работать только с определенной системой, ему необязательно открывать всю онтологию МКС и редактировать ее, достаточно просто перейти на слой нужной системы.

Если необходимо найти конкретный объект сети, в КО реализован поиск по объектам онтологии.

Другим вариантом выделения группы концептов из общей сети является получение подмножества связанных объектов любого уровня вложенности по определенным критериям, например, связанных одним и тем же отношением или обладающих одним и тем же свойством. Такой метод выделения подмножеств может быть удобен, например, при описании процессов. Зная свойство, запускающее процесс, пользователь может сразу выделить все объекты, которые должны участвовать в этом процессе. Назначив в качестве критерия отбора отношение, пользователь может выбрать объекты, составляющие определенную иерархию с ограниченным уровнем вложенности. КО предоставляет пользователю возможность выбрать в качестве критерия отбора отношение и радиус связей, чтобы вычлнить из общего множества указанный объект и все объекты, связанные с ним выбранным отношением на заданном

значении радиуса. Например, выберем в онтологии Международной космической станции в качестве центрального объекта объект «МКС». Критерием отбора назначим отношение «Входит в» и зададим радиус связи, равный 2. Полученное в результате отбора подмножество представлено на рис. 3.

Предложенные методы визуализации онтологий в целом и их отдельных частей позволяют любому пользователю, даже не обладающему специальной квалификацией, создавать и редактировать предметные онтологии.

Использование конструктора онтологий в интеллектуальных системах для аэрокосмических приложений

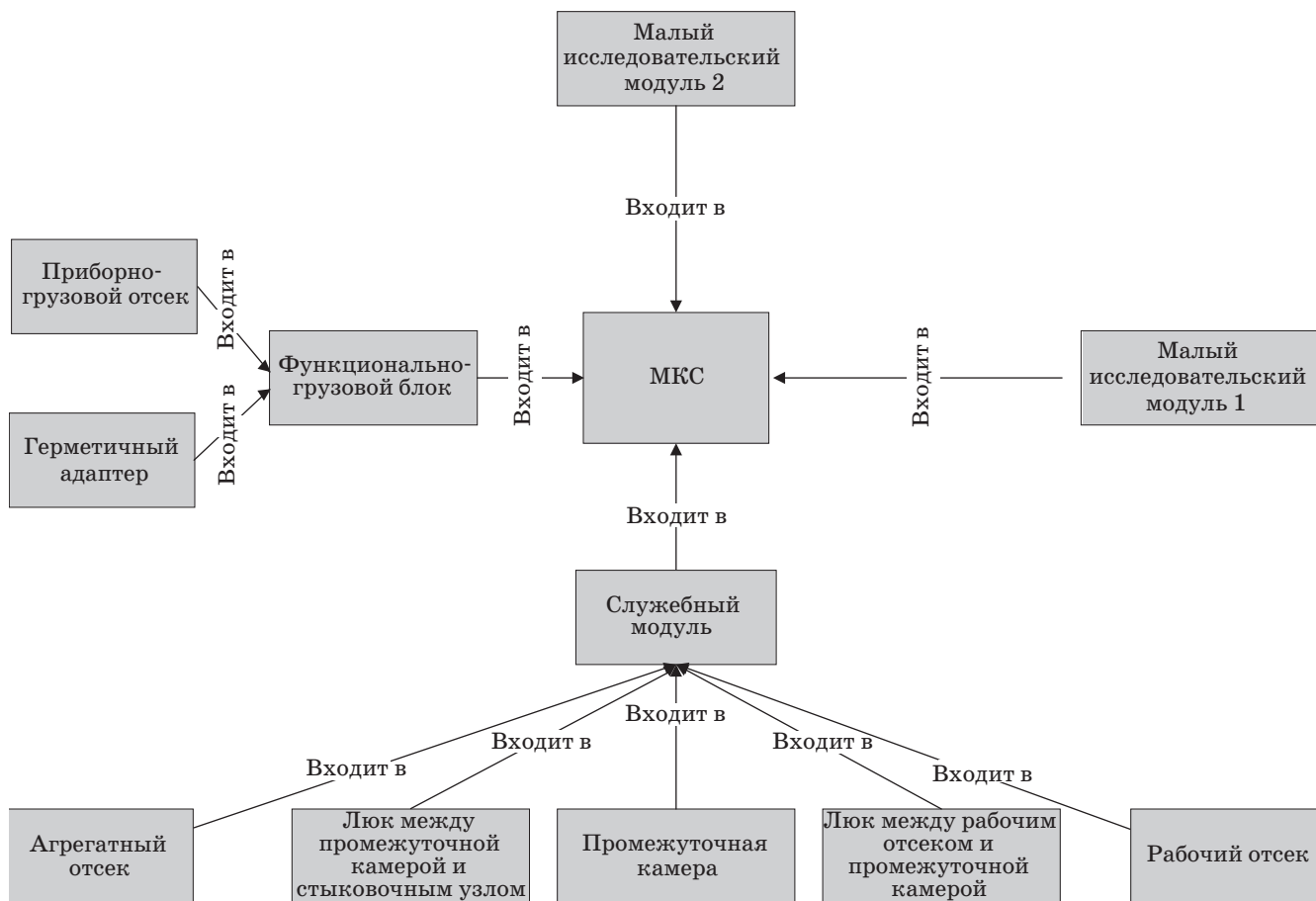
Различные уровни онтологии МКС, построенной с помощью КО, используются в «ОАО РКК «Энергия» в следующих интеллектуальных системах для аэрокосмических приложений:

- интеллектуальной системе поддержки принятия решений при парировании нештатных и аварийных ситуаций [8];
- автоматизированной системе поддержки принятия решений при организации работы опе-

ративной смены главной оперативной группы управления (ГОГУ);

— системе интерактивного построения программы полета, грузопотока и расчетов ресурсов МКС [9].

При этом в соответствующие уровни онтологии МКС вносятся знания, актуальные для каждой из этих систем. Например, система поддержки принятия решений в аварийных ситуациях использует онтологию, описывающую конфигурацию МКС, состав бортового оборудования и инструкции для экипажа по парированию аварийных ситуаций. Система поддержки принятия решений для смены ГОГУ оперирует такими понятиями, как смена, специалист, полетная операция, и планирует графики работ для членов ГОГУ, основываясь на онтологическом описании компетенций специалистов ГОГУ, их опыта и квалификации, видов выполняемых операций, смен и аксиом, по которым происходит взаимодействие между этими объектами. В системе построения программы полета, грузопотока и расчетов ресурсов МКС основными объектами являются ресурсы, корабли и полеты.



■ Рис. 3. Подмножество объектов, связанных отношением «Входит в» с радиусом связей, равным 2

Заключение

Разработанный подход к построению онтологий на основе модели мира Аристотеля, конструктор онтологий, основанный на данной методологии, а также методы визуализации в КО, описанные на примере онтологии МКС, значительно упрощают работу специалистов инженерии знаний при описании разнородных предметных областей. Созданная на основе этих принципов предметная онтология (мир) может в полной мере использоваться в интеллектуальных системах в качестве базы знаний, обеспечивая индивидуальную онтологическую настройку системы на конкретную сферу деятельности.

Однако до сих пор существуют трудности внедрения онтологического подхода к хранению

и визуализации знаний из-за отсутствия общего стандарта на описание и представление онтологий. В связи с этим планируются дальнейшие работы по дополнению и усовершенствованию КО в целях расширения предоставляемых возможностей и еще большего упрощения работы пользователя. Основной целью развития методов и алгоритмов построения и визуализации онтологий является достижение высокой степени автоматизации при добавлении и редактировании концептов, а также при задании правил и условий взаимодействия между ними.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, государственный контракт № ГК 14.514.11.4100.

Литература

1. **Wojtinek Pia-Ramona, Pulman Stephen.** Building semantic networks from plan text//International J. of Semantic Computing. 2012. Vol. 06. N 01. DOI:10.1142/S1793351X12400041.
2. **Karp Peter D., Myers Karen L., Gruber Tom.** The Generic Frame Protocol//Proc. 14th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Montréal Québec, Canada, Aug. 20–25, 1995. P. 768–774.
3. **Hansen Kaj Børge.** Formal Logic, Models, Reality. — Uppsala Philosophical Studies, 2011. http://www.filosofi.uu.se/digitalAssets/110/110787_formal-logic-real.pdf (дата обращения: 12.11.2013).
4. **Pasik Alexander J., Stolfo Salvatore J.** Improving Production System Performance on Parallel Architectures by Creating Constrained Copies of Rules. — Department of Computer Science, Columbia University, 1987. <http://academiccommons.columbia.edu/catalog/ac%3A142314> (дата обращения: 14.11.2013).
5. **Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф.** Базы знаний интеллектуальных систем. — СПб.: Питер, 2000. — 383 с.
6. **Скобелев П. О.** Онтологии деятельности для ситуационного управления предприятием в реальном времени // Онтология проектирования. 2012. № 1(3). С. 26–48.
7. **Овдей О. М., Проскудина Г. Ю.** Обзор инструментов инженерии онтологий // Электронные библиотеки. 2004. Т. 7. № 4. <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2004/part4/op> (дата обращения: 15.11.2013).
8. **Матюшин М. М.** и др. Автоматизированная система поддержки принятия решений в аварийных ситуациях // Программные продукты и системы. 2013. № 3. С. 62–69.
9. **Дязитдинова А. Р.** и др. Обеспечение согласованного взаимодействия по планированию грузопотока Международной космической станции с помощью мультиагентных технологий // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. 13-й Междунар. конф., Самара, 15–17 июня 2011 г. Самара, 2011. С. 435–442.

UDC 602-53.55

Methods and Software for Creation of Ontologies for Visualizing Connected Information Objects of Random Nature in Complex Information-Analytical Systems

Matushin M. M.^a, Head of Department, matushin@scsc.ru

Vakurina T. G.^a, Chief Engineer, tvakurina@yandex.ru

Kotelya V. V.^a, Head of Section, vlad@scsc.ru

Skobelev P. O.^b, Dr. Sc., Tech., Chief Executive Officer, petr.skobelev@gmail.com

Lakhin O. I.^b, Project Manager, lakhin@yandex.ru

Kozhevnikov S. S.^b, Head of Analytical Center, koz@smartsolutions-123.ru

Simonova E. V.^{b, c}, PhD, Associate Prof., Lead Analyst, simonova@smartsolutions-123.ru

Noskova A. I.^b, Analyst, noskova@smartsolutions-123.ru

^aPLC S. P. Korolev Rocket & Space Corporation Energia, 4A, Lenin St., 141070, Korolev, Moscow, Russian Federation

^bSoftware Engineering Company «Smart Solutions», 17, Moskovskoe St., 443013, Samara, Russian Federation

^cSamara State Aerospace University, 34, Moskovskoe St., 443086, Samara, Russian Federation

Purpose: Diverse sets of knowledge on intelligent decision making support systems are poorly formalized that complicates the use of automated systems for operative management of complex objects and processes. The purpose of the present paper is to develop methods and software for ontological representation of knowledge in complex information-analytical systems. **Methods:** There has been considered an approach for describing complex subject fields based on the meta-ontology "The Model of Aristotle". **Results:** There have been developed and described algorithmic and software solutions allowing to create ontologies of activities based on the given approach as well as visualization and storage of knowledge in subject domain ontologies. There has been created a system and element ontology of the ISS for decision making support during confrontation of the emergencies of "Leakage" and "Fire". There have been sorted three levels of the subject area "Ontology" – "Model" – "Scene" to enhance efficiency of processing connected information objects of random nature in complex information-analytical systems. There has been developed a constructor of ontologies to edit, visualize and navigate in ontologies, models and scenes allowing to extract the original data objects and their relations to information-analytical systems; to represent visually quantitative and qualitative characteristics of information objects on a two-dimensional surface; to fold subsets of data objects and their relations to a common set of extracted objects according to certain criteria and characteristics; to perform convolution of subsets of information objects and their relations in a single hyper object according to certain characteristics and criteria. **Practical relevance:** The knowledge model and algorithmic solutions provide individual ontological configuration tools developed for a specific activity and they are used for situational management in intelligent decision making support systems in aerospace applications.

Keywords — Visualization Methods, Ontology, Meta-Ontology of Aristotle, Model of Aristotle, Constructor of Ontologies, International Space Station Ontology.

References

1. Wojtinnik Pia-Ramona, Pulman Stephen. Building Semantic Networks from Plan Text. *International Journal of Semantic Computing*, 2012, vol. 06, no. 01. DOI:10.1142/S1793351X12400041.
2. Karp Peter D., Myers Karen L., Gruber Tom. The Generic Frame Protocol. *Proc. 14th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, Montréal Québec, Canada, August 20–25, 1995, pp. 768–774.
3. Hansen Kaj Börge. Formal Logic, Models, Reality. *Uppsala Philosophical Studies*, 2011. Available at: http://www.filosofi.uu.se/digitalAssets/110/110787_formal-logic-real.pdf (accessed 12 November 2013).
4. Pasik Alexander J., Stolfo Salvatore J. *Improving Production System Performance on Parallel Architectures by Creating Constrained Copies of Rules*. Department of Computer Science, Columbia University, 1987. Available at: <http://academiccommons.columbia.edu/catalog/ac%3A142314> (accessed 14 November 2013).
5. Gavrilova T. A., Horoshevskij V. F. *Bazy znaniy intellektual'nykh sistem* [Knowledge Base of Intelligent Systems]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2000. 383 p. (In Russian).
6. Skobelev P. O. Ontology of Actions for Situation-Driven Real Time Management of Enterprises. *Ontologiya proektirovaniia*, 2012, no. 1(3), pp. 26–48 (In Russian).
7. Ovdej O. M., Proskudina G. Ju. A Survey of Ontology Engineering Tools. *Elektronnye biblioteki*, 2004, vol. 7, no. 4. Available at: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2004/part4/op> (accessed 15 November 2013) (In Russian).
8. Matjushin M. M., Potockij S. I., Skobelev P. O., Potapov V. I., Lakhin O. I. Automated System of Decision Making Support in Emergencies. *Programmnye produkty i sistemy*, 2013, no. 3, pp. 62–69 (In Russian).
9. Dijazitdinova A. R., Ivashenko A. V., Litvinov I. I., Novikov A. L., Skobelev P. O., Sycheva M. V., Hamic I. I. Ensuring a Coherent Interaction of Traffic Planning the International Space Station Using Multi-Agent Technologies. *Trudy 13 Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh"* [Proc. 13th Int. Conf. "Complex Systems: Control and Modelling Problems"]. Samara, 2011, pp. 435–442 (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

УДК 621.397.5

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ИХ К ЗАПУСКУ

А. И. Лоскутов^а, доктор техн. наук, начальник кафедры

С. С. Патраков^а, соискатель, инженер

О. Л. Шестопалова^б, канд. техн. наук, доцент

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

^бФилиал «Восход» Московского авиационного института, Байконур, Казахстан

Постановка проблемы: контроль и диагностирование являются неотъемлемой частью процесса разработки, испытаний и эксплуатации космических аппаратов. Несовершенство средств контроля и диагностирования, уменьшение возможности получения исчерпывающих статистических данных по появлению различных дефектов привело к ситуации, когда принятие решения о техническом состоянии бортовой аппаратуры космических аппаратов и выработка управляющих воздействий проводятся в условиях существенной неопределенности. Одним из эффективных путей решения данной проблемы является использование интеллектуальных систем. **Методы:** создание специальной опросной матрицы решающих правил имплицитного типа «ЕСЛИ..., ТО...» в факторном пространстве нечетких переменных. При этом эксперт сам формирует пространство, в котором он принимает решение. **Результаты:** на базе предложенного метода оценивания технического состояния рассматриваемой телеметрической системы с использованием неявных экспертных знаний построена информационно-диагностическая система, позволяющая получать количественные оценки состояния работоспособности БР-91Ц в любой необходимый момент времени на основе анализа текущих значений параметров. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение испытаний типовой бортовой аппаратуры космических аппаратов, синтезированное на основе моделей и методов интеллектуальной обработки информации. Идея эксперимента заключалась в моделировании неисправностей для оценивания показателя безотказной работы интеллектуальной информационно-диагностической системы в составе испытательной аппаратуры бортовой информационно-телеметрической системы БР-91Ц. Количественные оценки состояния БР-91Ц в многомерном пространстве нечетких переменных позволяют проводить ее мониторинг, что дает основание для выработки гибкой стратегии эксплуатации. Проверка качества интеллектуальной нечеткой модели проведена прямым сравнением результатов работы приложения с результатами оценивания специалистом автономных испытаний бортовой информационно-телеметрической системы. Выигрыш по критерию точечной оценки показателя безотказной работы разработанной интеллектуальной системы составил 5 % по сравнению с традиционным классическим подходом. Таким образом, разработанная интеллектуальная информационно-диагностическая система характеризуется лучшими значениями точечной оценки вероятности безотказной работы в ходе проведенного эксперимента. **Практическая значимость:** результаты исследований использованы при разработке контрольно-испытательной аппаратуры бортовой аппаратуры космических аппаратов. Они позволяют существенно снизить неопределенность при принятии решения о техническом состоянии, а также при выдаче тестовых воздействий.

Ключевые слова — интеллектуальная информационно-диагностическая система, техническое состояние, нечеткая логика, бортовая аппаратура космических аппаратов.

Введение

При подготовке космических аппаратов (КА) к запуску оценивается вид технического состояния (ТС) бортовой аппаратуры (БА) в целях выявления дефектов при хранении и транспортировке КА [1]. Эффективность оценки напрямую определяется используемыми методами технического диагностирования при контроле технического состояния, поиске места и причин неисправностей систем [2–4].

Анализ статистических данных по неудачным запускам КА за последние годы показал, что несовершенство средств диагностирования обусловлено недостаточным объемом экспериментальной отработки и стендовых испытаний сложной БА КА. В связи с этим уменьшаются возможности получения исчерпывающих статистических данных по проявлению различных дефек-

тов и их влиянию на работоспособность и качество функционирования КА. Это в свою очередь приводит к ситуации, когда принятие решения о ТС и выработка управляющих воздействий для восстановления работоспособности проводятся в условиях существенной неопределенности.

Инструментом, позволяющим решить эту проблему, является новая информационная технология, основу которой представляют системы, основанные на знаниях, т. е. интеллектуальные системы [5–8]. Исследования, описываемые в настоящей статье, как раз и подразумевают создание интеллектуальной информационно-диагностической системы (ИИДС) оценивания ТС штатной бортовой системы КА в целях повышения эффективности выявления неисправностей.

Одним из необходимых элементов, обеспечивающих сбор и передачу по радиоканалу на наземный

измерительный пункт информации о состоянии БА КА, является бортовая информационно-телеметрическая система (БИТС). БИТС БР-91Ц, устанавливаемая на большинстве КА, а также процессы функционирования выбраны в рамках проводимых исследований по созданию перспективных систем диагностирования радиоэлектронной аппаратуры КА.

Постановка задачи синтеза интеллектуальной информационно-диагностической системы

В качестве исходных данных для проектирования ИИДС оценивания ТС БИТС выступают:

1) множество функциональных и сигнальных параметров контроля бортовой системы: Ω ;

2) вид функции принадлежности нечеткого отношения: треугольная;

3) алгоритм интеллектуальной обработки информации: правило нечеткого вывода на основе нечеткой импликации «ЕСЛИ..., ТО...» Мамдами — Заде А;

4) заданный показатель эффективности решения задачи определения ТС: $M^S = \{P, A, \Omega'\}$, где P — вероятность безотказной работы ИИДС, $\Omega' \in \Omega$ — множество выходных параметров для интеллектуальной обработки;

5) критерий эффективности: правило $M^S \rightarrow \max_A$.

Требуется на основе априорной информации о возможных ТС объекта диагностирования и выбранной структуры его описания, алгоритма интеллектуальной обработки информации, по результатам измерений параметров выхода объекта оценить в соответствии с критерием эффективности его реальное техническое состояние.

Согласно приведенной постановке задачи решение будем искать в виде

$$F = \operatorname{argmax} M^S.$$

Структура процесса оценивания представляет собой последовательность следующих взаимосвязанных этапов:

1) построение модели обработки данных: выбор параметров; формализация априорной информации об объекте контроля, включающая определение функций принадлежности; разработка правил нечеткого логического вывода;

2) сбор контрольно-диагностической информации, включающий измерение параметров состояния и проведение обработки в целях получения оценки признаков контроля;

3) принятие решения о ТС объекта контроля.

Разработка интеллектуальной информационно-диагностической системы

Интеллектуальная информационно-диагностическая система оценивания ТС БИТС основана на реализации метода построения моделей на базе экспертных знаний [5–9]. Суть метода заключается в создании специальной опросной матрицы продукционных правил импликативного типа «ЕСЛИ..., ТО...» в факторном пространстве нечетких переменных, при этом эксперт сам формирует пространство, в котором он принимает решение.

Выбор параметров мониторинга бортовой системы.

Определение факторного пространства

Для оценивания ТС БИТС выделим множество параметров и характеристик с учетом нечеткости и требований нормативно-технической и эксплуатационно-технической документации (ЭТД) на систему. Перечень контролируемых параметров, удовлетворяющих условиям нечеткости, приведен в табл. 1.

Из обозначенного списка выделены наиболее существенные в плане информативности для оценки ТС БИТС количественные параметры, которые составили факторное пространство для создания модели.

■ Таблица 1. Контролируемые параметры

Индекс и наименование параметра	Допуск на значения параметра	Семантическая нагрузка (состояние БА)
x_1 — мощность падающей волны, M_{Π}	$60 < U_{\Pi} < 5 \%$ $0 < U_{\Pi} < 5 \%$ Ошибка	Нормальная работа включенного передатчика Нормальная работа выключенного передатчика Аномальная работа передатчика
x_2 — мощность отраженной волны, M_o	$5 < U_o < 20 \%$ $0 < U_o < 5 \%$ Ошибка	Нормальная работа включенного передатчика Нормальная работа выключенного передатчика Аномальная работа передатчика
x_3 — напряжение питания приборов, НПП	$6,2 < U_{6,3В} < 6,4 В$ $U_{6,3В} < 6,2 В$ или $U_{6,3В} > 6,4 В$	Нормальное напряжение питания приборов Аномальное питание приборов
x_4 — температура в БИТС, $T_{БИТС}$	$15 < T < 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T < 15 \text{ } ^\circ\text{C}$ или $T > 25 \text{ } ^\circ\text{C}$	Нормальная температура Аномальная температура

Следует отметить, что факторное пространство системно представляет состояние объекта с учетом нечеткости: переменные x_1, x_2 характеризуют внутреннее состояние антенно-фидерного устройства; x_3 и x_4 — проявление параметров кондиции. В комплексе же они, по мнению эксперта, в достаточной степени характеризуют ТС БИТС в области неопределенности.

Задание обобщенного параметра технического состояния и функций принадлежности

На этапе выбора и формализации обобщенного параметра технического состояния (ОПТС) Y введена ранжированная шкала оценивания ТС БИТС. Для реализации этой задачи разбили области определения Y (рис. 1) на участки в интервале $[0, 1]$, где условным описательным характеристикам, полученным путем диалога с экспертами, поставлены в соответствие количественные значения с нечеткими границами (табл. 2). В нечетком виде выходной обобщенный показатель Y представлен на рис. 1.

Выбор количества интервалов обусловлен рекомендациями специалистов-экспертов. В табл. 2

показано ранжирование ОПТС с учетом неопределенности и нечеткости границ. Поскольку нечеткость исходной информации обуславливает нечеткость предполагаемых выводов, то ее термножества возможных значений пересекаются по всей области определения [10–12].

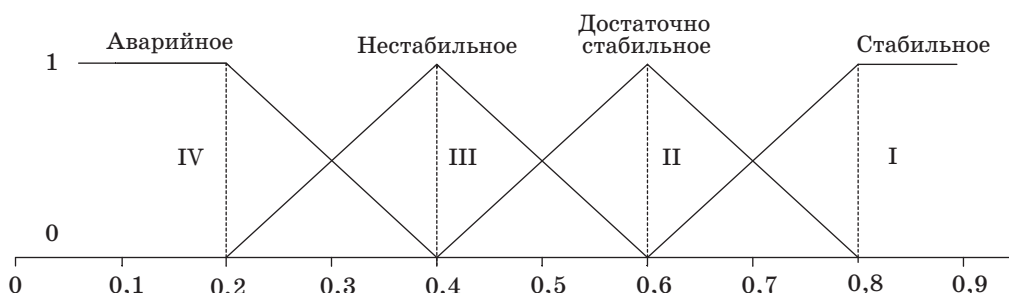
При попадании в зону неопределенности результирующее значение оценки будет отнесено к интервалу с более жесткой характеристикой.

В виде лингвистической переменной компонент факторного пространства x_4 представлен на рис. 2.

Аналогичным образом представляются в виде лингвистических переменных все остальные элементы факторного пространства.

Формирование правил нечеткого вывода

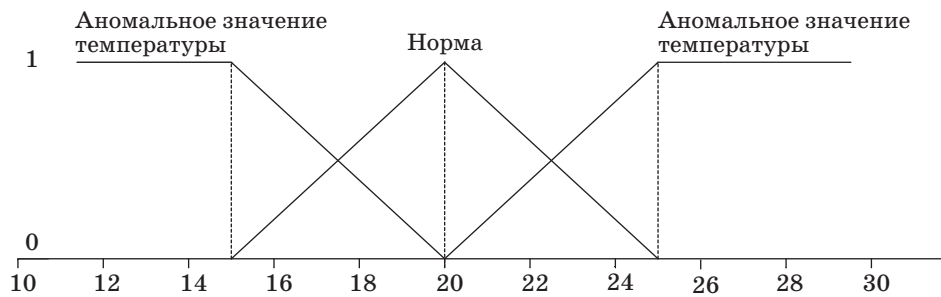
Следующим этапом разработки модели является составление матрицы экспертного опроса, фрагмент которой приведен в табл. 3. Достоинствами опросной матрицы являются свойства ортогональности и рототабельности, что хорошо коррелирует с интуитивными знаниями эксперта и дает возможность формализовать их в виде продукционных правил [13].



■ Рис. 1. Представление Y в виде лингвистической переменной

■ Таблица 2. Шкала нечетких значений ОПТС БИТС Y

Состояние	Интервал	Мода интервала	Характеристика состояния
I	$1 \div 0,6$	0,8	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС БИТС, соответствуют значениям, установленным в ЭТД на изделие
II	$0,8 \div 0,4$	0,6	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС БИТС, незначительно ниже значений, установленных в ЭТД на изделие, но позволяют дальнейшую эксплуатацию в составе контрольно-испытательной аппаратуры при условии проведения восстановительных мероприятий на месте, устранение замечаний и сбоев
III	$0,6 \div 0,2$	0,4	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС БИТС, не соответствуют установленным в ЭТД на изделие, проведение ремонта на месте позволит восстановить работоспособность изделия в полном объеме
IV	$0,4 \div 0$	0,2	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС БИТС, не соответствуют установленным в ЭТД на изделие, отправка на завод-изготовитель для ремонта



■ Рис. 2. Представление элемента факторного пространства x_4 и ОПТС в виде лингвистической переменной

■ Таблица 3. Фрагмент опросной матрицы с оценками эксперта

№ п/п	Мощность падающей волны, x_1		Мощность отраженной волны, x_2		Питание приборов, x_3		Температура БИТС, x_4		Обобщенный показатель ТС системы, Y (норма эксплуатации)
	Норма	Аномальное значение	Норма	Аномальное значение	Норма	Аномальное значение	Норма	Аномальное значение	
1	+	-	+	-	+	-	+	-	Стабильное
2	+	-	+	-	+	-	-	+	Достаточно стабильное
3	+	-	+	-	-	+	+	-	Достаточно стабильное
4	+	-	+	-	-	+	-	+	Нестабильное
5	+	-	-	+	-	+	-	+	Аварийное
6	+	-	-	+	+	-	+	-	Достаточно стабильное
7	+	-	-	+	+	-	-	+	Нестабильное
8	+	-	-	+	-	+	+	-	Нестабильное
9	-	+	-	+	-	+	-	+	Аварийное
10	-	+	-	+	-	+	+	-	Аварийное
11	-	+	-	+	+	-	+	-	Нестабильное
12	-	+	-	+	+	-	-	+	Аварийное
13	-	+	+	-	+	-	+	-	Достаточно стабильное
14	-	+	+	-	+	-	-	+	Нестабильное
15	-	+	+	-	-	+	-	+	Аварийное
16	-	+	+	-	-	+	+	-	Нестабильное

По результатам обработки данных матрицы получены продукционные правила для оценивания текущего значения ОПТС.

Анализ результатов моделирования

Задание функций принадлежности

Для построения нечеткой модели объекта испытаний (БР-91Ц-1) и проверки степени ее адекватности используем пакет Fuzzy Logic Toolbox вычислительной системы MatLab, предназначен-

ный для проектирования и исследования систем на нечеткой логике [14].

Для лингвистической оценки входных переменных будем использовать нечеткие термы с треугольной функцией принадлежности [15, 16]. Заданные функции принадлежности фактора x_1 представлены на рис. 3, а.

Аналогичным образом задаются функции принадлежности для остальных элементов — x_2, x_3, x_4 . Для лингвистической оценки переменной Y (ОПТС) будем использовать четыре терма с треугольными функциями принадлежности (рис. 3, б).

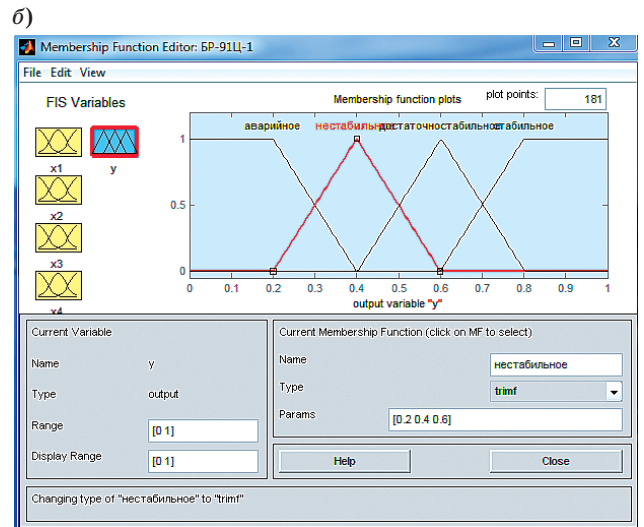
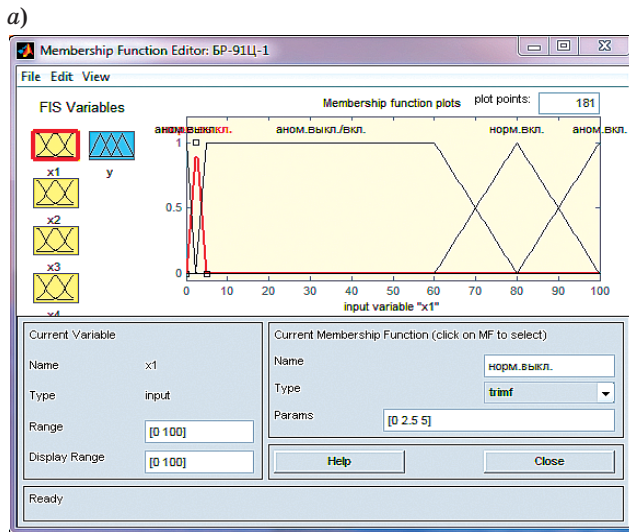


Рис. 3. Представление элемента x_1 факторного пространства (а) и элемента Y (б) в виде лингвистической переменной

Формирование правил вывода и результаты эксперимента

Окно редактора базы знаний после ввода всех 225 правил изображено на рис. 4, а. В скобках указаны весовые коэффициенты. Окно визуализации нечеткого вывода показано на рис. 4, б.

Проверка качества интеллектуальной нечеткой модели проведена прямым сравнением результатов работы приложения с результатами оценивания специалистом автономных испытаний БИТС. Идея эксперимента заключалась в моделировании неисправностей для оценивания показателя безотказной работы ИИДС в составе испытательной аппаратуры БИТС БР-91Ц.

Искомая оценка вероятности безотказной работы [1]

$$\hat{p} = \frac{N - m}{N} = 1 - \frac{m}{N};$$

среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки \hat{p}

$$\sigma[\hat{p}] = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{(N - m)m}{N}}.$$

Результаты проведенных исследований в виде значений рассчитанных показателей представлены в табл. 4 и на рис. 5.

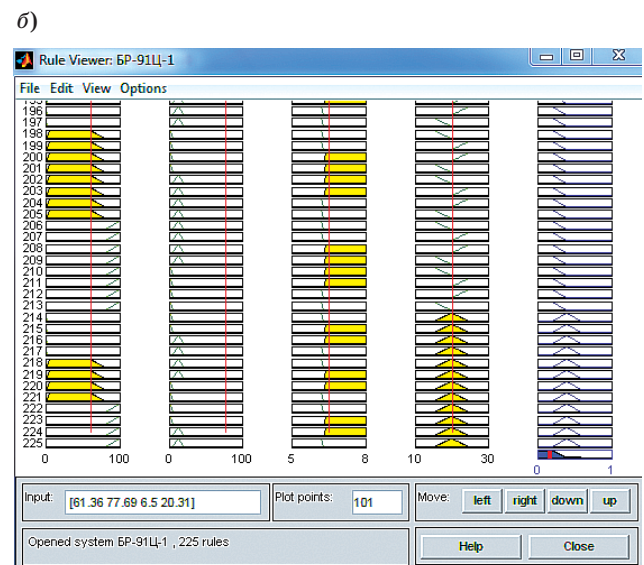
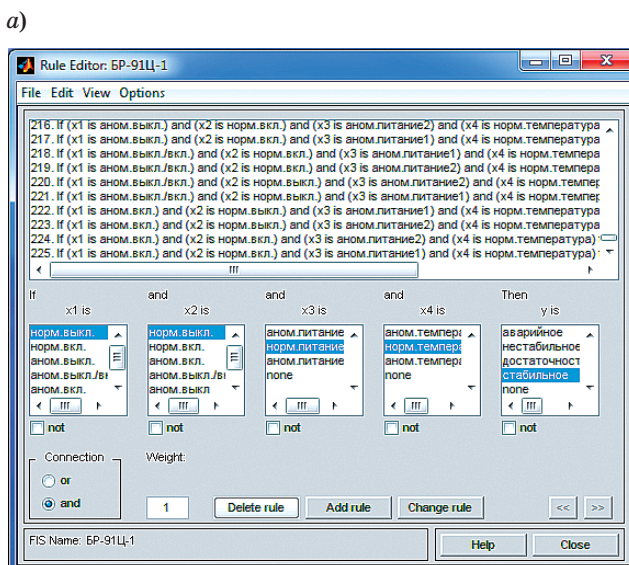
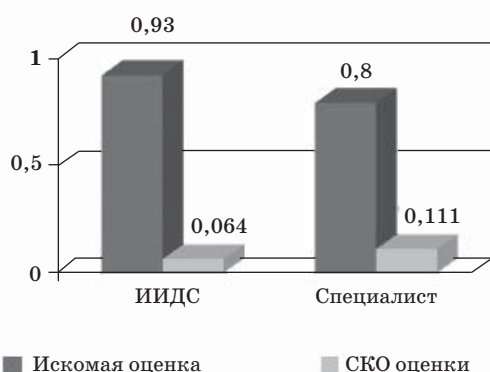


Рис. 4. Текстовое (а) и графическое (б) представление правил нечеткого вывода

■ Таблица 4. Показатели оценивания ТС БИТС

Показатель	ИИДС	Специалист (автономная проверка)
Общее число нечетких правил вывода	255	–
Количество изменений входного вектора, N	15	15
Количество неправильного определения изменений входного вектора, m	1	3
Количество правильного определения изменений входного вектора, $1 - m$	14	12
Искомая оценка $\hat{p}(N)$ / СКО оценки \hat{p}	0,93/0,064	0,8/0,111
Продолжительность принятия решений, t	0,6	1200



■ Рис. 5. Оценка показателя безотказной работы и СКО оценки

Таким образом, разработанная ИИДС характеризуется лучшими значениями точечной оценки вероятности безотказной работы в ходе проведенного эксперимента.

Заключение

Проведены исследования по созданию ИИДС бортовой радиотелеметрической системы телеконтроля БР-91Ц.

Предложен метод оценивания ТС рассматриваемой телеметрической системы. С использованием неявных экспертных знаний построена информационно-диагностическая система, которая дает возможность получать количественные оценки состояния работоспособности БР-91Ц в любой необходимый момент времени на основе анализа текущих значений параметров.

Количественные оценки состояния БР-91Ц в многомерном пространстве нечетких переменных позволяют проводить ее мониторинг, что дает основание для выработки гибкой стратегии эксплуатации.

Выигрыш по критерию точечной оценки показателя безотказной работы разработанной интеллектуальной системы по сравнению с традиционным классическим подходом составил 5 %.

Литература

1. Голяков А. Д., Миронов В. И., Смирнов В. В. Испытания систем ракетно-космической техники/ВИККИ им. А. Ф. Можайского. — СПб., 1992. — 398 с.
2. Дмитриев А. К., Юсупов Р. М. Идентификация и техническая диагностика/МО СССР. — М., 1987. — 521 с.
3. Дунаев В. В. Классификационные основы теории испытаний / под ред. В. И. Белицкого; МО СССР. — М., 1984. — 145 с.
4. Черкашин С. В., Шишкин В. В., Долбня Н. А. Универсальная система диагностирования бортового радиоэлектронного оборудования // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 3(2). С. 392–397.
5. Корнеев В. В., Гареев А. Ф., Васютин С. В., Райх В. В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. — М.: Нолидж, 2000. — 352 с.
6. Кузьмин В., Травкин С. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. — М.: Радио и связь, 1986. — 408 с.

7. Лоскутов А. И., Сирота С. В., Сакулин А. Н. Совершенствование с помощью экспертной системы испытаний объектов ракетно-космической техники // Проблемы управления. 2011. № 4. С. 68–73.
8. Полянский В. И. Нечеткие множества в моделях и методах диагностирования сложных технических систем: монография. — М.: Полиграф сервис, 2010. — 242 с.
9. Ручкин В. Н., Фулин В. А. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 240 с.
10. Коньшева Л., Назаров Д. Основы теории нечетких множеств. — СПб.: Питер, 2011. — 92 с.
11. Аверкин А. Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. — М.: Книга по Требованию, 2012. — 312 с.
12. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 284 с.
13. Машкин М. Н., Романов О. Т. Интеллектуальные автоматизированные системы в информационных

технологиях: монография. — М.: ВГНА Минфина России, 2011. — 236 с.

14. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 288 с.

15. Яхъяева Г. Нечеткие множества и нейронные сети. — М.: Бином, 2011. — 320 с.

16. Uziel Sandler, Lev Tsitolovsky. Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic. — Springer, 2008. — 478 p.

UDC 621.397.5

Intellectual Information-Diagnostic System for Evaluating Technical Condition of Space Vehicles Onboard Equipment during Pre-Launching Activities

Loskutov A. I.^a, Dr. Sc., Tech., Chief of Chair, rujenz@mail.ru

Patrakov S. S.^a, Applicant, Engineer, patrakovinet@mail.ru

Schestopalova O. L.^b, PhD, Tech., Associate Professor, voshodschestopalova@bk.ru

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197082, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bBranch «Sunrise» of Moscow Aviation Institute, 5, Gagarin St., 468320, Baikonur, Kazakhstan

Purpose: Control and diagnostics represent an integral part of the process of development, testing and maintenance of space vehicles. Imperfection of control and diagnostic devices, decrease of a possibility of reception of complete statistical data on emerging of various defects led to the situation when decisions on a technical condition of onboard equipment of space vehicles are made and control actions are developed in terms of significant uncertainty. The use of intellectual systems is one of the effective ways to solve of the given problem. **Methods:** Development of a special polling matrix for decision procedures of implicative type “If..., Then...” in a factor space of fuzzy variables. Meanwhile it is an expert himself who forms a space for decision making. **Results:** There has been built an information-diagnostic system based on the proposed method of evaluation of operation capacity of an observed telemetric system using implicit expert knowledge, it allows to obtain quantitative estimations of BR-91C operation capacity at any necessary moment of time on the basis of the analysis of current parametric values. There has been worked out algorithmic software for testing space vehicle onboard equipment synthesized on the basis of models and methods of intellectual data processing. The concept of the experiment was to model failures for evaluating a parameter of non-failure operation of the intellectual information-diagnostic system embedded into testing equipment of BR-91C onboard information telemetric system. Quantitative estimations of BR-91C condition in a multidimensional space of fuzzy variables allow to carry out its monitoring that provides the basis for development of flexible maintenance strategy. Quality test of the intellectual fuzzy model has been conducted using direct comparison of results of the application work with results of expert evaluation of independent tests of the onboard information-telemetric system. Gaining on a criterion of point estimation for the parameter of non-failure operation of the developed intellectual system was 5 % compared to the conventional classical approach. Thus, the developed intellectual information-diagnostic system is characterized by the best values of point estimation of a probability of non-failure operation in the course of the conducted experiment. **Practical relevance:** The research results have been used at development of testing and control equipment of space vehicle onboard equipment. They ensure significant lowering of uncertainty at decision making on a technical condition as well as at delivery of testing impacts.

Keywords — Intellectual Information-Diagnostic System, Technical Condition, Fuzzy Logics, Space Vehicle Onboard Equipment.

References

- Goljakov A. D., Mironov V. I., Smirnov V. V. *Ispytaniia sistem raketno-kosmicheskoi tekhniki* [Systems Tests for Space-Rocket Technics]. Saint-Petersburg, VIKKI imeni A. F. Mozhaiskogo Publ., 1992. 398 p. (In Russian).
- Dmitriev A. K., Jusupov R. M. *Identifikatsiia i tekhnicheskaiia diagnostika* [Identification and Technical Diagnostic]. Moscow, MO USSR Publ., 1987. 521 p. (In Russian).
- Dunaev V. V. *Klassifikatsionnye osnovy teorii ispytaniia* [Classification Tests Theory Bases]. Moscow, MO USSR Publ., 1984. 145 p. (In Russian).
- Cherkashin S. V., Shishkin V. V., Dolbnja N. A. *Universal System of Diagnosing of Onboard Electronic Equipment. Izvestiia Samarshkogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, vol. 11, no. 3(2), pp. 392–397 (In Russian).
- Korneev V. V., Gareev A. F., Vasjutin S. V., Rajh V. V. *Bazy dannykh. Intellektual'naia obrabotka informatsii* [Databases. Intellectual Machining of the Information]. Moscow, Nolidzh Publ., 2000. 352 p. (In Russian).
- Kuz'min V., Travkin S. *Nechetkie mnozhestva i teoriiia vozmozhnostei. Poslednie dostizheniia* [Illegible Assemblage and the Theory of Possibilities. Last Achievements]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1986. 408 p. (In Russian).
- Loskutov A. I., Sirotina S. V., Sakulin A. N. *Perfection by Means of Expert System of Tests of Installations of Space-Rocket Technics. Problemy upravleniia*, 2011, no. 4, pp. 68–73 (In Russian).
- Poljanskij V. I. *Nechetkie mnozhestva v modeliakh i metodakh diagnostirovaniia slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Illegible Assemblage in Models and Methods of Diagnosing of Difficult Engineering Systems]. Moscow, Polygraph servis Publ., 2010. 242 p. (In Russian).
- Ruchkin V. N., Fulin V. A. *Universal'nyi iskusstvennyi intellekt i ekspertnye sistemy* [Universal Artificial Intelligence and Expert Systems]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2009. 240 p. (In Russian).
- Konyshcheva L., Nazarov D. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv* [Bases of the Theory of Illegible Assemblage]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2011. 92 p. (In Russian).
- Averkin A. N. *Nechetkie mnozhestva v modeliakh upravleniia i iskusstvennogo intellekta* [Illegible Assemblage in Management and Artificial Intelligence Models]. Moscow, Kniga po Trebovaniuu Publ., 2012. 312 p. (In Russian).
- Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S. *Nechetkie modeli i seti* [Illegible Models and Networks]. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2007. 284 p. (In Russian).
- Mashkin M. N., Romanov O. T. *Intellektual'nye avtomatizirovannye sistemy v informatsionnykh tekhnologiakh* [The Intellectual Automated Systems in Information Technology]. Moscow, VGNA Minfina Rossii Publ., 2011. 236 p. (In Russian).
- Shtovba S. D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Designing of Illegible Systems by Means of MATLAB]. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2007. 288 p. (In Russian).
- Jahjaeva G. *Nechetkie mnozhestva i neuronnye seti* [Illegible Assemblage and Neural Networks]. Moscow, Binom Publ., 2011. 320 p. (In Russian).
- Uziel Sandler, Lev Tsitolovsky. *Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic*. Springer, 2008. 478 p.

УДК 681.324(031)

МЕТОД ФОРМАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ PFDD-ДИАГРАММ IDEF3-ТЕХНОЛОГИИ

Г. С. Бритов^а, канд. техн. наук, доцент

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

Цель: представить разработанный метод формального описания PFDD-диаграмм IDEF3-технологии моделирования технологических процессов в различных объектах, в частности, в системах технического диагностирования, отличающийся от известных методов, основанных на использовании конкретных примеров, тем, что применяются строгие математические понятия общего вида. **Методы:** использована теория бинарных отношений, позволившая понятным и удобным образом описать процесс технологического моделирования по IDEF3-технологии. **Результаты:** разработан метод формального описания диаграмм сценариев технологических процессов (PFDD-диаграмм), используемых в стандартной IDEF3-технологии. Суть метода в том, что с помощью инструментов теории бинарных отношений строятся все необходимые понятия IDEF3-технологии. Благодаря этому процесс технологического моделирования описывается в общем виде на основе предложенных математических формул, которые определяют понятие технологической модели, построенной из также формально определенных PFDD-диаграмм. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют быстро и достаточно просто понять принципы IDEF3-технологии и применить ее для своих конкретных примеров. В статье это сделано для систем технического диагностирования.

Ключевые слова — технологический процесс, IDEF3-технология, PFDD-диаграмма, технологическая модель, четырехместное отношение, проекция отношения, сечение отношения, дерево декомпозиции, дерево узлов.

Введение

Стандарт IDEF3 является составной частью комплекса IDEF и решает задачи технологического моделирования различных процессов, которое подразумевает создание сценариев и описания последовательности операций каждого моделируемого процесса [1, 2]. Для разработки технологических сценариев предназначена IDEF3-технология, которая успешно реализована на базе CASE-средства BPWin [3, 4].

IDEF3-технология используется для описания последовательностей и логики взаимодействия операций и событий в моделируемом процессе. Она обеспечивает разработчика принципами структурированного подхода и графическим языком для наглядного представления событий и действий моделируемого процесса.

Для описания последовательности операций технологического процесса в IDEF3-технологии определены PFDD-диаграммы (*Process Flow Description Diagrams*). Они представляют собой диаграммы потокового описания процесса. Во всех работах, посвященных IDEF3-технологии, PFDD-диаграммы описываются с помощью примеров. Поэтому для понимания принципов их построения сначала необходимо разобраться в тонкостях предлагаемых примеров. С другой стороны, PFDD-диаграммы строятся именно для этого [5, 6].

Целью статьи является разработка метода формального описания PFDD-диаграмм IDEF3-технологии. Аналогичный метод был разработан для формализованного описания диаграмм функционального моделирования IDEF0-технологии [7].

Формальное определение PFDD-диаграмм

Для того чтобы получить формальное определение PFDD-диаграммы, зададим три множества:

- 1) W — множество единиц работы или операций;
- 2) C — множество связей между ними;
- 3) R — множество ссылок, определяющих исполнителей и ресурсы процесса.

Множество связей состоит из двух подмножеств:

$$C = C_s \cup C_f,$$

где C_s — множество связей, определяющих последовательность следования одной операции за другой; C_f — множество связей, показывающих переход потока от одной операции к другой. Следует отметить, что потоки могут быть материальными, сигнальными, финансовыми, людскими и т. д. Такую технологическую модель будем называть потоковой. А при использовании связей типа последовательности — последовательностной технологической моделью. Однако могут быть и смешанные технологические модели, содержащие и потоковые, и последовательностные связи.

Теперь можно дать формальное определение конкретной PFDD-диаграммы как четырехместного отношения [8]:

$$\tau_j = C \times W \times C \times R.$$

Элемент диаграммы представляет собой четверку вида:

— для последовательностной модели

$$\tau_{ji} = (C_{sk}, W_i, C_{sr}, R_m);$$

— для потоковой модели

$$\tau_{ji} = (C_{fk}, W_i, C_{fr}, R_m).$$

Оба этих элемента представлены в условных обозначениях стандарта IDEF3 (рис. 1).

Множество PFDD-диаграмм образует технологическую модель

$$\tau = \{\tau_j\} = C \times W \times C \times R.$$

Для технологической модели с помощью проекций отношения можно выполнить структуризацию связей:

- входные связи $Pr_1\tau = C_{вх} \subset C$;
- выходные связи $Pr_3\tau = C_{вых} \subset C$;
- внутренние связи $C_{вн} = C_{вх} \cap C_{вых}$.

Для технологической модели с помощью сечений отношения можно получить полную информацию, например, о конкретной операции:

$$Sc_{W_i} = C_{вх} \times C_{вых} \times R.$$

Здесь для данной операции описаны ее входы, выходы и исполнители.

Технологическая модель как множество упорядочена с помощью бинарного отношения

$$\rho = \tau \times \tau.$$

Описывающий это отношение граф можно назвать деревом декомпозиции, так как он имеет вершину — контекстную диаграмму и ветви — диаграммы декомпозиции. Представить дерево декомпозиции целесообразно с помощью сечений [9]:

$Pr_1\rho$	τ_0	τ_1
τ/ρ	$\{\tau_1\}$	$\{\tau_2, \tau_3\}$

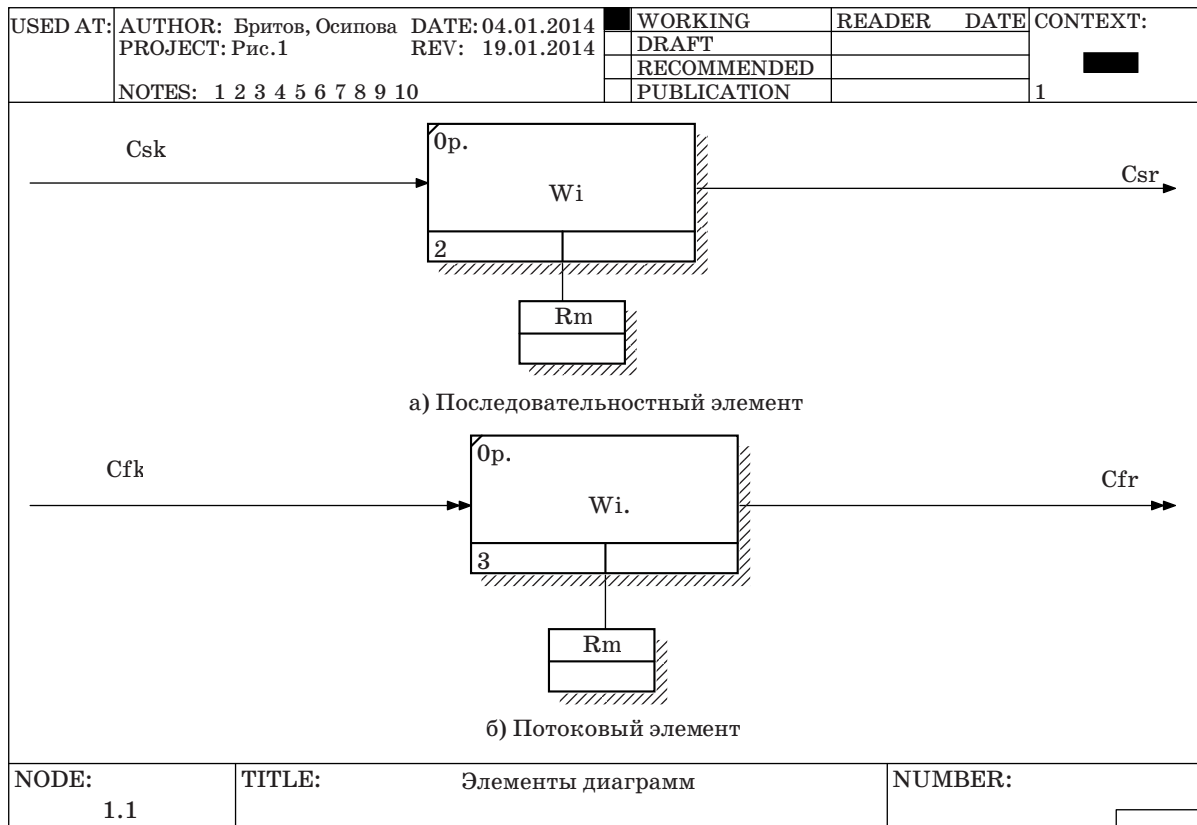
Контекстная диаграмма τ_0 связана с диаграммой τ_1 второго уровня декомпозиции, а она порождает две диаграммы τ_2, τ_3 третьего уровня.

Стандарт IDEF3 определяет и реализует в CASE-средстве *BPWin* более информативное дерево узлов для бинарного отношения $\sigma = W \times W$.

Сечения дерева узлов могут иметь следующий вид:

$Pr_1\sigma$	W_0	W_1	W_2
W/σ	$\{W_1, W_2\}$	$\{W_3, W_4\}$	$\{W_5, W_6\}$

Здесь дерево узлов является бинарным графом-деревом, в котором каждая операция декомпозируется на две операции нижнего уровня. Несомненно, наблюдать за декомпозицией операций полезнее, чем за декомпозицией диаграмм.



■ Рис. 1. Элементы PFDD-диаграммы

Виды PFDD-диаграмм

Вид PFDD-диаграммы зависит от характера моделируемого технологического процесса. Предложенное описание PFDD-диаграммы позволяет формально рассмотреть различные виды диаграмм.

Самым простым технологическим процессом является цепочка операций. На рис. 2 показан пример цепочки из трех операций.

Отношение последовательностной цепочки задается четверками вида

$$\tau_1 = \{(\emptyset, W_1, C_{s1}, R_1), (C_{s1}, W_2, C_{s2}, R_2), (C_{s2}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Отношение потоковой цепочки задается четверками вида

$$\tau_2 = \{(\emptyset, W_1, C_{f1}, R_1), (C_{f1}, W_2, C_{f2}, R_2), (C_{f2}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Нетрудно убедиться, что для цепочек выполняется условие

$$\exists W_i, W_j \in W \text{ Pr}_3 Sc_{W_i} \tau_1 = \text{Pr}_1 Sc_{W_j} \tau_1.$$

Для примера, показанного на рис. 2, а), получим

$$\text{Pr}_3 Sc_{W_2} \tau_1 = C_{s2}; \text{Pr}_1 Sc_{W_3} \tau_1 = C_{s2}.$$

Это означает, что выход операции W_2 является входом операции W_3 . Если бы цепочка операций была длиннее, то указанных условий было бы больше.

В технологических процессах обычно осуществляются разветвления. Они связаны с необходимостью выполнять после конкретной операции одну или другую операцию в зависимости от ситуации. Стандарт IDEF3 определяет условные обозначения для разветвлений типа перекресток. Типы перекрестков-разветвлений хорошо описаны в работе [4]. На рис. 3 показаны два типа разветвлений.

Отношение последовательностного O-разветвления задается четверками вида

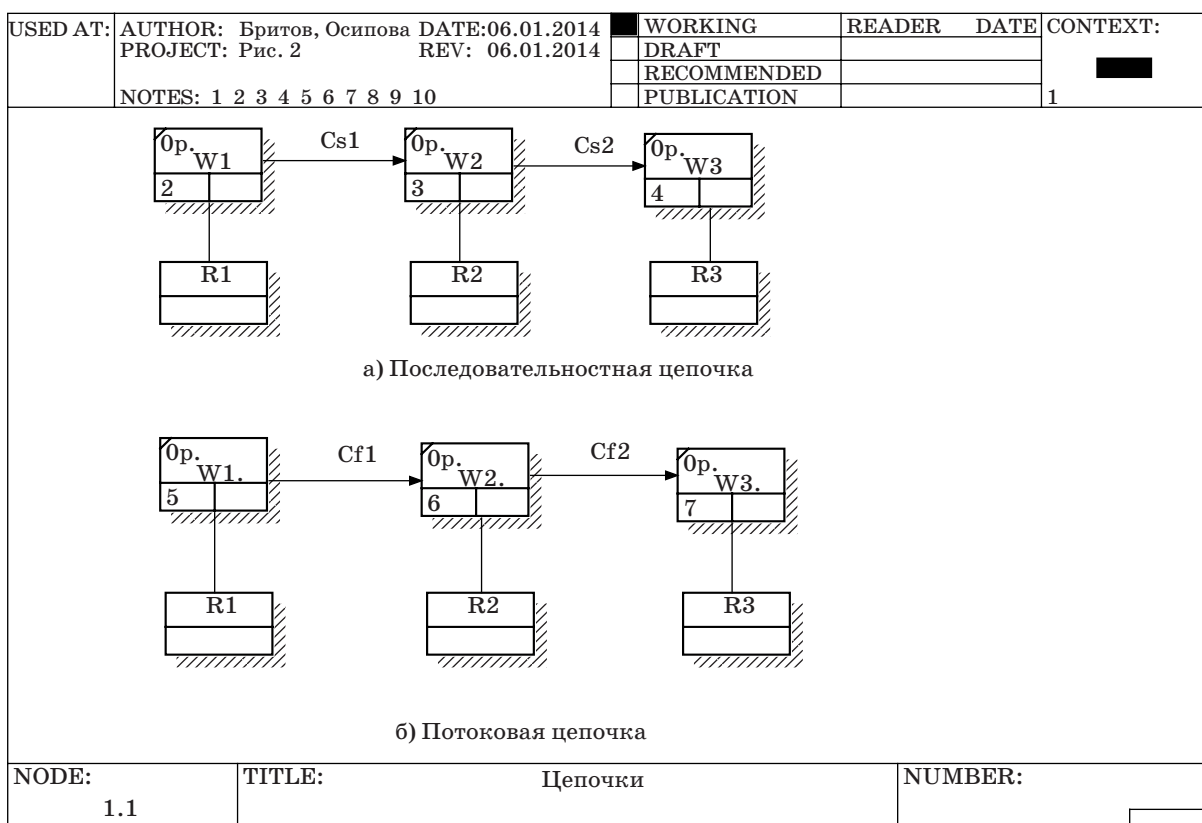
$$\tau_1 = \{(\emptyset, W_1, C_{s1}, R_1), (C_{s2}, W_2, \emptyset, R_2), (C_{s3}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Отношение потокового &-разветвления задается четверками вида

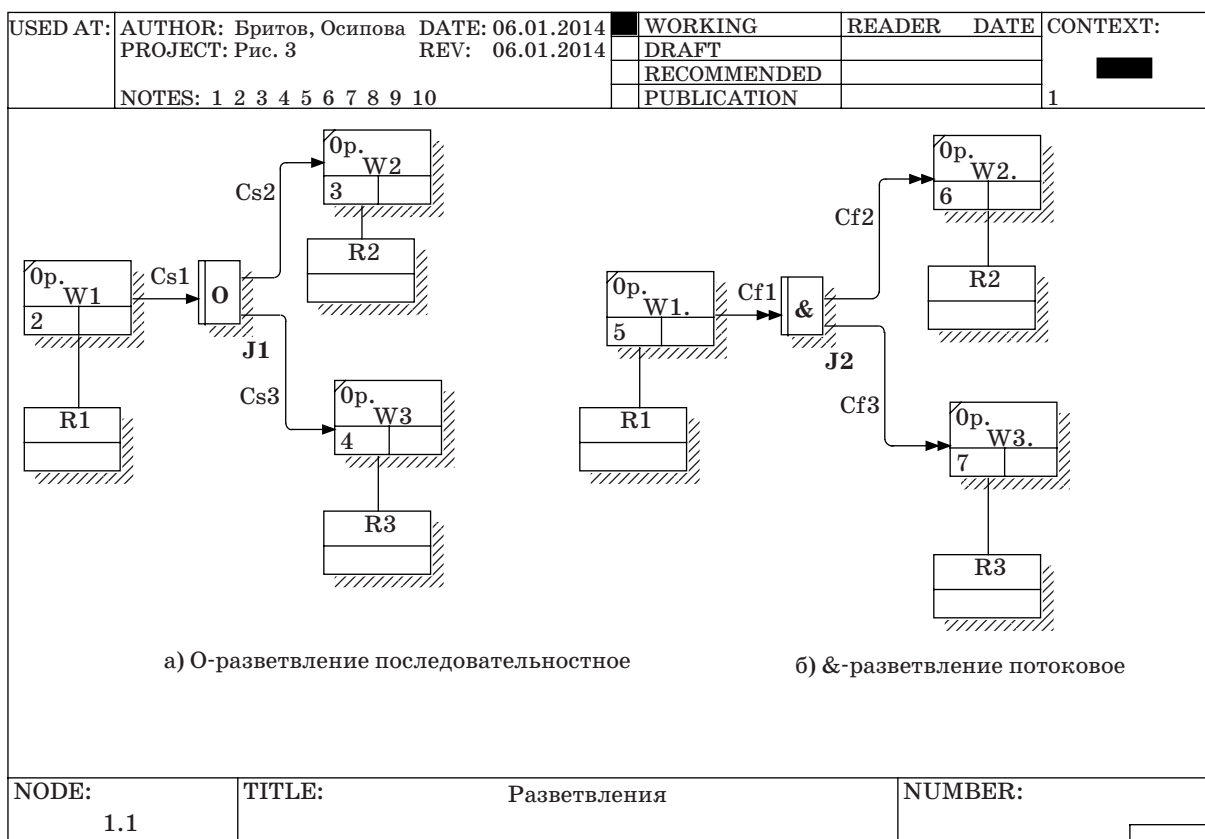
$$\tau_2 = \{(\emptyset, W_1, C_{f1}, R_1), (C_{f2}, W_2, \emptyset, R_2), (C_{f3}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Нетрудно убедиться, что для разветвлений выполняется условие

$$\exists W_i, W_j, W_k : \text{Pr}_3 Sc_{W_i} \tau_1 = \text{Pr}_1 Sc_{W_j} \tau_1 \cup \text{Pr}_1 Sc_{W_k} \tau_1.$$



■ Рис. 2. Технологические процессы типа цепочки



■ Рис. 3. Разветвленные технологические процессы

Для примера, показанного на рис. 3, а), получим

$$\begin{aligned} Pr_3 Sc_{W_1} \tau_1 = C_{s1}; Pr_1 Sc_{W_2} \tau_1 = C_{s2}; \\ Pr_1 Sc_{W_3} \tau_1 = C_{s3}; C_{s1} = C_{s2} \cup C_{s3}. \end{aligned}$$

Это означает, что выход операции W_1 является объединением входов операций W_2 и W_3 . Другими словами, выход операции W_1 разветвляется на два входа соответствующих операций. Очевидно, что разветвлений может быть больше.

В технологических процессах возможны слияния. Они связаны с необходимостью выполнять после нескольких конкретных операций одну следующую операцию. Стандарт IDEF3 определяет условные обозначения для слияний типа перекресток. Типы перекрестков-слияний представлены в работе [4]. На рис. 4 показаны два типа слияний.

Отношение последовательного O-слияния задается четверками вида

$$\tau_1 = \{(\emptyset, W_1, C_{s1}, R_1), (\emptyset, W_2, C_{s2}, R_2), (C_{s3}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Отношение потокового &-слияния задается четверками вида

$$\tau_2 = \{(\emptyset, W_1, C_{f1}, R_1), (\emptyset, W_2, C_{f2}, R_2), (C_{f3}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Нетрудно убедиться, что для слияний выполняется условие

$$\exists W_i, W_j, W_k : Pr_1 Sc_{W_i} \tau_1 = Pr_3 Sc_{W_j} \tau_1 \cup Pr_3 Sc_{W_k} \tau_1.$$

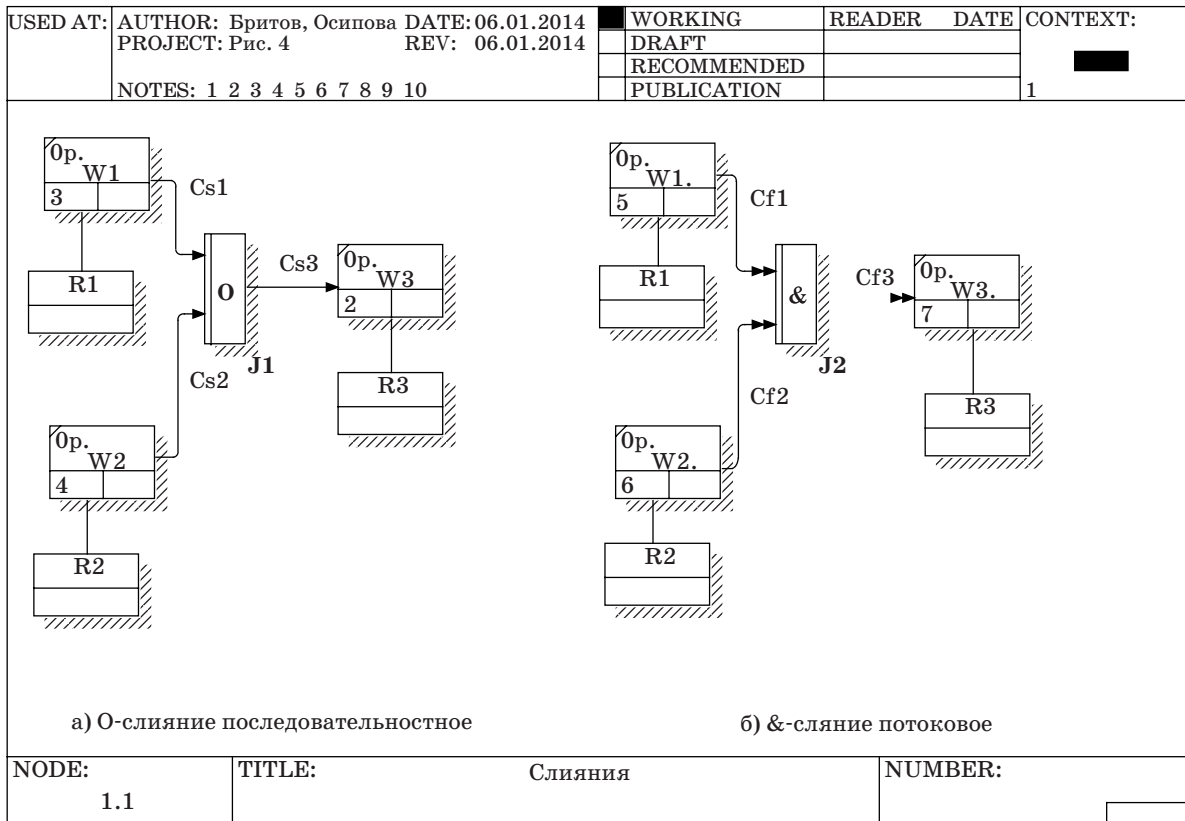
Для примера, показанного на рис. 4, а), получим

$$\begin{aligned} Pr_1 Sc_{W_3} \tau_1 = C_{s3}; Pr_3 Sc_{W_1} \tau_1 = C_{s1}; \\ Pr_3 Sc_{W_2} \tau_1 = C_{s2}; C_{s3} = C_{s1} \cup C_{s2}. \end{aligned}$$

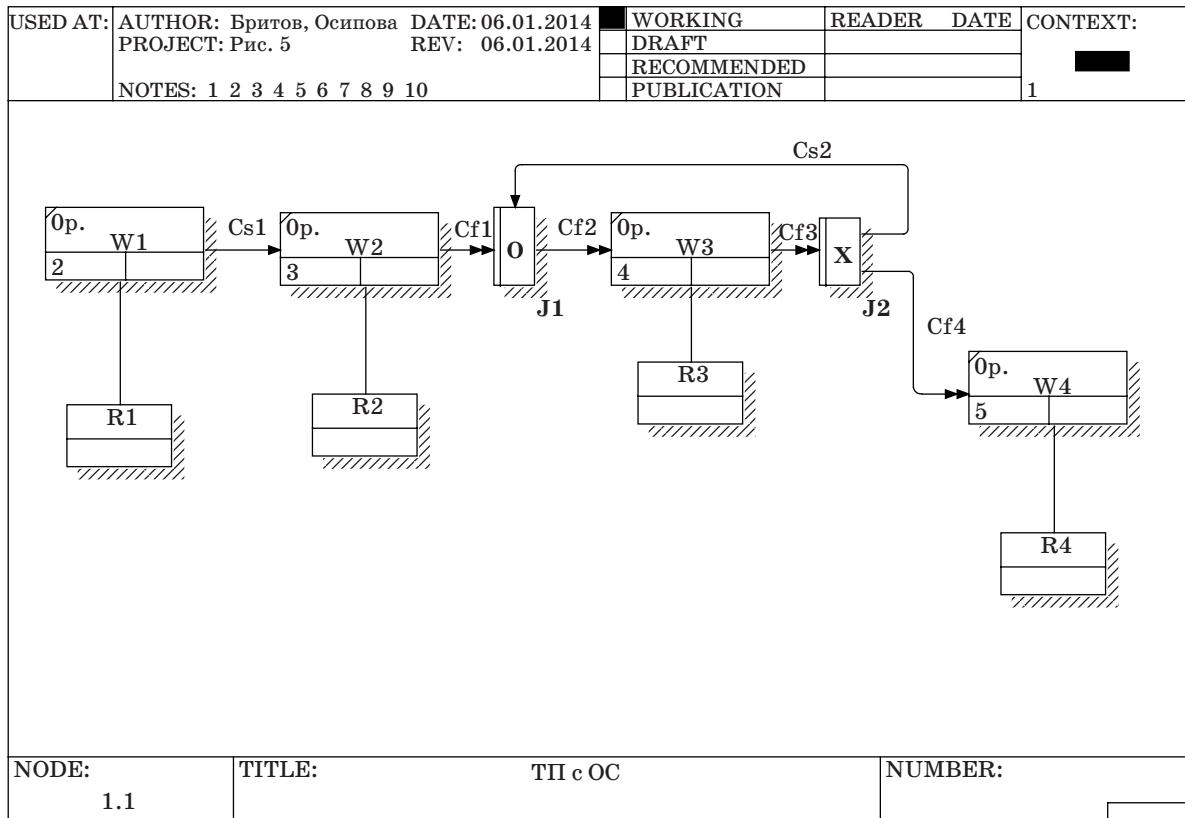
Это означает, что вход операции W_3 является объединением выходов операций W_1 и W_2 . Другими словами, вход операции W_3 является слиянием двух выходов соответствующих операций. Очевидно, что таких слияний может быть больше.

В технологических процессах возможны «узкие места». Они могут быть связаны с появлением обратных связей. Стандарт IDEF3 определяет условное обозначение для разветвления типа X-перекресток [4]. С его помощью моделируется обратная связь (рис. 5).

Из диаграммы, показанной на рис. 5, следует, что условия существования обратной связи соответствуют одновременному выполнению условий существования X-разветвления и O-слияния для операций, участвующих в обратной связи.



■ Рис. 4. Технологические процессы со слияниями



■ Рис. 5. Технологический процесс с обратной связью

Для примера, показанного на рис. 5, получим

$$\begin{aligned} Pr_1 Sc_{W_3} \tau_1 &= C_{f2}; Pr_3 Sc_{W_2} \tau_1 = C_{f1}; \\ Pr_3 Sc_{W_3} \tau_1 &= C_{f3}; Pr_1 Sc_{W_4} \tau_1 = C_{f4}; \\ C_{f3} &= C_{f4} \cup C_{s2}, C_{f2} = C_{f1} \cup C_{s2}. \end{aligned}$$

Это означает, что выход операции W_3 является объединением входа операции W_4 и выхода C_{s2} , а вход операции W_3 является объединением выхода операции W_2 и выхода C_{s2} . Другими словами, выход операции W_3 разветвляется на вход операции W_4 и выход C_{s2} , а на входе операции W_3 происходит слияние выхода операции W_2 и выхода C_{s2} .

Таким образом, формальное описание PFDD-диаграмм дает возможность не только получить общее представление об этом инструменте моделирования технологических процессов, но и формально описать возможные виды процессов. Опираясь на формальное описание PFDD-диаграммы, можно выполнить вероятностный анализ исследуемого объекта [10].

Моделирование технологических процессов в системах технического диагностирования

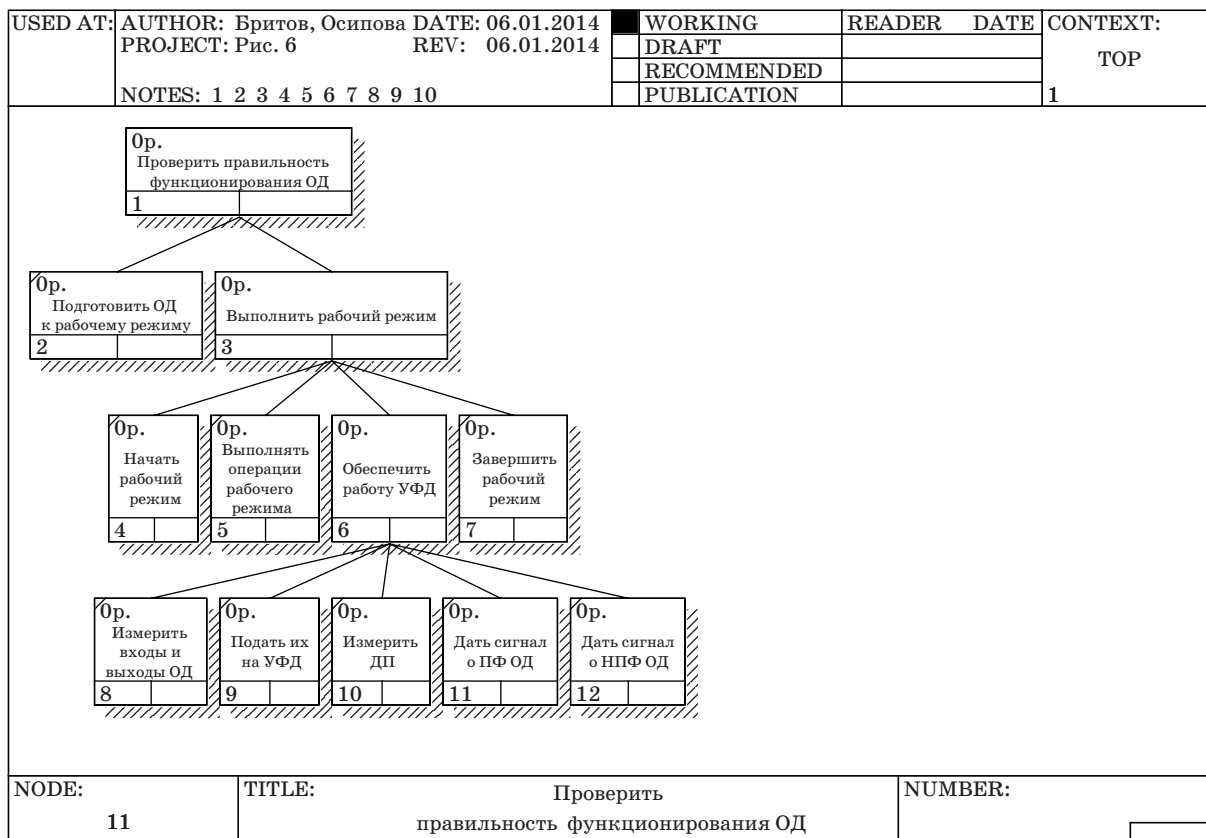
Системы технического диагностирования предназначены для определения технического состо-

яния объекта диагностирования (ОД). Они решают две задачи:

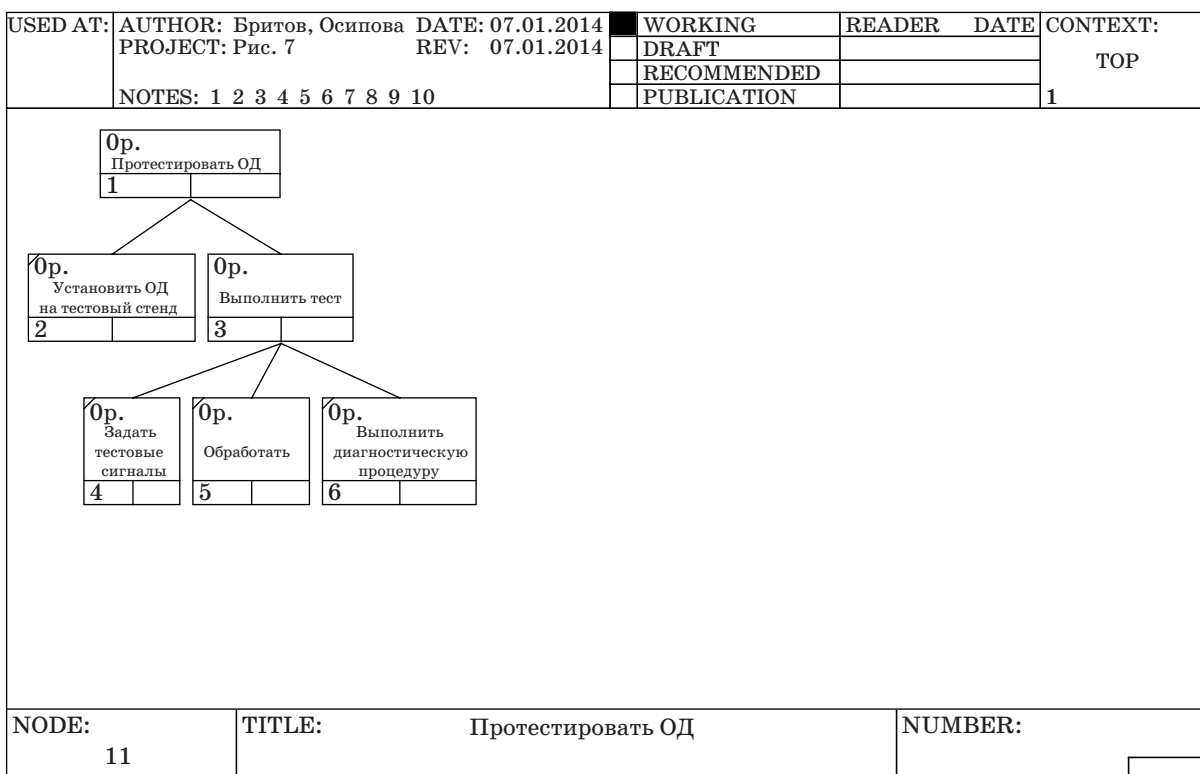
- определение правильного функционирования ОД [11, 12],
- тестирование ОД, фиксирующее его исправность или работоспособность [13].

Система технического диагностирования, решающая первую задачу, строится с использованием устройства функционального диагностирования. Его расчет для ОД вида линейной системы автоматического управления приведен в работе [14]. В рабочем режиме ОД с помощью устройства функционального диагностирования формируется диагностический признак, который позволяет определить, правильно или неправильно функционирует ОД. В процессе моделирования такой системы функционального диагностирования были построены четыре PFDD-диаграммы, образующие четырехуровневое дерево декомпозиции технологической модели системы функционального диагностирования типа цепочки. Дерево узлов технологической модели системы функционального диагностирования показано на рис. 6.

Система технического диагностирования, решающая вторую задачу, основана на расчете специального тестового режима, результаты которого должны быть известны. Другой вариант системы



■ Рис. 6. Дерево узлов системы функционального диагностирования: УФД — устройство функционального диагностирования; ДП — диагностический признак; ПФ, НПФ — правильное и неправильное функционирование



■ Рис. 7. Дерево узлов системы тестового диагностирования

тестового диагностирования связан с расчетом специального тестера, который вводит ОД в тестовый режим. Расчет такого тестера для ОД типа линейной системы управления приведен в работе [15].

Для системы тестового диагностирования была построена технологическая модель, включающая три PFDD-диаграммы. Они образуют трехуровневое дерево декомпозиции типа цепочки. Дерево узлов технологической модели системы тестового диагностирования показано на рис. 7. При построении модели полагалось, что для тестового диагностирования для ОД рассчитывается тестовый режим. Он должен быть реализован с помощью тестового стенда, на который устанавливается ОД. Тестовые сигналы подаются на ОД, обрабатываются и поступают в диагностическую процедуру. Здесь формируются результаты тестирования, определяющие, есть дефекты в ОД или их нет.

В статье не приводятся сами PFDD-диаграммы систем функционального и тестового диагностирования, так как они требуют слишком много

места. Кроме того, их подробное изучение может быть интересно небольшому числу специалистов.

Заключение

Формальное описание PFDD-диаграмм IDEF3-технологии позволяет получить о них самое общее представление. Появляется возможность увидеть процесс технологического моделирования в общем виде. При этом нет необходимости изучать какой-нибудь пример технологического процесса для овладения IDEF3-технологией. С другой стороны, поняв принципы технологического моделирования в общем виде, можно легко и просто построить модель конкретного технологического процесса, интересного разработчику. Приведенные примеры деревьев узлов моделей технологических процессов в системах технического диагностирования показывают, как можно построить требуемые модели любой сложности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 14-08-00327, 14-08-00399.

Литература

1. Черемных С. В., Семенов И. О., Ручкин В. С. Структурный анализ систем: IDEF-технология. — М.: Финансы и статистика, 2001. — 208 с.

2. Елиферов В. Г., Репин В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. — М.: Стандарты и качество, 2007. — 398 с.
3. Вендров А. М. CASE-средства. Современные методы и средства проектирования информационных

систем. — М.: Финансы и статистика, 1998. — 176 с.

4. Маклаков С. В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite. — М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. — 432 с.
5. Федотова Д. Э., Семенов Ю. Д., Чижик К. Н. CASE-технологии. — М.: Горячая линия–Телеком, 2003. — 160 с.
6. Калянов Г. Н. Моделирование, анализ, реорганизация и автоматизация бизнес-процессов. — М.: Финансы и статистика, 2006. — 240 с.
7. Бритов Г. С. Методология системного моделирования // Вестник молодых ученых. 2004. № 8. С. 3–16.
8. Вагнер В. В. Теория отношений и алгебра частичных отображений // Теория полугрупп и ее приложения/ СГУ. Саратов, 1965. Вып. 1. С. 3–179.
9. Кузнецов О. П. Дискретная математика для инженера. — СПб.: Лань, 2005. — 395 с.
10. Бритов Г. С., Лупал А. В. Вероятностный анализ состояний IDEF3-моделей технологических процессов // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5. С. 21–25.
11. Безмен Г. В., Колесов Н. В. Функциональное диагностирование линейных динамических систем с использованием нечеткого анализа // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5. С. 67–74.
12. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — 256 с.
13. Мироновский Л. А. Тестовый контроль передаточных функций стационарных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 1989. № 10. С. 22–26.
14. Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Автоматизированное проектирование устройств функционального диагностирования // Информационно-управляющие системы. 2010. № 2. С. 55–61.
15. Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Расчет тестового режима линейных систем управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 11. С. 44–49.

UDC 681.324(031)

A Method for Formal Definition of PFDD-Diagrams of IDEF3-Technology

Britov G. S.^a, PhD, Tech., Associate Professor, britovgs@gmail.com

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

Purpose: To represent the developed method for formal definition of PFDD-Diagrams of IDEF3-Technology for modeling technological processes in various objects, in particular, in systems of technical diagnostics. The method differs from the known ones based on use of certain examples by the fact that strict mathematical concepts of standard form are applied. **Methods:** There has been used the theory of binary relations which provided easy and convenient description of the process of technical simulation according to IDEF3-Technology. **Results:** There has been developed a method for formal definition of technological process scenario diagrams (PFDD-diagrams) applied in the standard IDEF3-Technology. The essence of the method is that all necessary concepts of IDEF3-Technology are constructed with a help of the theory of binary relations. Due to this fact the process of technological modeling is described in the standard form based on the proposed mathematical formulae which define concepts of a technological model built from formally defined PFDD-diagrams. **Practical relevance:** The obtained results ensure quick and rather easy understanding of IDEF3-principles and allow using them for specific applications. The paper shows their use for systems of technical diagnostics.

Keywords — Technological Process, IDEF3-Technology, PFDD-Diagram, Technological Model, Quarter Relation, Projection of Relation, Section of Relations, Decomposition Tree, Nodes Tree.

References

1. Cherenykh S. V., Semenov I. O., Ruchkin V. S. *Strukturnyi analiz sistem: IDEF-tekhnologii* [Structured Analysis of Systems: IDEF-Technology]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2001. 208 p. (In Russian).
2. Eliferov V. G., Repin V. V. *Protsessnyi podkhod k upravleniiu. Modelirovanie biznes-protsessov* [Process Approach to Control. Modeling of Business Processes]. Moscow, Standarty i kachestvo Publ., 2007. 398 p. (In Russian).
3. Vendrov A. M. *CASE-sredstva. Sovremennye metody i sredstva proektirovaniia informatsionnykh sistem* [CASE-Funds. Modern Methods and Funds for Design Informational Systems]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1998. 176 p. (In Russian).
4. Maklakov S. V. *Sozdanie informatsionnykh sistem s AllFusion Modeling Suite* [Design Informational Systems by AllFusion Modeling Suite]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2003. 432 p. (In Russian).
5. Fedotova D. E., Semenov U. D., Chizhik K. N. *CASE-tehnologii* [CASE-Technology]. Moscow, Goriachaja liniia–Telekom Publ., 2003. 160 p. (In Russian).
6. Kaljanov G. N. *Modelirovanie, analiz, reorganizatsiia i avtomatizatsiia biznes-protsessov* [Modeling, Analysis, Organization and Automatically Business Processes]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2006. 240 p. (In Russian).
7. Britov G. S. Methodology System Simulation. *Vestnik molodykh uchenykh*, 2004, no. 8, pp. 3–16 (In Russian).
8. Vagner V. V. Relation Theory and Algebra of Partial Reflections. *Teoriia polugrupp i ee prilozheniia*. Saratov, SGU Publ., 1965, vol. 1, pp. 3–179 (In Russian).
9. Kuznecov O. P. *Diskretnaia matematika dlia inzhenera* [Digital Mathematic for Engineer]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2005. 395 p. (In Russian).
10. Britov G. S., Lupal A. V. Probability Analysis of IDEF3 Models States of Technological Processes. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2009, no. 5, pp. 21–25 (In Russian).
11. Bezmen G. V., Kolesov N. V. Functional Diagnostics of Linear Dynamic Systems Using Fuzzy. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2009, no. 5, pp. 67–74 (In Russian).
12. Mironovsky L. A. *Funkcional'noe diagnostirovanie dinami-cheskikh sistem* [Functional Diagnostics of Linear Dynamic Systems]. Moscow, MGU Publ., 1998. 256 p. (In Russian).
13. Mironovsky L. A. Test Checking of Transfer Functions of Stationary Objects. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 1989, no. 10, pp. 22–26 (In Russian).
14. Britov G. S., Mironovsky L. A. Automated Design of Functional Devices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2010, no. 2, pp. 55–61 (In Russian).
15. Britov G. S., Mironovsky L. A. Estimation Testing Procedure of Linear Control Systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2006, no. 11. pp. 44–49 (In Russian).

УДК 629.7.085.2

АЛГОРИТМ РЕКОНСТРУКЦИИ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ

Г. Н. Мальцев^а, доктор техн. наук, профессор

А. В. Назаров^а, канд. техн. наук, доцент

В. Л. Якимов^а, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Цель: разработка прогнозной модели состояния нелинейной динамической системы на основе реконструкции ее фазового пространства. **Результаты:** сформулирована общая постановка задачи прогнозирования состояния динамической системы на основе реконструкции аттрактора (предельного множества точек) ее фазового пространства с использованием системы дискретных отображений наблюдаемых параметров. Разработан алгоритм реконструкции фазового пространства динамической системы по временному ряду одного из ее параметров, включающий разбиение исходной временной реализации на обучающую и тестовую выборки и их предварительную обработку; оценку размерности фазового пространства; определение необходимого для реконструкции аттрактора количества точек временного ряда; анализ сечений аттрактора; определение размерности и построение прогнозной модели в виде системы дискретных отображений; оптимизацию модели и ее тестирование. Приводится пример прогнозной модели телеметрического параметра бортовой динамической системы космического аппарата. Для рассмотренного примера определено время упреждения прогноза и продемонстрированы возможности предварительной обработки анализируемых временных рядов с использованием алгоритмов исключения аномальных отсчетов и сглаживания. **Практическая значимость:** реконструкция фазового пространства динамической системы позволяет аналитическим путем оценить параметры синтезируемой прогнозной модели и ускорить решение задачи оптимизации ее характеристик. Полученные алгоритмы и модель использованы в программном комплексе обработки телеметрической информации.

Ключевые слова — динамическая система, прогнозная модель, фазовое пространство, аттрактор, телеметрическая информация.

Введение

Одной из задач технической диагностики сложных технических систем является задача прогнозирования изменений параметров их технического состояния (ТС) в процессе функционирования. Данная задача решается, например, при испытаниях и летной эксплуатации объектов ракетно-космической техники в процессе обработки телеметрической информации [1, 2]. При этом в динамике функционирования сложных технических систем некоторые параметры их ТС могут иметь сложный нелинейный характер как следствие шумов измерений, а также отказов и неисправностей отдельных функциональных узлов, что требует использования нелинейных прогнозных моделей [3–6]. В настоящей работе рассматривается один из подходов к построению прогнозных моделей параметров ТС динамических систем, относящихся к классу самоорганизующихся систем, основанный на реконструкции фазового пространства, характеризующего изменение их ТС.

Общая постановка задачи разработки алгоритма реконструкции фазового пространства динамической системы

В нелинейной динамике свойства сложных технических систем рассматривают в фазовом пространстве состояний [5–7]. В соответствии

с теоремой Такенса, формулирующей требования к реконструкции фазового пространства динамических систем, их поведение можно описать по временной реализации одного из параметров системы с использованием метода задержек [8–10]. При этом параметр динамической системы должен быть представлен дискретными отсчетами: $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{M-1}$, где M — количество отсчетов экспериментальной реализации параметра, полученных с интервалом Δt , который обычно выбирается равным времени первого пересечения нуля автокорреляционной функцией временного ряда. Для цифровых телеметрических систем значение Δt кратно периоду дискретизации телеметрируемого параметра [9, 10].

Под состояниями динамической системы будем понимать точки $S_0 = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}]$, $S_1 = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$, ..., $S_{M-N} = [x_{M-N}, x_{M-N+1}, x_{M-N+2}, \dots, x_{M-1}]$ в N -мерном фазовом пространстве, где число состояний составляет $M - N + 1$, а координаты $x_k, x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_{k+N-1}$ представляют собой значения параметров k -го состояния и образуют траекторию. Порядок формирования векторов состояния из элементов временного ряда параметра динамической системы должен быть одинаковым для всех k -х состояний. Если анализируемая динамическая система обладает свойством самоорганизации, то с течением времени траектории ее состояний, выходящие из различных начальных точек фазового пространства,

стремятся собраться в некоторых сравнительно небольших областях фазового пространства и в дальнейшем их не покидают. Такие области получили названия аттракторов [9, 10]. Аттрактор характеризует процесс, происходящий в самоорганизующейся динамической системе, который может рассматриваться как выделение некоторого числа параметров (существенных переменных) системы, определяющих ее динамику.

Аттрактор представляет собой множество точек фазового пространства, на которое выходит самоорганизующаяся система при устремлении времени протекания процесса ее функционирования в бесконечность, и может быть использован при прогнозировании ее состояния. Алгоритм реконструкции позволяет найти размерность фазового пространства N , в котором необходимо рассматривать аттрактор (размерность вложения) и получить математическую модель динамической системы. Если модель найдена, то она должна с заданной точностью воспроизводить имеющиеся экспериментальные реализации параметров системы и давать прогноз последующего состояния динамической системы по предыдущему состоянию на заданное время упреждения прогноза T . Такая прогнозная модель параметра ТС динамической системы имеет вид системы дискретных отображений [10, 11]

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= f_1(x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-N+1}); \\ x_{i+2} &= f_2(x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-N+1}); \\ &\dots \\ x_{i+N} &= f_N(x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-N+1}), \end{aligned} \quad (1)$$

где x_i — дискретные отсчеты параметра ТС, рассмотренные в моменты времени $i\Delta t$; i — номер дискретного отсчета параметра ТС, $i = N - 1, N, \dots, M - N - 1$.

Функции в правой части выражения (1) связывают параметры предыдущего и последующего состояний в фазовом пространстве динамической системы, разнесенных во времени на интервал $T = N\Delta t$. Данные функции можно аппроксимировать полиномами степени n :

$$\begin{aligned} f_v(x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-N+1}) &= \\ &= \sum_{l_0, l_1, \dots, l_{N-1}=0}^n A_{v, l_0, l_1, \dots, l_{N-1}} \prod_{z=0}^{N-1} x_{i-z}^{l_z}, \quad \sum_{z=0}^{N-1} l_z \leq n. \end{aligned} \quad (2)$$

В выражении (2) $A_{v, l_0, l_1, \dots, l_{N-1}}$ — коэффициенты v -го полинома, которые могут быть найдены с помощью метода наименьших квадратов; l_z — составляющие степени компонентов полиномов. В модели (1) размерность фазового пространства N определяет время упреждения прогноза $T = N\Delta t$. Параметрами модели (1) являются размерность фазового пространства N и степень полиномов n .

Для повышения точности прогноза зашумленных параметров ТС необходимо использовать алгоритмы исключения аномальных отсчетов и сглаживания. В настоящей работе в качестве таких алгоритмов рассматриваются алгоритм исключения аномальных отсчетов, основанный на вычислении соседних разностей в пределах окна заданной размерности, и алгоритм сглаживания на основе преобразования Фурье. Данные алгоритмы обработки были синтезированы как итерационные и имеют следующие настраиваемые параметры: K — количество итераций алгоритма исключения аномальных отсчетов; $F_{гр}$ — значение граничной частоты (частоты среза) фильтра нижних частот.

Для оценки точности прогноза используются следующие статистические показатели: E_1 — среднеквадратическая относительная погрешность между прогнозными и сглаженными значениями параметра; E_2 — среднеквадратическая относительная погрешность между прогнозными и исходными несглаженными значениями параметра. Первый показатель характеризует возможности используемой модели (1), а второй — вклад в точность прогноза алгоритмов исключения аномальных отсчетов и сглаживания. Кроме того, для оценки прогноза используются вероятностные показатели достоверности прогноза G_1 и G_2 , представляющие собой вероятности того, что значения E_1 и E_2 не превысят заданного значения $E_{задан} = 0,05$ с доверительной вероятностью $P_{задан} = 0,99$.

В алгоритме реконструкции фазового пространства должна быть предусмотрена возможность оптимизировать параметры модели (1) и используемых алгоритмов обработки в соответствии с критериями $E_1, E_2(K, F_{гр}, n, N) \rightarrow \min$ и $G_1, G_2(K, F_{гр}, n, N) \rightarrow \max$ при ограничении $E_1, E_2 \leq E_{задан}$.

Описание алгоритма и результаты моделирования

В качестве примера рассмотрим реконструкцию фазового пространства одной из бортовых динамических систем космического аппарата, обладающей свойством самоорганизации, по значениям временного ряда одного из ее параметров. Данный параметр нелинейный, характеризуется сложным поведением во времени, содержит аномальные отсчеты и шумы. Исходная выборка значений параметра была получена по реальным данным телеметрирования бортовой аппаратуры космического аппарата с интервалом дискретизации $\Delta t = 3$ мин.

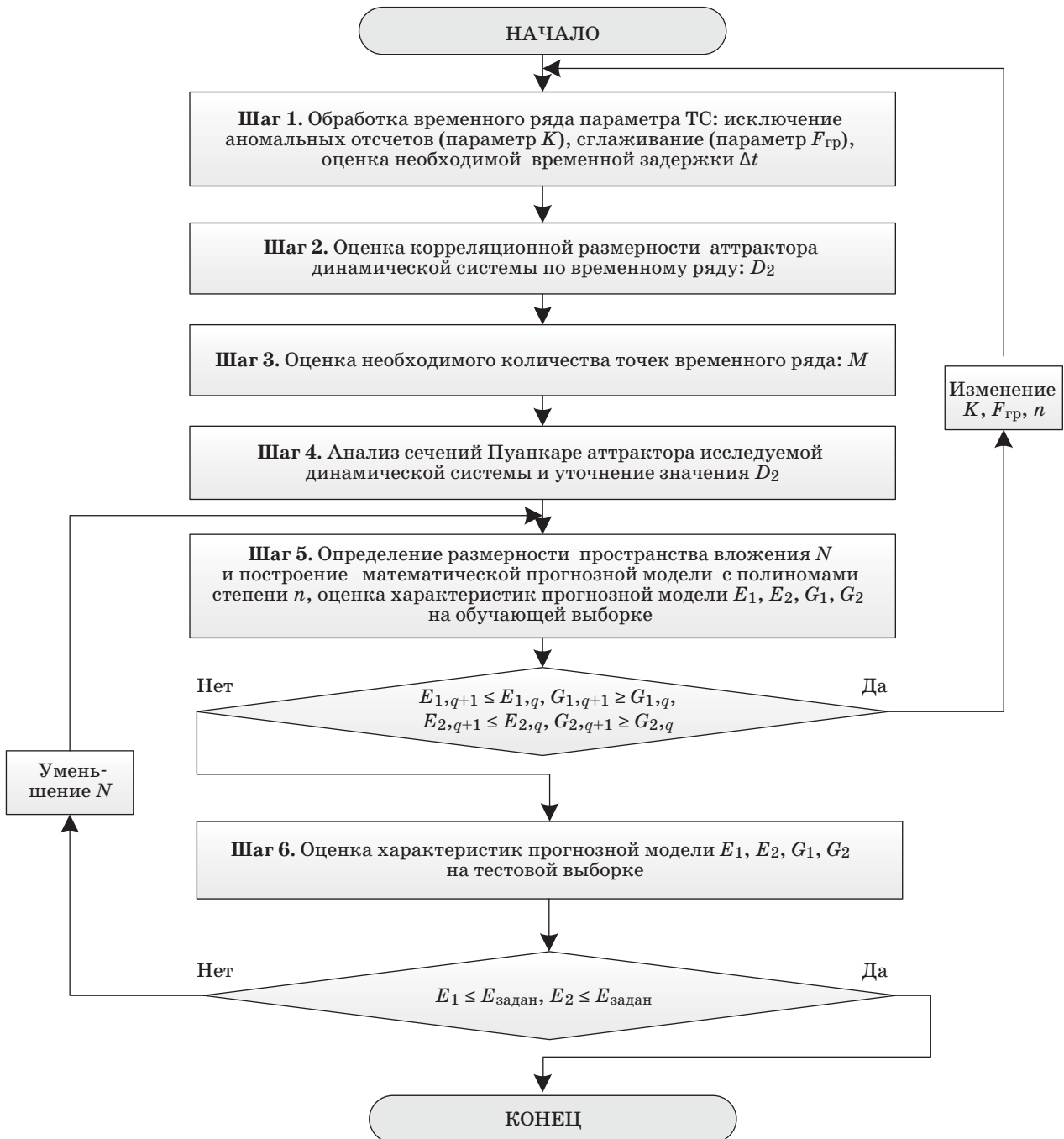
Структурная схема алгоритма реконструкции фазового пространства динамической системы по временному ряду анализируемого параметра

и построения прогнозной модели вида (1) представлена на рис. 1.

На **шаге 1** исходная временная реализация значений анализируемого параметра разбивается на две — обучающую и тестовую. Первая необходима для разработки модели вида (1), а вторая — для проверки ее работоспособности. Затем выполняется первичная обработка параметра с использованием алгоритмов исключения аномальных

отсчетов и сглаживания случайной составляющей и по исходной временной реализации параметра с использованием ее автокорреляционной функции уточняется значение временного интервала Δt . При необходимости осуществляется прореживание временного ряда значений телеметрируемого параметра.

На **шаге 2** по имеющейся временной реализации анализируемого параметра оценивается



■ **Рис. 1.** Схема алгоритма реконструкции фазового пространства динамической системы по временному ряду параметра и синтеза прогнозной модели

размерность аттрактора. При этом используется корреляционная размерность [9]

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(C(\varepsilon))}{\ln(\varepsilon)}, \quad (3)$$

где $C(\varepsilon) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m^2} \sum_{k,j=0}^{m-1} \theta(\varepsilon - \|\mathbf{S}_k - \mathbf{S}_j\|)$ — показатель,

характеризующий вероятность того, что две точки на фазовой траектории динамической системы будут находиться друг от друга на расстоянии, не превышающем заданного; ε — заданное расстояние между парой точек в N -мерном фазовом пространстве; $\mathbf{S}_k, \mathbf{S}_j$ — векторы состояния динамической системы из начала координат к точкам фазовой траектории с номерами k, j ;

$$\theta = \begin{cases} 1, & (\varepsilon - \|\mathbf{S}_k - \mathbf{S}_j\|) \geq 0 \\ 0, & (\varepsilon - \|\mathbf{S}_k - \mathbf{S}_j\|) < 0 \end{cases} \quad \text{— функция Хевисайда;}$$

m — число точек фазовой траектории. Для определения расстояния ε между парами точек в N -мерном фазовом пространстве при вычислении показателя C часто используют евклидову метрику и скорректированную евклидову метрику, при которой евклидово расстояние между парами точек нормируется на размерность фазового пространства N .

Корреляционная размерность (3) получает широкое практическое применение в нелинейной динамике и входит в семейство размерностей Реньи (в это же семейство входят размерность Хаусдорфа — Безиковича, информационная раз-

мерность и др.). При значительном времени наблюдения за объектом можно полагать, что

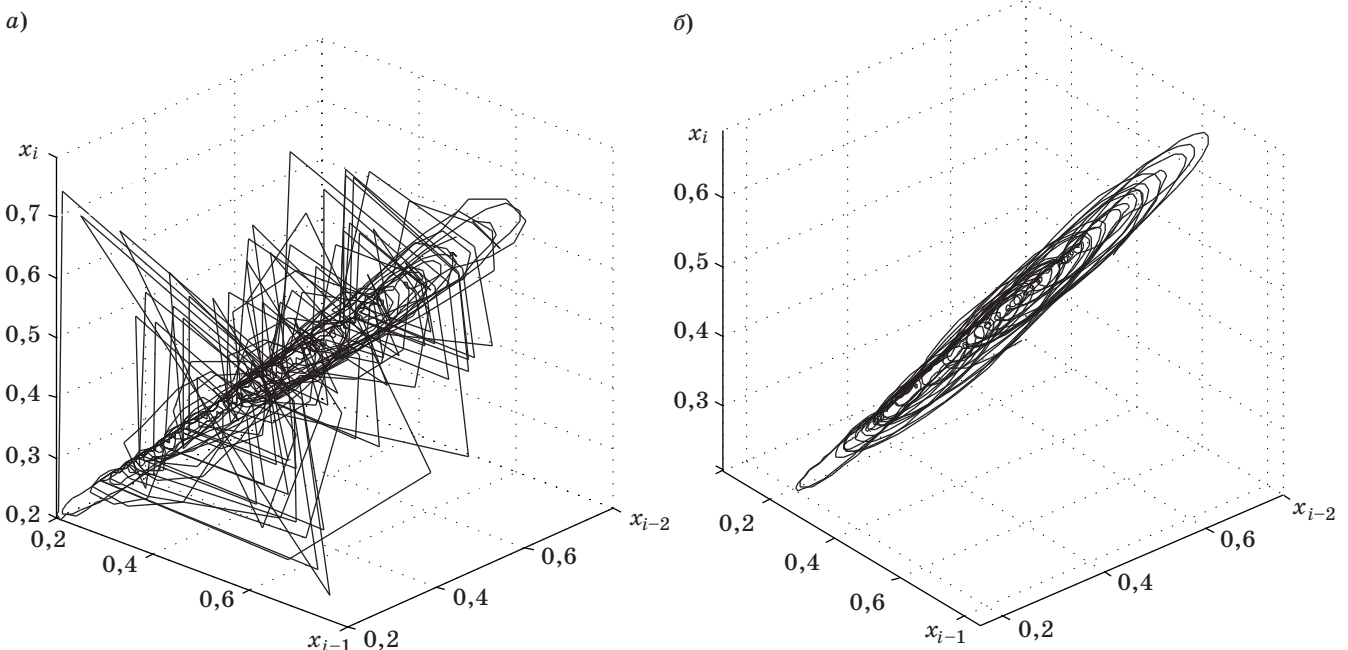
$$D \approx \frac{\ln(C(\varepsilon))}{\ln(\varepsilon)}, \quad C(\varepsilon) \approx \frac{1}{m^2} \sum_{k,j=0}^{m-1} \theta(\varepsilon - \|\mathbf{S}_k - \mathbf{S}_j\|).$$

На практике для приближенного расчета показателя $C(\varepsilon)$ используется формула [9, 10]

$$C(\varepsilon) \approx \frac{2}{m(m-1)} \sum_{k=0}^{m-2} \sum_{j=k+1}^{m-1} \theta(\varepsilon - \|\mathbf{S}_k - \mathbf{S}_j\|). \quad (4)$$

Расчет значений $C(\varepsilon)$ по формуле (4) основывается на определении числа точек фазовой траектории, расстояние между которыми меньше заданной величины ε или равно ей. Значения $C(\varepsilon)$ рассчитываются для различных значений ε . Полученная зависимость в логарифмическом масштабе отображается на координатной сетке, причем по оси абсцисс откладываются значения $\ln(\varepsilon)$, а по оси ординат — значения $\ln(C(\varepsilon))$. При малых значениях ε данная зависимость имеет линейный участок. Указанная процедура повторяется для различных значений размерности фазового пространства N . Предел полученной величины при устремлении размерности фазового пространства N в бесконечность (на практике N изменяют в диапазоне $1 \leq N \leq 10$) является корреляционной размерностью D .

Вид в трехмерном пространстве аттрактора исследуемой динамической системы получен по отсчетам анализируемого телеметрического параметра в отсутствие (рис. 2, а) и при наличии



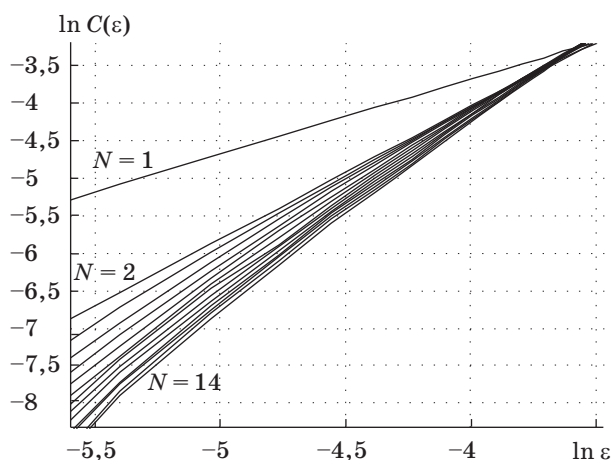
■ Рис. 2. Аттрактор исследуемой динамической системы, полученный по исходным (а) и сглаженным (б) значениям параметра

(рис. 2, б) сглаживания и исключения аномальных отсчетов.

Логарифмические зависимости показателя C от заданного расстояния ε при различных размерностях фазового пространства N (рис. 3) позволяют определить по сглаженным значениям временного ряда максимальное значение корреляционной размерности аттрактора: $D = 2,7$. Кривые соответствуют значениям $N = 1, 2, \dots, 14$; с увеличением размерности N кривые $C(\varepsilon)$ опускаются ниже.

На шаге 3 определяется необходимое для реконструкции аттрактора динамической системы число точек временного ряда M . Существуют приближительные оценки данной величины, например $M \geq M_{\min} = 10^{\alpha+\beta D}$, где D — размерность аттрактора; $\alpha = 2, \beta = 0,4$ — эмпирические параметры [12]. При $M < M_{\min}$ малое число точек не позволит правильно определить размерность аттрактора и описать его аналитически. Более того, при малом числе точек траектория динамической системы может не иметь аттрактора и восприниматься как случайная. В рассматриваемом случае, применительно к анализируемому параметру, условие выполняется: $M \approx 10\,000, M_{\min} = 1203$.

На шаге 4 проводится визуальный анализ сечений аттрактора (сечений Пуанкаре), который может помочь при поиске размерности пространства вложения для построения модели вида (1). В результате такого анализа можно получить дополнительную априорную информацию о сложности аттрактора динамической системы [9]. Это бывает необходимо в случае различного рода наложений и складок фазового пространства, которые имеют место в реальных системах и влияют на величину корреляционной размерности, определяемой выражением (3).



■ **Рис. 3.** Логарифмические зависимости показателя C от заданного расстояния ε при различных размерностях фазового пространства

На шаге 5 осуществляется определение размерности пространства вложения N и построение модели вида (1) с полиномами степени n . В соответствии с теоремой Такенса для определения размерности пространства вложения N необходимо использовать следующее соотношение [9]:

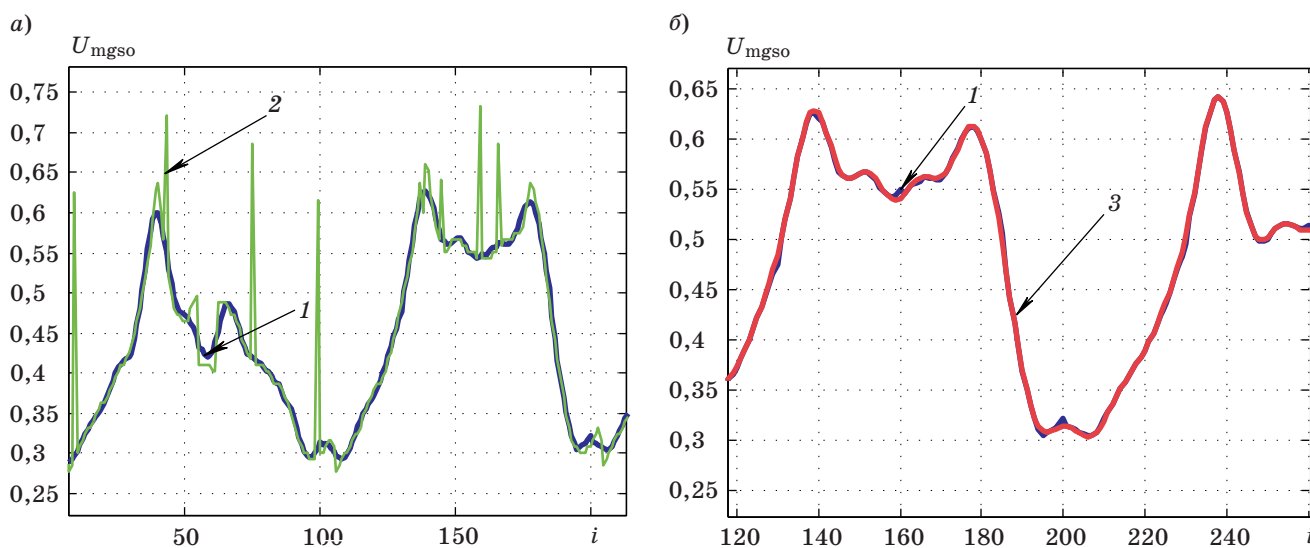
$$N \geq 2D + 1. \quad (5)$$

Однако для реальных динамических систем, параметры которых содержат шум и искажения, оценка (5) является завышенной, и для сильно зашумленных рядов при выборе N целесообразно ограничиться ближайшим к D сверху целым числом. Исходя из этого для рассматриваемого примера получены две оценки размерности пространства вложения: нижняя оценка $N_{\min} = 3$ и верхняя оценка $N_{\max} = 7$. В результате экспериментальных исследований установлено, что при $N = N_{\max}$ существует риск получить плохой прогноз на тестовой выборке, а при $N = N_{\min}$ имеет место малое время упреждения прогноза. Поэтому целесообразно выбирать среднее значение размерности пространства вложения $N = (N_{\max} + N_{\min})/2$. Для рассматриваемого примера соответствующее значение размерности пространства составляет $N = 5$.

Для найденного значения размерности фазового пространства N строится модель вида (1) с использованием метода наименьших квадратов. На обучающей реализации оцениваются ее характеристики E_1, E_2, G_1, G_2 . Полученные на очередной q -й итерации алгоритма значения $E_{1q}, E_{2q}, G_{1q}, G_{2q}$ показателей E_1, E_2, G_1, G_2 сравниваются со значениями $E_{1q-1}, E_{2q-1}, G_{1q-1}, G_{2q-1}$, полученными на предыдущей итерации, и путем изменения степени полиномов n в правой части уравнений модели (1), а также параметров алгоритмов исключения аномальных отсчетов K и сглаживания $F_{\text{гр}}$ осуществляется поиск условий оптимизации этих характеристик в соответствии с выбранными критериями.

На шаге 6 полученная на обучающей реализации прогнозная модель проверяется на тестовой реализации. Если характеристики прогноза удовлетворяют заданным условиям ($E_1, E_2 \leq E_{\text{задан}}$), работа алгоритма заканчивается. В противном случае необходимо уменьшить размерность пространства вложения N и повторить шаги 5 и 6 заново. Для рассматриваемого примера при $N = 5$ были найдены оптимальная степень полиномов в правой части уравнений модели (1) $n = 2$; оптимальные значения параметров алгоритмов исключения аномальных отсчетов и сглаживания $K = 1, F_{\text{гр}} = 0,25F_{\text{д}}$, где $F_{\text{д}}$ — частота дискретизации параметра.

Прогнозные модели получены на тестовой реализации телеметрического параметра U_{mgso} исследуемой динамической системы в дискретном



■ Рис. 4. Зависимость значений прогнозных 1 и исходных 2 (а), прогнозных 1 и сглаженных 3 (б) отсчетов параметра ТС от номера отсчета

времени i (интервал дискретизации $\Delta t = 3$ мин) без сглаживания (рис. 4, а) и со сглаживанием (рис. 4, б). Приведенные результаты показывают, что разработанная прогнозная модель позволяет получить удовлетворительный краткосрочный прогноз анализируемого телеметрического параметра ($E_1 = 0,05$; $G_1 = 0,92$; $E_2 = 0,005$; $G_2 = 0,99$) на время упреждения $T = 15$ мин и может быть использована для многошагового прогноза на время упреждения $T = 30$ мин. Дальнейшее увеличение времени упреждения в рассмотренном случае ведет к значительному ухудшению качества прогноза.

Заключение

Рассмотренный алгоритм создания прогнозных моделей динамических систем по результатам анализа их параметров ТС является одним из

аналитических подходов к синтезу нелинейных прогнозных моделей. Данный алгоритм может быть использован при обработке измерительной информации, характеризующей ТС сложных технических систем, а также на этапе создания систем со сложной динамикой функционирования. В последнем случае построение прогнозных моделей позволяет оценить динамические свойства создаваемой системы и определить критические значения некоторых параметров. Эта информация дает возможность избежать необходимости полного перебора всех возможных значений и уменьшить тем самым время на создание системы. Особенно это важно при больших объемах измерительной информации, что имеет место, например, при испытаниях и в ходе летной эксплуатации объектов ракетно-космической техники.

Литература

1. Сухорученков Б. И., Меньшиков В. А. Методы анализа характеристик летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1995. — 368 с.
2. Назаров А. В., Козырев Г. И., Шитов И. В. Современная телеметрия в теории и на практике. — СПб.: Наука и Техника, 2007. — 672 с.
3. Якимов В. Л., Назаров А. В. Прогнозирование технического состояния малых космических аппаратов с использованием многослойных нейронных сетей // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. № 1. С. 7–12.
4. Якимов В. Л. Прогнозирование параметров технического состояния стартового комплекса с использованием нейронных сетей // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. № 7. С. 7–10.
5. Бутырский Е. Ю. Метод аппроксимации нелинейной динамической системы линейной с переменными параметрами // Научное приборостроение. 2013. Т. 23. № 2. С. 89–98.
6. Борисов Ю. Ю. Построение прогнозирующих моделей динамических систем на основе исследования окрестностей реконструированных аттракторов // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 2. С. 32–37.
7. Букреев В. Г. Выявление закономерностей во временных рядах в задачах распознавания состояний динамических объектов. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. — 254 с.
8. Каток А. Б., Хасселблат Б. Введение в современную теорию динамических систем. — М.: Факториал, 1999. — 768 с.

9. Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Современные проблемы нелинейной динамики. — М.: Едиториал УРСС, 2002. — 360 с.
10. Анищенко В. С., Астахов В. В. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. — 529 с.

11. Павлов А. Н., Янсон Н. Б., Анищенко В. С. Применение статистических методов при решении задачи глобальной реконструкции // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 8. С. 7–13.
12. Nerenberg M. A. H., Essex C. Correlation dimension and systematic geometric effects // Physical Review A. 1990. Vol. 42. N 12. P. 7065–7074.

UDC 629.7.085.2

A Reconstruction Algorithm for a Dynamic System Phase Space and its Application for Development of Predictive Models

Maltsev G. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, georgy_maltsev@mail.ru

Nazarov A. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, naz_av@mail.ru

Yakimov V. L.^a, PhD, Tech., Deputy Head of a Sub-faculty, yakim78@yandex.ru

^aA. F. Mozhayskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197082, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Development of a predictive model of state of a non-linear dynamic system on the basis of reconstruction of its phase space. **Results:** There has been formulated general problem definition of predicting a state of a dynamic system on the basis of attractor reconstruction (a limit set of points) of its phase space using a system of discrete mapping of observed parameters. There has been developed a reconstruction algorithm of phase space of a dynamic system according to time series of one of its parameters which includes splitting initial time sampling in training and test samples as well as their preliminary processing; assessment of phase space dimension; definition of an amount of time series points required for attractor reconstruction; the analysis of attractor sections; determination of dimension and creation of a predictive model in a form of a system of discrete displays; optimization of model and its testing. There has been given an example of a predictive model of a telemetric parameter of the spacecraft onboard dynamic system. For the given example time of prediction anticipation has been defined and possibilities of preliminary processing of analyzed time series have been shown using algorithms of exception of abnormal values and smoothing. **Practical significance:** Reconstruction of phase space of a dynamic system allows to evaluate parameters of a synthesized predictive model and to accelerate the solution of the problem of optimization of its characteristics. The obtained algorithms and the model have been used in a software complex for processing of telemetric information.

Keywords — Dynamic System, Predictive Model, Phase Space, Attractor, Telemetric Information.

References

1. Sukhoruchenkov B. I., Men'shikov V. A. *Metody analiza kharakteristik letatel'nykh apparatov* [Methods of the Analysis of Characteristics of Aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 368 p. (In Russian).
2. Nazarov A. V., Kozyrev G. I., Shitov I. V. *Sovremennaya telemekhika v teorii i na praktike* [Modern Telemetry in the Theory and in Practice]. Saint-Petersburg, Nauka i Tekhnika Publ., 2007. 672 p. (In Russian).
3. Yakimov V. L., Nazarov A. V. Prediction of Technical State of Small Spacecrafts with Usage Multilayer Neural Networks. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2006, no. 5, pp. 7–12 (In Russian).
4. Yakimov V. L. Neural Networks Usage for Parameters Prediction of Technical State of the Launch Complex. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2006, no. 7, pp. 7–10 (In Russian).
5. Butyrskii E. Iu. Approximations Method of the Nonlinear Dynamic System Linear with Variable Parameter. *Nauchnoe priborostroenie*, 2013, vol. 23, no. 2, pp. 89–98 (In Russian).
6. Borisov Iu. Iu. Prediction Models Designing of the Dynamic Systems on the Basis of the Investigation of the Reconstruction Environs for Attract. *Avtomatizatsiia i sovremennye tekhnologii*, 2007, no. 2, pp. 32–37 (In Russian).
7. Bukreev V. G. *Vyjavlenie zakonomernostei vo vremennykh riadakh v zadachakh raspoznavaniia sostoianii dinami-cheskikh ob'ektov* [Detection of Regularities in Temporary Ranks in Problems of Recognition of Conditions of Dynamic Objects]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet Publ., 2010. 254 p. (In Russian).
8. Katok A. B., Khasselblat B. *Vvedenie v sovremennuiu teoriiu dinamicheskikh sistem* [Introduction in the Modern Theory of Dynamic Systems]. Moscow, Faktorial Publ., 1999. 768 p. (In Russian).
9. Malinetskii G. G., Potapov A. B. *Sovremennye problemy nelineinnoi dinamiki* [Modern Problems of Nonlinear Dynamics]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2002. 360 p. (In Russian).
10. Anishchenko V. S., Astakhov V. V. *Nelineinye efekty v khaoticheskikh i stokhasticheskikh sistemakh* [Nonlinear Effects in Chaotic and Stochastic Systems]. Moscow-Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2003. 529 p. (In Russian).
11. Pavlov A. N., Ianson N. B., Anishchenko V. S. Application of Statistical Methods at the Solution of a Problem of Global Reconstruction. *Pis'ma v ZhTF*, 1997, vol. 23, no. 8, pp. 7–13 (In Russian).
12. Nerenberg M. A. H., Essex C. Correlation Dimension and Systematic Geometric Effects. *Physical Review A*, 1990, vol. 42, no. 12, pp. 7065–7074.

УДК 519.688

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СЛУЖБЫ КАТАЛОГОВ

А. В. Андреев^{а, 1}, системный администратор, аспирант

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

Постановка проблемы: при обращении к службе каталогов множества сервисов (прокси-сервер, файловый сервер и т. д.) сервер каталога должен обрабатывать тысячи записей. При этом наблюдается низкая масштабируемость и, как следствие, увеличение времени доступа к данным. Целью работы является уменьшение аппаратных и временных затрат при чтении, записи, удалении данных каталога. **Методы:** проведены сравнительные анализы аппаратных и временных затрат при стандартных настройках каталога и при работе с СУБД PostgreSQL, методов индексирования в СУБД PostgreSQL, аппаратных и временных затрат при неиндексированных и индексированных данных в СУБД PostgreSQL. **Результаты:** определены сервисы, работающие со службой каталогов, и их операции (добавление пользователя, получение почты и т. д.). Получены числовые данные аппаратных и временных затрат для каждой конфигурации каталога при разных типах запросов. Определено подмножество атрибутов сервисов из общего числа атрибутов каталога. Определен метод индексирования данных в СУБД PostgreSQL с учетом типов данных каталога. Разработана и описана последовательность шагов оптимизации службы каталогов при работе в высоконагруженных вычислительных сетях с заданным набором сервисов. **Практическая значимость:** данный метод позволил добиться значительного уменьшения аппаратных и временных затрат для стандартных операций службы каталогов. Результаты исследования использованы при разработке серверных решений LinuxWizard.

Ключевые слова — служба каталогов, базы данных, методика, индексирование, анализ.

Введение

Служба каталогов (Directory Service) — средство иерархического представления различных ресурсов и хранения информации об этих ресурсах. В качестве ресурсов выступают материальные ресурсы, персонал, сетевые ресурсы и т. д.

Самой простой службой каталогов является служба имен (a naming service), отображающая имена сетевых ресурсов и соответствующие им сетевые адреса. При организации такой службы каталогов пользователь не должен помнить физический адрес сетевого ресурса — служба имен будет определять местоположение ресурса. Каждый ресурс при этом будет считаться объектом в службе каталогов.

Информация об определенном объекте (ресурсе) хранится как значения атрибутов этого объекта.

Служба каталогов в контексте компьютерных сетей — программный комплекс, позволяющий администратору работать с упорядоченным рядом признаков массивом информации о сетевых ресурсах (общие папки, серверы печати, принтеры, пользователи и т. д.), хранящимся в едином месте, что обеспечивает централизованное управление как самими ресурсами, так и информацией о них, а также позволяющий контролировать использование их третьими лицами [1].

В течение 1980-х гг. международной организацией International Telegraph and Telephone

Consultative Committee разрабатывался общий стандарт для службы каталогов, в дальнейшем названный X.500, частью которого является протокол доступа к каталогу DAP (Directory Access Protocol), используемый в современных службах каталогов в облегченном варианте LDAP (Lightweight Directory Access Protocol) по причине первоначальной всеобъемлющей функциональности, оказавшейся неуместной для персональных компьютеров.

OpenLDAP — открытая реализация протокола LDAP, разработанная проектом OpenLDAP Project. Распространяется под собственной лицензией, называемой OpenLDAP Public License. Для хранения записей OpenLDAP использует базу данных Berkeley DB, но доступны различные модули для хранения данных в других базах данных [2].

Berkeley DB (BDB) — база данных, реализованная в виде библиотеки. BDB является нереляционной базой данных — она хранит пары ключ/значение как массивы байтов и поддерживает множество значений для одного ключа [3].

Когда появляется необходимость обращения к LDAP-серверу с помощью различных приложений, LDAP-сервер должен обрабатывать тысячи записей LDAP. При этом наблюдается низкая масштабируемость и, как следствие, увеличение времени обращения к данным.

PostgreSQL — свободная объектно-реляционная система управления базами данных (СУБД). PostgreSQL базируется на языке SQL и поддерживает многие из возможностей стандарта SQL:2003 (ISO/IEC 9075) [4].

Поскольку в службе каталогов OpenLDAP доступны модули sql, можно реализовать хранение

¹ Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения В. В. Балберин.

данных в СУБД PostgreSQL и проанализировать масштабируемость и изменения времени обращения к данным [5].

Для анализа текущей задачи можно выполнить ряд шагов:

1) провести анализ временных и аппаратных затрат при работе службы каталогов с BDB;

2) определить минимальный необходимый и достаточный набор индексов для работы заданного набора сервисов;

3) реализовать совместную работу службы каталогов OpenLDAP и PostgreSQL;

4) провести сравнительный анализ временных и аппаратных затрат при работе служб каталогов с СУБД postgresql и bdb;

5) проиндексировать таблицы postgresql для различного набора сервисов. Провести сравнитель-

ный анализ временных и аппаратных затрат при работе службы каталогов с заданным набором индексов и исходным вариантом.

Средства и результаты анализа

Для проведения сравнительного анализа достаточно стандартных средств операционной системы GNU/Linux, таких как syslog, time, top.

Для индексирования таблиц СУБД PostgreSQL предпочтителен только один метод btree как единственный, удовлетворяющий всем типам данных, используемых в службе каталогов [6].

Результаты анализа при работе службы каталогов при стандартных настройках и после индексирования таблиц СУБД PostgreSQL представлены в табл. 1 и 2.

■ Таблица 1. Временные затраты, с

Сервис	Аутентификация		Добавление пользователя		Удаление пользователя		Отправка почты		Прием почты	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Прокси-сервер	0,230	0,08	–	–	–	–	–	–	–	–
Файл-сервер	0,285	0,132	0,440	0,230	0,41	0,15	–	–	–	–
Почтовый сервер 1	0,235	0,084	–	–	–	–	0,228	0,830	0,330	0,125
Сервер аутентификации	0,282	0,097	–	–	–	–	–	–	–	–
Почтовый сервер 2	0,280	0,101	–	–	–	–	0,290	0,110	0,330	0,123

I — стандартные настройки; II — после индексирования.

■ Таблица 2. Аппаратные затраты, %

Сервис	Аутентификация		Добавление пользователя		Удаление пользователя		Отправка почты		Прием почты	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Прокси-сервер	ЦПУ-70 ФС-70	ЦПУ-33 ФС-14	–	–	–	–	–	–	–	–
Файл-сервер	ЦПУ-84 ФС-92	ЦПУ-54 ФС-52	ЦПУ-86 ФС-100	ЦПУ-59 ФС-69	ЦПУ-79 ФС-100	ЦПУ-59 ФС-62	–	–	–	–
Почтовый сервер 1	ЦПУ-73 ФС-69	ЦПУ-40 ФС-22	–	–	–	–	ЦПУ-73 ФС-72	ЦПУ-47 ФС-37	ЦПУ-73 ФС-75	ЦПУ-43 ФС-36
Сервер аутентификации	ЦПУ-71 ФС-71	ЦПУ-35 ФС-16	–	–	–	–	–	–	–	–
Почтовый сервер 2	ЦПУ-75 ФС-70	ЦПУ-43 ФС-20	–	–	–	–	ЦПУ-77 ФС-75	ЦПУ-50 ФС-33	ЦПУ-74 ФС-78	ЦПУ-42 ФС-34

I — стандартные настройки; II — после индексирования.

ЦПУ — загруженность центрального процессорного устройства.

ФС — загруженность файловой системы.

Последовательность шагов для оптимизации службы каталогов

Для решения такой задачи была использована следующая последовательность действий.

1. Определение динамического набора сервисов и запросов к службе каталогов [7]; например, для таких сервисов, как прокси, файловый сервер, почтовый сервер, сервер аутентификации, будут актуальны следующие запросы:

- аутентификация;
- добавление записи;
- удаление записи;
- отправка почты;
- прием почты.

2. Настройка сервера с соответствующими настройками для работы с СУБД PostgreSQL [8].

3. Определение исходного множества используемых атрибутов A .

4. Выделение необходимого подмножества атрибутов B_n , принадлежащих множеству A ($A \subset B_n$) для каждого сервиса.

5. Выбор уникального множества индексов C из подмножеств атрибутов для текущего набора сервисов согласно формуле

$$C = ((B_i \setminus B_{i+1}) \cup \dots \cup (B_{n-1} \setminus B_n)) \cup (B_n \setminus ((B_i \setminus B_{i+1}) \cup \dots \cup (B_{n-1} \setminus B_n))),$$

где C — уникальное множество индексов; B_i — множество атрибутов для определенного сервиса, $i = 1..n$, n — количество сервисов.

Множество индексов C состоит из объединенных подмножеств B_n всех атрибутов сервисов с удалением дублирующихся атрибутов для каждого из них.

6. Индексирование согласно уникальному множеству индексов C [9].

Заключение

В данной статье представлен способ оптимизации работы службы каталогов в высоконагруженных локальных вычислительных сетях. Все действия, описанные в статье, следует применять только на Linux-сервере с установленными пакетами `openldap` и `postgresql-server`. В таком решении данные службы каталогов хранятся в СУБД PostgreSQL, что является уже редким случаем. Индексирование позволяет добиться более масштабируемого решения по сравнению с неиндексированным и тем более стандартным случаем с BerkeleyDB. Целесообразность индексирования обуславливается типами запросов к каталогу, так как они являются однотипными (поиск записи, удаление записи и добавление записи).

Сравнительный анализ проводился по двум основным характеристикам: временные затраты и аппаратные. Результаты после процедуры индексирования представлены для обеих характеристик в таблицах.

Согласно анализу, временные затраты для индексированного решения меньше на 50 % по сравнению с решением на BerkeleyDB, а преимущество по аппаратным затратам более 30 %.

Следует отметить, что данное улучшение наблюдается только для служб каталогов с количеством записей более 600, что было определено экспериментально.

Выражение для поиска уникального множества индексов службы каталогов универсально для различных конфигураций и может быть использовано для всех типов каталогов (Active Directory, OpenLDAP, 389 DS).

Предлагаемые шаги оптимизации службы каталогов универсальны и эффективны для динамического набора сервисов.

Результаты данного исследования используются в разработках компании LinuxWizard.

Литература

1. Свободная энциклопедия — Служба каталогов. http://ru.wikipedia.org/wiki/Служба_каталогов (дата обращения: 03.09.2012).
2. Свободная энциклопедия — OpenLDAP. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Openldap> (дата обращения: 03.09.2012).
3. Свободная энциклопедия — BerkeleyDB. http://ru.wikipedia.org/wiki/Berkeley_DB (дата обращения: 03.09.2012).
4. Свободная энциклопедия — PostgreSQL. <http://ru.wikipedia.org/wiki/PostgreSQL> (дата обращения: 03.09.2012).

5. Руководство администратора. <http://www.openldap.org/doc/admin24/> (дата обращения: 15.08.2012).
6. Douglas K., Douglas S. PostgreSQL. — Sams, 2006. — 1032 p.
7. Документация об открытой реализации протокола LDAP. <http://www.openldap.org> (дата обращения: 07.09.2012).
8. Алгоритм настройки службы каталогов для работы с СУБД PostgreSQL. http://open.linuxwizard.ru/wiki/index.php/OpenLDAP_PostgreSQL (дата обращения: 20.09.2012).
9. Smith G. PostgreSQL 9.0 High Performance. — Packt Publishing, 2010. — 468 p.

UDC 519.688

Methods of Optimizing the Directory ServiceAndreyev A. V.^a, System Administrator, Post-Graduate Student, aathexf@gmail.com^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: When there is a need to address a LDAP-server using different services (proxy server, file server etc.) the LDAP-server should handle thousands of records. This is characterized by low scalability and, as a result, it increases time of access to data. The goal of this paper is to decrease hardware and time expenditures while reading, recording and deleting directory data. **Methods:** There have been conducted comparative analyses of hardware and time expenditures at standard settings of a directory service and during work with PostgreSQL; there have been presented methods of indexing in PostgreSQL; hardware and time expenditures at indexed and non-indexed data in PostgreSQL. **Results:** There have been defined services working with a directory service and their operations (adding a user, receiving mail etc.). There have been obtained numerical data of hardware and time expenditures for each configuration of a directory for different types of queries. There has been sorted out a subset of service attributes from the total of directory services. There has been defined a method of indexing data in PostgreSQL taking into account types of directory data. There has been described a sequence of steps for optimizing hardware and time expenditures of a directory service when working at high-load LAN with the given set of services. **Practical relevance:** The method has allowed achieving significant decrease in hardware and time expenditures for standard operations of a directory service. The research results have been implemented in developing software for Linux Wizard servers.

Keywords — Directory Service, Databases, Methodology, Indexing, Analysis.

References

1. *Svobodnaia entsiklopediia — Sluzhba katalogov* [The Free Encyclopedia — Directory Service]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Служба_каталогов (accessed 3 August 2012).
2. *Svobodnaia entsiklopediia — OpenLDAP* [The Free Encyclopedia — OpenLDAP]. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Openldap> (accessed 3 September 2012).
3. *Svobodnaia entsiklopediia — BerkeleyDB* [The Free Encyclopedia — BerkeleyDB]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Berkeley_DB (accessed 3 September 2012).
4. *Svobodnaia entsiklopediia — PostgreSQL* [The Free Encyclopedia — PostgreSQL]. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/PostgreSQL> (accessed 3 September 2012).
5. *Rukovodstvo administratora* [OpenLDAP Admin Guide]. Available at: <http://www.openldap.org/doc/admin24/> (accessed 15 August 2012).
6. Douglas K., Douglas S. *PostgreSQL*. Sams, 2006. 1032 p.
7. *Dokumentacija ob otkrytoj realizacii protokola LDAP* [OpenLDAP Documentations]. Available at: <http://www.openldap.org> (accessed 7 September 2012).
8. *Algoritm nastroiiki sluzhby katalogov dlia raboty s SUBD PostgreSQL* [How to setup OpenLDAP with PostgreSQL]. Available at: http://open.linuxwizard.ru/wiki/index.php/OpenLDAP_PostgreSQL (accessed 20 September 2012).
9. Smith G. *PostgreSQL 9.0 High Performance*. Packt Publishing, 2010. 468 p.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

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

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

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

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

УДК 004.05

СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ В СЕТЯХ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОДОСТУПА СТАНДАРТА IEEE 802.11

Д. В. Юркин^а, канд. техн. наук, доцент

В. Н. Никитин^а, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: исследования разработчиков систем IDS и IPS определили типовую модель системы обнаружения вторжений, которая предназначена для обнаружения и блокировки типовых атак в проводной среде передачи данных. Однако, несмотря на повсеместное развертывание радиосетей передачи данных, проблема методов обнаружения вторжений и способов борьбы с ними недостаточно исследована. Целью работы является разработка методов автоматизации систем предотвращения вторжений в беспроводных сетях радиодоступа. **Методы:** сигнатурный и эвристический анализ сетевого трафика, корреляционный анализ попыток несанкционированного доступа. **Результаты:** разработаны основные принципы построения системы обнаружения вторжений в беспроводных сетях. Разработаны требования к реализации методов сбора и анализа данных IDS. Представлена технология обнаружения нарушителя в критических точках целевой IT-системы, использующая метод оценки уровня принятого сигнала RSSI и метод разности времен прихода сигнала TDoA. Разработаны методы сканирования радиоканала, позволяющие обнаруживать вторжения как в автономных системах, так и в системах с централизованной обработкой событий. **Практическая значимость:** результаты исследований позволяют повысить безопасность существующих распределенных сетей радиодоступа.

Ключевые слова — системы обнаружения вторжений, беспроводные сети передачи данных.

Введение

В настоящее время бурного развития мультисервисных беспроводных сетей вопросам информационной безопасности уделяется большое внимание. В связи с особенностями организации сетей передачи данных с использованием оборудования широкополосного радиодоступа (ШРД) к сетям предъявляются повышенные требования по защите информации [1]. Наряду с методами криптографической инкапсуляции [2], аутентификации [3] и управления доступом к среде передачи данных на канальном уровне OSI/ISO также важны методы предотвращения злонамеренного воздействия средствами системы обнаружения вторжений (COB, Intrusion Detection System — IDS).

Для функционирования COB в сетях стандартов IEEE 802.11 может использоваться как одна, так и несколько точек доступа (ТД), причем с увеличением их числа точность позиционирования стороннего устройства увеличивается. Наиболее эффективной считается схема, в которой несколько ТД не участвуют в передаче данных абонентов, а используются только в режиме сенсора (Rogue Detector).

Специфика развертывания [4] сетей ШРД ставит следующие задачи перед COB [5] в мультисервисных распределенных сетях передачи данных стандарта IEEE 802.11:

- 1) обнаружение всех сторонних радиоустройств в пределах зоны покрытия радиосети;
- 2) классификация сторонних радиоустройств в пределах зоны покрытия радиосети;

- 3) подробный анализ активности сторонних устройств;

- 4) оценка степени угрозы, вызываемой активностью стороннего устройства;

- 5) определение физического местоположения стороннего устройства;

- 6) обезвреживание стороннего устройства с использованием как проводных, так и беспроводных алгоритмов.

Основные принципы реализации COB в сетях радиодоступа

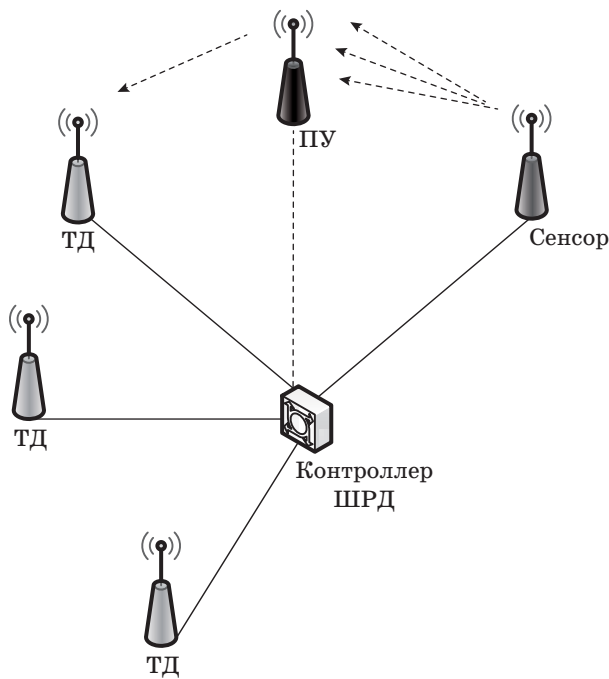
На примере реализации системы wIPS (wireless Intrusion Prevention System) (рис. 1) проиллюстрируем процесс детектирования [7] посторонних устройств (ПУ) ШРД.

Общая схема защиты от ПУ [5], работающих в зоне видимости сети ШРД, в которой работает COB, выглядит следующим образом.

Обнаружение [Detect] — обнаружение неинфраструктурных ТД и клиентов одноранговых подключений, а также ПУ стандарта IEEE 802.11n.

Классификация [Classify] — категорирование (over-the-air и on-the-wire) ПУ по уровню принятого сигнала RSSI (Receive Signal Strength Indications) и SSID (Service Set Identifier), клиентам и пр., проверка нахождения ПУ в проводном сегменте, алгоритм Switch port tracing.

Обезвреживание [Mitigate] — изоляция (Shutdown, Contain и т. д.) нарушителей в радиоканале, отключение (Shutdown) порта на коммутаторе, обнаружение местоположения.



■ Рис. 1. Детектирование посторонних устройств ШРД

Локализация [Locate] — определение координат местоположения и типа радиоустройства в зоне развертывания беспроводной локальной вычислительной сети (БЛВС).

Согласно данной схеме, обнаружение ПУ [6] сенсором может осуществляться в режиме:

1) обслуживания клиентов с переключением на другие каналы для сканирования (local mode), где каждый канал прослушивается в течение времени T_{scan} в режиме сканирования всех каналов, или каналов данного регуляторного домена, или DCA-каналов;

2) сканирования Monitor Mode, в котором каждый канал прослушивается в течение времени T_{scan} и сканируются все каналы.

Согласно алгоритму работы экземпляра COB, любая ТД, которая имеет неизвестные значения RF Group name или mobility group, считается ПУ, при этом автономные ТД, управляемые беспроводным контроллером (БК), автоматически заносятся в список разрешенных устройств. В COB имеется система классификации ПУ по SSID и RSSI, основанная на анализе соответствия этих параметров условиям эксплуатации COB.

Режим ТД Rogue Detector предписывает отслеживание всех ARP-запросов от посторонних ТД и их клиентов, а БК в свою очередь делает запрос на Rogue Detector для определения наличия посторонних клиентов в проводном сегменте ЛВС.

Режим работы COB по протоколу Rogue Location Discovery Protocol (RLDP) обеспечивает обнаружение ПУ посредством подключения инфраструктурных ТД к ПУ в качестве клиента и отправки пакета на IP-адрес контроллера (функционирование возможно только для ПУ с open SSID).

Режим работы БК Switchport Tracing обеспечивает обнаружение ПУ способом определения CDP Neighbors для ТД, которая обнаружила ПУ, и просмотра CAM-таблиц коммутаторов на предмет наличия в них MAC-адресов и клиентов ПУ.

Основные методы обнаружения ПУ приведены в таблице.

Изоляция проводится после детектирования, обнаружения и классификации ПУ в режимах Local Mode, Monitor Mode и H-REAP. Подсистема изоляции ПУ осуществляет либо ручную, либо автоматическую блокировку сторонних ТД и клиентских устройств путем отправки De-Authentication пакетов блокируемому клиенту или широковещательных пакетов от блокируемой ТД.

■ Основные методы обнаружения ПУ wIPS

Алгоритм	Порядок действий	Объект детектирования	Оценка точности
Switchport Tracing	<ol style="list-style-type: none"> 1. ТД детектирует ПУ в радиоканале 2. ТД уведомляет о коммутаторах 3. БК проверяет соседние коммутаторы 4. БК сообщает результаты в порядке их вероятности 5. Администратору предоставляется возможность отключить порт коммутатора 	Open APs Secured APs NAT APs	Средняя
RLDP	<ol style="list-style-type: none"> 1. ТД детектирует ПУ в радиоканале 2. ТД подключается к ПУ как клиент 3. ТД посылает RLDP-пакет 4. Если RLDP-пакет получен контроллером, то ПУ имеет выход в ЛВС 	Open APs NAT APs	Гарантированная
Rogue Detector	<ol style="list-style-type: none"> 1. Детектор подключается в режиме транка 2. Детектор получает набор MAC-адресов ПУ 3. Детектор ищет MAC-адреса ПУ в ARP-запросах 	Open APs Secured APs	Высокая

Режимы сканирования радиоканала

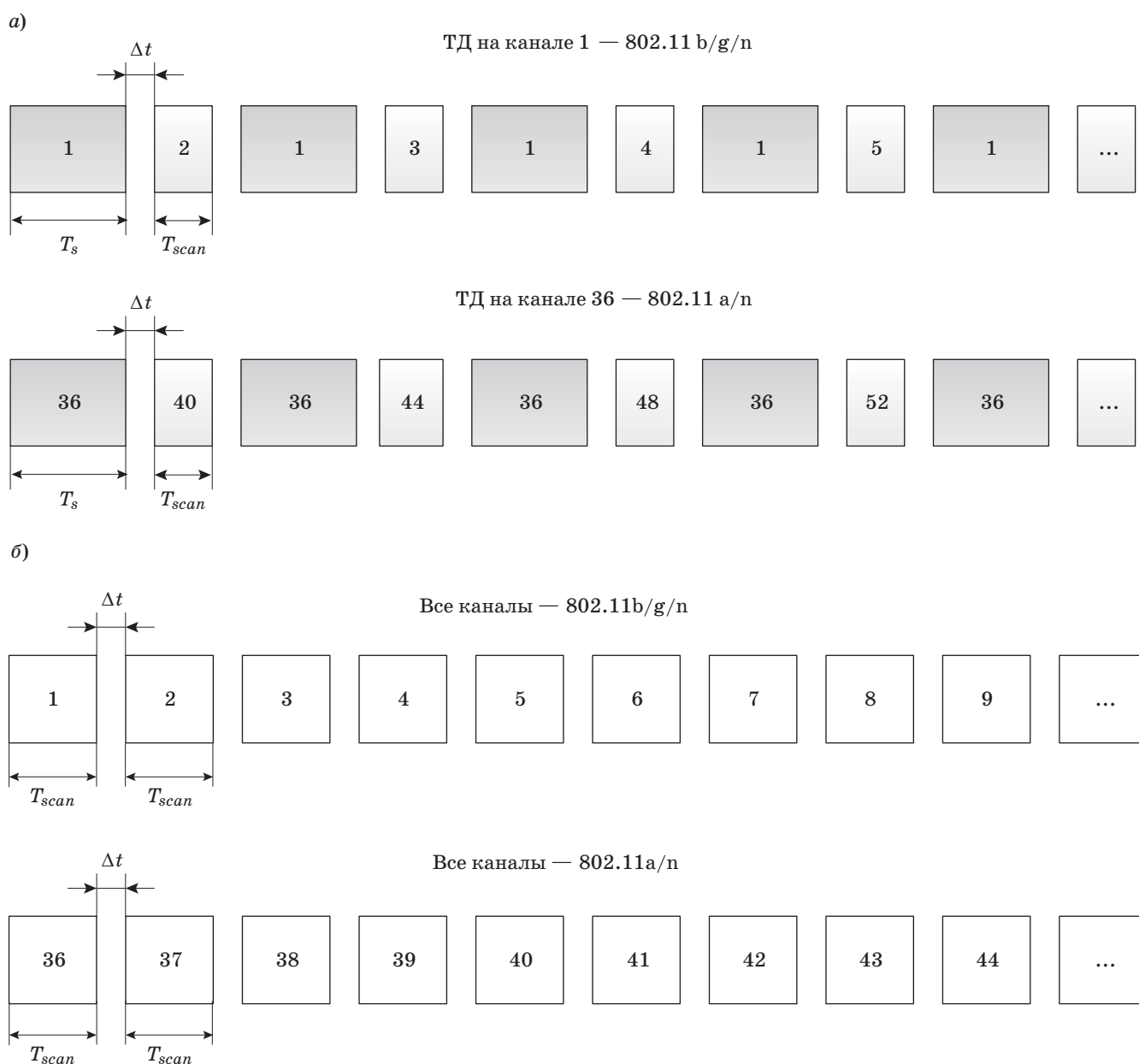
Для обеспечения сбора информации об активности радиоустройств ТД должен вестись постоянный мониторинг передаваемых по радиоканалу данных как абонентскими устройствами, так и другими ТД. Данная задача решается путем перехода ТД в режим радиочастотного (РЧ) сканирования, в котором ТД передает анализатору СОВ следующие данные:

- MAC-адрес ПУ;
- MAC-адреса подключенных клиентов;
- кадры, инкапсулированные по протоколам WEP и WPA;
- преамбулы захваченных кадров;

- отношение сигнал/шум детектированных сигналов;
- мощность RSSI источника;
- номер канала ПУ;
- SSID ПУ;
- IP-адрес ПУ;
- время обнаружения ПУ.

Требования [4] к современным мультисервисным сетям передачи данных оговаривают, что функционировать ТД могут в одном из следующих режимов: Local, H-REAP, Monitor, Rogue detector, Sniffer, Bridge.

Режим Local Mode РЧ-сканирования осуществляется по схеме рис. 2, а.



■ Рис. 2. Режим Local Mode (а) и Monitor Mode (б) РЧ-сканирования

Технология time-slicing H-REAP подразумевает приостановку обработки данных радиоканала, что позволяет прослушивать канал на протяжении T_{scan} каждые $T_s + \Delta t$ секунд без существенного влияния на качество оказания сервисов БЛВС (T_s — время передачи кадра).

Режим Monitor Mode РЧ-сканирования осуществляется по схеме рис. 2, б. Данная технология подразумевает отказ от обслуживания абонентов в пользу постоянного мониторинга радиоканала.

Особенности реализации адаптивных СОВ

Основным фактором, влияющим на топологию системы, является масштаб развертываемой БЛВС. В случае проектирования сети крупной организации, расположенной на площади, в несколько десятков раз превышающей зону покрытия одной ТД, необходимо развертывать сложную радиоканальную инфраструктуру. При этом следует учитывать тот факт, что атакующий [8, 9] субъект может перемещаться в пределах БЛВС или оказывать множественные воздействия на ее элементы.

Если в сети ШРД будет отсутствовать единый центр обработки событий сетевой активности, то множественные регистрируемые сенсорами ТД события будут иметь хаотичный характер, и по ним будет невозможно определить как источник, так и тип самого воздействия. Регистрация отдельных разрозненных событий сети ШРД не позволит администратору СОВ создать общую картину злонамеренных действий атакующего, и он может воспринять их как ложные срабатывания. Поэтому в данном случае необходимо использо-

вать единый центр обработки данных событий БЛВС, соответствующих специальным корреляционным сигнатурам СОВ.

Обеспечить работу механизмов корреляции атак можно путем подключения всех контроллеров БЛВС по схемам, представленным на рис. 3, а, б.

В схеме, представленной на рис. 4, все сигналы от контроллеров БЛВС об обнаружении тревог консолидируются в едином узле, а после анализа их происхождения выдается сигнал обнаружения атаки в пределах контролируемой сети.

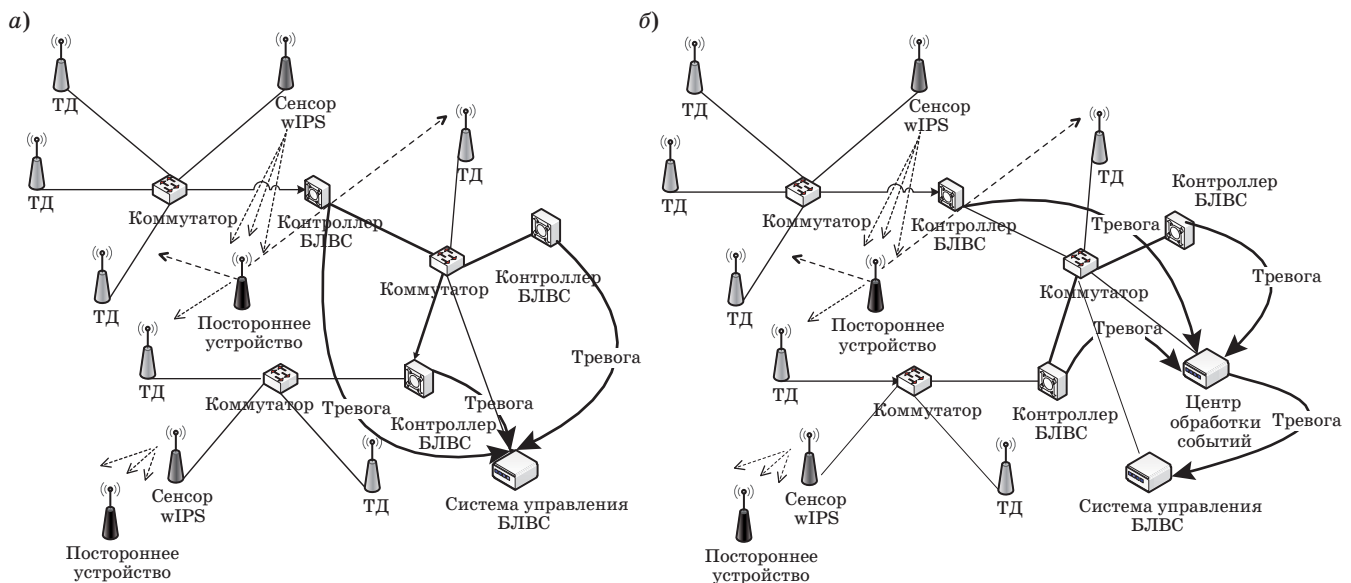
Система wIPS сохраняет всю информацию по передаваемым кадрам, составляющим обнаруженную угрозу, в соответствии с сигнатурой для ее дальнейшего анализа. Данная информация заносится в журнал отчетов, размещенный в центре обработки событий, и служит основным источником для формирования отчетности в системе управления БЛВС.

Для анализа уязвимостей БЛВС [10], защищаемой адаптивной СОВ, наиболее востребованными являются два типа отчетов — со списком wIPS-сигналов тревоги и идентификаторов ТД.

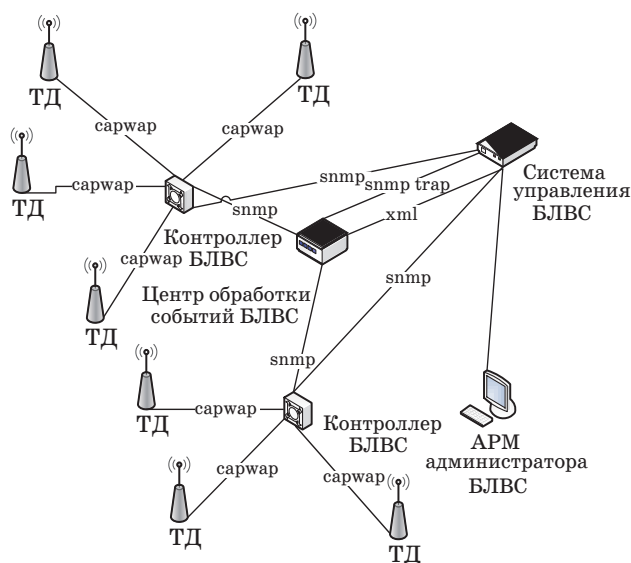
Отчет со списком wIPS-сигналов тревоги используется для отчетности об атаках и содержит:

- 1) сводный список сигналов тревоги;
- 2) тип сигнала тревоги;
- 3) SRC MAC;
- 4) идентификатор обнаружившей ТД;
- 5) время первого и последнего обнаружения.

Отчет со списком идентификаторов ТД используется для идентификации наиболее подверженных атакам зон радиопокрытия. Включает в себя рейтинг ТД с самым большим количеством ранжированных сигналов тревоги.



■ Рис. 3. Различия топологий БЛВС с базовой (а) и адаптивной (б) СОВ



■ Рис. 4. Взаимодействие компонентов wIPS

Система определения местоположения устройств

В состав проектируемой защищенной БЛВС включается система определения местоположения радиоустройств. Эта подсистема может быть как установлена на сервер системы управления, так и включена в состав контроллера БЛВС. Данная подсистема обеспечивает определение местоположения клиентских абонентских устройств (как входящих в состав сети, так и сторонних ТД и их клиентов), осуществляет мониторинг активности и фиксирует маршруты перемещения устройств, находящихся в зоне радиопокрытия БЛВС.

В рамках стандартов IEEE 802.11a/b/g/ радиооборудование обеспечивает возможность определения местоположения активного радиоинтерфейса субъекта, решая такие задачи, как:

- реализация работы алгоритмов позиционирования;
- настройка и корректировка алгоритмов позиционирования;
- отправка информации о местоположении;

— хранение статистики информации о местоположениях;

— хранение информации о радиоустройствах с привязкой к географическим картам.

Система определения местоположения функционирует по двум технологиям:

- метод оценки RSSI;
- метод разности времен прихода сигнала TDoA (Time Difference of Arrival).

Метод оценки RSSI основан на измерениях RSSI элементами инфраструктуры БЛВС. Для функционирования системы определения местоположения клиентов требуется присутствие в БЛВС не менее трех ТД. С увеличением числа ТД в БЛВС точность определения увеличивается. Основными факторами, влияющими на точность определения местоположения, являются:

- плотность размещения ТД;
- расположение ТД друг относительно друга;
- параметры окружающей среды.

Метод различий времен прихода сигнала TDoA основан на разнице во временах получения радиосигнала абонента несколькими ресиверами TDoA. Этот способ обнаружения хорошо работает на открытых пространствах.

Заключение

Несмотря на то, что методы обнаружения и предотвращения вторжений в проводных сетях в настоящее время бурно развиваются, а производители телекоммуникационного оборудования предлагают большое количество эффективных IDS, интенсивность разработки средств обнаружения вторжений в сегменте сетей радиодоступа существенно уступает проводному сегменту. Исследования показывают, что с увеличением числа ТД точность определения местоположения и вероятность ложного обнаружения стороннего радиоустройства повышаются. В территориально распределенных системах обнаружения вторжений целесообразно использовать алгоритмы корреляции сигналов тревоги, при этом вероятность ложного срабатывания снижается, а точность обнаружения повышается.

Литература

1. Зегжда Д. П., Коваленко С. Л. Проблемы безопасности беспроводных сетей семейства IEEE 802.11a/b/g // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2006. № 2. С. 45–49.
2. Юркин Д. В., Никитин В. Н. Анализ протоколов шифрования. Журнал радиоэлектроники. 2009. Т. 11. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr09/5/text.html> (дата обращения: 14.10.2013).
3. Юркин Д. В., Никитин В. Н. Улучшение способов аутентификации для каналов связи с ошибками // Информационно-управляющие системы. 2010. № 6. С. 24–29.
4. Common Criteria for Information Technology Security Evaluation. Part 1: Introduction and General Model, Version 3.1 // Common Criteria Portal. 2006. <http://www.commoncriteriaportal.org/files/ccfiles/CCPART1V3.1R3.pdf> (дата обращения: 20.10.2013).

5. **Common Criteria for Information Technology Security Evaluation. Part 2: Security Functional Requirements, Version 3.1.** // Common Criteria Portal. 2006. <http://www.commoncriteriaportal.org/files/ccfiles/CCPART2V3.1R3.pdf> (дата обращения: 20.10.2013).
6. **Watkins L., Robinson W. H., Beyah R. A.** A Passive Approach to Rogue Access Point Detection // Global Telecommunications Conf., Washington, 2007. P. 355–360.
7. **Chong E., Loo M., Christopher L., Marimuthu P.** Intrusion Detection for Routing Attacks in Sensor Networks // Intern. J. of Distributed Sensor Networks. 2006. Vol. 2. N 1. P. 313–332.
8. **Chung-Hsin L., Po-Cheng T., Chun-Lin L., Kuo-Hao L.** The Study of the Wireless Network Dos Attack // Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Interaction Sciences: Information Technology, Culture and Human. N. Y., 2009. P. 418–421.
9. **Марков А. С., Рауткин Ю. В., Фадин А. А.** Состояние и перспективы анализа защищенности Wi-Fi сетей // Тр. Научно-исследовательского института радио. 2012. № 1. С. 85–90.
10. **Hongda Yin, Guanling Chen, Jie Wang.** Detecting Protected Layer-3 Rogue APs. Broadband Communications // Networks Broadband Communications: Networks and Systems. Raleigh, 2007. P. 449–458.

UDC 004.05

Intrusion Detection Systems in IEEE 802.11 Local Wireless NetworksYurkin D. V.^a, PhD, Associate Professor, dvyurkin@yandex.ruNikitin V. N.^a, PhD, Associate Professor, vnikitin@rdnet.ru^aThe Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 22-1, Bolshevnikov St., 193232, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The research of developers of IDS and IPS has provided an operational model of an intrusion detection system which can detect and block typical wireless attacks in a wire system of data transfer. Yet the problem of techniques for monitoring, detecting and responding to information technology security breaches is very relevant in IEEE 802.11 radio networks. This research has been targeted at development of methods of system automation for preventing attacks on organization's wireless access points. **Methods:** signature and heuristic analysis of network traffic, correlation analysis of intrusion attempts. **Results:** There have been developed basic principles of constructing a system of intrusion detection in wireless networks. There have been worked out requirements for the methods of IDS data collection and analysis. There has been presented a technology of intruder detection at strategic points of a target IT system applying a method of evaluation of a received RSSI signal and a method of difference of TDoA signal arrival. There have been developed methods of radio channel scanning allowing detecting attacks in both autonomous systems and systems with central event processing. **Practical relevance:** The research results allow increasing the safety of the existing distributed radio networks.

Keywords — Intrusion Detection System, Wireless Local Networks..**References**

1. Zegzhda D. P., Kovalenko S. L. Problems of Radio Networks Std. IEEE 802.11a/b/g security. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy*, 2006, vol. 1, no. 2, pp. 45–49 (In Russian).
2. Yurkin D. V., Nikitin V. N. Analyses of Encryption Protocols. *Zhurnal radioelektroniki*, 2009, vol. 11, no. 4. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/apr09/5/text.html> (accessed 20 October 2013) (In Russian).
3. Yurkin D. V., Nikitin V. N. Improving Authentication Methods for Error Prone Channels. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2010, no. 6, pp. 24–29 (In Russian).
4. Common Criteria for Information Technology Security Evaluation. Part 1. Introduction and General Model, Version 3.1. *Common Criteria Portal*, 2006. Available at: <http://www.commoncriteriaportal.org/files/ccfiles/CCPART1V3.1R3.pdf> (accessed 20 October 2013).
5. Common Criteria for Information Technology Security Evaluation. Part 2. Security Functional Requirements, Version 3.1. *Common Criteria Portal*, 2006. Available at: <http://www.commoncriteriaportal.org/files/ccfiles/CCPART2V3.1R3.pdf> (accessed 20 October 2013).
6. Watkins L., Robinson W. H., Beyah R. A. A Passive Approach to Rogue Access Point Detection. *Global Telecommunications Conf.* Washington, 2007, pp. 355–360.
7. Chong E., Loo M., Christopher L., Marimuthu P. Intrusion Detection for Routing Attacks in Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2006, vol. 2, no. 1, pp. 313–332.
8. Chung-Hsin L., Po-Cheng T., Chun-Lin L., Kuo-Hao L. The Study of the Wireless Network Dos Attack. *Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Interaction Sciences: Information Technology, Culture and Human*. New York, 2009, pp. 418–421.
9. Markov A. S., Rautkin Iu. V., Fadin A. A. Status and Prospects of Security Analysis Wi-Fi Networks. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio*, 2012, vol. 1, no. 12, pp. 85–90 (In Russian).
10. Hongda Yin, Guanling Chen, Jie Wang. Detecting Protected layer-3 Rogue APs. *Broadband Communications, Networks and Systems*. Raleigh, 2007, pp. 449–458.

УДК 004.67+004.627

ОБ ИЕРАРХИЧЕСКОМ КОДИРОВАНИИ В ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Т. М. Сухов^{а,1}, начальник сектора отдела телевизионных систем, соискатель
^аЗАО «Научно-производственная фирма «ТИРС», Санкт-Петербург, РФ

Цель: существующие системы видеонаблюдения обладают рядом недостатков, одним из которых является низкая устойчивость к воздействию пакетных ошибок в каналах связи. Целью исследования является усовершенствование системы видеонаблюдения с использованием дискретного псевдокосинусного преобразования и принципа постоянной цветовой яркости для повышения устойчивости, порождаемого ею потока видеоданных к ошибкам, возникающим в каналах связи. **Результаты:** описаны основные функциональные блоки системы видеонаблюдения с использованием дискретного псевдокосинусного преобразования и принципа постоянной цветовой яркости в целях последующей доработки в части применения иерархического кодирования. Рассмотрены методы иерархического кодирования для кодеков с использованием дискретного (псевдо-)косинусного преобразования. Произведено сравнение типов иерархического кодирования применительно к системе видеонаблюдения с использованием дискретного псевдокосинусного преобразования и принципа постоянной цветовой яркости в условиях ограниченных аппаратных ресурсов, которое показало, что наиболее выгодным вариантом с точки зрения аппаратной реализации является применение иерархического кодирования с масштабированием по качеству. Исследование влияния потери пакетов в канале связи на иерархический поток видеoinформации, порожденный системой с использованием дискретного псевдокосинусного преобразования, принципа постоянной цветовой яркости и иерархического кодирования, показало, что применение иерархического кодирования с масштабированием по качеству может дать выигрыш пикового отношения сигнал/шум до 6 дБ относительно базовой схемы кодирования без иерархического расширения. **Практическая значимость:** результаты исследований иерархического кодирования позволили создать систему с улучшенными в части помехоустойчивости характеристиками передачи цветовой информации для аппаратных реализаций системы видеонаблюдения.

Ключевые слова — дискретное псевдокосинусное преобразование, иерархическое кодирование, система видеонаблюдения.

Введение

Системы видеонаблюдения являются одной из областей обработки видеoinформации, имеющей потенциал для улучшения потребительских характеристик. Большое распространение системы видеонаблюдения получили как в охранных системах, так и в бытовых, таких как видеодомофоны, автомобильные видеорегистраторы и пр.

Однако существующие системы видеонаблюдения обладают рядом недостатков, таких как плохая передача четкости насыщенных цветных деталей видеоизображений, большая вычислительная сложность и, как следствие, высокое энергопотребление.

Большинство методов кодирования видео для достижения эффекта сжатия используют два типа избыточности — временную и пространственную [1]. Системы цифрового видеонаблюдения устраняют при обработке видеoinформации временную и пространственную избыточность за счет применения стандартизованных кодеков, таких как MJPEG и MPEG. Кодеки на базе стандартов семейства MPEG (MPEG-2, MPEG-4, H.264/MPEG-4 AVC) обеспечивают высокую эффективность сжатия видеоданных, так как при помощи алгоритмов оценки и компенсации дви-

жения учитывают межкадровую зависимость отсчетов видеoinформации [2]. Однако данные алгоритмы обладают высокой вычислительной сложностью. Кодеки на базе стандарта MJPEG (MJPEG, JPEG2000) учитывают только внутрикадровую зависимость отсчетов видеoinформации и поэтому обладают низкой вычислительной сложностью, но при этом уступают по эффективности сжатия.

Одним из существенных недостатков применения в цифровых системах видеонаблюдения стандартизованных кодеков является использование принципа постоянной яркости как первичного звена преобразования цветных отсчетов в яркостные и цветоразностные отсчеты. Применение принципа постоянной яркости приводит к потере четкости видеoinформации в моноцветных деталях и потере яркости насыщенных цветов [3, 4].

Альтернативой системам видеонаблюдения, построенным на стандартизованных кодеках, может стать система, реализованная с использованием дискретного псевдокосинусного преобразования (ДПКП) и принципа постоянной цветовой яркости (ПЦЯ) [5].

Улучшения потребительских характеристик в системе видеонаблюдения с использованием ДПКП и принципа ПЦЯ можно достичь применением иерархического кодирования видеoinформации, которое позволит улучшить помехоустойчивость системы видеонаблюдения.

¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем управления Балтийского государственного технического университета им. Д. Ф. Устинова Л. Л. Полосин.

Система видеонаблюдения с использованием ДПКП и принципа постоянной цветовой яркости

Улучшения передачи цветовой информации в системах видеонаблюдения наряду с упрощением системы сжатия можно достичь, применив систему с использованием ДПКП и принципа ПЦЯ (рис. 1).

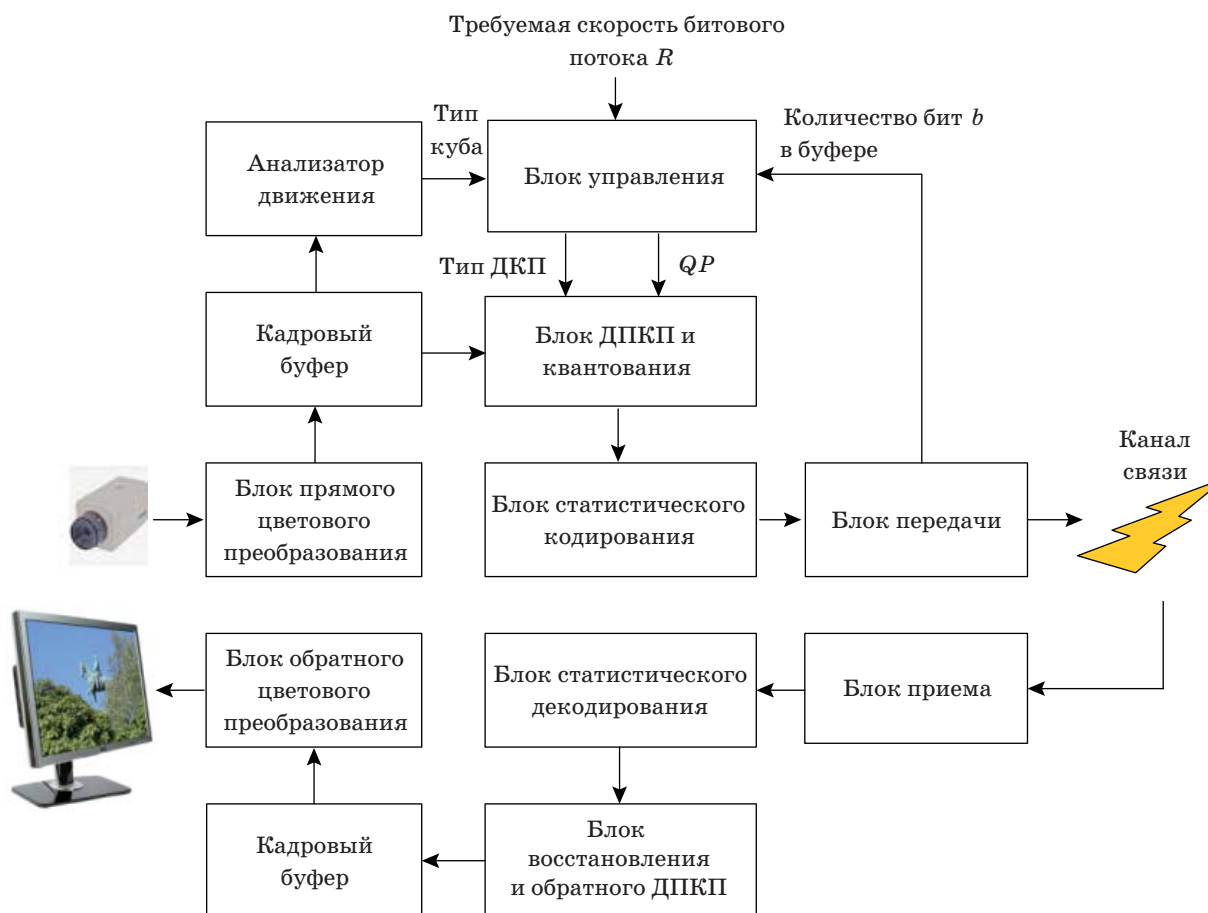
Кратко последовательность обработки видеоданных описывается следующим алгоритмом.

Данные поступают с видеосенсора в формате RGB в Блок прямого цветового преобразования, где преобразовываются входные отсчеты в выходные согласно принципу ПЦЯ, после чего в Кадровом буфере происходит накопление восьми кадров и формирование непересекающихся кубов размером $8 \times 8 \times 8$ отсчетов. Далее выделяется один куб размерностью $8 \times 8 \times 8$ отсчетов, который поступает в Анализатор движения, где анализируется количество движения внутри куба. В зависимости от типа куба в Блоке ДПКП и квантования производится вычисление трехмерного ДПКП (ДПКП-3) и квантование, либо двумерного ДПКП (ДПКП-2) по плоскостям и квантование

коэффициентов. Затем в Блоке статистического кодирования формируется массив кодовых слов кода Хаффмана для каждого куба. Блок передачи производит разбиение сжатого потока на пакеты и передачу информации по каналу связи. Блок управления выдает значение коэффициента квантования для каждого куба в зависимости от требуемой скорости битового потока и количества бит в буфере передатчика.

Прием пакетов и сборку осуществляет Блок приема. Сформированный поток поступает в Блок статистического декодирования, где производится извлечение кодовых слов кода Хаффмана. Далее поток передается в Блок восстановления и обратного ДПКП, после чего блоки раскладываются в Кадровый буфер. Для отображения из Кадрового буфера извлекается каждый из восьми кадров по порядку и передается в Блок обратного цветового преобразования, где выполняется восстановление отсчетов согласно принципу ПЦЯ.

Подробно принцип ПЦЯ и его использование описаны в работах [3–5]. Основными преимуществами принципа ПЦЯ является сохранение четкости видеoinформации при передаче цветовой информации с прореживанием цветоразностных



■ Рис. 1. Функциональная схема системы видеонаблюдения

видеоотсчетов и сохранение четкости в моноцветных насыщенных деталях видеоизображений.

Анализатор движения внутри куба оценивает блок и задает три возможных типа кодирования трехмерного куба: статический куб, куб с умеренным движением и динамический куб [2, 5]. Если куб оценен как статический, то кодер производит запись в поток двух бит на повторение куба, декодер в таком случае восстанавливает блок полностью из предыдущего накопленного набора видеоданных. Динамические кубы обрабатываются по плоскостям, так как трехмерное преобразование приводит к появлению специфичных визуальных искажений. Куб с умеренным движением обрабатывается с использованием ДПКП-3.

Пространственно-временная избыточность устраняется применением ДПКП-3 в кубах видеoinформации размерностью 8×8×8. ДПКП-3 является целочисленной реализацией трехмерного дискретного косинусного преобразования (ДКП-3) в сочетании с квантованием коэффициентов преобразования без операции деления [2]. Отличие вычисления преобразования с применением ДПКП-3 состоит в том, что используется аппроксимированная матрица

$$H = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 \\ 12 & 10 & 6 & 3 & -3 & -6 & -10 & -12 \\ 8 & 4 & -4 & -8 & -8 & -4 & 4 & 8 \\ 10 & -3 & -12 & -6 & 6 & 12 & 3 & -10 \\ 8 & -8 & -8 & 8 & 8 & -8 & -8 & 8 \\ 6 & -12 & 3 & 10 & -10 & -3 & 12 & -6 \\ 4 & -8 & 8 & -4 & 4 & 8 & -8 & 4 \\ 3 & -6 & 10 & -12 & 12 & 10 & 6 & -3 \end{pmatrix}$$

Одномерное ДПКП может быть вычислено следующим образом: $X = D \cdot H \cdot x = (H \cdot X) \otimes d$, где X — матрица значений ДПКП; D — диагональная матрица; x — матрица входных значений; $d = D \cdot e$ (e — единичный вектор-столбец длины 8); \otimes — поэлементное умножение.

Обратное ДПКП может быть вычислено как $x_r = H^T \cdot X$, где x_r — матрица восстановленных

значений. Производя вычисление ДПКП по трем осям (строкам, столбцам и «времени»), можно произвести вычисление ДПКП-3 [2, 6, 7].

Процедура квантования без операции деления может быть реализована с операциями умножения и арифметического сдвига [2, 6, 7].

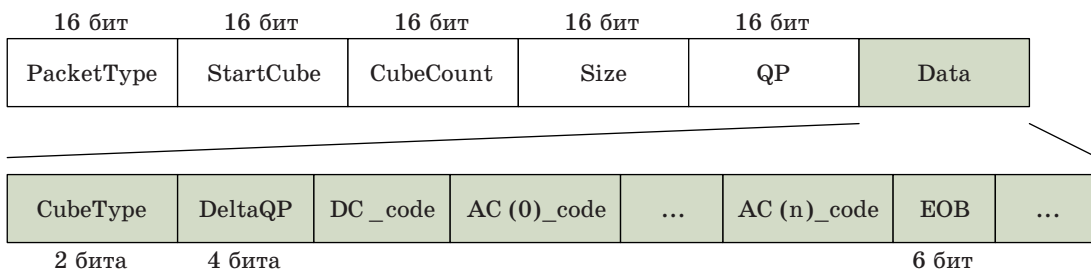
Применение ДПКП-3 обеспечивает сравнимый с MPEG-4 коэффициент сжатия видеoinформации в сочетании со сравнительно невысокой вычислительной сложностью. Согласно исследованиям ФГУП «НИИТ» [8], для реализации кодека на основе ДКП-3 потребовалось меньше вычислительных ресурсов по сравнению с кодером MPEG-4.

Поток формируется в функциональном блоке передачи, формат пакета видеоданных изображен на рис. 2 (белым цветом указаны поля заголовка пакета, серым — данные кубов).

Поле *PacketType* содержит информацию о типе пакета (0 — пакет видеоданных, 2 — сервисный пакет, содержащий временные метки), *StartCube* — порядковый номер куба, *CubeCount* — количество кубов в пакете, *Size* — размер пакета, *QP* — коэффициент квантования для первого куба в пакете. Поле данных *Data* содержит тип куба (*CubeType*), изменение шага коэффициента квантования (*DeltaQP*) для следующего за этим полем куба, далее записываются кодовые слова кода Хаффмана. Сначала записывается низкочастотный коэффициент (*DC_code*) и за ним кодовые слова кода Хаффмана высокочастотных коэффициентов (*AC(i)_code*, где i — порядковый номер кодового слова). Окончание куба фиксируется записью кодового слова *end of block (EOB)*.

Максимальный размер пакета прием равным 1000 Б. Очередной пакет формируется, пока суммарный размер коэффициентов кода Хаффмана куба меньше, чем размер оставшегося места в текущем пакете. Если суммарный размер коэффициентов кода Хаффмана куба не вмещается в текущий пакет, то происходит переход к формированию следующего пакета.

Представленная выше система видеонаблюдения может быть доработана и улучшена в целях повышения помехоустойчивости видеоданных.



■ Рис. 2. Формат пакета потока видеоданных

Для удобства изложения назовем функциональные блоки от блока прямого цветового преобразования до блока передачи **базовым кодером**, а блоки от блока приема до блока обратного цветового преобразования — **базовым декодером**.

Представим иерархическое кодирование для системы сжатия видеoinформации с использованием ДПКП. Но перед этим рассмотрим основы иерархического кодирования видеoinформации.

Иерархическое представление видеoinформации для Д(П)КП

Иерархическое представление видеoinформации было предложено для стандартов H.262/MPEG-2, H.263 и MPEG-4 Visual. Подробно механизмы иерархического кодирования для стандарта H.264/MPEG-4 AVC изложены в работе [9]. В англоязычной литературе используется термин Scalable Video Coding (SVC) — масштабируемое (иерархическое) кодирование видео. В русскоязычной терминологии термины «масштабируемое» и «иерархическое» кодирование видео будем считать тождественными.

Иерархическое кодирование — представление видеоданных в целях адаптации их для различных потребностей и предпочтений конечных пользователей, а также различных возможностей приемной (декодирующей) аппаратуры и различных сетевых условий.

Целью иерархического кодирования является порождение такого потока видеоданных, в котором содержится один или более потоков разного уровня, которые могут быть декодированы как по отдельности базовым декодером видеoinформации, так и иерархическим декодером видеoin-

формации в зависимости от аппаратной мощности декодирующей аппаратуры и (или) характеристик канала передачи данных.

Для общего понимания приведена схема кодирования и декодирования разных уровней иерархической видеoinформации (рис. 3).

Имеется иерархический кодер ДПКП, на вход которого подается полноформатное полнокадровое видеooбразование. Кодер порождает иерархический поток видеоданных. Поток содержит информацию в виде иерархических слоев, первый из которых несет основную видеoinформационную составляющую и называется *базовым* слоем, остальные слои являются дополняющими, полученными при помощи базового слоя, и называются *расширяющими* слоями. Базовый слой может быть декодирован при помощи декодера ДПКП (описан ранее, далее — *базовый декодер*). Расширяющие слои могут быть декодированы иерархическим декодером и суммированы с базовым слоем таким образом, что выходное изображение получает дополнительную информацию либо в виде пространственного увеличения видеooбразования (увеличение разрешения), либо в виде увеличения кадровой скорости видеоряда.

Использовать иерархическое кодирование целесообразно по следующим причинам. Во-первых, аппаратное устройство не способно производить декодирование большого количества видеoinформации, т. е. ограничена вычислительная сложность аппаратуры декодирования. Во-вторых, пропускная способность канала связи ограничена: при получении базового потока можно произвести декодирование уменьшенной по разрешению и кадровой скорости видеoinформации, в то время как при увеличении пропускной



■ Рис. 3. Схема кодирования и декодирования иерархического кодера

способности канала связи качество декодированной видеопоследовательности будет улучшено за счет добавления пространственных уточняющих деталей и увеличения кадровой скорости видеoinформации.

Рассмотрим виды иерархического кодирования для системы сжатия с использованием Д(П)КП. Как и для стандарта H.264/MPEG-4 AVC, имеется 3 вида иерархического кодирования: пространственное, временное и иерархическое кодирование с масштабированием по качеству.

Пространственное иерархическое кодирование

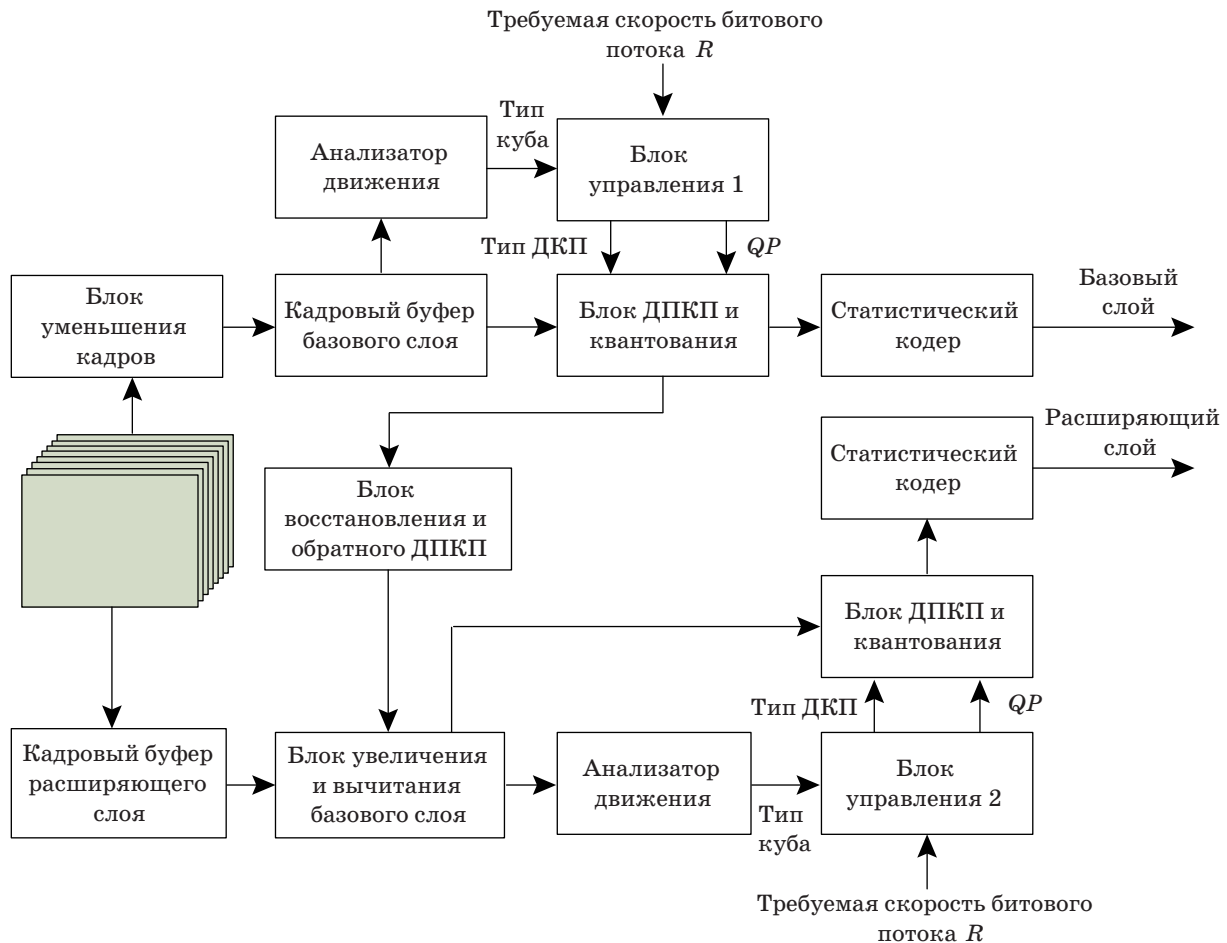
Пространственное иерархическое кодирование видеoinформации (рис. 4) предполагает, что кадры исходного видеоряда будут уменьшены в 2 раза (или более) в Блоке уменьшения кадров. Уменьшенные изображения накапливаются в Кадровом буфере базового слоя, после чего из него извлекаются блоки размерностью 8×8×8 отсчетов. Далее сжатие производится так же, как описано ранее в системе сжатия видеoinформации с использованием ДПКП, с тем исключением, что кубы, после того как были проквантованы коэффициенты спектра, поступают в Блок вос-

становления и обратного ДПКП и далее в ветку формирования расширяющего слоя.

Расширяющий слой формируется следующим образом. Кадры из Кадрового буфера расширяющего слоя поступают в Блок увеличения и вычитания базового слоя, который содержит восстановленные кадры базового слоя, увеличенные в 2 раза. Из исходных кадров производится вычитание восстановленных кадров базового слоя, после чего формируются кубы расширяющего слоя. Далее сжатие разностных кубов расширяющего слоя производится аналогично сжатию кубов базового слоя.

Блок управления 1 управляет скоростью выходного потока базового слоя, изменяя значение коэффициента квантования для каждого куба. Блок управления 2 регулирует скорость битового потока расширяющего слоя аналогичным образом.

Таким образом, на выходе пространственного иерархического кодера имеются базовый и расширяющий потоки. Для порождения двух и более расширяющих слоев требуется для каждого расширяющего потока ввести дополнительную ветку сжатия, которая будет получать разност-



■ Рис. 4. Схема пространственного иерархического кодирования

ную информацию от предыдущих слоев и формировать дополнительный расширяющий поток.

Распределение видеоинформации по слоям показано на рис. 5, а-в. Базовый слой занимает примерно 25 % от основного потока, 75 % приходится на расширяющий слой.

Пространственное иерархическое кодирование с использованием ДПКП-3 более подробно изложено в работе [11].

Временное иерархическое кодирование

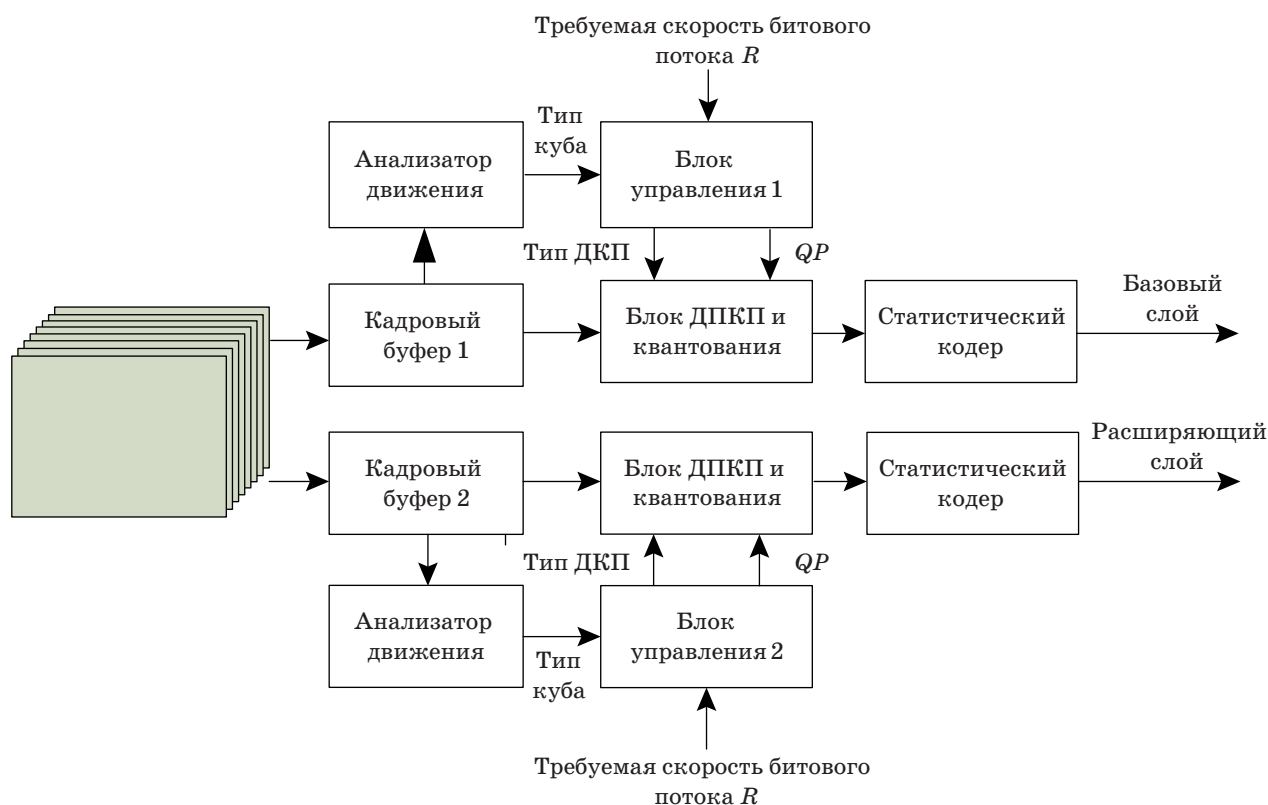
Иерархическое кодирование с масштабированием по времени (рис. 6) представляет собой, по сути, применение двух и более базовых ко-

деров ДПКП с тем исключением, что *Кадровый буфер 1* принимает только нечетные кадры, а *Кадровый буфер 2* принимает только четные кадры. Исходный видеоряд в данном случае представляет собой ряд с вдвое большим количеством кадров (16 кадров). *Блок управления 1*, изменяя значение коэффициента квантования, порождает базовый слой с требуемой скоростью битового потока. *Блок управления 2* аналогично порождает расширяющий слой с требуемой скоростью битового потока для расширяющего слоя.

Распределение видеоинформации по слоям для иерархического кодирования по времени показано на рис. 7, а-в.



■ Рис. 5. Декодированные кадры иерархического кодирования по пространству: а — исходное изображение видеоряда («foreman») [10]; б — декодированный кадр базового слоя; в — декодированный кадр базового и расширяющего слоев



■ Рис. 6. Схема иерархического сжатия по времени



■ **Рис. 7.** Представление декодированных слоев иерархического кодирования по времени: *а* — исходная видео-последовательность; *б* — декодированный кадр базового слоя; *в* — декодированный кадр расширяющего слоя

Рассмотрев более детально принципы временного иерархического кодирования, можно сделать вывод, что любой из порожденных иерархическим кодером потоков в данной схеме является базовым и может быть декодирован по отдельности базовым декодером ДПКП с уменьшенной кадровой скоростью.

Однако, чтобы получить полнокадровый видеоряд, требуется произвести перемежение и интерполяцию кадров базового и расширяющего слоев.

Иерархическое кодирование с масштабированием по качеству

Отличие сжатия видеоинформации с применением иерархического кодирования видеоинформации с масштабированием по качеству (рис. 8) от базового кодирования видеоинформации заключается в том, что из кодовых слов кода Хаффмана, полученных в блоке *Статистический кодер*, коэффициенты распределяются в базовый слой и расширяющие слои. При этом расширяющих слоев может быть два и более.

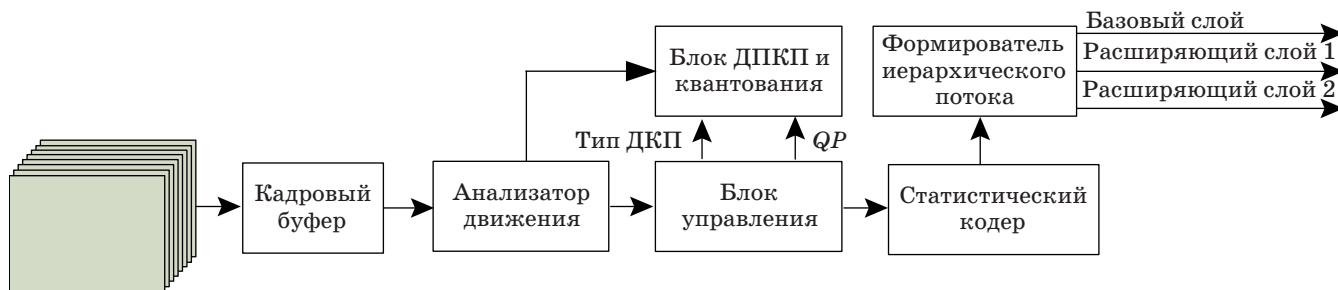
Распределение коэффициентов по слоям показано на рис. 9. Базовый слой состоит из низкочастотных коэффициентов трехмерного куба (*DC*-коэффициентов). Расширяющий слой 1 состоит из высокочастотных коэффициентов блока (показаны серым цветом), согласно обходу по зигзагу

для трехмерного куба. Расширяющий слой 2 состоит из оставшихся высокочастотных коэффициентов куба (показаны белым цветом).

Восстановленные изображения декодированных иерархических слоев показаны на рис. 10, *а-г*. Базовый слой занимает около 13 % от суммарного потока, расширяющий слой 1 занимает около 29 %, расширяющий слой 2 занимает 58 %.

После декодирования базового слоя кадр видеоряда представляет собой блочное изображение, где базовой единицей отображения является блок 8×8 пикселей, яркость в котором определяется *DC*-коэффициентом. При декодировании базового слоя и расширяющего слоя 1 изображение дополняется деталями и становится более четким. При декодировании всех слоев (базового и двух расширяющих) получается наиболее четкое изображение для заданного критерия сжатия (при сжатии установлено ограничение 1 Мбит/с на весь поток видеоданных).

Распределение по слоям можно производить в зависимости от характеристик канала связи, для которого планируется применять систему сжатия и передачи видеоинформации. К примеру, первый расширяющий слой можно увеличить до коэффициентов диагонали $AC_{0,7,1} - AC_{0,0,7}$, тем самым перераспределив поток таким образом, что расширяющий слой 1 займет 50 %, а расширяющий слой 2 займет 37 %.



■ **Рис. 8.** Схема иерархического сжатия с масштабированием по качеству

<i>DC</i>	<i>AC</i> _{0,0,1}	<i>AC</i> _{0,0,2}	<i>AC</i> _{0,0,3}	<i>AC</i> _{0,0,4}	<i>AC</i> _{0,0,5}	<i>AC</i> _{0,0,6}	<i>AC</i> _{0,0,7}
<i>AC</i> _{0,1,0}	<i>AC</i> _{0,1,1}	<i>AC</i> _{0,1,2}	<i>AC</i> _{0,1,3}	<i>AC</i> _{0,1,4}	<i>AC</i> _{0,1,5}	<i>AC</i> _{0,1,6}	<i>AC</i> _{0,1,7}
<i>AC</i> _{0,2,0}	<i>AC</i> _{0,2,1}	<i>AC</i> _{0,2,2}	<i>AC</i> _{0,2,3}	<i>AC</i> _{0,2,4}	<i>AC</i> _{0,2,5}	<i>AC</i> _{0,2,6}	<i>AC</i> _{0,2,7}
<i>AC</i> _{0,3,0}	<i>AC</i> _{0,3,1}	<i>AC</i> _{0,3,2}	<i>AC</i> _{0,3,3}	<i>AC</i> _{0,3,4}	<i>AC</i> _{0,3,5}	<i>AC</i> _{0,3,6}	<i>AC</i> _{0,3,7}
<i>AC</i> _{0,4,0}	<i>AC</i> _{0,4,1}	<i>AC</i> _{0,4,2}	<i>AC</i> _{0,4,3}	<i>AC</i> _{0,4,4}	<i>AC</i> _{0,4,5}	<i>AC</i> _{0,4,6}	<i>AC</i> _{0,4,7}
<i>AC</i> _{0,5,0}	<i>AC</i> _{0,5,1}	<i>AC</i> _{0,5,2}	<i>AC</i> _{0,5,3}	<i>AC</i> _{0,5,4}	<i>AC</i> _{0,5,5}	<i>AC</i> _{0,5,6}	<i>AC</i> _{0,5,7}
<i>AC</i> _{0,6,0}	<i>AC</i> _{0,6,1}	<i>AC</i> _{0,6,2}	<i>AC</i> _{0,6,3}	<i>AC</i> _{0,6,4}	<i>AC</i> _{0,6,5}	<i>AC</i> _{0,6,6}	<i>AC</i> _{0,6,7}
<i>AC</i> _{0,7,0}	<i>AC</i> _{0,7,1}	<i>AC</i> _{0,7,2}	<i>AC</i> _{0,7,3}	<i>AC</i> _{0,7,4}	<i>AC</i> _{0,7,5}	<i>AC</i> _{0,7,6}	<i>AC</i> _{0,7,7}

■ *Рис. 9.* Распределение коэффициентов по слоям



■ *Рис. 10.* Представление иерархического кодирования с масштабированием по качеству: *a* — исходное видеозображение; *б* — базовый слой; *в* — базовый поток и расширяющий поток 1; *г* — базовый поток и расширяющие потоки 1 и 2

Сравнение типов иерархического кодирования для применения в системе видеонаблюдения

Отметим преимущества и недостатки иерархических моделей кодирования в применении к описанной ранее системе видеонаблюдения с использованием ДПКП и принципа ПЦЯ.

Критериями ограничения будем считать вычислительную сложность системы сжатия и требуемый объем оперативной памяти для хранения кадров.

Пространственное иерархическое кодирование требует увеличения объема памяти для хранения дополнительных уменьшенных кадров. При увеличении количества расширяющих слоев потребуется дополнительное увеличение объемов памяти для хранения разностных кадров. Кодирование каждого из расширяющих слоев приводит к запуску дополнительного кодера ДПКП. Кроме того, требуется производить увеличение и уменьшение кадров с вычитанием, что намного увеличивает количество вычислительных ресурсов, требуемых для формирования пространственных иерархических потоков.

Применение иерархического кодирования с масштабированием по времени требует увеличения объема оперативной памяти для хранения вдвое большего количества кадров, потому как

уменьшение ДПКП по «времени» до четырех (вместо восьми) отсчетов существенно скажется на коэффициенте сжатия каждого из слоев. Относительно вычислительных операций требуется запуск двух кодеров, работающих в параллель, но каждому из кодеров отводится вдвое больше времени для сжатия потока, т. е. не потребуются существенных затрат в вычислительном отношении.

Иерархическое кодирование с масштабированием по качеству не требует значительного увеличения объемов оперативной памяти, и вычислительная сложность ограничивается только формированием потоков по отдельности, что является приемлемым для рассмотренных ограничений в применении к описанной ранее системе видеонаблюдения.

Система видеонаблюдения с использованием ДПКП, принципа постоянной цветовой яркости и иерархического кодирования

Сравнение типов иерархического кодирования в применении к системе видеонаблюдения с использованием ДПКП и принципа ПЦЯ позволяет сделать вывод, что иерархическое кодирование видеоинформации с масштабированием



■ Рис. 11. Схема иерархического кодирования для системы видеонаблюдения с использованием ДПКП и принципа ПЦЯ

по качеству является наименее требовательным к вычислительным аппаратным ресурсам, вследствие чего его реализация является преимущественной для применения в системе видеонаблюдения с использованием ДПКП. Схема системы видеонаблюдения с использованием ДПКП, принципа ПЦЯ и иерархическим кодированием потока показана на рис. 11.

Обработка видеoinформации производится аналогично обработке в базовом кодере ДПКП с тем исключением, что из коэффициентов кода Хаффмана Блок формирования слоев иерархического потока формирует базовый слой и два расширяющих. Базовый слой (слой 1), как описано выше, содержит только низкочастотные коэффициенты кубов, слои 2 и 3 являются расширяющими.

Блок передачи иерархического потока, получая каждый из слоев, формирует пакеты иерархических слоев и передает их по отдельному логическому (либо физическому) каналу связи.

Рассмотрим распределение коэффициентов по слоям иерархического потока видеoinформации. Количество слоев определим по количеству логических (либо физических) каналов передачи данных. Для нашего случая определим три канала с пропускными характеристиками 512, 1024 Кбит/с и 54 Мбит/с. Трехмерные кубы коэффициентов ДКП содержат информацию о видеоизображении, которая описывает пространственно-временные характеристики. Низкочастотный коэффициент куба содержит информацию о яркости всего блока. Высоочастотные коэффициенты, в зависимости от расположения, описывают пространственные (коэффициенты по горизонтали и вертикали) и временные (коэффициенты по «времени») изменения внутри куба. Более эффективно использовать обход по зигзагу, соответствующий убыванию частот появления ненулевых коэффициентов преобразования в кубе [2]. Исходя из описанного выше, при формировании слоев можно выделить низкочастотные коэффициенты в базовый слой, а в расширяющие слои (в зависимости от их количества) поместить высокочастотные коэффициенты. Так как следующие

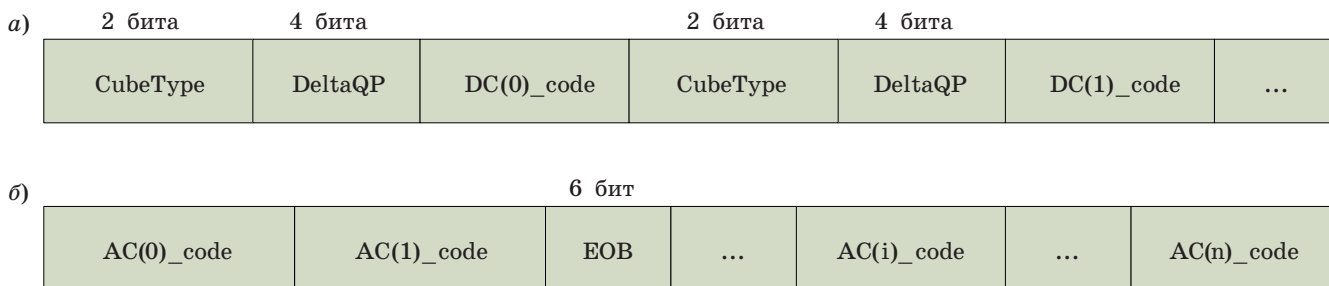
ми по значимости коэффициентами в кубе ДКП-3 являются коэффициенты, расположенные по трем направлениям от низкочастотного, логично вынести эти три коэффициента в расширяющий слой 1 (см. рис. 9). Оставшиеся коэффициенты поместим в расширяющий слой 2. Рассмотрим более подробно формирование иерархического потока.

Формирование иерархического потока и пакетов в системе видеонаблюдения с использованием ДПКП, ПЦЯ и иерархического кодирования производится таким же образом, как и для базового кодера (см. рис. 2), при этом заголовок пакета полностью аналогичен заголовку пакетов потока, порожденного базовым кодером видеoinформации. Размер пакета соответствует размеру пакета базового кодера. Формат поля данных пакета иерархических слоев видеоданных изображен на рис. 12.

Базовый слой иерархического потока (рис. 12, а) содержит тип куба (*CubeType*), изменение шага коэффициента квантования (*DeltaQP*) для следующего за этим полем куба, далее записывается кодовое слово низкочастотного коэффициента (*DC(i)_code*, где *i* — порядковый номер куба) кода Хаффмана.

Расширяющие слои (рис. 12, б) формируются согласно заранее заданным границам размещения коэффициентов кода Хаффмана. Границы слоев задаются следующим образом: базовый слой — низкочастотные коэффициенты кода Хаффмана (*DC_code*); расширяющий слой 1 — высокочастотные коэффициенты кода Хаффмана в диапазоне от двух до пяти (при зигзагообразном сканировании коэффициентов куба); расширяющий слой 2 — высокочастотные коэффициенты кода Хаффмана в диапазоне от шести до 512 (при зигзагообразном сканировании коэффициентов куба). При этом если в диапазоне расширяющего слоя встречается код конца блока (*EOB*), то он записывается в этот расширяющий слой.

Для увеличения помехоустойчивости и лучшего восстановления принятой видеoinформации можно произвести передачу базового слоя по наиболее помехоустойчивому каналу связи либо применить коды, исправляющие ошибки.



■ Рис. 12. Формат пакета иерархического потока видеоданных: а — базовый слой; б — расширяющие слои

Например, построив систему с передачей по каналам третьего (3G), четвертого (4G/LTE) поколения и Wi-Fi, можно производить отсылку базового слоя и по 3G-, и по 4G/LTE-сетям, а расширяющие слои передавать по 4G/LTE и Wi-Fi.

Сравнение базовой и иерархической систем видеонаблюдения с использованием ДПКП и принципа постоянной цветовой яркости

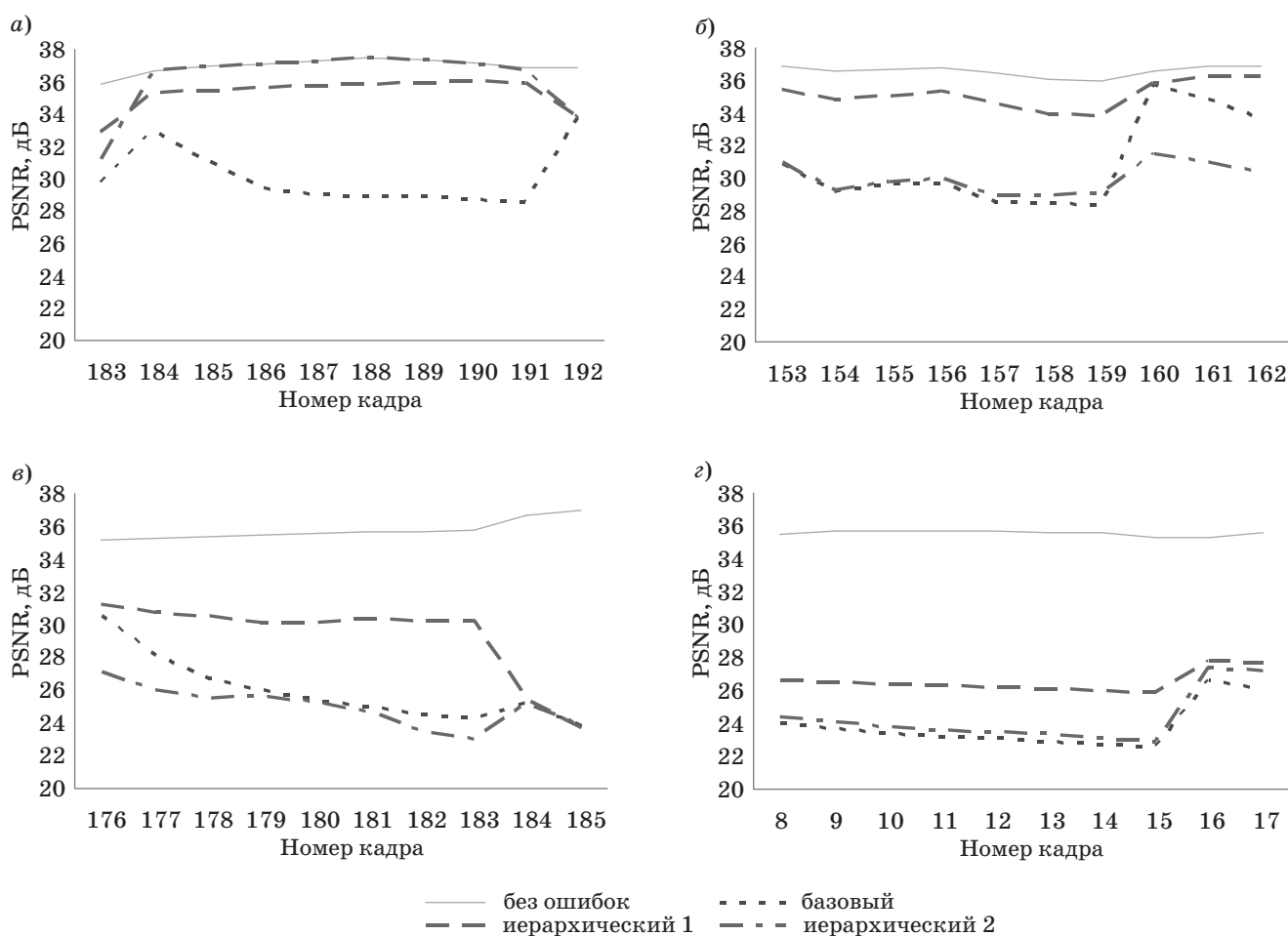
Рассмотрим характеристики базовой и иерархической систем видеонаблюдения. При сжатии тестовой видеопоследовательности «foreman» была установлена следующая характеристика: ограничение на порождаемый кодером поток видеоданных — не более 1 Мбит/с.

При иерархическом кодировании с масштабированием по качеству фактическое количество кодов Хаффмана остается таким же, как и у базового кодера, поэтому избыточность порожденного потока зависит только от того, как коэффициенты кода Хаффмана будут распре-

лены по пакетам. Для видеопоследовательности «foreman» иерархический поток по объему превысил на 0,6 % поток, порожденный базовым кодером. Это связано с тем, что при формировании пакетов, описанном выше, используется ограничение в 1000 Б на размер пакета. Так как кодовые слова кода Хаффмана имеют различную длину (от 2 до 26 бит), то их распределение, учитывая ограничение на длину пакета, может влиять на размер суммарного выходного иерархического потока видеoinформации. Однако для другой видеопоследовательности и других параметров сжатия может наблюдаться ситуация, когда поток базового кодера больше, чем иерархического.

Таким образом, избыточность иерархического потока сопоставима с избыточностью потока базового кодера видеoinформации.

Графики зависимости пикового отношения сигнала к шуму (PSNR) для потока без ошибок, потока базового кодера, иерархических потоков 1 и 2 приведены на рис. 13, а–г.



■ Рис. 13. Зависимость PSNR от количества ошибок для видеопоследовательности «foreman» при потере пакета с вероятностью 0,01 (а); 0,05 (б); 0,1 (в); 0,15 (г)



■ **Рис. 14.** Воздействие канальной ошибки с вероятностью потери пакета 0,1 на базовый (а) и иерархический (б) потоки

В иерархическом потоке 1 следующее распределение потоков: базовый — 13 %, расширяющий слой 1 — 29 %, расширяющий слой 2 — 58 %. Иерархический поток 2 содержит потоки со следующим распределением: базовый — 24 %, расширяющий слой 1 — 47 %, расширяющий слой 2 — 29 %. Размер пакета для обоих иерархических потоков — не более 1000 Б.

По приведенным результатам можно сделать вывод, что выигрыш от применения иерархического кодирования с масштабированием по качеству может достигать 6 дБ, однако при различных распределениях потоков по иерархическим слоям может происходить потеря данных, которая ведет к падению PSNR до 3 дБ и более.

Из-за отличия от базового распределения коэффициентов в сформированном иерархическом потоке восстановленные изображения после воздействия ошибок канала связи выглядят иначе (рис. 14, а, б).

На рисунке видно, что при пропадании пакета, относящегося к базовому потоку, изображение искажается в соответствии с позициями пропавших кубов. В то же время при пропадании пакета из расширяющего слоя иерархического потока изображение не искажается полностью, а лишь становится более «блочным». Критичным является случай потери пакета с базовыми коэффициентами — в этом случае характер визуального искажения аналогичен характеру искажений базового кодека.

Реализованный режим иерархического кодирования позволяет улучшить потребительские характеристики системы видеонаблюдения с использованием Д(П)КП и принципа ПЦЯ, потому что является более эффективным для системы видеонаблюдения в каналах связи с ошибками.

Заключение

В работе рассмотрены три основных типа иерархического кодирования видеoinформации для систем с использованием ДПКП. Произведено сравнение типов иерархического кодирования видеoinформации. На основе сравнения выбран тип иерархического кодирования для системы видеонаблюдения с использованием ДПКП и принципа ПЦЯ. Произведено сравнение базовой и иерархической систем видеонаблюдения.

Система видеонаблюдения с применением иерархического кодирования порождает поток, сопоставимый по объему с потоком базовой системы видеонаблюдения без иерархического кодирования. Иерархический поток более устойчив к воздействиям канальных ошибок, что делает предпочтительным применение системы видеонаблюдения с использованием иерархического кодирования при передаче видеoinформации по беспроводным каналам связи.

При потере пакетов, относящихся к расширяющим слоям иерархического потока видеоданных, выигрыш PSNR относительно базового кодера может достигать 6 дБ. Потери пакетов, относящихся к базовому слою иерархического кодера, вносят искажения, сопоставимые с потерей пакетов потока базового кодера.

За рамками статьи остался вопрос, связанный с помехоустойчивым кодированием базового и расширяющих слоев видеoinформации. Требуется также рассмотрение критериев предпочтительного распределения потока между слоями с учетом различной чувствительности слоев к потере пакетов.

Литература

1. Санкин П. С., Литвинов М. Ю. Особенности оценки содержимого сжатого видеопотока // Информационно-управляющие системы. 2009. № 3. С. 45–48.
2. Беляев Е. А., Сухов Т. М., Шостацкий Н. Н. Сжатие видеоинформации на основе трехмерного дискретного псевдокосинусного преобразования для энергоэффективных систем видеонаблюдения // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 2. С. 260–272.
3. Полосин Л. Л. Принцип постоянной цветовой яркости в телевидении // Телевизионная техника и связь. 1995. Спец. выпуск. С. 28–37.
4. Сухов Т. М., Беляев Е. А. Использование принципа постоянной цветовой яркости для передачи видеоинформации // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 1. С. 55–59.
5. Сухов Т. М. Сжатие цветовой информации с использованием аутентификации видеоданных в системах видеонаблюдения // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2013. Вып. 2. С. 70–79.
6. Sun W. B., Chen H. X., Tang H. Y. Research on 3D Integer SDCT Transform and Quantization // The Imaging Science Journal. 2012. Vol. 60. N 5. P. 285–293.
7. Malvar H. S., Hallapuro A., Karczewicz M., Kerofsky L. Low Complexity Transform and Quantization // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2003. Vol. 13. N 7. P. 598–603.
8. Умбиталиев А. А. Перспективы развития цифрового телерадиовещания: комплексное решение внедрения цифрового телевидения в регионах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2008. Вып. 2. С. 3–8.
9. Schwarz H., Marpe D., Wiegand T. Overview of the Scalable Video Coding Extension of the H.264/AVC Standard // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2007. Vol. 17. N 9. P. 1103–1120.
10. YUV Video Sequences. <http://trace.eas.asu.edu/yuv/> (дата обращения: 01.02.2014).
11. Belyaev E., Sukhov T., Kai Liu. Scalable Video Coding Based on Three-Dimensional Discrete Pseudo Cosine Transform // Proc. of the 10th Intern. Conf. on Next Generation Wired / Wireless Advanced Networking, Saint-Petersburg, 23–25 Avg. 2010. P. 448–459.

UDC 004.67+004.627

Scalable Video Coding in Digital CCTV

Sukhov T. M.^a, Head of the sector by department of television technology, Post-Graduate Student, tsuhov@mail.ru
^aJSC «Scientific and Production Company «TIRS», 19, Ural'skaia St., Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The existing CCTV systems have several drawbacks; one of them is low resistance to packet errors in communication channels. The purpose of this study is to enhance the existing video surveillance system using discrete pseudo cosine transformation and the principle of constant color brightness to increase resistance of the generated video stream to errors in communication channels. **Results:** There have been described the major functional blocks of a CCTV system using discrete pseudo cosine transformation and the principle of constant color brightness for subsequent improving the application of scalable video coding. There have been considered methods for scalable video codecs using a discrete (pseudo-) cosine transformation. There have been compared types of scalable video coding applied to the surveillance system using discrete pseudo cosine transformation and the principle of constant color brightness in terms of limited hardware resources, it has shown that the application of scalable video coding with SNR scaling is the most effective scalability regarding of hardware implementation. Investigation of the influence of packet loss in a communication channel on the scalable video stream generated by the system using discrete pseudo cosine transformation, the principle of constant color brightness and scalable coding has demonstrated that the application of scalable video coding with SNR scaling can lead to improve peak signal-to-noise ratio up to 6 decibels comparing to the basic coding scheme without scalable expansion. **Practical relevance:** The research results of scalable coding have allowed creating a coding system with the improved noise resistance characteristics regarding transmission of color information for hardware implementations of video surveillance systems.

Keywords — Discrete Pseudo-Cosine Transform, Scalable Video Coding, CCTV.

References

1. Sankin P. S., Litvinov M. Yu. Special Characteristics of the Compressed Video Stream Content Estimate. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2009, vol. 60, no. 3, pp. 45–48 (In Russian).
2. Belyaev E. A., Sukhov T. M., Shostackiy N. N. Video Compression Based on Three-Dimensional Pseudo Cosine Transform for Video Surveillance Systems. *Komp'uternaia optika*, 2010, vol. 34, no. 2, pp. 260–272 (In Russian).
3. Polosin L. L. Color Brightness Principle in Television. *Televizionnaia tekhnika i sviaz'*, Spetsial'nyi vypusk, 1995, pp. 28–37 (In Russian).
4. Sukhov T. M., Belyaev E. A. Application of Invariant Color Brightness Principle for Video Information Transmission. *Izvestiia vuzov. Priborostronnie*, 2011, vol. 1, pp. 55–59 (In Russian).
5. Sukhov T. M. Compression of Color Information with Authentication of the Video Data in CCTV. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniia*, 2013, vol. 2, pp. 70–79 (In Russian).
6. Sun W. B., Chen H. X., Tang H. Y. Research on 3D Integer SDCT Transform and Quantization. *The Imaging Science Journal*, 2012, vol. 60, no. 5, pp. 285–293.
7. Malvar H. S., Hallapuro A., Karczewicz M., Kerofsky L. Low Complexity Transform and Quantization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, vol. 13, no. 7, pp. 598–603.
8. Umbitaliev A. A. Prospects for the Development of Digital Broadcasting: an Integrated Solution of Digital TV in the Regions. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniia*, 2008, vol. 2, pp. 3–8 (In Russian).
9. Schwarz H., Marpe D., Wiegand T. Overview of the Scalable Video Coding Extension of the H.264/AVC Standard. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, vol. 17, no. 9, pp. 1103–1120.
10. YUV Video Sequences. Available at: <http://trace.eas.asu.edu/yuv/> (accessed 1 February 2014).
11. Belyaev E., Sukhov T. and Kai Liu. Scalable Video Coding Based on Three-Dimensional Discrete Pseudo Cosine Transform. *Proc. 10th Int. Conf. on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networking*. Saint-Petersburg, 2010, pp. 448–459.

УДК 621.391

СОВМЕСТНЫЙ СПИСОЧНЫЙ ДЕКОДЕР ТУРБОКОДА И ВОКОДЕРА AMR-NB ДЛЯ СЕТЕЙ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ

А. И. Акмалходжаев^{а, 1}, программист

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

Постановка проблемы: на практике декодирование кодера канала и источника в системах связи производится независимо, что ограничивает возможность использования избыточности источника для улучшений производительности приемника в целом. Целью работы является разработка алгоритма совместного декодирования турбокода и кодера источника с избыточностью для сетей четвертого поколения. **Результаты:** предложен совместный списочный декодер турбокода и кодера источника. При построении декодера учитывается тот факт, что в сетях четвертого поколения данные источника, т. е. коррелированные данные, составляют лишь часть информационного слова. Поэтому в первую очередь целью алгоритма является корректное декодирование коррелированных бит за счет избыточности и списочного декодирования. После этого влияние правильно декодированных бит распространяется на все информационное слово благодаря перемежителю в схеме турбокода. Критерием выбора правильного слова при списочном декодировании является корректность проверки CRC. Результаты работы нового декодера представлены для турбокода стандарта 3GPP LTE и вокодера AMR-NB. Выигрыш, достигаемый при использовании нового алгоритма по сравнению с обычным итеративным декодером, составляет 0,15 дБ по вероятности ошибки на декодированное слово. В свою очередь, это соответствует улучшению качества принимаемой речи в 0,4–0,15 MOS. **Практическая значимость:** предложенный алгоритм позволяет уменьшить вероятность ошибки на декодированное слово и значительно улучшить качество принимаемой речи, что является важной и актуальной задачей в современных беспроводных сетях.

Ключевые слова — турбокод, совместное декодирование, кодирование речи, сети четвертого поколения.

Введение

С точки зрения теории кодирования и теории информации задачу сжатия источника и передачи информации по каналу связи можно решать независимо без потери качества для системы передачи в целом [1]. Однако теоремы кодирования, исследующие потенциальные возможности систем связи, доказываются в условиях отсутствия ограничений на длину кодового слова, т. е. в отсутствие ограничений на сложность кодирующих и декодирующих устройств.

На практике такие ограничения часто являются принципиальными. Поэтому задачи совместного кодирования и декодирования источника и канала связи вызывают значительный теоретический и практический интерес. Особенно это касается передачи голосовых и видеоданных, при сжатии которых не от всей избыточности удаётся избавиться.

В настоящей статье предложен алгоритм совместного декодирования канала и источника (СДКИ), основанный на применении турбодекодирования. Рассматривается использование предложенного алгоритма в сетях четвертого поколения на примере передачи речи в стандарте 3GPP LTE [2].

¹ Научный руководитель — профессор, доктор технических наук, директор института информационных систем и защиты информации, заведующий кафедрой безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения Е. А. Крук.

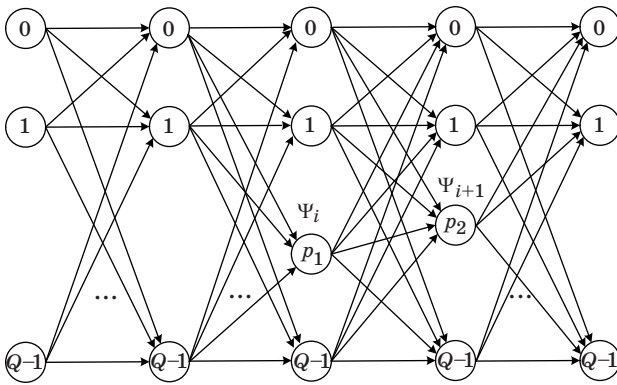
Избыточность источника и ее декодирование

Рассмотрим кодер источника с фиксированной длиной, выходом которого являются пакеты данных, которые в дальнейшем поступают на кодер канала. Обозначим такой пакет как $\mathbf{I} = (I_1, I_2, \dots, I_m)$, где I_i — это i -й символ пакета длиной q бит. Избыточность, связанная с различной вероятностью появления символов на выходе кодера источника, может быть использована как априорная информация на входе декодера канала. Поэтому наибольший интерес вызывает избыточность, которая обусловлена межсимвольной корреляцией и определяется вероятностями $P(I_i | I_{i-1}, \dots, I_1)$. Если $P(I_i | I_{i-1}, \dots, I_1) = 1/2^q$, то зависимости нет. В противном случае говорят о наличии последней. Чаще всего корреляция между символами рассматривается как марковский процесс первого порядка, который характеризуется лишь связями между соседними символами

$$P(I_i | I_{i-1}, \dots, I_1) = P(I_i | I_{i-1}). \quad (1)$$

Во многих случаях это предположение верно, в частности, для речевых кодеков.

Марковский процесс, описывающий источник, можно представить как полносвязную решетку, которая состоит из m секций и где каждый переход соответствует выходу символа кодера источника. Пример такой решетки представлен на рис. 1, где через Ψ_i обозначено состояние решетки в i -й момент времени и $Q = 1/2^q$. По аналогии



■ Рис. 1. Полносвязная решетка для марковского процесса первого порядка

со сверточными кодами для оценки значений символов при известных переходных вероятностях может быть использован алгоритм ВСJR [3].

Для совместного декодирования кодеров источника и канала существует два способа. Первый связан с построением единой решетки, по которой производится декодирование. Однако данный подход является трудоемким и не реализуемым в практических системах. Второй подход основан на использовании турбопринципа [4], в ходе которого декодеры канала и источника итеративно обмениваются информацией, за счет чего достигается лучшее качество приема. В данной статье рассматривается второй метод совместного декодирования. Далее показано, как происходит декодирование источника, и представлена схема совместного итеративного декодера.

Рассмотрим модель системы, где выход источника описывается марковским процессом первого порядка с Q состояниями. Битовое представление последовательности символов \mathbf{I} обозначим как $\mathbf{u} = \{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_m\}$, где $\mathbf{u}_i = \{u_i^0, \dots, u_i^{Q-1}\}$ — битовое представление i -го символа. Пусть канал связи является каналом с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) [5], тогда если для передачи используется двоичная фазовая манипуляция, то принятая последовательность будет выглядеть как $\mathbf{r} = \{\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_m\}$, где $\mathbf{r}_i = \{r_i^0, \dots, r_i^{Q-1}\}$. Соответственно $r_i^j = s_i^j + n_i$, где $s_i^j = 2u_i^j - 1$, а n_i — независимая гауссова величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . Плотность условной вероятности значения r_i^j гауссова канала описывается как

$$P(r_i^j | u_i^j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(r_i^j - s_i^j)^2}. \quad (2)$$

Поскольку канал без памяти, то для символа I_i можно написать следующее выражение:

$$P(\mathbf{r}_i | I_i) = \prod_{j=0}^{Q-1} P(r_i^j | u_i^j). \quad (3)$$

Используя алгоритм ВСJR на декодере источника, можно оценить апостериорные вероятности $P(I_i | \mathbf{r})$ для всех возможных символов в каждой секции решетки. Символ, для которого значение $P(I_i | \mathbf{r})$ является наибольшим, считается правильным. Рассчитаем вероятность того, что i -й символ последовательности \mathbf{I} при условии \mathbf{r} равен некоторому значению p_2 . В соответствии с алгоритмом ВСJR эта вероятность может быть рассчитана как

$$P(I_i = p_2 | \mathbf{r}) = \sum_{p_1=0}^{Q-1} P(\Psi_i = p_1, \mathbf{r}_{<i}) P(\mathbf{r}_{>i} | \Psi_{i+1} = p_2) \times P(\Psi_{i+1} = p_2, \mathbf{r}_i | \Psi_i = p_1) / P(\mathbf{r}), \quad (4)$$

где $\mathbf{r}_{<i}$, \mathbf{r}_i , $\mathbf{r}_{>i}$ — значения, обозначающие символы, принятые до момента времени i , в i -й момент и после него соответственно. Обычно вероятности $P(\Psi_i = p_1, \mathbf{r}_{<i})$, $P(\Psi_{i+1} = p_2, \mathbf{r}_i | \Psi_i = p_1)$, $P(\mathbf{r}_{>i} | \Psi_{i+1} = p_2)$ обозначают как $\alpha_i(p_1)$, $\gamma_i(p_1, p_2)$, $\beta_{i+1}(p_2)$ [3]. Для расчета $\alpha_{i+1}(p_2)$ и $\beta_i(p_1)$ существуют рекуррентные выражения

$$\alpha_{i+1}(p_2) = \sum_{p_1=0}^{Q-1} \alpha_i(p_1) \gamma_i(p_1, p_2); \quad (5)$$

$$\beta_i(p_1) = \sum_{p_2=0}^{Q-1} \beta_{i+1}(p_2) \gamma_i(p_1, p_2). \quad (6)$$

Начальные значения $\alpha_0(p_1)$ и $\beta_k(p_2)$ обычно устанавливают равными $1/Q$.

Значение $\gamma_i(p_1, p_2)$ называется метрикой перехода и вычисляется как

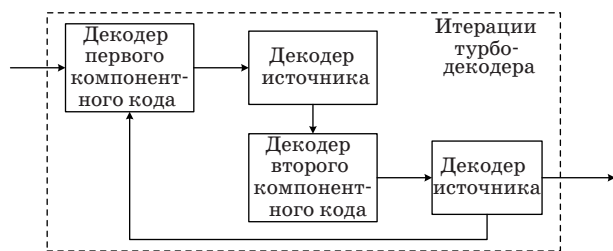
$$\gamma_i(p_1, p_2) = P(\Psi_{i+1} = p_2, \mathbf{r}_i | \Psi_i = p_1) = P(\mathbf{r}_i | \Psi_i = p_1, \Psi_{i+1} = p_2) P(\Psi_{i+1} = p_2 | \Psi_i = p_1), \quad (7)$$

где $P(\mathbf{r}_i | \Psi_i = p_1, \Psi_{i+1} = p_2)$ легко находится с помощью выражения (3). Вероятность $P(\Psi_{i+1} = p_2 | \Psi_i = p_1)$ есть не что иное, как переходная вероятность рассматриваемого марковского процесса, которая считается известной. Таким образом, можно рассчитать вероятности символов в каждой секции решетки. В дальнейшем из вычисленных значений можно получить вероятности бит каждого символа следующим образом:

$$P(u_i^j = x | \mathbf{r}) = \sum_{\text{все } I_i, \text{ где } u_i^j = x} P(I_i | \mathbf{r}),$$

где $x \in \{0, 1\}$ — значение бита.

Необходимо, чтобы при совместном декодировании кодера канала и источника декодер канала мог обрабатывать мягкие значения и учитывать априорные значения бит. Примером такого кода может быть сверточный код или турбокод,



■ Рис. 2. Итеративная схема декодирования источника и турбокода

где для декодирования используется алгоритм Log-MAP или Scaled Max-Log-MAP [6]. При совместном декодировании сверточного кода и источника с избыточностью можно использовать итеративную схему, которая описана в работе [7]. В данном случае выходные значения декодера сверточного кода можно представить как произведение априорной и канальной составляющих вероятности $\hat{P}(u_i^j | \mathbf{r}) = \hat{P}_{ch} \hat{P}_{ap}$. Для декодера источника выходные значения также можно записать в виде $\hat{P}(u_i^j | \mathbf{r}) = \hat{P}_{ch} \hat{P}_{ext}$, где $\hat{P}_{ch} = \hat{P}_{ch}$, а \hat{P}_{ext} — составляющая, которая известна благодаря избыточности источника. Таким образом, при итерировании совместного алгоритма два декодера обмениваются канальными и внешними составляющими, т. е. $\hat{P}_{ch} = \hat{P}_{ch}$ и $\hat{P}_{ap} = \hat{P}_{ext}$. Однако данная техника может быть улучшена для турбокода.

Основными элементами турбокода являются два рекурсивных систематических сверточных кода (компонентные коды), связанных между собой перемежителем [4]. В качестве декодера используется итеративная схема, ядром которой является декодер компонентного кода с мягким входом и выходом. Для улучшения параметров совместного декодирования декодер источника необходимо внедрить непосредственно в итеративный процесс турбодекодирования. Итоговая схема будет выглядеть, как показано на рис. 2.

Совместный списочный декодер турбокода и источника с избыточностью для систем с коммутацией пакетов

Большое распространение турбокоды получили за счет использования в связи четвертого поколения 3GPP LTE [8]. Сеть LTE организована как сеть с коммутацией пакетов, и все данные, в том числе и голосовые, используют IP-протокол для передачи. Таким образом, при организации совместного декодирования необходимо учитывать специфику формирования пакета данных на входе кодера канала. В системах с коммутацией пакетов данные с выхода кодера источника обрабатываются на сетевом (IP), транспортном (TCP\UDP) и нижестоящих уровнях, после чего посту-

пают на физический уровень. Прежде чем закодировать данные, к ним прибавляют проверку CRC для обнаружения ошибок декодирования на приемнике. В результате этих операций совместное декодирование может быть использовано лишь для части информационного слова, что сильно снижает эффективность декодирования (рис. 3). При совместном декодировании такого информационного слова биты источника декодируются лучше за счет имеющейся избыточности, при этом они влияют на рядом стоящие биты. В случае турбодекодирования за счет использования перемежителя можно говорить о том, что биты источника оказывают свое влияние на все слово.

Для улучшения параметров декодирования в такой системе предлагается следующий алгоритм. Допустим, что благодаря избыточности удалось успешно декодировать символы источника. Тогда, чтобы увеличить влияние этих бит на все остальные, можно установить их надежности равными $\pm\infty$, в зависимости от значения бита. В дальнейшем такие биты будем называть пилотными, по аналогии с пилотными сигналами. Однако не всегда за счет избыточности данные источника удается успешно декодировать. Но, учитывая то, что символы источника декодируются с меньшей вероятностью ошибки на бит, чем остальные, оставшиеся ошибки в битах источника можно исправить за счет использования списочного декодера Витерби [9] на решетке первого компонентного кода турбокода. Но списочный декодер Витерби нужно использовать не на всей решетке, а лишь в окне, где расположены данные с выхода кодера источника. В результате будет получен список последовательностей, из которых необходимо выбрать правильную. После этого, приняв ее как пилотную, выполнить несколько итераций обычного турбодекодера, чтобы увеличить влияние пилотных бит на остальное информационное слово. Если нет возможности определить корректность декодированных бит источника, можно использовать параллельный списочный подход [10], т. е. предположить, что каждая последовательность является корректной, принять эти значения как пилотные и независимо для каждого элемента списка выполнить итерации обычного турбодекодера. Декодирование считается успешным, если проверка контрольной суммы CRC, добавленной на физическом уровне, является корректной. С учетом всех замечаний для обоих случаев

Заголовки	Данные с избыточностью	Данные без избыточности	CRC
-----------	------------------------	-------------------------	-----

■ Рис. 3. Структура информационного слова на входе кодера канала



■ Рис. 4. Схема совместного списочного турбодекодера с возможностью (а) и без возможности (б) проверки корректности символов источника

представим схему результирующего декодера (рис. 4, а, б).

Для оценки производительности предложенного декодера рассмотрим систему 3GPP LTE. Поскольку передача речи является одним из основных пунктов дохода современных операторов, то качество принимаемой речи играет важную роль. Поэтому в качестве источника принят вокодер AMR-NB, который используется для сжатия голоса в сетях LTE.

Передача речи в стандарте 3GPP LTE

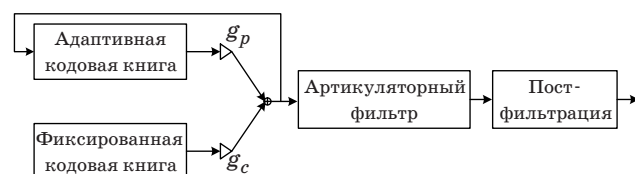
Для передачи голоса в 3GPP LTE кодеком по умолчанию является AMR-NB. Он работает на основе алгоритма ACELP [11] и поддерживает скорости кодирования от 4,75 до 12,2 Кбит/с, но основным является режим 12,2 Кбит/с, который будет обсуждаться далее. В рамках вокодера AMR определен алгоритм VAD обнаружения фреймов, которые не содержат речевого сигнала и для передачи которых используются короткие пакеты. Такие пакеты не рассматривались в ходе анализа.

Для кодирования речи алгоритм AMR-NB делит входной речевой сигнал на фреймы по 20 мс и для каждого извлекает параметры (коэффициенты) артикуляторного фильтра. После этого фрейм делится на 4 сабфрейма, для которых вычисляются индексы и коэффициенты усиления фиксированной и адаптивной кодовых книг. Поскольку

коэффициент адаптивной кодовой книги характеризует период основного тона человека, который мало изменяется во времени, то во втором и четвертом сабфреймах каждого фрейма передается лишь значение приращения относительно предыдущего сабфрейма. Декодер вокодера AMR-NB показан на рис. 5 [12].

Все вычисленные параметры обладают большой избыточностью, поэтому перед передачей они преобразуются и квантуются, что приводит к заметному уменьшению размера передаваемой информации и к тому, что в параметрах, относящихся к артикуляторному фильтру, от имеющейся избыточности удается практически полностью избавиться. Однако оставшуюся корреляцию остальных параметров, для которых ниже представлены результаты измерения символической корреляции, можно использовать для улучшения параметров приема.

Битовый поток с выхода вокодера делится и группируется в три класса — А, В и С. В классе А находятся наиболее важные для восстанов-



■ Рис. 5. Схема декодера ACELP

ления речи биты, которые соответствуют наиболее коррелированным данным. В класс В и С входят биты менее важные и чувствительные к ошибкам и относящиеся к некоррелированным данным. После этого к сформированному AMR-пакету добавляется заголовок RTP-пакета и RTP-заголовок. Стандартом [12] предусмотрено два возможных формата заголовка RTP-пакета, один из которых включает 8-битовую проверку CRC для бит класса А. Так как голосовые пакеты чувствительны к заголовкам, на транспортном уровне для передачи используются протоколы UDP и IP. Перед поступлением на физический уровень голосовой пакет с добавленными заголовками обрабатывается на PDCP-, RLC- и MAC-уровнях, которые добавляют свои собственные 1–2-байтовые заголовки. Поскольку общая длина RTP/UDP/IP заголовков достаточно велика, а сами эти заголовки обладают большой избыточностью, на PDCP-уровне они подвергаются компрессии с помощью алгоритма ROHC, после чего их длина с 40–60 Б уменьшается до 2–3 Б. На физическом уровне к сформированному пакету добавляется CRC длиной 24 бита («CRC24В») [8], после чего пакет кодируется. С учетом всех уровней обработки длина AMR-пакета увеличивается с 244 бит до минимальных 320 бит на входе кодера канала.

Учитывая тот факт, что все коррелированные данные находятся в битах класса А, на входе первого компонентного кода информационное слово будет выглядеть, как показано на рис. 6. Также на рисунке изображено окно, для которого будет выполняться оконный списочный алгоритм Витерби предложенного алгоритма с учетом использования CRC в заголовке RTP-пакета, в противном случае окном являются лишь биты класса А.

Избыточность на выходе вокодера AMR-NB

Для оценки избыточности на выходе речевых кодеков исследованы мужская и женская русская речь длительностью от 1,5 до 2 ч. Оба сигнала были сжаты с помощью алгоритма AMR-NB, и была собрана статистика по различным параметрам, которые в дальнейшем рассматривались отдельно. Зависимость параметров рассматривалась в рамках одного фрейма и между ними.

Для оценки корреляции в рамках одного фрейма с помощью собранной статистики оценены вероятности $P(\Psi_{i-1}^t)$, $P(\Psi_{i-1}^t, \Psi_i^t)$ и $P(\Psi_i^t | \Psi_{i-1}^t)$, где $\Psi_i^t \in \{1, \dots, Q-1\}$ — возможное значение i -го параметра в t -м фрейме. Также рассчитаны вероятности $P(\Psi_i^{t-1}, \Psi_i^t)$ и $P(\Psi_i^t | \Psi_i^{t-1})$, описывающие корреляцию между фреймами.

С помощью полученных вероятностей для различных параметров рассчитаны энтропия

$$H(\Psi) = - \sum_{k=0}^{Q-1} P(\Psi = k) \log_2 P(\Psi = k)$$

и условная энтропия для коррелированных параметров

$$H(\Psi_i^t | \Psi_{i-1}^t) = - \sum_{k=0}^{Q-1} \sum_{j=0}^{Q-1} P(\Psi_i^t = k, \Psi_{i-1}^t = j) \log_2 P(\Psi_i^t = k | \Psi_{i-1}^t = j);$$

$$H(\Psi_i^t | \Psi_i^{t-1}) = - \sum_{k=0}^{Q-1} \sum_{j=0}^{Q-1} P(\Psi_i^t = k, \Psi_i^{t-1} = j) \log_2 P(\Psi_i^t = k | \Psi_i^{t-1} = j).$$

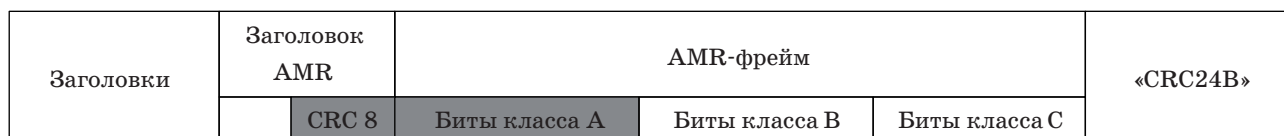
Избыточность была измерена как разность между количеством бит, которые используются по стандарту для передачи, и измеренным значением энтропии:

$$\Delta R(H(\Psi)) = q - H(\Psi);$$

$$\Delta R(H(\Psi_i^t | \Psi_{i-1}^t)) = q - H(\Psi_i^t | \Psi_{i-1}^t);$$

$$\Delta R(H(\Psi_i^t | \Psi_i^{t-1})) = q - H(\Psi_i^t | \Psi_i^{t-1}).$$

В результате анализа получено, что наибольшей корреляцией обладает индекс адаптивной кодовой книги, поскольку период основного тона, который он характеризует, мало меняется во времени. Также большой межфреймовой зависимостью обладают первый и второй индексы, отвечающие за передачу информации о коэффициентах артикуляторного фильтра. Меньшей избыточностью обладают коэффициенты усиления обеих кодовых книг. Во всех остальных параметрах



Окно списочного декодера Витерби с учетом CRC

■ Рис. 6. Схема AMR-пакета

■ Результаты анализа избыточности мужской русской речи (AMR-NB)

Параметр [2]	$\Delta R(H(\Psi))$	$\Delta R\left(H\left(\Psi_i^t \Psi_{i-1}^t\right)\right)$	q
Корреляция параметров внутри фрейма			
Коэффициент усиления адаптивной кодовой книги	0,1	0,46	4
Индекс адаптивной кодовой книги	0,17	2,82	9
Индекс адаптивной кодовой книги (величина приращения)	0,57	0,75	6
Коэффициент усиления фиксированной кодовой книги	0,77	1,22	5
Корреляция параметров между фреймами			
LSF-коэффициент артикуляторного фильтра:			
первый	1,43	2,16	7
второй	0,88	1,86	8
Индекс адаптивной кодовой книги:			
первый	0,17	2,46	9
второй	0,17	2,47	9
Коэффициент усиления фиксированной кодовой книги:			
первый	0,74	1,21	5
второй	0,79	1,28	5
третий	0,79	1,26	5
четвертый	0,76	1,24	5

избыточность практически отсутствует, в то время как кодовые последовательности фиксированной кодовой книги имеют случайный характер. Также из полученных результатов сделан вывод, что биты, которые соответствуют наиболее коррелированным параметрам, относятся к классу А AMR-пакета. Поскольку для женского и мужского исследуемых голосов получены практически одинаковые результаты, то приведены замеры лишь для мужской речи. Примеры измерений для наиболее коррелированных параметров для межфреймовой и внутрифреймовой корреляции приведены в таблице, где q — число бит, используемых для передачи того или иного параметра по стандарту.

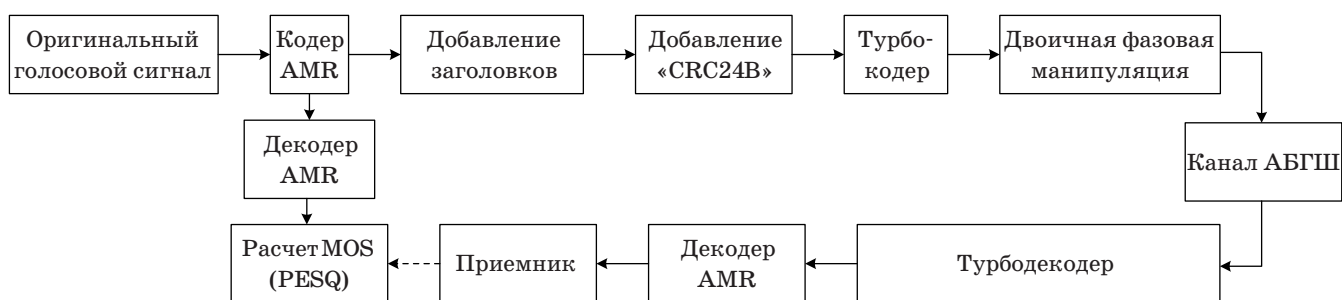
Результаты моделирования

Для сравнения обычного совместного турбодекодера и предложенного алгоритма была использована модель, представленная на рис. 7. При моделировании предполагалось, что передаются лишь голосовые пакеты, в то время как для коротких VAD-пакетов передача всегда считалась успешной. Заголовки считались случайными. В качестве компонентного декодера турбокода рассмотрен алгоритм Scaled Max-Log-MAP с взвешивающим коэффициентом, равным 0,75. Итерирование турбодекодера заканчивалось после восьми итераций, поскольку дальнейшее итерирование декодера практически не дает прироста производительности. Пакет считался при-

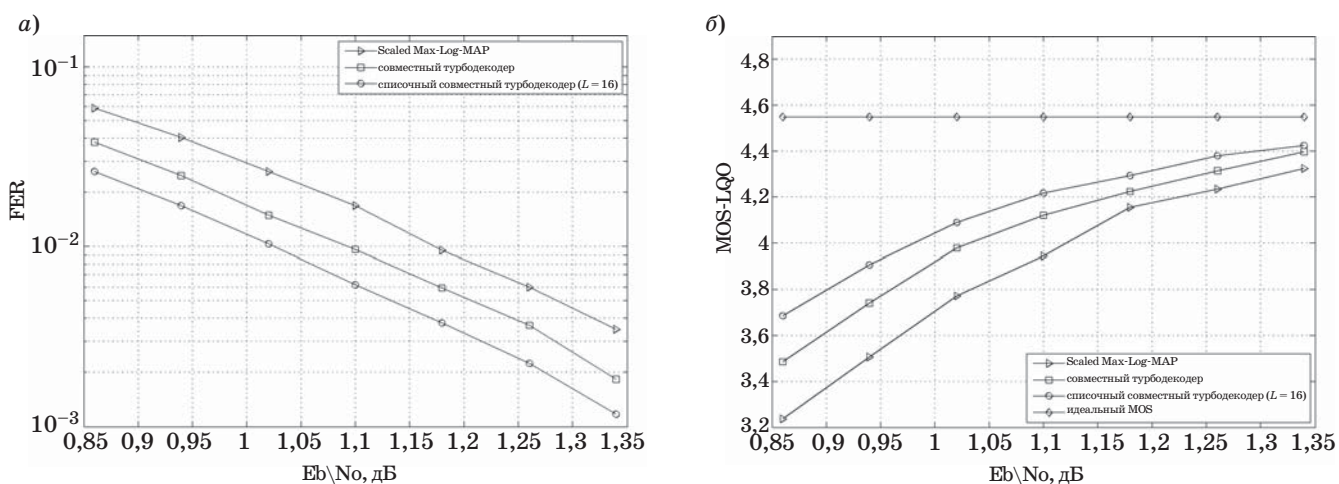
нятым успешно, если корректной была контрольная сумма «CRC24В». Для предложенного списочного совместного алгоритма после построения списка выполнялось еще 8 итераций обычного турбодекодера в соответствии со схемами рис. 4, б и 5. Размерность списка обозначена как L и при моделировании была установлена $L = 16$.

В качестве критерия сравнения алгоритмов использована вероятность ошибки на пакет (FER), однако данный критерий не отображает улучшения качества декодированной речи. Поэтому было проведено сравнение с использованием критерия MOS (Mean Option Score) [13], результаты которого принимают следующие значения: 1 — плохое; 2 — низкое; 3 — удовлетворительное; 4 — хорошее; 5 — прекрасное. Для расчета значения MOS может быть использован алгоритм PESQ [14], результат которого обозначают как MOS-LQO.

Результаты моделирования для случая с использованием CRC в заголовке и без последнего были близки, поэтому графики (рис. 8, а, б) приведены для случая с использованием CRC для класса А бит. Как видно из графиков, предложенный алгоритм позволяет получить выигрыш в 0,15 дБ по сравнению с обычным декодером, что эквивалентно выигрышу по MOS от 0,4 до 0,15 пункта. В частности видно, что за счет использования предложенного алгоритма качество принимаемой речи переходит из разряда «удовлетворительное» в разряд «хорошее».



■ Рис. 7. Схема модели для тестирования совместного декодера турбокода и вокодера AMR-NB



■ Рис. 8. Результат моделирования FER (а) и MOS-LQO (б) для вокодера AMR-NB и турбокода

Заключение

В данной работе представлен алгоритм совместного декодирования кодера канала и источника для сетей четвертого поколения. По результатам моделирования видно, что предложенный совместный списочный декодер турбокода показывает лучшую производительность, чем независимый и обычный совместный декодеры, что проиллюстрировано на примере вокодера AMR-NB.

Данный алгоритм может быть использован и для других источников, необходимым является лишь оценка избыточности таких источников для выполнения совместного декодирования.

Работа выполнена по плану работ, представленному в заявке № 14-11-00644 на конкурс грантов Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами».

Литература

1. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // The Bell System Technical J. 1948. N 27. P. 379–423.
2. 3GPP TS 26.090: Mandatory Speech Codec Speech Processing Functions; Adaptive Multi-Rate (AMR) Speech Codec; Transcoding Functions. — 3GPP Specification, 2011. — 55 p. <http://www.3gpp> (дата обращения: 01.12.2013).
3. Bahl L., Cocke J., Jelinek F., Raviv J. Optimal Decoding of Linear Codes for Minimizing Symbol Error Rate // IEEE Transactions on Information Theory. Mar. 1974. N 2. P. 284–287.

4. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding: Turbo Codes // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Communications (ICC-93). May 1993. P. 1064–1070.
5. Krouk E., Ovchinnikov A., Poikonen J. Channel Models and Reliable Communication // Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications. — John Wiley and Sons, 2011. P. 1–20.
6. Robertson P., Villebrun E., Hoeher P. A Comparison of Optimal and Sub-Optimal MAP Decoding Algorithms Operating in the Log Domain // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Communications (ICC-95). 1995. P. 1009–1013.
7. Акмалходжаев А. И. Совместное декодирование канала и источника // Научная сессия ГУАП: сб.

докл.: в 3 ч. Ч. I. Технические науки. — СПб.: ГУАП, 2013. С. 71–75.

8. 3GPP TS 36.212: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and Channel Coding. — 3GPP Specification, 2011. 61 p. <http://www.3gpp> (дата обращения: 01.12.2013).
9. Seshadri N., Sundberg C.-E. W. List Viterbi Decoding Algorithms with Applications // *IEEE Transactions on Communications*. 1994. Vol. 42. N 2–4. P. 313–323.
10. Акмалходжаев А. И., Козлов А. В. Новый алгоритм списочного декодирования турбокодов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2013. Т. 56. № 8. С. 20–24.
11. 3GPP TS 26.101: Mandatory Speech Codec Speech Processing Functions; Adaptive Multi-Rate (AMR) Speech Codec Frame Structure. — 3GPP Specification, 2009. — 20 p. <http://www.3gpp> (дата обращения: 01.12.2013).
12. Sjöberg J., Westerlund M., Lakaniemi A., Xie Q. RTP Payload Format and File Storage Format for the Adaptive Multi-Rate (AMR) and Adaptive Multi-Rate Wideband (AMR-WB) Audio Codecs. — RFC 4867, Apr. 2007. — 59 p.
13. ITU-T Recommendation P.800.1. Mean Option Score (MOS) Terminology. — ITU-T, 2006. — 12 p. <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.862-200102-I/en> (дата обращения: 01.12.2013).
14. ITU-T Recommendation P.862. Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ): An Objective Method for End-to-End Speech Quality Assessment of Narrow-Band Telephone Networks and Speech Codecs. — ITU-T, 2001. — 30 p. <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.862-200102-I/en> (дата обращения: 01.12.2013).

UDC 621.391

A Joint List Decoder of a Turbo Coder and AMR-NB Vocoder for Cellular Networks of the Fourth Generation

Akmalkhodzhaev A. I.^a, Programmer, Akmal.ilh@gmail.com

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

Purpose: In practical systems decoding of the channel and source codes is performed independently that limits the possibility of using the source redundancy for improvement of overall receiver performance. The goal of the paper is to develop a joint turbo code and a source decoder for wireless systems of the fourth generation. **Results:** There has been proposed a new joint list decoder of a turbo code and the source coder. The decoder considers specifics of data generation in the fourth generation wireless systems, i.e. the fact that correlated data constitute only a part of the information word. Therefore, first and foremost, the goal of the algorithm is correct decoding of redundant bits through joint and list decoding. Then the influence of correctly decoded bits is applied to a whole information sequence due to an interleaver in the turbo code. CRC is used as a criterion of decoded sequence correctness in the list decoding. The new decoder performance is considered for 3GPP LTE turbo code and AMR-NB speech coder. Simulations show that the new algorithm gives 0.15 frame error rate gain and decoded speech quality improvement by 0.4–0.15 MOS comparing to the conventional iterative algorithm. **Practical relevance:** The proposed algorithm allows to reduce frame error probability and to increase decoded speech quality that is an important and relevant task for modern cellular networks.

Keywords — Turbo Code, Joint Source Channel Decoding, Speech Coding, Fourth Generation Cellular Networks.

Reference

1. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, pp. 379–423.
2. 3GPP TS 26.090: Mandatory Speech Codec Speech Processing Functions; Adaptive Multi-Rate (AMR) Speech Codec; Transcoding Functions. 3GPP Specification, 2011. 55 p. Available at: <http://www.3gpp> (accessed 01 December 2013).
3. Bahl L., Cocke J., Jelinek F., Raviv J. Optimal Decoding of Linear Codes for Minimizing Symbol Error Rate. *IEEE Transactions on Information Theory*, Mar. 1974, vol. 20, no. 2, pp. 284–287.
4. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding: Turbo Codes. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Communications (ICC-93)*, May 1993, vol. 2, pp. 1064–1070.
5. Krouk E., Ovchinnikov A., Poikonen J. Channel Models and Reliable Communication. *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications*. John Wiley and Sons, 2011, pp. 1–20.
6. Robertson P., Villebrun E., Hoher P. Comparison of Optimal and Sub-Optimal MAP Decoding Algorithms Operating in the Log Domain. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Communications (ICC-95)*, 1995, vol. 2, pp. 1009–1013.
7. Akmalhodzhaev A. I. Joint Source and Channel Decoding. *Nauchnaia sessia GUAP, sbornik докладov, ch. I, Tekhnicheskie nauki*. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2013, pp. 71–75 (In Russian).
8. 3GPP TS 36.212: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and Channel Coding. 3GPP Specification, 2011. 61 p. Available at: <http://www.3gpp> (accessed 01 December 2013).
9. Seshadri N., Sundberg C.-E. W. List Viterbi Decoding Algorithms with Applications. *IEEE Transactions on Communications*, 1994, vol. 42, no. 2–4, pp. 313–323.
10. Akmalhodzhaev A. I., Kozlov A. V. A New Algorithm for List Decoding of Turbo Codes. *Izvestia vuzov. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. 8, pp. 20–24 (In Russian).
11. 3GPP TS 26.101: Mandatory Speech Codec Speech Processing Functions; Adaptive Multi-Rate (AMR) Speech Codec Frame Structure. 3GPP Specification, 2009. 20 p. Available at: <http://www.3gpp> (accessed 01 December 2013).
12. Sjöberg J., Westerlund M., Lakaniemi A., Xie Q. RTP Payload Format and File Storage Format for the Adaptive Multi-Rate (AMR) and Adaptive Multi-Rate Wideband (AMR-WB) Audio Codecs. RFC 4867, Apr. 2007. 59 p.
13. ITU-T Recommendation P.800.1. Mean Option Score (MOS) Terminology. ITU-T, 2006. 12 p. Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.862-200102-I/en> (accessed 01 December 2013).
14. ITU-T Recommendation P.862. Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ): An Objective Method for End-to-End Speech Quality Assessment of Narrow-Band Telephone Networks and Speech Codecs. ITU-T, 2001. 30 p. Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.862-200102-I/en> (accessed 01 December 2013).

УДК 004.057.4; 004.724.4

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗЕРВНЫХ ПУТЕЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ДЕЙКСТРЫ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

К. Ю. Цветков^а, доктор техн. наук, профессор

С. И. Макаренко^а, канд. техн. наук, доцент

Р. Л. Михайлов^а, адъюнкт

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Постановка задачи: анализ исследований в области устойчивости маршрутизации показал, что основным направлением модификации алгоритмов поиска кратчайших путей является совершенствование представления и формата исходных данных за счет учета в метрике ребер факторов, определяющих те или иные свойства реальной сети. Целью работы является повышение устойчивости связи путем модификации алгоритма Дейкстры, позволяющей одновременно с решением задачи поиска кратчайших путей сформировать резервные пути к узлам сети. **Методы:** в интересах использования топологической избыточности сети связи модифицируется алгоритм Дейкстры в направлении расширения его функциональности за счет формирования как кратчайших, так и резервных путей. Данное расширение обеспечивается введением дополнительных множеств в расчет, а также новых блоков в тело алгоритма. **Результаты:** разработан модифицированный алгоритм Дейкстры, модификация которого основана на использовании входящих в узлы ребер для построения резервных путей к узлам. Оценка прироста устойчивости сети связи осуществлена по показателю вероятности устойчивости информационного направления. Рассмотрена работа алгоритма на примере сети и показано, что его применение дает повышение устойчивости от 5 до 35 % по обоснованному показателю. **Практическая значимость:** предложенная модификация алгоритма Дейкстры может быть использована для улучшения эффективности протоколов OSPF и PNNI при маршрутизации информационных потоков в сети с каналами связи в условиях воздействия на них деструктивных факторов.

Ключевые слова — алгоритм Дейкстры, маршрутизация, резервирование каналов связи, OSPF, PNNI, ATM, устойчивость связи, надежность связи.

Введение

В условиях стремительной информатизации общества особую актуальность приобретает обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС). Проведенный в работе [1] анализ деструктивно-разрушающих воздействий на элементы современных ИТКС показал, что ИТКС (в особенности специального назначения), как правило, функционируют в условиях ограниченной надежности узлов и каналов связи, что вступает в противоречие с высокими требованиями по качеству обслуживания абонентов [2].

Одним из решений, направленных на обеспечение устойчивости сети в условиях ограниченной надежности ИТКС на сетевом уровне, является эффективное управление топологическим ресурсом ИТКС, а именно внедрение топологических структур с высокой избыточностью и живучестью [2–7], а также маневр маршрутами передачи информационных потоков в ИТКС [2–4, 8, 9].

Решение задачи использования топологических структур с высокой избыточностью и живучестью в транспортных сетях за счет резервирования каналов связи и применения циклических топологических структур описано в работах [5, 6, 10].

Решения, связанные с применением протоколов различных версий алгоритма Spanning Tree (STP, RSTP, MSTP, PVST) и протокола EAPS (Ethernet Automatic Protection Switching) [9], а также технологии пакетного кольца с самовосстановлением RPR (Resilient Packet Ring) [10] используют маневр маршрутами передачи информационных потоков в ИТКС. Сюда же можно отнести и исследования технологий П-циклов (P-cycles) [6, 11] в ИТКС, основанных на выделении и дальнейшем использовании циклических топологических структур в составе ИТКС для обеспечения структурной избыточности и резервирования маршрутов передачи информационных потоков. Декомпозиция ИТКС на циклические топологические структуры [11] логично расширяет область применения циклических топологических структур для повышения структурной избыточности от транспортных сетей к ИТКС произвольной архитектуры.

Проведенный в работах [2, 12, 13] анализ алгоритмических и протокольных решений производителей сетевого оборудования показал, что в настоящее время в протоколах маршрутизации при решении задач поиска кратчайших путей получил широкое распространение алгоритм Дейкстры [2, 13–18]. Данный алгоритм используется в протоколе маршрутизации OSPF (Open

Shortest Path First) [13, 15], а также при маршрутизации информационных потоков по меткам в сетях ATM по протоколам PNNI (Private Network-Network Interface), LSP (Label-Switched Path) и MPLS (Multiprotocol Label Switching) [2]. Целью данной работы является модификация алгоритма Дейкстры, позволяющая одновременно с решением задачи поиска кратчайших путей сформировать резервные пути к узлам сети, за счет чего можно обеспечить:

- использование топологической избыточности ИТКС протоколами маршрутизации, основанными на алгоритме Дейкстры, в направлении повышения устойчивости их функционирования при отказах элементов сети;

- снижение времени реакции протоколов маршрутизации, основанных на алгоритме Дейкстры, за счет включения в таблицу маршрутизации информации о резервных путях и минимизации времени перехода к использованию этих путей при отказе элементов сети.

Анализ публикаций, находящихся в открытом доступе, показал, что подобные цели ставились и разрешались в работах [14, 17–23]. Однако в основной части работ по решению задач маршрутизации в ИТКС не используется модификация самого алгоритма поиска кратчайшего пути. Достижения основаны на совершенствовании представления и формата исходных данных для алгоритма за счет учета в метрике ребер исследуемых факторов, определяющих те или иные свойства реальной сети. Так, в работах [14, 17] предлагается использовать метрику ребер сети в виде нечеткого множества. В работе [14] предложен вариант реализации и приведен пример функционирования алгоритма Дейкстры с такими нечеткими метриками пути. В работе [18] предложена гибридная метрика для алгоритма Дейкстры в интересах решения задачи перераспределения информационных потоков с учетом как состояния, так и текущей загрузки элементов сети связи.

В работах [20–23] рассмотрены алгоритмы маршрутизации в сетях с быстроизменяющейся топологией и предложены подходы к их модификации за счет учета вероятностных характеристик работы сети, а также учета движения абонентов. Однако в этих работах не были представлены решения по модификации самого алгоритма маршрутизации за счет введения в него элементов формирования резервных путей и последующего их использования при изменении топологии.

Задача повышения устойчивости связи

Устойчивость относится к одним из основных свойств ИТКС. Целью работы является повышение устойчивости связи в ИТКС по показателю

вероятности устойчивости информационного направления P_y [7]:

$$P_y = K_\Gamma P_{\text{выж}}; \quad (1)$$

$$P_{\text{выж}} = 1 - P_{\text{пор}}, \quad (2)$$

где K_Γ — коэффициент готовности информационного направления; $P_{\text{выж}}$ — вероятность выживания информационного направления в результате деструктивно-разрушающих воздействий; $P_{\text{пор}}$ — вероятность поражения элемента информационного направления ИТКС с учетом реализуемых организационно-технических мер защиты для современной цифровой аппаратуры связи.

Покажем, что при допущении соответствия вероятности поражения $P_{\text{пор}}$ элемента информационного направления ИТКС отказу канала связи добавление в таблицу маршрутизации дополнительных резервных путей повышает устойчивость маршрутизации в ИТКС по показателю (1).

Коэффициент готовности K_Γ в выражении (1) является параметром, учитывающим временные показатели устойчивости. В соответствии с работой [7] K_Γ определяется наработкой на отказ T_o и временем восстановления T_v , которое состоит из времени диагностики отказа $T_{\text{диагн}}$; времени ожидания восстановления связи (удержания конфигурации ИТКС) $T_{\text{ож}}$; времени уведомления узла, ответственного за изменение конфигурации ИТКС, $T_{\text{увед}}$; длительности реконфигурации ИТКС, резервирования маршрутов информационных потоков и сигнализации $T_{\text{рек}}$; времени переключения информационных потоков с активного на резервные пути $T_{\text{перекл}}$:

$$K_\Gamma = \frac{T_o}{T_o + T_v} = \frac{T_o}{T_o + (T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} + T_{\text{увед}} + T_{\text{рек}} + T_{\text{перекл}})}. \quad (3)$$

Введение резервных маршрутов позволяет после диагностики отказа, не ожидая восстановления связи ($T_{\text{ож}} = 0$), без уведомления управляющего узла ($T_{\text{увед}} = 0$) сразу же ($T_{\text{рек}} = 0$) переключить информационные потоки на резервные информационные направления. При этом уведомление узла, ответственного за маршрутизацию ИТКС, предлагается осуществлять после решения о переключении информационных потоков.

Вероятность выживания одного маршрута $P_{\text{выж } 1}$ на информационном направлении из n каналов в выражении (1) будет определяться вероятностями поражения отдельных каналов связи $P_{\text{пор } v}$, $v = 1 \dots n$, в составе маршрута [7]:

$$P_{\text{выж } 1} = 1 - P_{\text{пор } 1} = 1 - \left(1 - \prod_{v=1}^n (1 - P_{\text{пор } v}) \right). \quad (4)$$

Вероятность выживания одного основного и k резервных маршрутов (состоящих, соответственно, из $n_{осн}$, n_1 , n_2 , ..., n_k каналов), будет определяться [7] выражением

$$P_{выж\ 1+k} = 1 - P_{пор\ 1+k} = 1 - \left(1 - \prod_{v=1}^{n_{осн}} (1 - P_{пор\ v}) \right) \prod_{j=1}^k \left[1 - \prod_{i=1}^{n_j} (1 - P_{пор\ i,j}) \right]. \quad (5)$$

Поскольку для любого v -го канала $P_{пор\ v} \leq 1$, то для любой сети $P_{выж\ 1} \leq P_{выж\ 1+k}$. Равенство в этом выражении будет иметь место при $k = 1$.

Вероятность устойчивости информационного направления в ИТКС при использовании алгоритма, формирующего единственный кратчайший маршрут из n каналов, определим по формуле [7]

$$P_{y1} = \frac{T_o}{T_o + (T_{диагн} + T_{ож} + T_{увед} + T_{рек} + T_{перекл})} \times \left(1 - \left(1 - \prod_{v=1}^n (1 - P_{пор\ v}) \right) \right). \quad (6)$$

Устойчивость информационного направления из $1 + k$ маршрутов при использовании алгоритма, формирующего основной кратчайший маршрут из n каналов и k резервных маршрутов, примет вид [7]

$$P_{y\ 1+k} = \frac{T_o}{T_o + T_{диагн} + T_{перекл}} \times \left(1 - \left(1 - \prod_{v=1}^{n_{осн}} (1 - P_{пор\ v}) \right) \prod_{j=1}^k \left[1 - \prod_{i=1}^{n_j} (1 - P_{пор\ i,j}) \right] \right). \quad (7)$$

Таким образом, обоснован показатель устойчивости связи — вероятность связности информационного направления. Ниже будет произведена оценка прироста эффективности по указанному показателю.

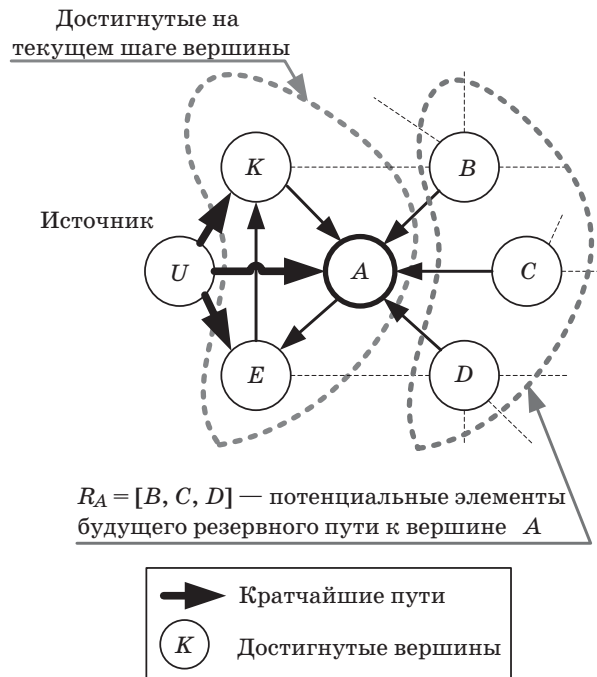
Модификация алгоритма Дейкстры в направлении формирования резервных путей к узлам сети

В ходе модификации алгоритма Дейкстры в него дополнительно вносятся изменения, направленные на расширение его функциональности, связанной с формированием резервных путей в соответствии с вышеуказанными положениями. Основой предлагаемой модификации алгоритма Дейкстры являются следующие положения.

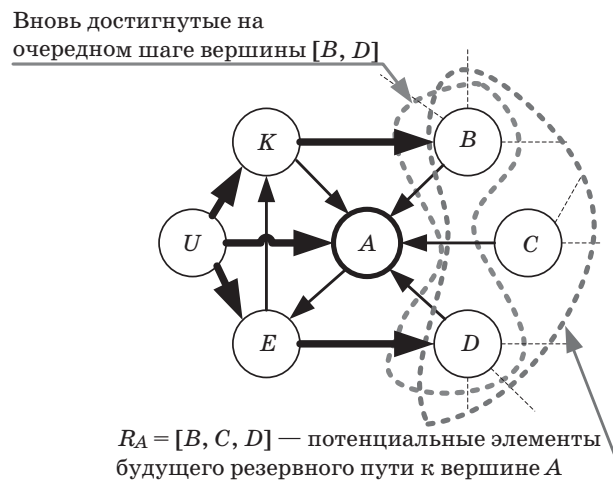
1. При достижении очередной вершины запоминаются исходящие вершины входящих в эту

вершину ребер как потенциальные элементы будущего резервного пути к этой вершине (рис. 1).

2. При следующем шаге функционирования алгоритма достигнутая очередная вершина проверяется как потенциальный элемент резервного пути для всех уже достигнутых вершин. Если она является потенциальным элементом резервного пути, формируется резервный путь к ранее достигнутой вершине через только что достигнутую (рис. 2). Сравнение $[B, C, D]$ и $[B, D]$ приводит к выводу, что резервные пути к A лежат через B и D .



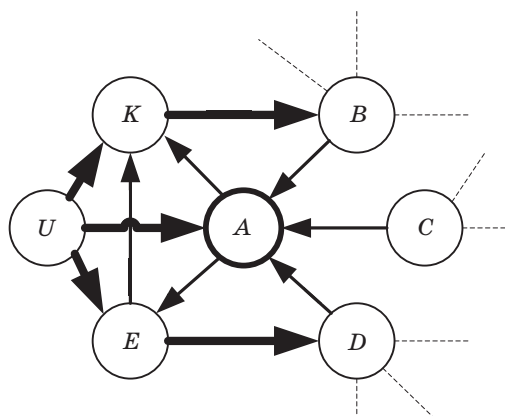
■ Рис. 1. Запись потенциальных элементов будущего резервного пути к вершине



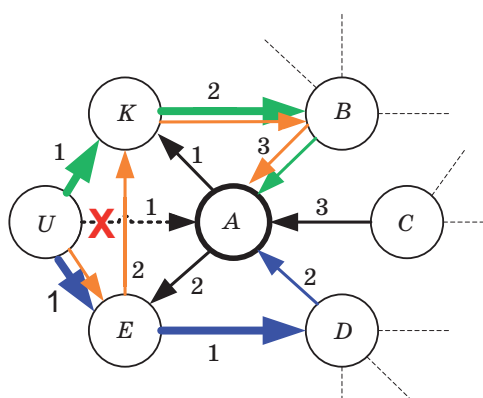
■ Рис. 2. Формирование резервного пути к вершине

3. Если к ранее достигнутой вершине уже были сформированы резервные пути и она участвует в создании нового резервного пути к очередной вершине, то к очередной вершине формируется множество резервных путей с включением в них всех возможных вариантов резервных путей, сформированных ранее. Причем если в резервный путь входит сама очередная вершина, то такой путь, во избежание циклов, в резервные не включается (рис. 3).

4. Все резервные пути к вершинам сети упорядочиваются в соответствии с минимизацией весов 1, 2, 3 и вносятся в таблицу маршрутизации наряду с кратчайшим путем (рис. 4). При отказе элементов кратчайшего пути для передачи выбирается резервный путь с минимальным суммарным весом, не содержащий отказавшие элементы.



■ Рис. 3. Пример построения резервного пути к вершине



Основной путь	Вес	Резервный путь	Вес
UA	1	UEDA	5
		UKBA	6
		UEKBA	9

■ Рис. 4. Пример построенных резервных путей к вершине

Схема модифицированного алгоритма Дейкстры приведена на рис. 5.

Входными параметрами алгоритма являются:

- ориентированный граф сети $G(U, V)$;
- количество вершин в графе n ;
- веса ребер, соединяющих произвольные i -ю и j -ю вершины $V(U_i, U_j)$.

Для обеспечения работы модифицированного алгоритма помимо имеющихся множеств (P — множество помеченных вершин, L — множество смежных помеченных вершин, D — множество расстояний до помеченных вершин от начальной вершины) вводятся следующие дополнительные множества.

1. R — множество вершин потенциальных резервных путей. В это множество вносятся достигнутые вершины, смежные рассматриваемой. В дальнейшем элементы множества используются при нахождении резервных путей.

2. C — множество весов ребер потенциальных резервных путей. В это множество вносятся веса ребер, исходящих из вершин, вносимых в множество R и входящих в рассматриваемую вершину.

3. Z — множество резервных путей в вершину. Содержит резервные пути в рассматриваемую вершину, сформированные в результате проведения логических операций над входящими в него элементами и элементами множеств R и L .

4. S — множество весов резервных путей к вершине. Содержит веса путей из множества Z и используется для ранжировки резервных путей при выводе результатов работы алгоритма.

К новым элементам алгоритма относятся блоки 16–23, 25. В блоках 16, 17 реализуется формирование элементов множества вершин R к текущей рассматриваемой вершине за счет использования положения № 1 по модификации алгоритма. Далее в блоках 18–23 путем пересечения элементов множества R , L и Z формируются элементы множества Z с учетом положения № 2 по модификации алгоритма. В блоке 25 осуществляется ранжировка резервных путей по сумме весов ребер, входящих в их состав.

Оценка повышения устойчивости информационных направлений связи в ИТКС при использовании модифицированного алгоритма Дейкстры

Модификация алгоритма Дейкстры за счет внедрения в него элементов одновременного формирования резервных и кратчайших путей позволит повысить устойчивость ИТКС по показателю (1) за счет одновременного повышения показателей K_r и $P_{\text{выж}}$. Повышение показателя K_r ведется благодаря снижению временных задержек восстановления информационного на-

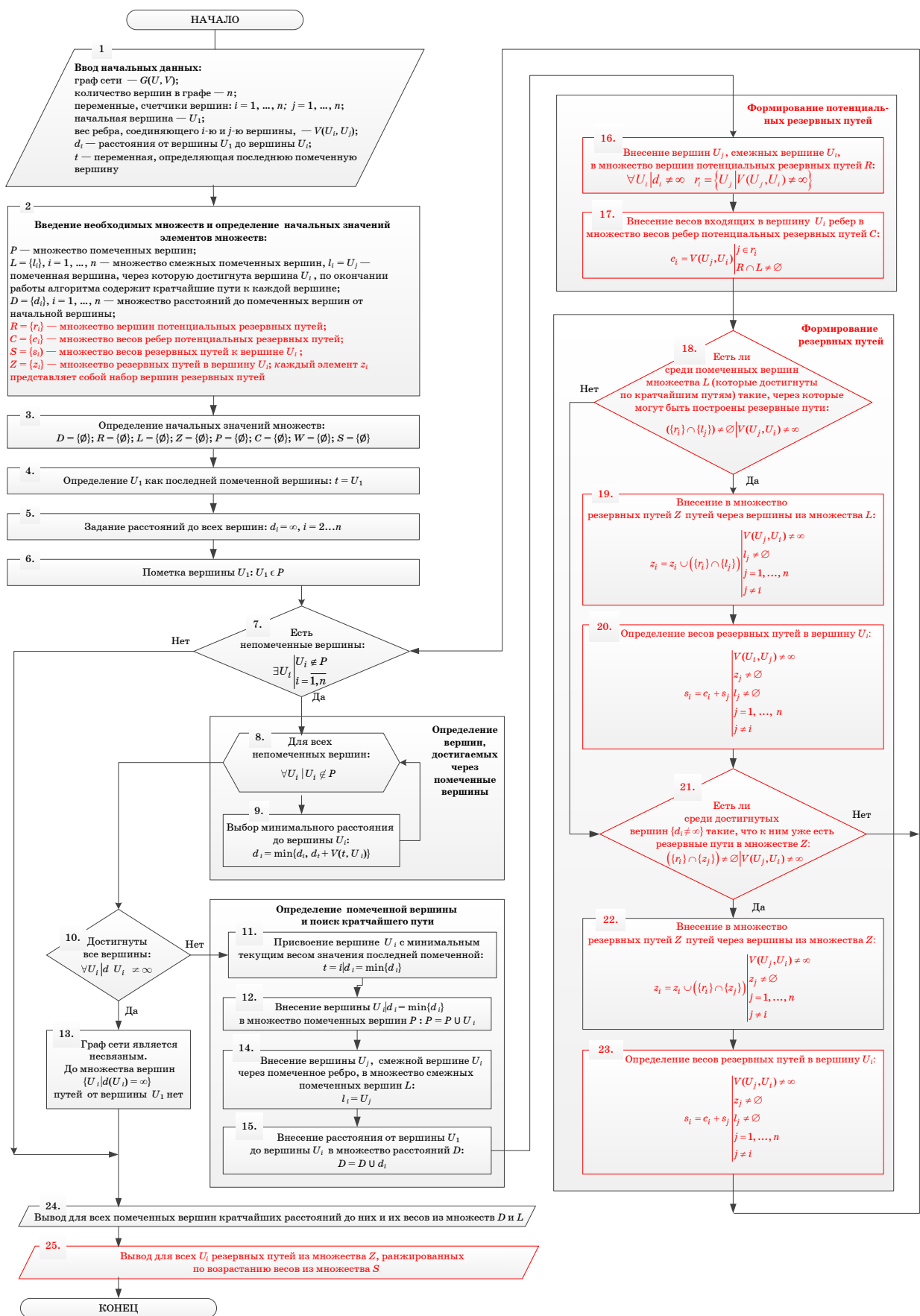


Рис. 5. Схема модифицированного алгоритма Дейкстры

■ Значения показателей выживания информационных направлений сети, представленной на рис. 6

Информационное направление	Алгоритм Дейкстры	Модифицированный алгоритм Дейкстры	Повышение эффективности, %
	Значение $P_{\text{выж } l}$	Значение $P_{\text{выж } 1+k}$	
$U_1 \rightarrow U_2$	0,9	0,9982	10
$U_1 \rightarrow U_3$	0,9	0,9949	10
$U_1 \rightarrow U_4$	0,9	0,9947	10
$U_1 \rightarrow U_5$	0,81	0,973	20

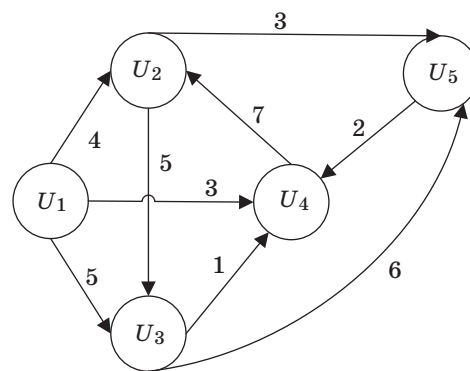
правления связи ($T_{\text{ож}} = 0, T_{\text{увед}} = 0, T_{\text{рек}} = 0$) за счет переключения информационных потоков. Повышение показателя $P_{\text{выж}}$ достигается введением резервных путей.

Для примера, представленного на рис. 6, по показателю вероятности выживания информационного направления связи в соответствии с выражениями (5) и (6) была проведена оценка эффективности использования предлагаемой модификации алгоритма Дейкстры, результаты которой представлены в таблице.

В значениях, приведенных в таблице, не учитывается выигрыш по параметру K_r , так как временные параметры восстановления связи зависят от конкретного протокола, в составе которого функционирует алгоритм Дейкстры. Достижимый выигрыш для одного и того же информационного направления по показателю вероятности его устойчивости, выраженный в процентах, составит

$$\left(1 - \frac{P_{y1+k}}{P_{y1}}\right) \cdot 100\% = \left[1 - \frac{T_o + T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} + T_{\text{увед}} + T_{\text{рек}} + T_{\text{перекл}}}{T_o + T_{\text{диагн}} + T_{\text{перекл}}}\right] \times \left[\frac{1 - \left(1 - \prod_{v=1}^{n_{\text{оч}}} (1 - P_{\text{пор } v})\right) \prod_{j=1}^k \left[1 - \prod_{i=1}^{n_j} (1 - P_{\text{пор } i,j})\right]}{1 - \left(1 - \prod_{v=1}^n (1 - P_{\text{пор } v})\right)} \right] \cdot 100\%.$$

Прирост эффективности, получаемый при использовании модифицированного алгоритма Дейкстры, возрастает при увеличении топологи-



■ Рис. 6. Сеть, на примере которой производилась оценка эффективности предлагаемого алгоритма

ческой сложности сети и при снижении длительностей временных параметров конкретных протоколов маршрутизации.

Заключение

Проведена модификация алгоритма Дейкстры за счет формирования как кратчайших, так и резервных путей. В результате проведенной модификации прирост устойчивости сети связи по показателю вероятности устойчивости информационного направления составил от 5 до 35 %.

Рассмотренную модификацию алгоритма Дейкстры предполагается использовать для совершенствования протоколов маршрутизации PNNI и OSPF в целях обеспечения заданного уровня устойчивости сетей ATM и TSP/IP в условиях деструктивно-разрушающих воздействий на сетевые элементы.

Литература

1. Блукке В. П., Попков В. К. О некоторых вопросах живучести телекоммуникационных сетей // Информационные сети, системы и технологии: тр. VII Междунар. конф. ICENASTe'2001, Минск, 2-7 октября 2001 г. Минск, 2001. С. 46-52.

2. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. — Красноярск: Поликом, 2010. — 389 с.
3. Попков В. К., Блукке В. П., Дворкин А. Б. Модели анализа устойчивости и живучести информацион-

- ных сетей // Проблемы информатики. 2009. № 4. С. 63–78.
4. Громов Ю. Ю., Драчев В. О., Набатов К. А., Иванова О. Г. Синтез и анализ живучести сетевых систем: монография. — М.: Машиностроение-1, 2007. — 152 с.
 5. Грызунов В. В. Оценивание живучести неоднородных структур // Вестник СибГУТИ. 2011. № 1. С. 28–36.
 6. Егунов М. М., Шувалов В. П. Анализ структурной надежности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. № 1. С. 54–60.
 7. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4. С. 69–79.
 8. Маршрутизация и защита информации на сетевом уровне в мультисервисных сетях связи / А. А. Буров, А. А. Киселев, С. Н. Новиков, Е. В. Сафонов, О. И. Солонская; под ред. С. Н. Новикова; ГОУ ВПО СибГУТИ. — Новосибирск, 2004. — 221 с. Деп. в ВИНТИ 04.11.04, № 1732-B2004.
 9. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Модель функционирования коммутатора в сети с использованием протокола покрывающего дерева STP и исследование устойчивости сети в условиях ограниченной надежности каналов связи // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 2. С. 61–68.
 10. Фокин В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети: учеб. пособие. — М.: Эко-Трендз, 2008. — 271 с.
 11. Кузюрин Н. Н., Фомин С. А. Покрытие графов циклами и быстрое восстановление оптоволоконных сетей // Тр. Института системного программирования. 2004. № 5. С. 249–268.
 12. Кораблин М. А., Хамитова Л. А. Матрично-графовые модели компьютерных сетей // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Т. 6. № 3. С. 46–52.
 13. Рудь Д. Е. Технологии топологической оптимизации трафика информационных потоков в телекоммуникационных сетях // Инженерный вестник Дона. 2010. Т. 12. № 2. С. 95–107.
 14. Макеев А. С., Стецко А. А., Ярушкина Н. Г. Система моделирования маршрутизации корпоративных сетей на основе нечетких метрик // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Т. 6. № 1. С. 64–71.
 15. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на сетевой уровень модели взаимодействия открытых систем и функционирование протокола маршрутизации оценки состояния канала (OSPF) // Информационные технологии моделирования и управления. 2009. № 7(59). С. 956–961.
 16. Cormen Thomas H., Leiserson Charles E., Rivest Ronald L. Introduction to Algorithms. — MIT Press and McGraw, 1990. — 1292 p.
 17. Коваленко Т. А. Анализ алгоритмов маршрутизации в вычислительных сетях // Глобальный научный потенциал: информационные технологии. 2011. № 9. С. 41–45.
 18. Полещук В. В., Азметов В. Р., Фортинский А. Г. Алгоритм динамической маршрутизации с гибридной метрикой для адаптивной сети связи // Изв. Института инженерной физики. 2009. Т. 3. № 13. С. 51–53.
 19. Кузнецов Н. А., Фетисов В. Н. Управление маршрутизацией в IP-сетях с переменным критерием качества // Автоматика и телемеханика. 2007. № 7. С. 180–189.
 20. Милованов Д. С., Тухтамирзаев А. Ю., Шамин П. Ю. Проблемы маршрутизации в сети с быстро меняющейся топологией // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 72. С. 29–33.
 21. Батаев Р. А., Голубев А. С. Вероятностный подход при создании алгоритмов маршрутизации в сетях с изменяющейся топологией // Тр. XIV конф. «Телематика 2007», Санкт-Петербург, 18–21 июня 2007 г. СПб., 2007. С. 32.
 22. Адъякимов А. Г. Решение задачи маршрутизации в сети с радиодоступом // Вестник Удмуртского университета. 2009. № 2-1. С. 173–182.
 23. Дмитриев В. Н., Сорокин А. А., Пищин О. Н. Построение систем связи с динамической неперiodической топологией // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Т. 6. № 1. С. 34–39.

UDC 004.057.4; 004.724.4

Forming Reserve Paths Based on Dijkstra Algorithm in Order to Enhance Stability of Telecommunication NetworksTsvetcov K. U.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, wavelet3@mail.ruMakarenko S. I.^a, PhD, Tech., Associate Professor, mak-serg@yandex.ruMikhailov R. L.^a, Post-Graduate Student, mikhailov-rom2012@yandex.ru^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The analysis of studies in the area of routing stability shows that the main direction of modification of the shortest path seeking algorithms is enhancement of presentation and formats of initial data due to accounting line metrics factors which define various characteristics of a real network. The goal of the paper is to enhance stability of connection by modification of Dijkstra algorithm to increase its productivity searching both the shortest and reserve paths to elements of a network. **Methods:** In order to use topological redundancy of the network Dijkstra algorithm has been modified towards expansion of its functionality by seeking both the shortest

and reserve paths. This expansion is provided by introducing additional sets and blocks in the field of the algorithm. **Results:** There has been developed modified Dijkstra algorithm which modification is based on application of incoming line edges for seeking reserve paths to the elements. A growth of connection network stability is evaluated according to an index of stability probability of an information direction. There has been considered the algorithm operation on the example of a network, it has been shown that its application increases stability from 5 up to 35 % based on the given index. **Practical implications:** The proposed modification of Dijkstra algorithm can be used to enhance OSPF and PNNI protocols efficiency at routing informational streams in terms destabilizing factors influence.

Keywords — Dijkstra Algorithm, Routing, Reservation of Communication Canals, OSPF, PNNI, ATM, Stability of Connection, Reliability of Connection.

References

- Blukke V. P., Popkov V. K. Some Aspects of Survivability of Telecommunication Networks. *Trudy VII Mezhdunarodnoi konferentsii "Informatsionnye seti, sistemy i tekhnologii" ICENASTe'2001* [Proc. VII Int. Conf. "Telecommunication Networks, Systems and Technologies"]. Minsk, 2001, pp. 46–52 (In Russian).
- Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metody rascheta pokazatelei kachestva funktsionirovaniia uzlovogo oborudovaniia i strukturno-setevykh parametrov setei sviazi sleduiushchego pokoleniia* [Models and Methods of Quality of Service of Elements of the Network` Coefficients and Structural Parameters of Next Generation Networks Analysis]. Krasnoyarsk, Policom Publ., 2010, 389 p. (In Russian).
- Popkov V. K., Blukke V. P., Dvorkin A. B. Models for Analysis of Stability and Reliability of Telecommunication Networks. *Problemy informatiki*, 2009, no. 4, pp. 63–78 (In Russian).
- Gromov Iu. Iu., Drachev V. O., Nabatov K. A., Ivanova O. G. *Sintez i analiz zhivuchesti setevykh sistem* [Synthesis and Analysis Net Systems Reliability]. Moscow, Mashinostroyeniye-1 Publ., 2007. 152 p. (In Russian).
- Gryzunov V. V. The Estimation of Nonuniform Structures` Reliability. *Vestnik SibGUTI*, 2011, no. 1, pp. 28–36 (In Russian).
- Egunov M. M., Shuvalov V. P. The Analysis of Structural Reliability of Traffic Nets. *Vestnik SibGUTI*, 2012, no. 1, pp. 54–60 (In Russian).
- Mikhailov R. L., Makarenko S. I. Estimating Communication Network Stability under the Conditions of Destabilizing Factors Affecting it. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2013, no. 4, pp. 69–79 (In Russian).
- Burov A. A., Kiselev A. A., Novikov S. N., Safonov E. V., Solonskaia O. I. *Marshrutizatsiia i zashchita informatsii na setevom urovne v mult'iservisnykh setiakh sviazi* [Routing and Data Protection at the Net Level of Multiservice Communication Networks]. S. N. Novikov ed. Novosibirsk, GOU VPO SibGUTI Publ., 2004. 221 p. Deposited in VININI on 04.11.04, no. 1732-B2004. *Deponirovannyye nauchnye raboty*, no. 1, 2005 (In Russian).
- Makarenko S. I., Mikhailov R. L. The Model of the Switch Functioning in the Network which Applies the Spanning Tree Protocol and the Net Stability in the Conditions of the Communication Channels Limited. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2013, no. 2, pp. 61–68 (In Russian).
- Fokin V. G. *Opticheskie sistemy peredachi i transportnye seti* [Optical Systems of Communication and Traffic Nets]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2008. 271 p. (In Russian).
- Kuziurina N. N., Fomin S. A. The Covering Graphs by Cycles and the Fast Reactivation of Fibber-Optical Networks. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniia*, 2004, no. 5, pp. 249–268 (In Russian).
- Korablin M. A., Hamitova L. A. Array and Graph Models of Computer Networks. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2008, vol. 6, no. 3, pp. 46–52 (In Russian).
- Rud' D. E. Technologies of Topological Optimization of Information Traffic in Telecommunication Networks. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2010, vol. 12, no. 2, pp. 95–107 (In Russian).
- Makeev A. S., Stetsko A. A., Jarushkina N. G. Routing Model Operation of Corporative Networks Based on Illegible Metrics. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2008, vol. 6, no. 1, pp. 64–71 (In Russian).
- Makarenko S. I. The Analysis of Purposeful Noise on Net Level of Open Systems Interconnection the Open Shortest Path First Protocol Functioning. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2009, no. 7(59), pp. 956–961 (In Russian).
- Cormen Thomas H., Leiserson Charles E., Rivest Ronald L. *Introduction to Algorithms*. MIT Press and McGraw, 1990. 1292 p.
- Kovalenko T. A. The Analysis of Routing Algorithms of Computer Networks. *Global'nyi nauchnyi potentsial: informatsionnye tekhnologii*, 2011, no. 9, pp. 41–45 (In Russian).
- Poleshchuk V. V., Azmetov V. R., Fortinskii A. G. The Algorithm of Dynamic Routing with the Hybrid Metric for the Adaptive Communication Networks. *Izvestiia Instituta inzhenernoi fiziki*, 2009, vol. 3, no. 13, pp. 51–53 (In Russian).
- Kuznecov N. A., Fetisov V. N. The Administration of IP Networks` Routing with Nonconstant Criteria of Quality. *Avtomatika i telemekhanika*, 2007, no. 7, pp. 180–189 (In Russian).
- Milovanov D. S., Tukhtamirzaev A. Iu., Shamin P. Iu. Problems of Routing in Fast Variable Topology Networks. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2009, no. 72, pp. 29–33 (In Russian).
- Bataev R. A., Golubev A. S. The Probabilistic Way of Creating the Routing Algorithms in Fast Variable Topology Networks. *Trudy XIV konferentsii "Telematika 2007"* [Proc. XIV Conf. "Telematika 2007"]. Saint-Petersburg, 2007, p. 32 (In Russian).
- Ad'iakimov A. G. The Decision of Routing Task in the Networks with Radioaccess. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, 2009, no. 2-1, pp. 173–182 (In Russian).
- Dmitriev V. N., Sorokin A. A., Pishchin O. N. Non-Periodic Dynamic Topology Communication Systems` Creating. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2008, vol. 6, no. 1, pp. 34–39 (In Russian).

УДК 621.396

ОПЕРАТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОРЕСУРСА СПУТНИКА-РЕТРАНСЛЯТОРА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВХОДНОМ ПОТОКЕ СООБЩЕНИЙ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В УПРАВЛЕНИИ

Е. А. Новиков^а, канд. техн. наук, доцент

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: обширность зон обслуживания и, соответственно, абонентской базы спутников-ретрансляторов, с одной стороны, и принципиальная ограниченность их частотно-энергетического ресурса (радиоресурса), с другой стороны, требуют оперативного перераспределения радиоресурса между активными и пассивными радионаправлениями в целях повышения эффективности его использования. Целью работы является разработка метода управления распределением (резервированием) ресурса спутника-ретранслятора при вариации трафика, поступающего от различных земных станций, и математической модели процесса обслуживания нестационарного трафика, позволяющей оптимизировать управление для выбранного показателя эффективности. **Результаты:** сформулирована задача оперативного распределения (резервирования) радиоресурса спутника-ретранслятора в виде задачи нелинейного программирования и приведен пример ее решения при обслуживании нестационарного потока сообщений, формируемого группой речевых абонентов. В качестве модели нестационарного потока сообщений, формируемого речевыми абонентами с учетом подавления сигнала в паузах, использован модулированный марковский процесс и его частный случай — прерываемый пуассоновский процесс. Сущность предложенного метода управления состоит в гибком подключении дополнительного резерва при достижении очередью сообщений на входе земной станции определенного порога. Новизна подхода состоит в том, что оптимальное значение порога для каждой земной станции определяется не только статистическими характеристиками входящего потока, но и величиной запаздывания сигналов управления в спутниковой радиолинии. Для решения поставленной оптимизационной задачи нелинейного программирования разработана математическая модель процесса обслуживания модулированного марковского процесса с запаздыванием в подключении дополнительных каналов в виде трехмерной марковской цепи. Для этого в качестве ограничений приняты допущения об экспоненциальных законах распределения продолжительности периодов активности и пауз речи, задержки в подключении дополнительного ресурса и длительностей передачи отдельных сообщений и интервалов между ними. Снятие одного или нескольких из этих ограничений возможно путем расширения пространства состояний и, соответственно, размерности модели. Разработан алгоритм и приведен числовой пример решения поставленной задачи для случая, когда входной поток формируется лишь одним абонентом и описывается прерываемым пуассоновским процессом. **Практическая значимость:** разработанный метод оперативного перераспределения радиоресурса спутника-ретранслятора с учетом динамики неоднородного сетевого трафика позволит существенно (как показывает даже простейший пример, от 15 до 40 %) повысить емкость отечественных сетей спутниковой связи, включающих большое число малоканальных региональных земных станций.

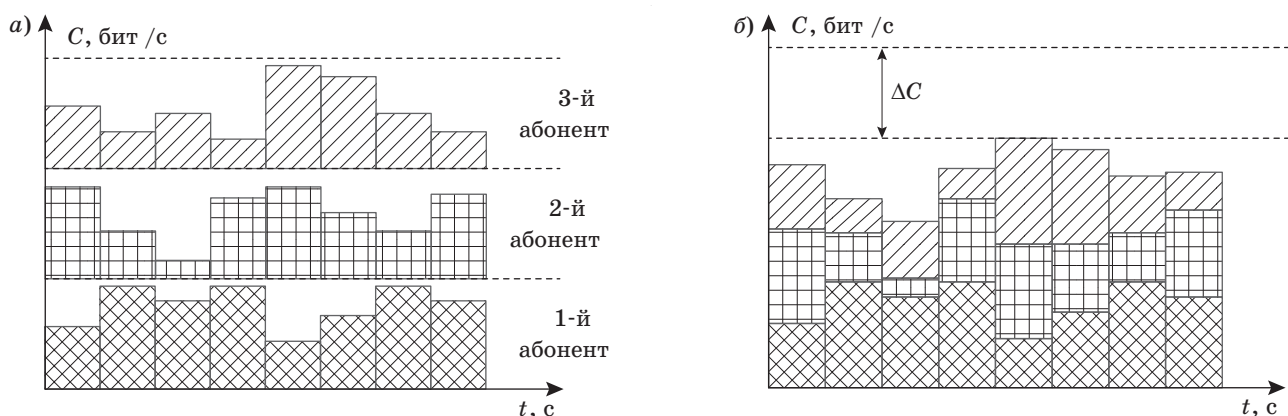
Ключевые слова — спутник-ретранслятор, радиоресурс, земная станция, прерываемый пуассоновский поток, модулированный марковский процесс, нелинейное программирование, управление с запаздыванием, речевой трафик.

Введение

Необходимость применения систем спутниковой связи (ССС) при организации доступа к современным инфокоммуникационным услугам особенно отчетливо ощущается абонентами, находящимися в труднодоступных и удаленных регионах России. Обширность обслуживаемых территорий с большой абонентской базой и принципиальная ограниченность частотно-энергетического ресурса (далее — радиоресурса) спутников-ретрансляторов (СР) обуславливают особую актуальность задачи динамического перераспределения радиоресурса СР между активными и пассивными направлениями связи. Основным фактором, осложняющим решение этой задачи, являются высокие задержки распространения сигналов в спутниковых радиолиниях и, соответственно, запаздывание в управлении [1, 2]. Поэтому традиционно при распределении радиоресурса операторы связи ориентируются на пи-

ковую нагрузку для каждого радионаправления (рис. 1, а) с тем, чтобы обеспечить требуемое качество обслуживания даже в часы наибольшей нагрузки. В работе предлагается альтернативный подход к распределению ресурса, в основе которого лежит оперативный маневр свободными ресурсами между более и менее загруженными радионаправлениями. Достижимый в результате статистического уплотнения [3] эффект экономии пропускной способности ΔC (рис. 1, б) по сути составляет выигрыш в пропускной способности СР.

Для компенсации запаздывания в управлении текущий ресурс, закрепляемый за конкретной земной станцией (ЗС), выделяется с некоторым запасом (резервом), который способен на некоторое время обеспечить требуемое качество обслуживания при внезапном повышении интенсивности нагрузки. Очевидно, величина этого резерва определяется запаздыванием управления и динамикой изменения интенсивности нагрузки: чем выше эти показатели, тем больше должен



■ Рис. 1. Вариант «жесткого» (а) и «гибкого» (б) распределения радиоресурса

быть запас. И, соответственно, чем выше резерв, тем меньше ожидаемый выигрыш в пропускной способности за счет оперативного резервирования. Собственно, обоснование рациональной величины резервируемого радиоресурса для каждого направления связи и составляет предмет исследования в данной работе.

Разработка математической модели обслуживания нестационарного трафика

В дальнейшем в работе под радиоресурсом СР понимается некоторое число стандартных цифровых каналов либо некоторое число частотно-временных слотов, подобных ресурсным единицам в стандарте LTE [4], которые распределяются между множеством ЗС неким диспетчером (протоколом МД или ЦС) [4].

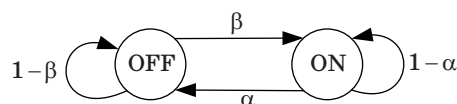
Дополнительным аргументом в пользу применения динамического перераспределения радиоресурса в спутниковой связи, несмотря на высокие задержки в управлении, является неоднородная и, как следствие, нестационарная с долговременной зависимостью структура трафика, формируемого новыми и вновь появляющимися мультимедийными службами [5, 6]. Однако учет такой долговременной зависимости, так называемого эффекта «самоподобия» трафика, не позволяет воспользоваться классическим математическим аппаратом теории телетрафика на основе формул А. Эрланга при обосновании рационального резерва для радионаправлений и требует использования более сложных моделей для «самоподобного» трафика, например, на основе модулированных марковских процессов [7, 8]. Частным случаем модулированных марковских процессов является прерываемый пуассоновский процесс (ППП), который хорошо подходит для моделирования отдельного телефонного источника в режиме подавления пауз. Граф модели ППП представлен на рис. 2.

Состояние «OFF» марковской цепи на рис. 2, например, соответствует паузе в процессе телефонного разговора, а состояние «ON» — периоду активности. Предполагается, что в течение периода активности источник генерирует пуассоновский поток сообщений (пакетов, переносящих фрагменты оцифрованной речи) с некоторой интенсивностью λ .

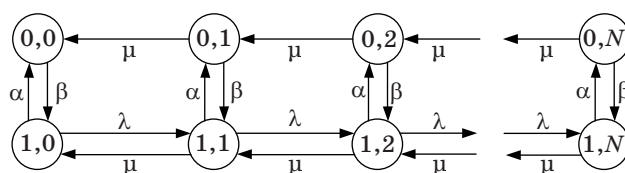
Модель процесса обслуживания одного абонента в логическом канале с подавлением передачи в паузах при ограниченной емкости буфера $R = N - 1$ в виде двумерной цепи Маркова представлена на рис. 3.

Состояния цепи характеризуются парой чисел (i, j) , где переменная i отражает состояние источника: $i = 0$ соответствует состоянию «OFF» (абонент молчит), $i = 1$ соответствует состоянию «ON» (абонент говорит); переменная $j = \overline{0, N}$ отражает число речевых пакетов, одновременно находящихся в канале обслуживания и в буфере.

Процесс динамического резервирования радиоресурса рассмотрим на примере одного радионаправления. Радиоресурс выделяется ЗС в зависимости от текущей активности абонента, но с некоторым запасом (резервом) для компенса-



■ Рис. 2. Граф модели ППП



■ Рис. 3. Двумерная цепь Маркова с прерываемым источником

ции задержки в управлении. Управление заключается в подключении дополнительного канала (ресурса) при возрастании активности абонента и возникновении угрозы снижения качества связи ниже нормы (например, возрастания задержки, переполнения буфера и т. п.). Учитывая высокий процент (>60 %) пауз в процессе телефонного разговора [1, 5, 8] и использование пакетной формы передачи речи в режиме подавления пауз, следует ожидать, что удастся существенно сократить величину выделяемого ЗС ресурса и, соответственно, повысить емкость радиосети в целом. Дополнительно следует учесть некоторую смысловую избыточность речи, которая допускает до 1–5 % потерь от общего числа речевых пакетов без снижения качества диалога [1, 5, 8].

Постановка и решение задачи оптимального выбора ресурса пропускной способности спутника-ретранслятора

Задача состоит в том, чтобы с учетом статистических особенностей речевого трафика и времени T_y запаздывания в управлении определить минимально необходимую величину пропускной способности (объема одной ресурсной единицы), выделяемой каждому радионаправлению, а также момент формирования запроса на подключение дополнительного ресурса (канала).

Предполагается, что задержка в подключении дополнительного канала CP при заполнении буфера ЗС до некоторой величины k^* является величиной случайной с экспоненциальным законом распределения и средним значением $T_y = 1/\gamma$. Емкость буфера, выделяемого для всей группы, определяется регламентируемой задержкой и нормой потерь речевых пакетов.

Допущение об экспоненциальных законах распределения длительностей передачи и поступления речевых пакетов, периодов активности и пауз абонента, а также запаздывания в управлении позволяет представить моделируемый процесс в виде трехмерной цепи Маркова. Граф состояний трехмерной цепи, моделирующей процесс обслуживания одного источника ППП с учетом запаздывания в управлении при включении дополнительного канала, приведен на рис. 4.

Состояния марковской цепи на рис. 4 характеризуются тройкой чисел (i, j, k) , где $i = 0$ соответствует молчанию абонента, $i = 1$ соответствует активности абонента; $j = 1, 2$ — число каналов (ресурсных единиц), выделяемых для передачи речевого трафика; $k = 0, N$ — общее число речевых пакетов в буфере ЗС.

Интенсивности переходов между состояниями графов на рис. 2–4:

λ — интенсивность поступления пакетов в активном состоянии источника;

μ — интенсивность обслуживания пакетов;

β — интенсивность перехода источника в активное состояние;

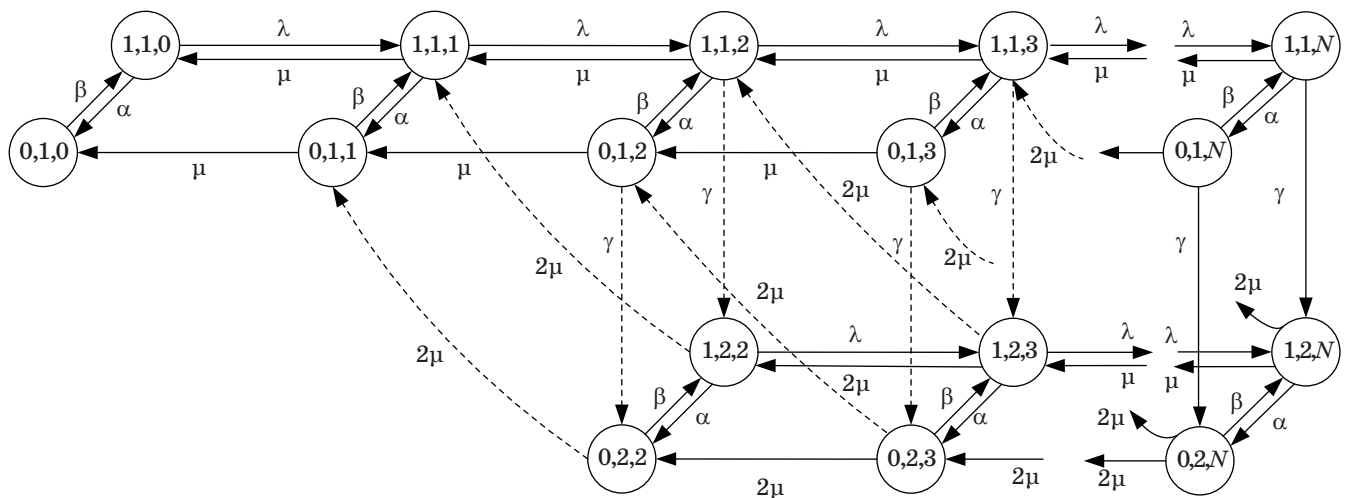
α — интенсивность перехода источника в неактивное состояние;

γ — интенсивность подключения дополнительного канала,

— определяются как обратные соответствующим временным интервалам, величины которых имеют показательное распределение со средними значениями:

$T_{п} = 1/\beta$ — средняя длительность паузы в речи;

$T_{а} = 1/\alpha$ — средняя длительность периода активности в речи;



■ **Рис. 4.** Модель обслуживания одного абонента, формирующего ППП сообщений, с учетом задержки в подключении дополнительного канала

$T_{в.п} = 1/\lambda$ — средний интервал времени между последовательными речевыми пакетами, генерируемыми одним абонентом;

$T_0 = 1/\mu$ — среднее время обслуживания одного речевого пакета;

$T_y = 1/\gamma$ — среднее время задержки в управлении.

Для расчета вероятностей состояний марковской цепи в стационарном режиме может быть составлена система линейных алгебраических уравнений вида

$$P_{ijk} = \begin{cases} f_{ijk}(p_{ijk}, i = \overline{0,1}, j = 1, k = \overline{0,N}); \\ f_{ijk}(p_{ijk}, i = \overline{0,1}, j = 2, k = \overline{k^*, N}); \\ 0, i = \overline{0,1}, j = 2, k = \overline{0, k^* - 1}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^1 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=0}^N p_{ijk} = 1,$$

где линейные функции f_{ijk} определяются путем последовательного разрешения относительно p_{ijk} уравнений баланса переходов между состояниями системы массового обслуживания (СМО) на рис. 4; k^* — число пакетов в буфере ЗС, при котором формируется запрос на выделение дополнительного ресурса ($k = k^*, N$), при снижении числа пакетов в буфере ниже k^* происходит отключение дополнительного ресурса.

Система уравнений (1) за счет введения вектора $\mathbf{P} = [p_z = p_{ijk}, z = \overline{1, Z}]^T$, содержащего ненулевые значения p_{ijk} , может быть представлена в векторно-матричном виде, более удобном для численного решения, а также постановки и решения задачи оптимизации:

$$\mathbf{AP} = \mathbf{B}, \quad (2)$$

где \mathbf{A} — $(Z + 1) \times Z$ -мерная матрица интенсивностей переходов; \mathbf{P} — Z -мерный вектор ненулевых вероятностей состояний СМО; \mathbf{B} — $(Z + 1)$ -мерный вектор правых частей; $Z = 4(N + 1)$.

В качестве примера определим матрицу \mathbf{A} , а также векторы \mathbf{P} и \mathbf{B} для случая $M = 1, K = 2,$

$N = 3$. Граф переходов между состояниями СМО будет выглядеть в этом случае в соответствии с рис. 5, а, где в квадратных блоках справа снизу от каждого состояния СМО указан номер $z = \overline{1, 12}$ состояния после сквозной перенумерации.

Система алгебраических уравнений, описывающих граф на рис. 5, а, может быть записана в следующем виде:

$$\begin{cases} \beta p_1 - \alpha p_2 - \mu p_3 = 0; \\ -\beta p_1 + (\lambda + \alpha) p_2 - \mu p_4 = 0; \\ (\beta + \mu) p_3 - \alpha p_4 - \mu p_5 - 2\mu p_6 = 0; \\ -\lambda p_2 - \beta p_3 + (\alpha + \mu + \alpha) p_4 - \mu p_7 = 0; \\ (\beta + \mu + \gamma) p_5 - \alpha p_7 - \mu p_9 = 0; \\ -\gamma p_5 + (\beta + 2\mu) p_6 - \alpha p_8 - 2\mu p_{10} = 0; \\ -\lambda p_4 - \beta p_5 + (\mu + \gamma + \lambda) p_7 - \mu p_{11} = 0; \\ -\beta p_6 - \gamma p_7 + (\alpha + 2\mu + \lambda) p_8 - 2\mu p_{12} = 0; \\ (\beta + \mu + \gamma) p_9 - \alpha p_{11} = 0; \\ -\gamma p_9 + (2\mu + \beta) p_{10} - \alpha p_{12} = 0; \\ -\lambda p_7 - \beta p_9 + (\mu + \alpha + \gamma) p_{11} = 0; \\ -\lambda p_8 - \beta p_{10} - \gamma p_{11} + (\alpha + 2\mu) p_{12} = 0; \\ \sum_z p_z = 1. \end{cases} \quad (3)$$

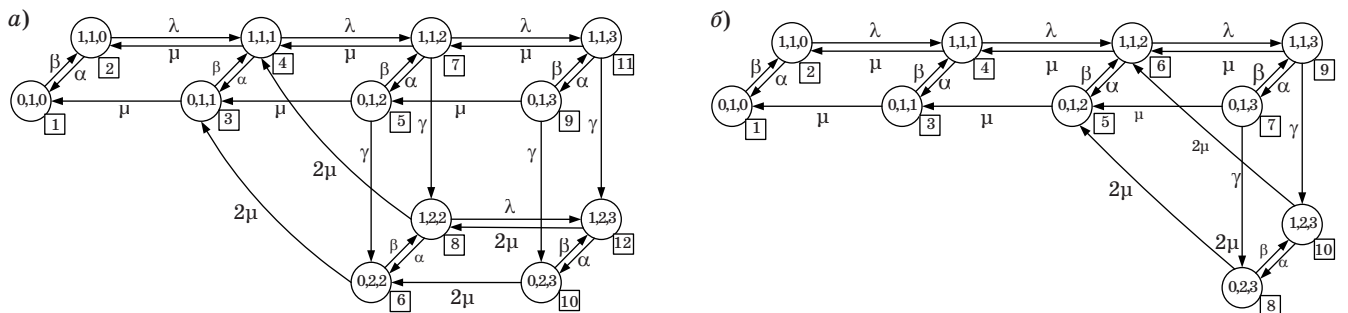
В системе уравнений коэффициенты при p_z определяют ненулевые компоненты матрицы \mathbf{A} на пересечении строк, соответствующих номеру уравнения, и столбцов, соответствующих номеру состояния z . Правые части уравнений из системы (3) определяют вектор \mathbf{B} .

Решение матричного уравнения (2) в общем случае может быть получено в следующем виде:

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}^+ \mathbf{B}, \quad (4)$$

где \mathbf{A}^+ — матрица, псевдообратная матрице \mathbf{A} , определяемая как $\mathbf{A}^+ = [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T$.

Для постановки задачи оптимального выбора требуется провести декомпозицию системы уравнений (2) с целью выделить оптимизируемые параметры. Так, матрица \mathbf{A} интенсивностей пере-



■ Рис. 5. Первый (а) и второй (б) варианты графа модели обслуживания ППП вызовов от одного абонента

ходов между состояниями СМО может быть представлена в виде суммы

$$A = A_0 + \mu A_\mu + A_\gamma, \quad (5)$$

где A_0 — матрица, содержащая интенсивности переходов α , β и λ ; A_μ — матрица, содержащая, кроме нулевых компонентов, постоянные множители, стоящие перед интенсивностью переходов μ ; A_γ — матрица, содержащая, кроме нулевых компонентов, интенсивность переходов γ .

Задача определения момента формирования запроса на подключение дополнительного канала может быть интерпретирована как последовательное (слева направо и сверху вниз) удаление перехода вниз на графах, приведенных на рис. 4 и 5, а, а также перемещение диагональной стрелки, соответствующей отключению дополнительного ресурса, вправо. Так, например, для графа, приведенного на рис. 5, а, может быть сформировано только два варианта запроса дополнительного ресурса, один из которых приведен на рис. 5, а и показывает необходимость запроса при поступлении в систему второго пакета, а другой приведен на рис. 5, б и показывает необходимость запроса при поступлении в систему третьего пакета. Каждый из перечисленных вариантов будет иметь соответствующие матрицы (A_μ : $A_\mu^{(1)}$ и $A_\mu^{(2)}$, A_γ : $A_\gamma^{(1)}$ и $A_\gamma^{(2)}$) и соответствующие показатели качества обслуживания, например вероятность потерь $P_{\text{пот}}$.

Задачу минимизации ресурса пропускной способности, выделяемой для каждого радионаправления, с учетом прерывистого характера трафика и возможности оперативного подключения дополнительного ресурса можно сформулировать как задачу нелинейного программирования в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \left[E_\mu^T X \right] \left[\sum_{j=1}^K j E_j^T X \right] + \\ & + R^T X + s [E_u X]^T [E_u - E_U X] \rightarrow \min, \quad (6) \end{aligned}$$

где $X = [P^T \mu U^T]^T$ — агрегированный вектор оптимизируемых параметров, включающий в себя Z -мерный вектор вероятностей состояний модели системы обслуживания, граф которой приведен на рис. 4; μ — интенсивность обслуживания пакетов; U — L -мерный вектор управляющих параметров, определяющих вариант матриц $A_\mu^{(l)}$, $l=1, L$ и $A_\gamma^{(l)}$, $l=1, L$ интенсивностей подключения дополнительной ресурсной единицы; E_μ^T , E_1^T , E_2^T , E_u и E_U — вспомогательные матрицы, позволяющие проводить декомпозицию исходного вектора X ; R — вектор относительных приоритетов, определяющий порядок возрастания важности конкретного управляющего воздействия; s — вспомогательный параметр, определяющий величину штрафа.

В выражении (6) первое слагаемое имеет смысл среднего ресурса пропускной способности СР, потребляемого одним радионаправлением и выраженного через интенсивность обслуживания одним каналом следующим образом:

$$M = [E_\mu^T X] \left[\sum_{j=1}^2 j E_j^T X \right] = \mu \left[\sum_{i=0}^1 \sum_{k=0}^N \sum_{j=1}^2 j p_{ijk} \right]. \quad (7)$$

Второе слагаемое в выражении имеет смысл ранжирования альтернатив управления по вкладу в результирующую целевую функцию. Очевидно, что компоненты $(Z + L + 1)$ -мерного вектора R должны быть тем больше, чем больше ненулевых компонентов в соответствующих матрицах $A_\mu^{(l)}$, $l=1, L$ и $A_\gamma^{(l)}$, $l=1, L$. В свою очередь, чем больше ненулевых компонентов в матрицах $A_\mu^{(l)}$, $l=1, L$ и $A_\gamma^{(l)}$, $l=1, L$, тем раньше есть возможность послать запрос на выделение дополнительного канала, что влечет за собой повышение средней интенсивности задействования системы.

Третье слагаемое в выражении (6) имеет смысл индикатора первого порядка, т. е. переключателя между альтернативами управления.

Ограничения для задачи (1) сведены в таблицу.

Сформулированная задача нелинейного программирования может быть решена с использованием метода возможных направлений [9].

■ Ограничения для задачи (1)

Ограничение	Формализованная запись ограничения
Учитывающее порядок переходов в модели на рис. 1	$\left[A_0 + \sum_{l=1}^L \left([A_\gamma^{(l)} + A_\mu^{(l)}] [E_l^T X] \right) \right] [E_p X] = B$
На вероятность потерь	$E_0^T X \leq P_{\text{з.отк}}$
Неотрицательности значений вероятностей	$E_p X \geq 0$
Нормирующее значения управляющих параметров	$E_u^T X = 1$
Неотрицательности значения интенсивности обслуживания	$E_\mu^T X > 0$
На диапазон значений управляющих параметров	$0 \leq E_u \leq 1$

Исследование эффективности разработанного метода управления распределением ресурса спутника-ретранслятора при вариации трафика

Для моделей небольшой размерности, например, при емкости буфера 10–40 пакетов, оптимальное решение задачи (6), (7) может быть получено путем прямого перебора. Сначала для каждого варианта управления решается задача поиска минимального значения средней интенсивности обслуживания при ограничении на вероятность отказа $P_{отк} \leq 0,01$, затем решается задача выбора варианта управления, доставляющего минимальное значение средней интенсивности обслуживания.

Результаты моделирования для различной емкости системы обслуживания $N = 10, 20, 30, 40$ и заданной вероятности отказа $P_{отк} \leq 0,01$ приведены на рис. 6, а–г.

При моделировании использовались следующие допущения:

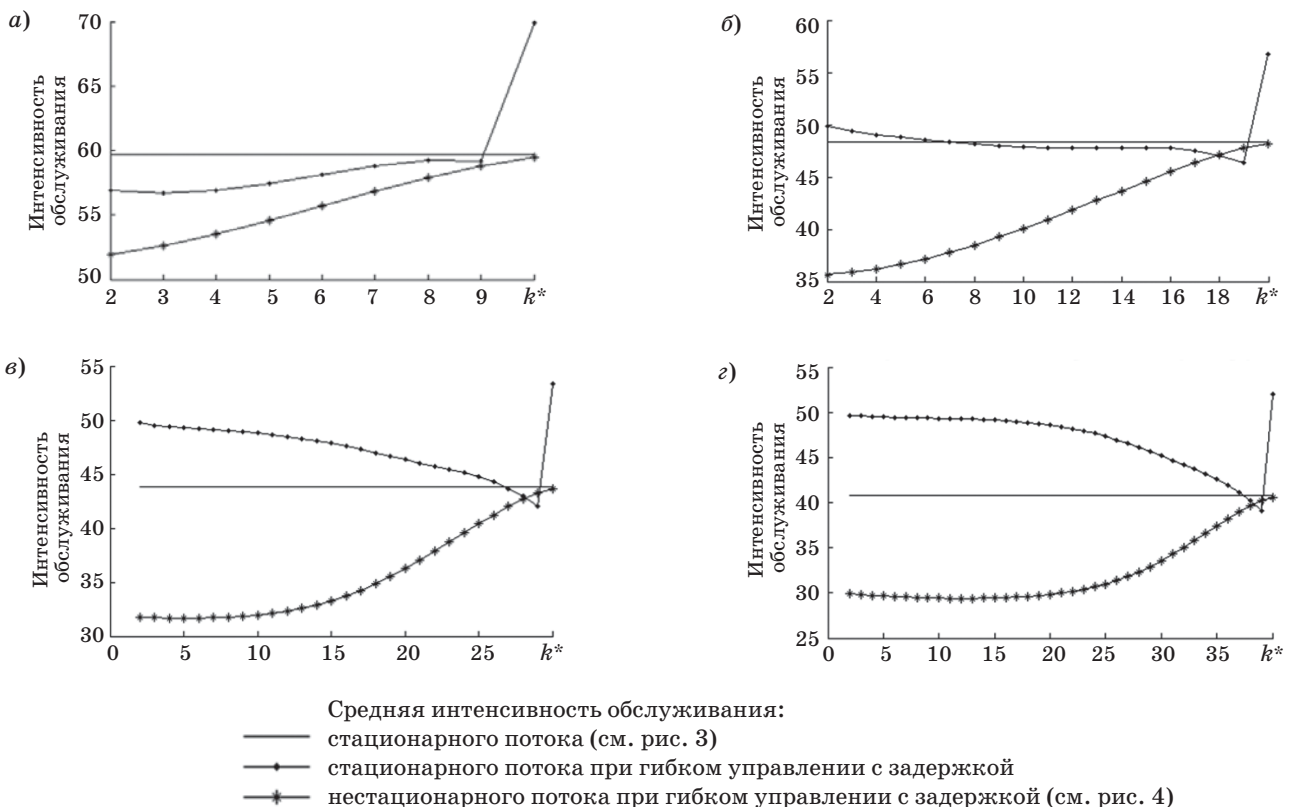
- скорость кодирования речи $C_k = 10$ Кбит/с;
- дискретность работы пакетизатора речи $t_{пак} = 20$ мс;
- средняя длительность активности абонента $T_a = 1,2$ с, соответственно, интенсивность перехода в состояние молчания абонента $\alpha = 1/T_a = 0,83$;

— средняя продолжительность паузы $T_{п} = 1,8$ с, соответственно, интенсивность перехода в состояние активности абонента $\beta = 1/T_{п} = 0,56$;

— среднее время распространения радиосигнала от ЗС до СР и обратно $T_y = 0,25$ с, соответственно, интенсивность удовлетворения запросов на выделение дополнительного ресурса $\gamma = 1/T_y = 4$.

При принятых допущениях средний объем речевого пакета составит $V_{пак} = 200$ бит, а средняя длительность его передачи $T_{пак} = \Delta T_{пак} = 20$ мс. С учетом принятых допущений о продолжительности периодов активности и пауз интенсивность поступления речевых пакетов в буфер ЗС составит от 20 до 50 пакетов/с.

Анализ графиков на рис. 6 показывает очевидное преимущество при использовании схемы гибкого управления обслуживанием нестационарного трафика даже с учетом ощутимой задержки в доведении управляющего воздействия. В среднем выигрыш от применения алгоритма гибкого управления обслуживанием нестационарного трафика по сравнению с неуправляемым вариантом обслуживания нестационарного трафика составляет порядка 15 %, а по сравнению с алгоритмом гибкого управления обслуживанием стационарного трафика с задержкой — до 60 %.



■ **Рис. 6.** Зависимость средней интенсивности обслуживания от варианта управления при емкости системы $N = 10$ (а); $N = 20$ (б); $N = 30$ (в); $N = 40$ (г)

Кроме того, результаты моделирования показали, что при сравнительно небольшой емкости буфера (10, 20 пакетов) необходимость формирования запроса на подключение второго канала обслуживания возникает уже при образовании очереди в 2 пакета, по существу, при первых признаках очереди. При увеличении емкости буфера до 30, 40 пакетов оптимальный момент посылки запроса на выделение дополнительного ресурса сдвигается вправо (при возрастании очереди до 5–7 пакетов).

Заключение

Следует ожидать, что распространение разработанного подхода к управлению ограниченным ресурсом СР на случай подключения к каждой ЗС группы из M абонентов позволит добиться еще более существенного выигрыша в экономии радиоресурса СР за счет динамического перераспределения его между радионаправлениями. Однако изучение этого вопроса, учитывая существенное увеличение размерности задачи, является предметом отдельного исследования.

Литература

1. Антоян А. Б. Пакетная коммутация для передачи речи // Вестник связи. 1999. № 5. С. 68–71.
2. Bae J. J., Suda T. Survey of Traffic Control Schemes and Protocols in ATM Networks // Proc. IEEE. 1991. Vol. 79. N 2. P. 170–186.
3. Chandra K. Statistical Multiplexing // The Wiley Encyclopedia of Telecommunicatins. — John Wiley & Sons Publication, 2002. Vol. 5. P. 2420–2432.
4. Cox С. An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications. — John Wiley & Sons Ltd, 2012. — 337 p.
5. Коган А. В. IP-телефония: оценка качества речи // Технологии и средства связи. 2001. № 1. С. 78–84.
6. Петров В. В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия: дис. ... канд. техн. наук / МЭИ (ТУ). — М., 2004. — 199 с.
7. Michiel H., Laevens K. Teletraffic Engineering in a Broad-Band Era // Proc. IEEE. 1997. Vol. 85. N 12. P. 2007–2033.
8. Шелухин О. И., Лукьянцев Н. Ф. Цифровая обработка речи. — М.: Радио и связь, 2000. — 256 с.
9. Bazaraa M. S. and C. M. Shetty. Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. — N. Y.: John Wiley & Sons, 1979. — 872 p.

UDC 621.396

Operative Distribution of Satellite Repeater Radio Resource in Terms of Non-Stationary Ingress Flow with Account of Time Lagged Control

Novikov E. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, novikov.evg.al@gmail.com

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Vast satellite-serviced area and subscriber base of satellite repeaters on the one hand and fundamental limitedness of their frequency-energetic resource (radio resource) on the other hand require operative radio resource redistribution between active and passive radio routes to enhance their operation efficiency. The goal of this research is development of a method to control distribution (reservation) of a satellite repeater resource under traffic variance provided by diverse satellite terminals, development of a mathematical model of a non-stationary traffic service process which allows optimizing control of a chosen efficiency factor. **Methods:** modulated Markov processes, tele-traffic theory, non-linear programming. **Results:** There have been formulated task of operative distribution (reservation) of satellite repeater radio resource in a form of non-linear programming problem; there has been given an example of its solution during service of a non-stationary message stream which is formed by a group of voice subscribers. Modulated Markov process and its particular case – so called interrupted Poisson process – has been used as a model of a non-stationary message stream formed by voice subscribers taking into account signal suppression in pauses. The essence of this control method is flexible connection of an additional reserve after achievement of a particular limit by message queue in input of satellite terminal. The novelty of the approach implies that the best limit value for each satellite terminal is defined either by statistical characteristic of input stream or by control signals lag factor in satellite radio-frequency line. To solve the given optimization problem of nonlinear programming there has been developed a mathematical model of service of modulated Markov process with time lag during connection of additional channels in a form of three dimensional Markov chain. In order to achieve this goal there has been accepted as restrictions an assumption about exponential rules of duration distribution of active periods and pauses, time lag of connection of additional resources, duration time of certain message transmission and an interval time between them. Removal of one or more of these restrictions is possible by widening of state space and dimensions of the model accordingly. There has been developed an algorithm for this problem solution and there has been given an example for the case when ingress flow is formed only by one subscriber and it is described by interrupted Poisson process.

Practical importance: The developed method of operative distribution of satellite repeater radio resource with account of dynamics of heterogeneous network traffic will significantly increase capacity of the domestic satellite networks which include a lot of local satellite terminals (the simplest example indicates from 15 to 40 %).

Keywords — Satellite Repeater, Radio Resource, Satellite Terminal, Interrupted Poisson Process, Modulated Markov Process, Nonlinear Programming, Time Lagged Control, Voice Traffic.

References

1. Antonian A. B. Package Switching for a Speech Transmission. *Vestnik svyazi*, 1999, no. 5, pp. 68–71 (In Russian).
2. Bae J. J., Suda T. Survey of Traffic Control Schemes and Protocols in ATM Networks. *Proc. IEEE*, 1991, vol. 79, no. 2, pp. 170–186.
3. Chandra K. Statistical Multiplexing. *The Wiley Encyclopedia of Telecommunications*. A John Wiley & Sons Publication, 2002, vol. 5, pp. 2420–2432.
4. Cox C. *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*. John Wiley & Sons Ltd, 2012. 337 p.
5. Kogan A. V. IP-Telephony: Assessment of Quality of the Speech. *Tekhnologii i sredstva svyazi*, 2001, no. 1, pp. 78–84 (In Russian).
6. Petrov V. V. *Struktura telegrafiki i algoritm obespecheniia kachestva obsluzhivaniia pri vliianii effekta samopodobiia*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Teletraffic Structure and Ensuring Quality of Service Algorithm at Influence of Self-Similarity Effect. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, MEI(TU) Publ., 2004. 199 p. (In Russian).
7. Michiel H., Laevens K. Teletraffic Engineering in a Broad-Band Era. *Proc. IEEE*, 1997, vol. 85, no. 12, pp. 2007–2033.
8. Shelukhin O. I., Luk'iantsev N. F. *Tsifrovaia obrabotka rechi* [Digital Processing of the Speech]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2000. 256 p. (In Russian).
9. Bazaraa M. S. and C. M. Shetty. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. New York, John Wiley & Sons, 1979. 872 p.

Уважаемые подписчики!

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2013 гг. в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>), НЭБ (<http://www.elibrary.ru>) и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/journal/n/informatsionno-upravlyayuschie-sistemy>). 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 РУНЭБ (<http://www.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) 500-00-60, 580-95-80, эл. почта: interpochta@interpochta.ru, сайт: <http://www.interpochta.ru>

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 389

ИНВАРИАНТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ СРЕДНИХ В СЛУЧАЕ ТРЕХ ИЗМЕРЕНИЙ

И. Г. Ханыков^а, магистр^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка задачи: проблема восстановления значений измерений по косвенным данным актуальна в технической диагностике тогда, когда отсутствует возможность прямого измерения и контроля данных. Пять классически средних: арифметическое, геометрическое, гармоническое, квадратическое, контргармоническое — это часто встречаемые в технике, науке и быту средние. Ранее найденные инвариантные соотношения этих средних были получены для случая двух измерений. Целью данной работы является вывод инвариантных соотношений классически средних от трех измерений, а также решение обратной задачи поиска самих измерений по известным средним. **Методы:** составлены системы уравнений; последовательно исключены неизвестные переменные; рассмотрено влияние априорной информации об измерениях. **Результаты:** выведены инвариантные соотношения для каждой тройки из пяти средних от трех аргументов. Решена задача восстановления измерений по известным средним величинам. Обе задачи решены для двух видов априорной информации: измерения — соседние члены прогрессии или нет. Выведенные формулы восстановления измерений по средним величинам представлены в таблицах. **Практическая значимость:** выведенные инвариантные соотношения, связывающие каждые три из пяти классически средних, могут оказаться полезными в технической диагностике и при обработке результатов косвенных измерений.

Ключевые слова — классические средние, инвариантные соотношения, средние от трех измерений, прямая задача о средних, обратная задача о средних.

Введение

В математике и технике известно много средних величин. Их исследованию посвящены работы [1–12]. Самыми распространенными являются пять классических средних: арифметическое A , геометрическое G , гармоническое H , квадратическое Q , контргармоническое C . Формулы этих средних для случая трех аргументов a, b, c :

$$A = \frac{a+b+c}{3}; G = \sqrt[3]{abc}; H = \frac{3}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}};$$

$$Q = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2}{3}}; C = \frac{a^2 + b^2 + c^2}{a+b+c}. \quad (*)$$

Среднее арифметическое имеет наибольшее распространение как в научной деятельности, в технике, в промышленности, так и в быту.

Среднее геометрическое применяется в прикладной статистике при нелинейной шкале измерений, в теории автоматического регулирования при анализе быстродействия систем управления.

Среднее гармоническое равно обратному среднему арифметическому от обратных величин. Оно применяется в расчетах средней скорости, средней продолжительности жизни, средней цены продукции при известных объемах продаж и в других случаях.

Среднее квадратическое применяется в теории вероятностей и математической статистике

при определении дисперсии и среднеквадратического отклонения.

Среднее контргармоническое находит применение в цифровой обработке изображений для устранения шумов типа «соль» и «перец».

В статье рассматриваются две задачи — поиск инвариантных соотношений (ИСО) между средними и решение обратной задачи теории измерений для случая малых выборок.

Первая задача сводится к поиску выражений, связывающих три различных средних из пяти (*). Выражения представляют собой полином, который включает в себя средние. В зависимости от априорной информации в него может войти и известное измерение, например a .

Вторая задача — она же обратная к первой — состоит в восстановлении значений измерений $\{a, b, c\}$ по известным значениям трех средних из пяти (*) и выражения ИСО, связывающего последние.

Решение обеих задач зависит от априорной информации об измерениях $\{a, b, c\}$. Все задачи решаются для $n = 3$ измерений.

Два случая вывода инвариантных соотношений

Для поиска инвариантных соотношений, как правило, задается априорная информация. Рассмотрим два случая информации этого рода.

В основе первого случая лежит допущение о том, что значение одной величины из набора $\{a, b, c\}$,

например a , определяется, а две другие — изменяются.

Алгоритм отыскания ИСО для этого случая выглядит следующим образом:

1) берем выражения для трех из пяти средних (*) (всего 10 вариантов);

2) исключив из этих выражений измерения b , c , получаем соотношения, которые инвариантны к исключенным измерениям.

Например, взяв первые три из средних (*), можно записать

$$3A = a + b + c; G^3 = abc;$$

$$H(ab + bc + ac) = 3abc.$$

Выразив из первого и второго уравнений b и c :

$$b = 3A - c - a, c = \frac{G^3}{ab},$$

и подставив их в третье, получаем соотношение, не зависящее от исключенных измерений:

$$-3Ha^2A + Ha^3 - HG^3 + 3aG^3 = 0.$$

Это соотношение выполняется при любых значениях b и c , т. е. оно является инвариантом. Поступая аналогичным образом для оставшихся троек средних, взятых из (*), находим еще девять ИСО. Все они представлены в табл. 1.

Заметим, что в табл. 1 ИСО тройки (A, G, C) образуются из тройки (A, G, Q) , а пятая (A, H, C) — из четвертой (A, H, Q) подстановкой выражения тройки (A, Q, C) .

Второй случай априорной информации имеем, если известно некоторое функциональное соотношение, связывающее три измеряемые величины. В общем случае оно имеет вид $f(a, b, c) = 0$. Далее мы ограничимся рассмотрением случая, когда априорно известно, что величины $\{a, b, c\}$ являются соседними членами арифметической, геометрической или гармонической прогрессии.

Формулы, связывающие измеряемые величины для этих трех прогрессий, имеют вид:

— арифметическая прогрессия: $a = b - q; b, c = b + q, q = 1, 2, 3, \dots$;

— геометрическая прогрессия: $a = b/q; b, c = aq, q = 1.1, 1.2, 1.3, \dots$;

— гармоническая прогрессия: $a = \frac{1}{q-1}; b = \frac{1}{q}; c = \frac{1}{q+1}, q = 2, 3, 4, \dots$

Алгоритм отыскания ИСО в этом случае выглядит так:

1) выбираем формулы одной из трех ранее описанных прогрессий для операции замены переменных;

2) берем тройку из пяти средних (*) (всего возможны десять комбинаций) и вносим в нее для измерений-аргументов $\{a, b, c\}$ принятую на предыдущем шаге замену переменных;

3) из полученной тройки выражений, последовательно исключая аргументы a, q (или b, q , или c, q), получаем соотношение, инвариантное к исключенным аргументам.

Приведем примеры для набора средних (A, G, H) при разной априорной информации.

Пример 1. Пусть априори известно, что измерения $\{a, b, c\}$ образуют арифметическую прогрессию. В этом случае выражения для средних (A, G, H) приобретают вид

$$A = a + q; G^3 = a(a + q)(a + 2q);$$

$$H = \frac{3a(a + q)(a + 2q)}{(a + q)(a + 2q) + a(a + 2q) + a(a + q)}.$$

Исключение переменных a и q из получившейся системы дает ИСО:

$$2HA^3 + HG^3 - 3AG^3 = 0,$$

где A — среднее арифметическое; G — среднее геометрическое; H — среднее гармоническое.

■ Таблица 1. Инвариантные соотношения при заданном a

Тройка средних	Инвариантные соотношения
(A, G, H)	$Ha^3 - 3HAa^2 - HG^3 + 3G^3a = 0$
(A, G, Q)	$-2a^3 + 6Aa^2 - (3Q^2 - 9G^2)a + 2G^3 = 0$
(A, G, C)	$2a^3 - 6Aa^2 + (9A^2 - 3CA)a - 2G^3 = 0$
(A, H, Q)	$2a^3 - 6Aa^2 + (9A^2 - 3Q^2)a - 3HA^2 + HQ^2 = 0$
(A, H, C)	$2a^3 - 6Aa^2 + (9A^2 - 3CA)a - 3HA^2 + HCA = 0$
(A, Q, C)	$Q^2 - CA = 0$
(G, H, Q)	$H^2a^6 - 3H^2Q^2a^4 - 2H^2G^3a^3 + 9G^6a^2 - 6G^6Ha + G^6H^2 = 0$
(G, H, C)	$H^2a^6 - H^2Ca^5 + (-2H^2G^3 - 3G^3HC)a^3 + (CH^2G^3 + 9G^6)a^2 - 6G^6Ha + G^6H^2 = 0$
(G, Q, C)	$2C^2a^3 - 6CQ^2a^2 + (9Q^4 - 3C^2Q^2)a - 2C^2G^3 = 0$
(H, Q, C)	$2C^2a^3 - 6CQ^2a^2 + (9Q^4 - 3C^2Q^2)a + HQ^2C^2 - 3HQ^4 = 0$

■ **Таблица 2.** Инвариантные соотношения, получаемые при образовании тройкой измерений $\{a, b, c\}$ арифметической прогрессии

Тройка средних	Инвариантные соотношения
(A, G, H)	$-2HA^3 - HG^3 + 3AG^3 = 0$
(A, G, Q)	$-3AQ^2 + 5A^3 - 2G^3 = 0$
(A, G, C)	$-3CA^2 + 5A^3 - 2G^3 = 0$
(A, H, Q)	$-3HA^2 + Q^2H - 3AQ^2 + 5A^3 = 0$
(A, H, C)	$-3HA + CH - 3AC + 5A^2 = 0$
(A, Q, C)	$Q^2 - AC = 0$
(G, H, Q)	$50G^9 - 12G^2Q^4G^3 + 4H^3Q^6 - 15HQ^2G^6 - 27H^3G^6 = 0$
(G, H, C)	$50G^6 - 9H^2G^3C - 2H^3C^3 - 12HC^2G^3 - 27H^3G^3 = 0$
(G, Q, C)	$2C^3G^3 + 2Q^4C^2 - 5Q^6 = 0$
(H, Q, C)	$5Q^4 - 3Q^2C^2 - 3Q^2CH + HC^3 = 0$

■ **Таблица 3.** Инвариантные соотношения, получаемые при образовании тройкой измерений $\{a, b, c\}$ геометрической прогрессии

Тройка средних	Инвариантные соотношения
(A, G, H)	$G^2 - HA = 0$
(A, G, Q)	$2AG + Q^2 - 3A^2 = 0$
(A, G, C)	$2G + C - 3A = 0$
(A, H, Q)	$-4A^3H + Q^4 - 6Q^2A^2 + 9A^4 = 0$
(A, H, C)	$-4HA + C^2 + 9A^2 - 6AC = 0$
(A, Q, C)	$Q^2 - CA = 0$
(G, H, Q)	$-Q^2H^2 - 2HG^3 + 3G^4 = 0$
(G, H, C)	$-HC - 2HG + 3G^2 = 0$
(G, Q, C)	$C^2 + 2CG - 3Q^2 = 0$
(H, Q, C)	$4CQ^2H - C^4 + 6C^2Q^2 - 9Q^4 = 0$

■ **Таблица 4.** Инвариантные соотношения, получаемые при образовании тройкой измерений $\{a, b, c\}$ гармонической прогрессии

Тройка средних	Инвариантные соотношения
(A, G, H)	$-H^3 + 3AH^2 - 2G^3 = 0$
(A, G, Q)	$-Q^6 + 9A^2Q^4 - 27A^4Q^2 + 27A^6 + 6G^3Q^2A - 18A^3G^3 + 4G^6 = 0$
(A, G, C)	$4G^6 + 6CA^2G^3 - 18A^3G^3 - C^3A^3 + 9C^2A^4 - 27CA^5 + 27A^6 = 0$
(A, H, Q)	$3A^2 - 3AH - Q^2 + H^2 = 0$
(A, H, C)	$3A^2 - 3AH + H^2 - CA = 0$
(A, Q, C)	$Q^2 - CA = 0$
(G, H, Q)	$4G^6 - 3Q^2H^4 - 2G^3H^3 + H^6 = 0$
(G, H, C)	$4G^6 - (2CH^2 + 2H^3)G^3 + H^6 - CH^5 = 0$
(G, Q, C)	$4C^6G^6 + (6C^5Q^4 - 18C^3Q^6)G^3 + 9C^4Q^8 - 27Q^{10}C^2 + 27Q^{12} - C^6Q^6 = 0$
(H, Q, C)	<p>При замене $q = \frac{\sqrt{(C-H)(2C - \sqrt{C^2 + 6HC - 3H^2})}}{(C-H)H}$</p> $-6C^2Q^2 - 24HCQ^2 + 6Q^2H^2 + 6Q^2C\sqrt{K} + 6Q^2H\sqrt{K} + 8H^2C^2 - 4H^2C\sqrt{K} = 0,$ $K = C^2 + 6HC - 3H^2$

Пример 2. Пусть известно, что измерения $\{a, b, c\}$ являются соседними членами геометрической прогрессии: $b = aq, c = aq^2$. Тогда выражения для средних (A, G, H) имеют вид

$$3A = 2a + aq + q^2; G^3 = a^2q(a + q^2);$$

$$H = \frac{3a^2q(a + q^2)}{a^2q + aq(a + q^2) + a(a + q^2)}.$$

Исключив из получившейся системы переменные a и q , получаем ИСО:

$$G^2 - HA = 0.$$

Пример 3. Аналогичные действия при априорной информации о гармонической прогрессии измерений $\{a, b, c\}$ позволяют из системы

$$3A = a + \frac{1}{r} + \frac{1}{r+1}; G^3 = \frac{a}{r(r+1)};$$

$$H \left(\frac{a}{r} + \frac{1}{r(r+1)} + \frac{a}{r+1} \right) = \frac{3a}{r(r+1)}$$

получить следующее инвариантное соотношение:

$$-H^3 + 3AH^2 - 2G^3 = 0.$$

Проделав подобные выкладки для всех десяти троек средних, получаем результаты, приведенные в табл. 2–4. В них измерения $\{a, b, c\}$ образуют арифметическую, геометрическую и гармоническую прогрессии соответственно.

Обратим внимание, что ИСО для тройки средних A, Q, C во всех случаях совпадают.

Обратная задача

Как было сказано ранее, обратная задача о трех средних от трех измерений $\{a, b, c\}$ состоит в восстановлении самих значений измерений по известным значениям трех из пяти средних (*) и заданному выражению ИСО, связывающему последние.

Аналогично прямой задаче, в обратной тоже можно выделить два случая в зависимости от вида априорной информации. Решения обратной задачи позволяют либо выразить одно среднее через другие по заданному ИСО (первый случай), либо отыскать значения измерений $\{a, b, c\}$ по известным значениям тройки средних (второй случай).

В первом случае обратная задача формулируется таким образом: по известному измерению и известным двум средним найти третье среднее.

Для ее решения воспользуемся ИСО, приведенными в табл. 1. Например, из ИСО $Ha^3 - 3HAa^2 - HG^3 + 3G^3a = 0$ могут быть выве-

дены формулы для расчета среднего арифметического, гармонического, геометрического:

$$A = \frac{Ha^3 - HG^3 + 3aG^3}{3Ha^2}; H = \frac{3aG^3}{3a^2A - a^3 + G^3};$$

$$G = \frac{\left(Ha^2(3A - a)(-H + 3a) \right)^{1/3}}{-H + 3a}.$$

Во втором случае обратная задача формулируется так: по известным значениям двух средних величин от трех измерений $\{a, b, c\}$, образующих некоторую прогрессию, найти сами значения измерений.

Алгоритм восстановления измерений содержит следующие шаги:

1) из пяти средних (*) берем одну пару (всего возможно 10 пар);

2) в выбранной паре средних выполняем замену переменных. Тройку аргументов-измерений $\{a, b, c\}$ преобразуем в соответствии с априори заданной прогрессией; в получаемом выражении присутствуют две переменные: аргумент прогрессии q и аргумент-измерение, например b ;

3) из полученной системы уравнений исключаем одну из переменных (допустим, это q или b);

4) решая образовавшееся уравнение относительно оставшейся в нем переменной, находим ее значение.

Пример 4.

Из набора пар средних: $(A, G), (A, H), (A, Q), (A, C), (G, H), (G, Q), (G, C), (H, Q), (H, C), (Q, C)$ — выбираем первую пару. Выполняем замену в паре согласно априори известной арифметической прогрессии измерений: $A = a + q, G^3 = a(a + q)(a + 2q)$. Выражаем q через a из первого уравнения и, подставив во второе, решаем относительно a полученное уравнение:

$$-G^3 - Aa^2 + 2A^2 = 0.$$

Его решением будет

$$a = A + \frac{\sqrt{-6A^2 + 6CA}}{2}.$$

Найденное значение a позволяет найти q и два остальных измерения b и c :

$$q = A + \frac{\sqrt{-6A^2 + 6CA}}{2},$$

$$b = A, c = A - \frac{\sqrt{-6A^2 + 6CA}}{2}.$$

Поступая аналогично, находим результаты для случаев, когда измерения $\{a, b, c\}$ образуют геометрическую или гармоническую прогрессию. Решение также зависит от того, в каком порядке извлекались переменные-измерения $\{a, b, c\}$

■ **Таблица 5.** Решение обратной задачи для пары средних (A, G), если измерения $\{a, b, c\}$ образуют арифметическую и геометрическую прогрессии

Пара средних	Решение исключением q	Решение исключением a
(A, G) Арифметическая прогрессия	Замена: $q = A - a$ Выражение: $G^3 + Aa^2 - 2A^2$ Решение: $a = A + \sqrt{\frac{A^3 - G^3}{A}}, \quad b = A,$ $c = A - \sqrt{\frac{A^3 - G^3}{A}}, \quad q = -\sqrt{\frac{A^3 - G^3}{A}}$	Замена: $a = A - q$ Выражение: $Aq^2 + G^2 - A^3 = 0$ Решение: $a = A + \sqrt{\frac{A^3 - G^3}{A}}, \quad b = A,$ $c = A - \sqrt{\frac{A^3 - G^3}{A}}, \quad q = -\sqrt{\frac{A^3 - G^3}{A}}$
(A, G) Геометрическая прогрессия	Замена: $q = \frac{G^3 - a^3 + 3Aa^2}{3Aa^2}$ Выражение: $-a^2 + (3A - G)a - G^2$ Решение: $q = \frac{2G}{3A - G - \sqrt{9A^2 - 6GA - 3G^2}},$ $a = \frac{3A - G + \sqrt{9A^2 - 6GA - 3G^2}}{2}, \quad b = G,$ $c = \frac{2G^2}{3A - G - \sqrt{9A^2 - 6GA - 3G^2}}$	Замена: $a = \frac{3A}{1 + q + q^2}$ Выражение: $-Gq^2 + (3A - G)q - G$ Решение: $q = \frac{3A - G + \sqrt{9A^2 - 6GA - 3G^2}}{2G},$ $a = \frac{2G^2}{3A - G + \sqrt{9A^2 - 6GA - 3G^2}}, \quad b = G,$ $c = \frac{3A - G + \sqrt{9A^2 - 6GA - 3G^2}}{2}$

из исходной тройки средних. Часть полученных результатов, учитывающая очередность удаления переменных и вид априорной информации, приведена в табл. 5.

Заключение

В статье рассмотрены задачи поиска инвариантных соотношений между средними и восстановление измерений по известным средним в случае малых выборок.

При решении первой задачи найдены инвариантные соотношения для различных троек средних от трех измерений при наличии и отсутствии априорной информации. При решении второй задачи получены выражения для расчета неизвестных измерений $\{a, b, c\}$ по известным значениям трех средних (обратная задача теории измерений).

Полученные формулы сведены в таблицы. Они могут оказаться полезными в технической диагностике и при обработке результатов косвенных измерений.

Литература

1. Мироновский Л. А., Слаев В. А. Алгоритмы оценивания трех измерений. — СПб.: Профессионал, 2010. — 192 с.
2. Slaev V. A., Chunovkina A. G., Mironovsky L. A. Metrology and Theory of Measurement. — Berlin: De Gruyter, 2013. — 560 p.
3. Мироновский Л. А., Слаев В. А. Оценивание результатов трех измерений по малым выборкам // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 69–78.
4. Джини К. Средние величины. — М.: Статистика, 1970. — 417 с.

5. Мироновский Л. А., Слаев В. А. Инварианты в метрологии и технической диагностике // Измерительная техника. 1996. № 6. С. 3–14.
6. Годин А. М., Русин В. Н., Соколов В. П. Статистические средние и другие величины и их применение в различных отраслях деятельности. — М.: Дашков и Ко, 2006. — 252 с.
7. Барский Б. В., Соколов М. В. Средние величины, инвариантные относительно допустимых преобразований шкалы измерения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 1. С. 59–66.
8. Локоть В. В. Соотношения между средними величинами // Современные проблемы и пути их решения

в науке, транспорте, производстве и образовании: тр. Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 20–27 декабря 2010 г. Одесса, 2010. Т. 8. № 4. С. 27–28.

9. Sandor J. On Certain Conjectures on Classical Means // *Octogon Math. Mag.* 2006. Vol. 14. N 2. P. 643–645.
10. Sandor J., Toader Gh. Some General Means // *Czechoslovak Mathematical Journal.* 1999. Vol. 49. N 1. P. 53–62.

11. Sandor J. A Note on Some Inequalities for Means // *Archiv der Mathematik.* 1991. Vol. 56. N 5. P. 471–473.

12. Sandor J. On Certain Inequalities for Means // *Journal of Mathematical Analysis and Applications.* 1995. Vol. 189. N 2. C. 602–606.

UDC 389

Invariant Relations for Averages in Case of Three Measurements

Khanykov I. G.^a, Magister, igorioniak@mail.ru

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

Purpose: The problem of recovery of measurement values based on implicit data is relevant in technical diagnostics when it is impossible to carry out direct measurement and data control. The following five classic averages – arithmetic, geometrical, harmonious, quadratic and counter-harmonious – are often used in technology, science and life. Invariant relations of these averages found earlier have been received for the case of two measurements. The goal of this paper is to deduce on the invariant relations of the given classical averages for the case of three measurements as well as to solve an inverse problem of searching measurements based on known averages. **Methods:** There have been compiled equation systems; then there has been consecutive exception of unknown variable; consideration of influence of aprioristic information on measurements. **Results:** Invariant relations have been deduced for each three of five classical averages of three measurements. There have been solved the problem of measurements recovery based on known averages. There have also been solved problems of two types of aprioristic information: whether measurements are members of progression or not. The deduced formulae of measurements recovery by averages formulas are represented in tables. **Practical relevance:** The deduced invariant relations connecting each three of five classical averages can be useful in technical diagnostics and at processing results of indirect measurements.

Keywords — Classical Averages, Invariant Relations, Average from Three Measurements, Direct Problem of Averages, Reverse Problem of Averages.

References

1. Mironovsky L. A., Slaev V. A. *Algoritmy otsenivaniia trekh izmerenii* [Algorithms for Evaluating the Results of Three Measurements]. Saint-Petersburg, Professional Publ., 2010. 192 p. (In Russian).
2. Slaev V. A., Chunovkina A. G., Mironovsky L. A. *Metrology and Theory of Measurement.* Berlin, De Gruyter, 2013. 560 p.
3. Mironovsky L. A., Slaev V. A. Evaluation of the Results of Three Measurements on Small Samples. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2011, vol. 50, no. 1, pp. 69–78 (In Russian).
4. Gini C. *Srednie velichiny* [Average Means]. Moscow, Statistika Publ., 1970. 417 p. (In Russian).
5. Mironovsky L. A., Slaev V. A. Invariants in Metrology and Technical Diagnostics. *Izmeritel'naia tekhnika*, 1996, no. 6, pp. 3–14 (In Russian).
6. Godin A. M., Rusin V. N., Sokolov V. P. *Statisticheskie srednie i drugie velichiny i ikh primenenie v razlichnykh otrasliakh deiatel'nosti* [Statistical Averages and Other Means and their Application in Various Branches of Activity]. Moscow, Dashkov i Ko Publ., 2006. 252 p. (In Russian).
7. Barskii B. V., Sokolov M. V. Averages Average Means, Invariant Concerning to an Admissible Scale of Measurement Transformations. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2006, vol. 72, no. 1, pp. 59–66 (In Russian).
8. Lokot' V. V. Relations Between Average Means. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennye problemy i puti ikh reshenia v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii"* [Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. "Contemporary Issues and Ways of their Decision in a Science, Transport, Manufacture and Education"]. Odessa, 2010, pp. 27–28 (In Russian).
9. Sandor J. On Certain Conjectures on Classical Means. *Octogon Mathematical Magazin*, 2006, vol. 14, no. 2, pp. 643–645.
10. Sandor J., Toader Gh. Some General Means. *Czechoslovak Mathematical Journal*, 1999, vol. 49, no. 1, pp. 53–62.
11. Sandor J. A Note on Some Inequalities for Means. *Archiv der Mathematik*, 1991, vol. 56, no. 5, pp. 471–473.
12. Sandor J. On Certain Inequalities for Means. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 1995, vol. 189, no. 2, pp. 602–606.

УДК 004.02:378.146

РЕАЛИЗАЦИЯ ОДНОГО АЛГОРИТМА УСЛОВНОГО ПОИСКА ЭЛЕМЕНТОВ КОМПЕТЕНЦИЙ С НЕДОСТАТОЧНЫМ УРОВНЕМ ОСВОЕНИЯ

В. И. Фрейман^а, канд. техн. наук, доцент

^аПермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, РФ

Цель: разработка и реализация информационного и методического обеспечения автоматизированной системы проведения учебного процесса, в частности одного алгоритма условного поиска недостаточно освоенных элементов компетенций при контроле качества обучения по компетентностно-ориентированным образовательным программам. **Методы:** использованы некоторые положения аппарата и процедуры технической диагностики, такие как безусловные и условные алгоритмы поиска и обнаружения дефектов, адаптированные к области контроля результатов обучения, заданных в компетентностном формате. **Результаты:** показаны возможности, условия и ограничения применения безусловных и условных алгоритмов для обнаружения и поиска элементов дисциплинарных компетенций с недостаточным уровнем освоения, которые могут быть использованы преподавателем для текущих и итоговой проверок, а студентом — для самоконтроля. Предложен алгоритм условной процедуры поиска и определения уровня освоения элементов, построенный на основе дихотомии, который позволяет осуществить пошаговый поиск недостаточно освоенных элементов среди полного множества контролируемых элементов. Показано, что при помощи аддитивного интегро-дифференциального критерия оценки уровня освоения элементов дисциплинарных компетенций можно организовать условные переходы к следующим шагам диагностирования и, в частном случае, уменьшить размерность необходимой тестовой последовательности, количество шагов и трудоемкость проверки. Предложен и проиллюстрирован на примере способ расчета весовых коэффициентов, который обеспечивает заданную точность (глубину локализации) процедуры поиска. Разработана программа имитационного моделирования в среде Visual Basic for Application, интегрированной в пакет Microsoft Excel, результаты работы которой подтвердили корректность предлагаемого алгоритма. **Практическая значимость:** результаты работы применяются в составе информационного, алгоритмического и программного обеспечения разрабатываемой автоматизированной системы сопровождения учебного процесса, которая позволит повысить эффективность управления и контроля качества обучения.

Ключевые слова — тесты обнаружения и поиска неисправностей, безусловные и условные процедуры поиска, дихотомия, интегро-дифференциальный критерий оценки, весовые коэффициенты.

Введение

Управление и контроль качества реализации учебного процесса всегда являются актуальными задачами высшего профессионального образования (ВПО). Повышенное внимание указанным проблемам стало уделяться при внедрении компетентностно-ориентированных основных образовательных программ подготовки бакалавров, специалистов и магистров. Программы построены в соответствии с требованиями внедренных с 2011 г. федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования третьего поколения. Они формулируют результаты подготовки в виде набора общекультурных и профессиональных *компетенций*, которыми должен овладеть выпускник для успешной профессиональной деятельности [1].

Анализ научно-методических публикаций, посвященных решению проблем контроля уровня освоения компетенций как основного результата образовательной деятельности вузов (например, работы Пахаренко Н. В., Зольниковой И. Н., Князевой М. Д., Трапезникова С. Н., Трапезникова А. С., Стась Н. Ф., Ширшова Е. В., Ефремовой Н. Г., Попова Г. В., Лыгиной Л. В., Ватутиной М. Н.), показал недостаточность общих подходов и конструктивных решений указанной

комплексной задачи. В частности, на наш взгляд, не хватает конкретных механизмов и методов оценки уровня освоения компетенций и их составляющих — *дисциплинарных компетенций* — частей компетенции, формируемых учебными дисциплинами или разделами основных образовательных программ (практиками, научно-исследовательскими работами и т. п.). Дисциплинарная компетенция, в свою очередь, состоит из *компонентов*: «знания», «умения», «владения» — каждая составляющая которых представляет собой *элемент дисциплинарной компетенции* (ЭДК). По нашему мнению, ЭДК являются элементарными объектами формирования и контроля в соответствии с принятым в федеральных образовательных стандартах компетентностным подходом к образованию [2, 3].

Проблема разработки методик создания контрольно-измерительных материалов для контроля и оценки уровня освоения компетенций и их составляющих является для системы ВПО России недостаточно исследованной и формализованной, а потому актуальной [4]. Привлечение опыта ведущих вузов зарубежных стран, в первую очередь Европы и США, не дает полного решения указанной проблемы вследствие существенных отличий (реальных, а не формальных) у систем образования. К тому же информация, относящаяся

к данной проблематике, а также механизмы реализации методик в рамках учебного процесса не всегда доступны или имеют обобщенный иллюстративный характер. Поэтому поставленные вопросы система ВПО России должна решать самостоятельно. Также важно при решении указанных проблем учитывать заданные квалификационные требования работодателей и вектор развития соответствующего направления науки и техники [2].

Для количественной оценки результатов контроля уровня освоения компонентов и элементов современной системы обучения предлагается применить интегро-дифференциальный критерий (ИДК) оценки [5], который представляет собой многоуровневую систему линейных сверток. По ним определяется количественная оценка, интегрирующая частные количественные оценки предыдущих уровней. В качестве уровней в указанном выше многоуровневом подходе к вычислению ИДК предлагается рассматривать (в порядке уменьшения объекта контроля) компетенции, дисциплинарные компетенции, компоненты дисциплинарных компетенций, элементы компонентов дисциплинарных компетенций, тесты знаний, умений, владений.

На сегодняшний день одним из актуальных вопросов является разработка методологической основы контроля и оценивания результатов освоения ООП с применением системного подхода и соответствующего математического и алгоритмического аппарата. В поиске ответа на него существенную помощь, по нашему мнению, может оказать применение хорошо проработанного и апробированного аппарата технической диагностики [6, 7] с адаптацией его к рассматриваемым объектам исследования (компетенциям и их составляющим) и предметам исследования (алгоритмам контроля, поиска и оценивания).

Проблема оценки результатов обучения в компетентностном формате является комплексной. Для ее решения необходимо:

- 1) построить (синтезировать) проверяющие (обнаружения) либо локализирующие (поиска) тесты;
- 2) разработать алгоритмы поиска ЭДК с недостаточным уровнем освоения;
- 3) провести диагностический эксперимент (тестирование);
- 4) получить и представить в заданном формате результаты проверки или поиска;
- 5) дешифровать результаты с использованием выбранных критериев и шкал оценивания;
- 6) определить уровень освоения оцениваемых ЭДК путем сравнения с заданными пороговыми значениями;
- 7) локализовать с требуемой глубиной и точностью недостаточно освоенные объекты контроля;
- 8) выработать список корректирующих мероприятий (при необходимости);

9) определить интегральные и дифференциальные оценки каждого уровня для общей оценки уровня подготовки выпускника.

В работах [2–5, 8–11] были предложены конструктивные методы и алгоритмы формирования и контроля уровня освоения элементов дисциплинарных компетенций с использованием предложенного ИДК оценки. В настоящее время разрабатываются и исследуются алгоритмы реализации и дешифрации результатов обнаружения и поиска (безусловные и условные) ЭДК с недостаточным уровнем освоения. Для решения указанной задачи предлагается использовать методы и подходы технической диагностики, в частности тестовое диагностирование, с учетом специфики учебного процесса.

Целью данной статьи является исследование вопросов реализации алгоритма условного поиска недостаточно освоенных ЭДК с использованием аппарата и методов технической диагностики, адаптированных к рассматриваемой предметной области.

Классификация и основные свойства алгоритмов обнаружения и поиска недостаточно освоенных ЭДК

В соответствии с положениями технической диагностики по организации и проведению тестового диагностирования можно ввести понятия «тест обнаружения» и «тест поиска» элементов с дефектом, в данном случае — недостаточно освоенных элементов дисциплинарных компетенций (далее — нЭДК) [6]. Допускается произвольная кратность нЭДК.

Тесты обнаружения дают обобщенные результаты, показывающие наличие хотя бы одного нЭДК, без конкретизации, среди полного множества контролируемых ими ЭДК, т. е. носят индицирующий характер. Поэтому тесты обнаружения эффективны при реализации мероприятий контроля (аттестаций, допуска к определенному виду занятий и т. д.), а также для контроля однотипных ЭДК (например, принадлежащих одному компоненту — «знать», «уметь» или «владеть»).

Тесты поиска позволяют выявить конкретный ЭДК с недостаточным (относительно заданного порогового значения) уровнем освоения из полного множества контролируемых ЭДК. Тесты поиска должны удовлетворять требованиям точности или глубины локализации и предназначены для получения детальной информации относительно подмножества подозреваемых ЭДК.

При реализации тестового диагностирования применяют *безусловные* или *условные* алгоритмы обнаружения и поиска [7, 11]. Их названия определяются по наличию или отсутствию зависимости перехода к следующему шагу (этапу)

диагностирования от результатов предшествующего шага (этапа).

При *процедуре обнаружения* диагностический эксперимент проводится, как правило, до первого отрицательного результата. Общий результат теста не детализируется (дешифрируется) на результаты отдельно по каждому контролируруемому ЭДК, т. е. не позволяет выявить отдельный нЭДК, поэтому при отрицательном результате необходима дальнейшая реализация алгоритмов поиска.

При *безусловной процедуре поиска* проводится детализация (дешифрация) результатов освоения по каждому элементу, что требует соблюдения определенных правил построения сложных (составных) тестов либо сложных алгоритмов дешифрации. *Шаг диагностирования* определяется временными (например, графиком учебного процесса) и пространственными (количеством и видами средств контроля) характеристиками. Количество шагов может быть переменным и во времени, и в пространстве. На каждом шаге можно рассчитать текущую (промежуточную) оценку уровня освоения ЭДК по оценкам уже выполненных тестовых заданий либо выполнить прогнозирование, задав определенные значения (или интервалы) оценкам еще не выполненных тестов. Это позволяет оценить текущий уровень освоения и в случае необходимости выработать список корректирующих мероприятий, чтобы улучшить результат [8].

Условная процедура поиска подразумевает зависимость количества и подмножества тестов, подаваемых на текущем шаге диагностирования, от результатов тестов предыдущего шага (или шагов) диагностирования. Количество шагов и условия перехода для каждого шага (этапа) диагностирования определяются выбранным алгоритмом поиска.

Для равнозначных (равновероятных с точки зрения сложности и трудоемкости освоения)

ЭДК (\mathcal{E}_j) наиболее простым для реализации условным алгоритмом поиска является *дихотомия* («деления надвое», «метод средней точки»). При этой условной процедуре на очередном шаге проверки подмножество контролируемых каждым тестом ЭДК по возможности разбивается на две примерно одинаковые части. Все тестовые наборы соответствующего шага равнозначны и проверяют примерно одинаковое количество ЭДК (таблица).

Количество шагов тестирования определяется как $\lceil \log_2 h \rceil$ (h — общее количество контролируемых ЭДК; $\lceil \cdot \rceil$ — операция округления в большую сторону). На каждом шаге (кроме последнего — для $h \neq 2^i$, где i — целое положительное число) количество диагностических тестов удваивается. На последних шагах подаются тесты, контролирующие только один ЭДК в подозреваемом подмножестве, поскольку проводится локализация недостаточно освоенных ЭДК с заданной точностью. Решение для ЭДК может приниматься по двоичной шкале («освоен/не освоен») или по выбранной k -ичной шкале на основании дешифрации результатов реализации тестов поиска. При этом количество шагов, а также реализуемых на каждом из них диагностических тестов может быть уменьшено за счет применения предлагаемых ниже алгоритмов обработки и дешифрации. Оценка уровня освоения осуществляется в соответствии с предлагаемым ИДК.

Вследствие линейного (аддитивного) формата ИДК возможно возникновение явления *компенсации*, заключающееся в том, что при суммировании высокие оценки компенсируют низкие и наоборот. Таким образом, можно сделать вывод, что в результате реализации теста фиксируются три события:

- все контролируемые тестом элементы освоены (S^1);
- ни один из контролируемых тестом элементов не освоен (S^0);

■ Распределение тестов по шагам диагностирования

	T ₀	T _{1.1}	T _{1.2}	T _{2.1}	T _{2.2}	T _{2.3}	T _{2.4}	T _{3.1}	T _{3.2}	T _{3.3}	T _{3.4}	T _{3.5}	T _{3.6}	T _{3.7}	T _{3.8}	T _{4.1}	T _{4.2}
\mathcal{E}_1	*	*		*				*								*	
\mathcal{E}_2	*	*		*				*									*
\mathcal{E}_3	*	*		*					*								
\mathcal{E}_4	*	*			*					*							
\mathcal{E}_5	*	*			*						*						
\mathcal{E}_6	*		*			*						*					
\mathcal{E}_7	*		*			*							*				
\mathcal{E}_8	*		*				*							*			
\mathcal{E}_9	*		*				*								*		
	Шаг 1			Шаг 2				Шаг 3					Шаг 4				

— результат нуждается в уточнении тестами следующих шагов (S^*).

Для каждого шага диагностирования результаты всех тестов проверяются на выполнение указанных условий. Если выполнены условия точного принятия решения (S^1 или S^0), то процедура поиска для всех контролируемых тестом элементов прекращается, рассчитывается ИДК и фиксируется уровень освоения по двоичной шкале («освоен/не освоен»). Если результат нуждается в уточнении, то проводятся тесты следующего шага диагностирования для контролируемых тестом элементов. Далее в статье будет приведен алгоритм поиска нЭДК и его реализация в среде имитационного моделирования.

Применение ИДК для оценки результатов условной процедуры поиска нЭДК, построенной на базе дихотомии

В работе [5] были исследованы проблемы составления и применения ИДК оценки уровня освоения компонентов и элементов компетенций. Оценка степени освоения каждого ЭДК (по двухуровневой или многоуровневой шкале) определяется с использованием многоуровневого ИДК. Он вычисляется по результатам тестов, проверяющих в том числе и данный ЭДК на протяжении всех шагов диагностирования:

$$O_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} \lambda_{i,j} R_{i,j} v_{i,j}^{(k)}, \quad (1)$$

где O_k — уровень освоения элемента \mathcal{E}_k , нормализованный в диапазоне [0; 1]; N — количество шагов тестирования; N_j — количество тестов на i -м шаге тестирования; $R_{i,j}$ — результат реализации теста $T_{i,j}$ (i — номер шага тестирования, j — номер теста на i -м шаге тестирования); $\lambda_{i,j}$ — весовой коэффициент результата теста $T_{i,j}$; $v_{i,j}^{(k)}$ — коэффициент покрытия, принимающий следующие значения: 1, если элемент \mathcal{E}_k контролируется тестом $T_{i,j}$; 0, если \mathcal{E}_k не контролируется тестом $T_{i,j}$. Для весовых коэффициентов выполня-

ется условие нормирования $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} \lambda_{i,j} v_{i,j}^{(k)} = 1$.

Определение для каждого теста проверяемых им элементов осуществляется на этапе проектирования рабочей программы дисциплины и реализуется в таблице соответствия ЭДК и диагностических тестов [5]. В этой же работе [5] предложена методика определения весовых коэффициентов по заданной таблице соответствия, которая составлена из тестов обнаружения (без дешифрации результатов по каждому контролируемому тестом ЭДК, только с анализом общего результата теста).

При определении весовых коэффициентов необходимо учесть тот факт, что результат теста не дешифрируется на составляющие, соответствующие каждому из контролируемых тестом элементов. Поэтому весовые коэффициенты дифференциальных оценок в составе ИДК (результатов тестов обнаружения и/или поиска, контролирующих данный ЭДК) предлагается определять в обратно пропорциональной зависимости от общего количества ЭДК ($N_{i,j}$), контролируемых тестом $T_{i,j}$. Это предложение основывается на утверждении, что чем меньше ЭДК контролирует тест, тем больше глубина (точность) локализации, т. е. выше вероятность обнаружения элементов с недостаточным уровнем освоения (доказательство данного утверждения в работе не приводится). Следовательно, максимальный весовой коэффициент имеет тест, контролирующий только один элемент, и при его построении необходимо учитывать ограничения и рекомендации, изложенные в работах [9, 10].

В соответствии с приведенным утверждением предлагается определять весовые коэффициенты результатов тестов при составлении ИДК оценки каждого ЭДК следующим образом:

$$\lambda_{i,j} = \frac{1}{N_{i,j} \sum_{l=1}^N \sum_{l=1}^{N_l} \left(\frac{1}{N_{i,j}} \right)^{v_{i,j}^{(k)}}}. \quad (2)$$

Пример 1. Построим ИДК для элемента \mathcal{E}_2 (см. таблицу). Для этого выпишем значения коэффициентов покрытия с учетом того, что элемент \mathcal{E}_2 контролируется тестами поиска $T_{1,1}$, $T_{2,1}$, $T_{3,1}$ и $T_{4,2}$: $v_{1,1}^{(2)} = v_{2,1}^{(2)} = v_{3,1}^{(2)} = v_{4,2}^{(2)} = 1$. В соответствии с (1) построим ИДК оценки уровня освоения элемента \mathcal{E}_2 :

$$O_2 = \lambda_{1,1} R_{1,1} + \lambda_{2,1} R_{2,1} + \lambda_{3,1} R_{3,1} + \lambda_{4,2} R_{4,2}.$$

Согласно (2), определим весовые коэффициенты результатов тестов, контролирующих элемент \mathcal{E}_2 :

$$\lambda_{1,1} = 1/(N_{1,1}(1/N_{1,1} + 1/N_{2,1} + 1/N_{3,1} + 1/N_{4,2})) = 1/(5(1/5 + 1/3 + 1/2 + 1)) = 0,098;$$

$$\lambda_{2,1} = 1/(N_{2,1}(1/N_{1,1} + 1/N_{2,1} + 1/N_{3,1} + 1/N_{4,2})) = 1/(3(1/5 + 1/3 + 1/2 + 1)) = 0,164;$$

$$\lambda_{3,1} = 1/(N_{3,1}(1/N_{1,1} + 1/N_{2,1} + 1/N_{3,1} + 1/N_{4,2})) = 1/(2(1/5 + 1/3 + 1/2 + 1)) = 0,246;$$

$$\lambda_{4,2} = 1/(N_{4,2}(1/N_{1,1} + 1/N_{2,1} + 1/N_{3,1} + 1/N_{4,2})) = 1/(1(1/5 + 1/3 + 1/2 + 1)) = 0,492.$$

Условие нормирования весовых коэффициентов выполняется — сумма равна 1.

Очевидно, что расчет ИДК по общим результатам тестов, а не по результатам дешифрации относительно каждого контролируемого элемента,

приводит к снижению точности вычислений. При использовании двоичной шкалы оценивания и предлагаемого подхода к определению весовых коэффициентов, как будет показано ниже, требуемая точность гарантированно будет обеспечена. Однако при переходе от двухуровневой к многоуровневым шкалам (например, традиционной четырехуровневой «5-4-3-2») вследствие возникновения *компенсации* заданная точность определения оценки не может быть обеспечена, что потребует применения сложных процедур дешифрации. Далее в настоящей работе ограничимся двухуровневой шкалой оценивания.

Разработка алгоритма условного поиска нЭДК для способа тестирования на основе принципа дихотомии

Перед разработкой алгоритмов поиска нЭДК необходимо отметить следующие условия.

1. Для разработки и реализации алгоритмов диагностирования может потребоваться пересмотр и изменение компонентной структуры дисциплинарных компетенций (увеличение или уменьшение их количества, коррекция формулировок и т. д.). При этом реализуется *контролепригодная* структура, которая удобна для диагностирования и при необходимости трансформируется в исходный вариант.

2. Необходимо совместное (взаимоувязанное, итеративное) построение диагностических тестов (выбор формата таблицы соответствия, конструирование составных и смешанных тестов с заданной покрывающей способностью и т. д.) и контролепригодного объекта диагностирования с требуемым содержанием и структурой компонентов и ЭДК.

Выполнение вышеуказанных требований позволяет разработать и реализовать процедуры и алгоритмы диагностирования.

В данном разделе предлагается алгоритм условного поиска нЭДК для способа тестирования, построенного по принципу дихотомии (рис. 1). Исходными данными является общее количество равнозначных (равновероятных) ЭДК — h . Для них определяется количество шагов тестирования $N_T = \lceil \log_2 h \rceil$. Условия, по которым принимается решение о принадлежности результата к одному из вариантов (S^1 , S^0 или S^*), в настоящей статье не рассматриваются.

Для каждого шага в соответствии с принципом дихотомии определяется необходимое количество тестов, причем количество тестов увеличивается, а количество контролируемых элементов — уменьшается, примерно в 2 раза.

Реализация тестового диагностирования производится в соответствии с условной процедурой

поиска. Сначала реализуются тесты первого шага. В случае если результат теста принадлежит либо диапазону S^0 , либо диапазону S^1 (которые определяются для каждого теста, поскольку зависят от количества контролируемых ими элементов), то имеются условия для уверенного принятия решения. Если результат требует уточнения, то реализуются тесты второго шага и т. д. После реализации всех необходимых тестов проводится расчет уровня освоения каждого из h ЭДК и оценивание его по двухуровневой шкале.

Применение предлагаемого алгоритма позволяет сократить количество шагов, а соответственно, и реализуемых тестов поиска. С точки зрения уменьшения реализуемой длины тестовой последовательности эффективность алгоритма может быть оценена коэффициентом эффективности

$$K_э = (N_T - N_d) / N_d \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где N_T — количество тестов, реализуемых в случае применения предлагаемого алгоритма; N_d — подготовленное количество тестов при дихотомии. Очевидно, коэффициент эффективности зависит от распределения конкретных значений оценок каждого элемента (чем меньше разброс оценок элементов, тем больше коэффициент) и имеет случайный характер. Максимальное значение коэффициента эффективности соответствует минимальному количеству шагов, равному 1. Такая ситуация возможна в случаях, когда все элементы имеют или почти максимальный уровень (близкий к 1), или почти минимальный уровень (близкий к 0) освоения, и решение принимается без необходимости дальнейшего поиска (на ранних шагах диагностирования).

В общей оценке параметров предлагаемого алгоритма поиска нЭДК разработана программа имитационного моделирования. Она позволяет для случайно заданных исходных данных (уровня освоения каждого ЭДК) промоделировать работу алгоритма дихотомии и определить количество шагов диагностирования, необходимых для реализации тестов поиска, а также коэффициент эффективности.

Исследование свойств предложенного алгоритма условного поиска нЭДК с помощью программы имитационного моделирования

Для исследования возможностей алгоритма эффективно использовать моделирование. Оно позволяет выполнить имитацию исходных данных (например, уровня освоения ЭДК), выполнить расчет по заданному алгоритму и проанализировать полученные результаты. Поэтому была разработана программа имитационного модели-



■ Рис. 1. Схема алгоритма поиска

рования в среде Visual Basic for Application, интегрированной в пакет Microsoft Excel. Исходные данные для моделирования:

- заданное общее количество контролируемых элементов h ;
- случайно выбранные значения уровня освоения для каждого элемента в диапазоне от 0 до 1;
- линейный формат ИДК;
- глубина локализации диагностирования до каждого ЭДК;
- произвольная кратность (количество) нЭДК;

— пороговое значение для принятия решения о том, освоен элемент или нет.

Применение разработанной программы моделирования условного алгоритма поиска нЭДК с применением аддитивного ИДК оценки уровня освоения позволило решить следующие задачи:

- 1) построить в соответствии с принципом дихотомии таблицу соответствия ЭДК и контролируемых их тестов $T_{i,j}$;
- 2) рассчитать в соответствии с ИДК значения результатов тестов;

3) реализовать предложенный алгоритм условного поиска — дихотомию;

4) рассчитать весовые коэффициенты дифференциальных оценок (результатов тестов поиска) для определения освоения ЭДК в соответствии с ИДК;

5) определить уровень освоения ЭДК с использованием результатов тестов, без детализации результатов каждого теста по контролируемым им ЭДК.

Результаты работы программы моделирования представлены на рис. 2. Таблица соответствия строится в предположении, что результат теста определяется как линейный ИДК уровня освоения контролируемых им равнозначных (равновероятных) ЭДК, каждый из которых имеет уровень освоения в диапазоне [0; 1]. Значения уровней каждого ЭДК задаются случайным образом (столбец «То» — тест обнаружения, контролирующей все элементы). Далее по принципу дихотомии строятся все тесты поиска $T_{i,j}$. Заданные случайным образом значения уровня освоения каждого элемента переписываются в соответствующие ячейки контролирующих их тестов, но учитываются только при сравнении с рассчитанным по ИДК результатом (столбец «IDC»).

Вычисление результата после выполнения всех шагов тестирования осуществляется с использованием предложенного ИДК [5] — весовой коэффициент теста определяется количеством контролируемых им элементов по вышеизложенной методике. Если на определенном шаге

результаты теста не требуют дальнейшего уточнения, т. е. выполняются условия точного определения (например, результат подачи теста Т2.3, отмеченный символом «0», соответствующий состоянию S^0 , показывает, что ни один из контролируемых тестом элементов точно не освоен), то далее дихотомия для проверки контролируемых им элементов (Э6, Э7 и Э8) не производится (тесты Т3.5 (контроль Э6 и Э7), Т.3.6 (контроль Э8), Т4.3 (контроль Э6) и Т4.4 (контроль Э7) не подаются). После реализации всех шагов диагностирования по каждому ЭДК определяется уровень освоения по двоичной шкале (0/1, столбец «IDC», дополнительно иллюстрированный цветом: красный — элемент не освоен, зеленый — элемент освоен).

Пример 2. Приведем пример расчета уровня освоения элемента Э2 с использованием весовых коэффициентов, определенных в примере 1, а результаты тестов взяв из строки «Ri.j» в таблице соответствия (см. рис. 2):

$$O_2 = \lambda_{1.1}R_{1.1} + \lambda_{2.1}R_{2.1} + \lambda_{3.1}R_{3.1} + \lambda_{4.2}R_{4.2} = 0,098 \cdot 0,55 + 0,164 \cdot 0,63 + 0,246 \cdot 0,48 + 0,492 \cdot 0,43 = 0,49.$$

В исходных данных в столбце «То» случайным образом было задано значение уровня освоения элемента Э2, равное 0,43. В результате расчета ИДК получено значение уровня освоения 0,49. И по заданному, и по полученному результатам можно сделать вывод, что оба они индицируют

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1		То	T1.1	T1.2	T2.1	T2.2	T2.3	T2.4	T3.1	T3.2	T3.3	T3.4	T3.5	T3.6	T3.7	T3.8	T4.1	T4.2	T4.3	T4.4	IDC	
2	31	0,53	0,53		0,53				0,53								0,53				0,54	
3	32	0,43	0,43		0,43				0,43									0,43			0,49	
4	33	0,92	0,92		0,92					0,92											0,81	
5	34	0,85	0,85			0,85					0,85										0,69	
6	35	0,02	0,02			0,02							0,02								0,21	
7	36	0,02		0,02			0,02														0,23	
8	37	0,17		0,17			0,17														0,23	
9	38	0,23		0,23			0,23														0,23	
10	39	0,7		0,7				0,7							0,7						0,67	
11	310	0,78		0,78				0,78							0,78						0,72	
12	Ri,j	0,46	0,55	0,38	0,63	0,44	0,14	0,74	0,48	0,92	0,85	0,02			0,7	0,78	0,53	0,43			0,48	
13		*	*	*	*	*	0	*	*	1	1	0			1	1	1	0				
14			Шаг 1		Шаг 2				Шаг 3				Шаг 4									
15	N_T	19																				
16	R_T	15																				
17	K%	21																				

■ Рис. 2. Экранная форма программы моделирования

недостаточный уровень освоения (ниже заданного порогового значения 0,5).

Из сравнительного анализа столбцов «То» (исходные данные) и столбца «IDC» (результаты тестирования) можно сделать вывод, что тесты поиска позволили правильно определить уровень освоения всех элементов. Абсолютные значения результатов вычисления ИДК не анализируются, поскольку решается задача поиска ЭДК с недостаточным уровнем освоения. Для точного вычисления необходима дешифрация результатов тестов по каждому элементу.

В общем случае уровень освоения можно выявить на тестах, контролируемых только один ЭДК. Однако с достаточной вероятностью может встретиться такое распределение ЭДК, что количество тестов может быть уменьшено. Например, на рис. 2 из заранее рассчитанных и подготовленных 19 тестов было реализовано 15, что привело к уменьшению фактического количества реализованных тестов в соответствии с формулой (3) на 21 %, а это значит, что уменьшились и ресурсы (временные, технические и т. п.), требуемые для реализации процедуры поиска нЭДК произвольной кратности.

Тест каждого шага позволяет с большей глубиной и уровнем детализации выявить уровень освоения контролируемых им элементов. Естественно, это требует усложнения процедуры формирования тестов, поэтому выявление уровня освоения ЭДК на ранних этапах диагностирования существенно повышает эффективность и снижает ресурсоемкость процедуры контроля.

Необходимо отметить, что предлагаемый алгоритм больше подходит для тестов знаний, поскольку тесты каждого уровня можно формировать из общей структурированной базы данных. Тест обнаружения, который контролирует, например, все ЭДК одного типа, может содержать по несколько вопросов общего характера (определения, терминология и т. п.). По отрицательному результату очевидно, что дальнейшее тестирование не имеет смысла, поскольку проверяемый не знает основ контролируемой тематики. Применение указанного подхода позволяет по-

строить тесты с максимальной эффективностью и экономичностью.

Тесты умений и владений, как правило, являются сложными и требуют детализированной дешифрации результатов по каждому ЭДК в рамках каждого реализованного теста. Поэтому необходимо адаптировать предлагаемые алгоритмы поиска к контролю ЭДК разного вида.

Разработанные процедуры и алгоритмы диагностирования, а также программа имитационного моделирования будут включены в состав методического, информационного, алгоритмического и программного обеспечения автоматизированной информационной системы, которая проектируется в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Заключение

В настоящей статье представлены следующие основные результаты.

1. Дана классификация и проведен анализ свойств безусловных и условных алгоритмов обнаружения и поиска нЭДК.

2. Предложена методика построения аддитивного ИДК оценки уровня освоения ЭДК с учетом особенностей применяемой условной процедуры поиска.

3. Разработана методика определения весовых коэффициентов дифференциальных оценок (результатов тестов поиска при анализируемой условной процедуре диагностирования) в составе интегральной оценки (уровня освоения ЭДК), приведен пример расчета.

4. Предложен алгоритм реализации условной процедуры поиска и определения уровня освоения ЭДК, построенный на основе дихотомии, который позволяет найти недостаточно освоенные ЭДК среди полного множества контролируемых элементов.

5. Приведены результаты имитационного моделирования предлагаемого алгоритма в среде Visual Basic for Application, интегрированной в пакет Microsoft Excel, что позволило подтвердить правильность работы алгоритма и корректность результатов моделирования.

Литература

1. Основные тенденции развития высшего образования: глобальные и Болонские измерения / под науч. ред. д-ра пед. наук, профессора В. И. Байденко. — М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2010. — 352 с.
2. Кон Е. Л. и др. К вопросу о подготовке и оценке компетенций выпускников высшей школы с использованием модулей «Вектор развития направления» и «Квалификационные требования работо-

дателей» // Открытое образование. 2012. № 3. С. 17–29.

3. Кон Е. Л., Фрейман В. И., Южаков А. А., Кон Е. М. Подход к формированию компонентной структуры компетенций // Высшее образование в России. 2013. № 7. С. 37–41.

4. Кон Е. Л., Фрейман В. И., Южаков А. А. Практический подход к формированию компетентностной модели выпускника технического университета // Университетское управление: практика и анализ. 2013. № 2(84). С. 52–58.

5. Кон Е. Л., Фрейман В. И., Южаков А. А. Применение интегро-дифференциального критерия оценки освоения компонентов компетенций // Образование и наука. 2013. № 6. С. 47–63.
6. Фрейман В. И. Разработка и исследование методов синтеза импульсных тестов для автоматизации проверки КМОП СБИС на этапах изготовления и эксплуатации телекоммуникационного оборудования: дис. ... канд. техн. наук / ПГТУ. — Пермь, 2000. —114 с.
7. Кон Е. Л., Фрейман В. И. Подходы к тестовому диагностированию цифровых устройств // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. Пермь, 2012. № 4. С. 231–241.
8. Кон Е. Л., Фрейман В. И., Южаков А. А. Оценка качества формирования компетенций студентов технических вузов при двухуровневой системе обучения // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2012: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 2–12 октября 2012 г. Одесса: Куприяненко Сергей Васильевич, 2012. Т. 9. С. 39–41.
9. Кон Е. Л., Фрейман В. И., Южаков А. А. К вопросу о контроле элементов дисциплинарных компетенций в рамках основной образовательной программы (на примере технических направлений подготовки) // Открытое образование. 2013. № 3. С. 12–19.
10. Кон Е. Л., Фрейман В. И., Южаков А. А., Кон Е. М. К вопросу о формировании компетенций при разработке основной образовательной программы // Открытое образование. 2013. № 2. С. 4–10.
11. Кон Е. Л., Фрейман В. И., Южаков А. А. Реализация алгоритмов дешифрации результатов безусловного и условного поиска при проверке уровня освоения элементов дисциплинарных компетенций // Образование и наука. 2013. № 10. С. 17–36.

UDC 004.02:378.146

An Algorithm of Conditional Search of Competence Elements with Insufficient Level of Development

Freyman V. I.^a, PhD, Tech., Associate Professor, vfrey@mail.ru^aPerm National Research Technical University, 29, Komsomol'skii St., 614990, Perm, Russian Federation

Purpose: Creation and implementation of an automated system of information and methodical support for the educational process, in particular, an algorithm of conditional search of competence elements with insufficient level of development for quality control of education according to competence-oriented educational programs. **Methods:** There have been used some machine states and technical diagnostics procedures, namely: unconditional and conditional algorithms of defects search and detection adapted for control of training results set in the competence-based format. **Results:** There have been shown opportunities, conditions and restrictions of applying unconditional and conditional algorithms for detection and search of disciplinary competences elements with insufficient level of development which can be used by a teacher for current and final assessment and by a student — for self-checking. There has been proposed an algorithm of search and definition of a conditional procedure of elements development level constructed on the basis “dichotomy”, it allows to carry out step-by-step search of elements of insufficient development among a full set of controlled elements. It has been shown that by means of additive integral-differential criterion of disciplinary competences elements development level assessment one can organize conditional transitions to the following steps of diagnostics and, in particular, reduce a dimension of the required test sequence, an amount of steps and labor input of the assessment. There has been proposed and demonstrated a method of calculation of weight coefficients which ensures the set accuracy (localization depth) of search procedures. There has been developed the software of imitative modeling in the environment of Visual Basic for Application integrated into a Microsoft Excel package which operational results have confirmed correctness of proposed algorithm. **Practical relevance:** The research results have been applied as a part of information, algorithmic support and software of the developed automated system of support of the educational process which allows enhancing management efficiency and training quality control.

Keywords — Tests for Fault Search and Detection, Unconditional and Conditional Search Procedures, Dichotomy, Integral-Differential Assessment Criterion, Weight Coefficients.

References

12. Baidenko V. I. *Osnovnye tendentsii razvitiia vysshego obrazovaniia: global'nye i Bolonskie izmereniia* [Main Tendencies of Development of the Higher Education: Global and Bologna Measurements]. Moscow, Issledovatel'skii tsentro problem kachestva podgotovki spetsialistov Publ., 2010. 352 p. (In Russian).
13. Danilov A. N., Kon E. L., Yuzhakov A. A., Andrievskaya N. V., Bezukladnikov I. I., Freyman V. I., Kon E. M. On Preparation and Evaluation of Competencies of Graduates of Higher School with Use of Modules «Vector of Direction» and «Qualification Requirements of Employers». *Otkrytoe obrazovanie*, 2012, no. 3, pp. 17–29 (In Russian).
14. Kon E. L., Freyman V. I., Yuzhakov A. A., Kon E. M. The Approach to Formation of the Competence Component Structure. *Vysshee obrazovanie v Rossii*, 2013, no. 7, pp. 37–41 (In Russian).
15. Kon E. L., Freyman V. I., Yuzhakov A. A. Practical Approach to Formation the Competence-based Model for a Technical University Graduate. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz*, 2013, no. 2(84), pp. 52–58 (In Russian).
16. Kon E. L., Freyman V. I., Yuzhakov A. A. Implementing the Integral Differential Estimation Criterion of Competence Acquisition. *Obrazovanie i nauka*, 2013, no. 6, pp. 47–63 (In Russian).
17. Freyman V. I. *Razrabotka i issledovanie metodov sinteza impulsnykh testov dlia avtomatizatsii proverki KМОP SBIS na etapakh izgotovleniia i ekspluatatsii telekommunikatsionnogo oborudovaniia*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Development and Research of Pulse Tests Synthesis Methods for Automation CMOS SLIS Check at Making and Using Stages of the Telecommunication

- Equipment. PhD techn. sci. diss.]. Perm, PGTU Publ., 2000. 114 p. (In Russian).
18. Kon E. L., Freyman V. I. Approaches to Test Diagnostic of Digital Devices. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*. Perm, Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet Publ., 2012, no. 4, pp. 231–241 (In Russian).
 19. Kon E. L., Freyman V. I., Yuzhakov A. A. The Quality Control of Technical Universities Students Competences Forming with Two-level Education System. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Nauchnye issledovaniia i ikh prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostoianie i puti razvitiia" 2012* [Proc. Int. Conf. "Scientific Researches and their Practical Application. Modern State and Ways of Development 2012"]. Odessa, Kuprienko Sergei Vasil'evich Publ., 2012, vol. 9, pp. 39–41 (In Russian).
 20. Kon E. L., Freyman V. I., Yuzhakov A. A. To the Question about the Discipline Competence Elements Control at the Basic Educational Program (on the Technical Programs Example). *Otkrytoe obrazovanie*, 2013, no. 3, pp. 12–19 (In Russian).
 21. Kon E. L., Freyman V. I., Yuzhakov A. A., Kon E. M. Developing Competences at the Basic Educational Program Implementation. *Otkrytoe obrazovanie*, 2013, no. 2, pp. 4–10 (In Russian).
 22. Kon E. L., Freyman V. I., Yuzhakov A. A. The Realization of Conditional and Unconditional Searching Results Decoding Algorithms during the Discipline Competence Elements Level Marking Control. *Obrazovanie i nauka*, 2013, no. 10, pp. 17–36 (In Russian).

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), 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, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляются в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.doc); AdobeIllustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы 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 37.02

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ НОРМАТИВОВ И ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ

В. П. Андрийчук^а, канд. воен. наук, профессор

^аМихайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, РФ

Цель: разработка инструмента определения временных нормативов, обеспечивающих повышение эффективности обучения должностных лиц органов управления, и оптимального состава органов управления. **Методы:** длительность этапа работ должностных лиц органа управления определена выполнением задачи в терминах теории расписаний, используемых при решении минимаксной задачи. Задача выбора оптимального состава органа управления решена с использованием элементов минимаксной задачи теории расписаний с применением идей метода ветвей и границ. **Результаты:** полученная методика определения времени выполнения работ органами управления при установленном составе должностных лиц на основе исходных данных о характеристиках работ позволяет определять табличным методом минимальное и максимальное общее время выполнения работ путем оптимального их распределения между должностными лицами. При разработке нормативов минимальное общее время принимается соответствующим оценке «отлично», а максимальное — оценке «удовлетворительно». Время на оценку «хорошо» определяется по зависимости, учитывающей минимальное и максимальное время. Методика выбора оптимального состава органа управления базируется на алгоритме методики определения времени выполнения работ и пошаговом изменении состава должностных лиц органа управления. Оптимальная численность состава органа управления соответствует точке экстремума на кривой общего времени. **Практическая значимость:** предложенные методики позволяют создать алгоритмы для расчета на ЭВМ не только времени работы органа управления по принятию решения, но и времени выполнения задачи подразделением, а также продолжительности других выполняемых мероприятий.

Ключевые слова — цикл управления, оптимальный состав, органы управления, принятие решения, объекты управления, минимальное и максимальное время, установленный состав, должностные лица, длительность, этап работ.

Введение

В ходе обучения управленческого звена используются временные нормативы. На их основе рассчитывается оптимальный состав органов управления [1].

При решении этих задач, как правило, известны состав органа управления в настоящее время и характеристики работ. Часть работ на определенном этапе можно выполнять в любой последовательности, поэтому требуется решить задачу оптимизации распределения обязанностей по выполнению работ с целью минимизировать общее время их выполнения. Также остается актуальной задача определения оптимального состава органа управления для экономии ресурсов и сокращения времени выполнения работ.

Следовательно, целевую установку работы можно определить в виде разработки методик решения обозначенных задач путем комплексного использования известных методов с опорой на нижеприведенные положения.

Эффективность управления характеризуется способностью системы управления использовать возможности объектов управления в интересах успешного выполнения поставленных перед ними задач [2].

В общем виде результатом функционирования системы управления является управляющее воздействие. При этом к системе управления предъявляются определенные требования, такие как устойчивость, живучесть, скрытность, по-

мехозащищенность, надежность, оперативность [3, 4].

Под оперативностью системы управления будем понимать время ее реагирования на изменения обстановки в целях создания условий для успешных действий. Следовательно, за показатель оперативности можно принять математическое ожидание (МО) длительности цикла управления при выполнении задач, $M[\Delta t]$.

Под циклом управления при выполнении задачи следует понимать сумму интервалов времени работы органа управления от момента принятия решения на ее выполнение до готовности объектов управления (до начала выполнения), включая время подготовки и время доклада о выполнении задачи [5]. Длительность цикла управления при выполнении задачи Δt целесообразно представить как

$$\Delta t = \Delta t_{\text{ф.у}}^{\text{н}} + \Delta t_{\text{п.у}} + \Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{д}}, \quad (1)$$

где $\Delta t_{\text{ф.у}}^{\text{н}}$ — время на принятие начальником решения о выполнении задачи и формирование указаний; $\Delta t_{\text{п.у}}$ — общее время передачи указаний; $\Delta t_{\text{п}}$ — сумма интервалов времени работы органов управления в ходе подготовки объектов управления к выполнению задачи; $\Delta t_{\text{д}}$ — интервал времени на доклад старшему начальнику.

В общем виде $\Delta t_{\text{ф.у}}^{\text{н}}$ будет составлять [6]

$$\Delta t_{\text{ф.у}}^{\text{н}} = \sum_a^A \Delta t_a + \Delta t_{\text{ф.у}}, \quad (2)$$

где Δt_a — время на выполнение a -го пункта решения; $\Delta t_{\phi,y}$ — время на формирование указаний; A — количество пунктов решения.

Перечень работ с указанием минимального и максимального времени их выполнения в момент принятия решения начальником и формирования указаний должен быть сведен в таблицы. Время на выполнение работ определяется в соответствии с руководящими документами и результатами экспертного опроса.

Сетевой граф [7] расчета времени выполнения задачи тремя подразделениями в ходе одной реализации показан на рис. 1, где — время передачи команд начальника в подразделения, $\Delta t_{p1(2,3)}$ — время работы в 1 (2, 3)-м подразделении до окончания доклада о готовности; $\Delta t_{п.у}^2$ — время передачи указаний о начале выполнения задачи подразделением; $\Delta t_{в.з}^{1(2,3)}$ — время выполнения задачи 1 (2, 3)-м подразделением с докладом об окончании работ.

Схема определения МО времени выполнения задачи $M(\Delta t_3)$ показана на рис. 2.

Математическое ожидание [8] длительности цикла управления при выполнении рассматриваемой задачи рассчитывается по зависимости

$$M[\Delta t] = M[\Delta t_{\phi,y}^H] + M[\Delta t_{п}] + M[\Delta t_{п.у}^1] + M[\Delta t_{п.у}^2] + M[\Delta t_{д}]. \quad (3)$$

Отметим, что МО слагаемого (этапа работ), приведенного в формуле (3), в общем виде рассчитывается как

$$M[\Delta t] = \frac{1}{n} \sum_{\gamma=1}^n t_{\gamma}, \quad (4)$$

где n — количество реализаций (испытаний) ($\gamma = 1, n$); Δt_{γ} — время выполнения работы управления в γ -й реализации.

Методика выработки временных нормативов

В работе предлагается методика определения длительности этапа работ должностных лиц органа управления $M[\Delta t]$ при управлении выполнением задачи в терминах теории расписаний, используемых при решении минимаксной задачи [9].

Длительность этапа работ $\Delta t_{\phi,y}^H$ представляется как время работы M должностных лиц от момента окончания постановки задачи до начала передачи полностью сформированных указаний начальника. За это время должностные лица выполняют N работ. Возможности должностных лиц по выполнению работ оформляются в виде матрицы $\|t_{ij}\| (i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N})$, где t_{ij} — длительность выполнения j -й работы i -м должностным лицом, определенная из Перечня работ.

В каждой реализации процесса управления длительность работы рассчитывается следующим образом:

$$t_{ij} = t_{ij \min} + (t_{ij \max} - t_{ij \min}) \xi, \quad (5)$$

где $t_{ij \min}$, $t_{ij \max}$ — минимальная и максимальная длительность выполнения работ; ξ — случайное число от 0 до 1.

Работы выполняются в указанной (заданной) последовательности. При этом некоторые из работ являются универсальными и могут выполняться параллельно любыми должностными лицами.

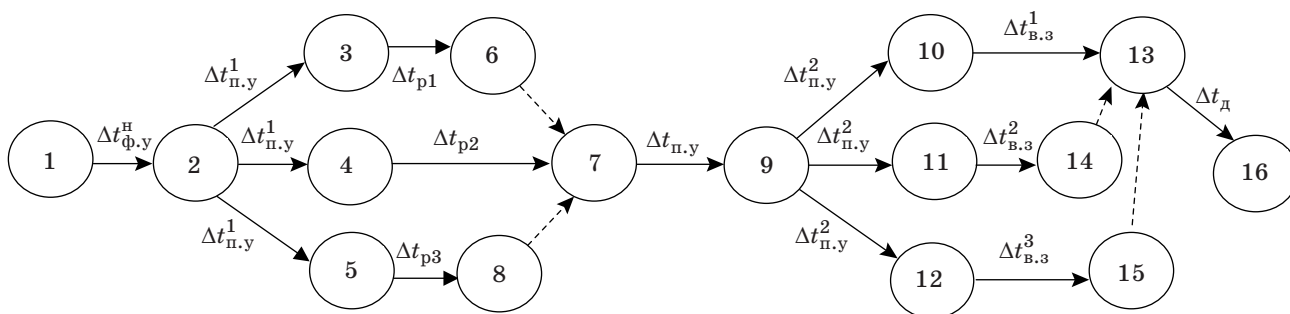


Рис. 1. Сетевой граф выполнения задачи

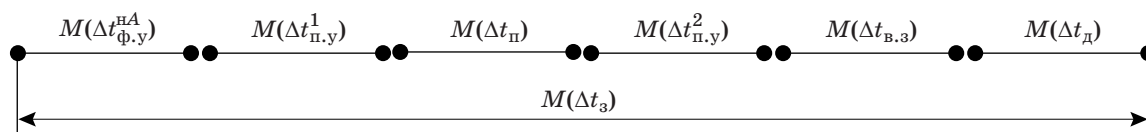


Рис. 2. Схема определения МО времени выполнения задачи

Задача определения длительности каждого этапа работ органа управления с известным составом должностных лиц может быть решена с помощью разработанного табличного метода [10].

Порядок расчета времени $\Delta t_{\text{ф.у}}^{\text{н}}$ приведен на примере работы органа управления в составе трех человек (табл. 1).

Порядок расчетов следующий.

1. Значение времени t_j (время работ на j -м шаге (в вертикальном столбце таблицы)) рассчитывается по нижеприведенным правилам:

а) если в вертикальном столбце с j -м номером время t_{ij} одно, то это значит, что только после выполнения этой работы приступают к следующей, поэтому $t_j = t_{ij}$;

б) если в столбце несколько работ и после них только одна работа в следующем столбце, то это значит, что несколько должностных лиц выполняют работы параллельно и только после завершения этих работ приступают к следующей. Тогда время t_j равно максимальному времени $t_{ij \text{ max}}$ из всех работ в столбце: $t_j = t_{ij \text{ max}}$;

в) если часть работ нескольких должностных лиц выполняется параллельно и каждое должностное лицо способно выполнять эти работы в любой последовательности (маркируются и не разделяются вертикальными линиями), то все работы в строке суммируются по формуле $T_i = \sum t_{ij}$, а затем полученные значения для разных строк сравниваются между собой и из них выбирается большее. Это значение записывается в последнюю строку своего столбца и принимается за значение t_j . Предшествующие значения t_j принимаются равными нулю.

2. Величина времени $\Delta t_{\text{ф.у}}^{\text{н}}$ рассчитывается по зависимости

$$\Delta t_{\text{ф.у}}^{\text{н}} = \sum_{j=1}^N t_j.$$

В данном примере $t_1 = 5$ с, $t_2 = 20$ с, $t_3 = 30$ с, $t_4 = 0$, $t_5 = 0$, $t_6 = 43$ с, $t_7 = 20$ с, $t_8 = 23$ с, $t_9 = 35$ с. Время формирования указаний начальником ($\Delta t_{\text{ф.у}}^{\text{н}}$) составит 176 с.

В результате расчетов получают время работы органа управления при принятии решения

на выполнение задачи и подготовки указаний в одной реализации. Далее, после всех реализаций, определяется МО этого времени по зависимости (4).

Время для нормативов определяется с помощью предлагаемой методики путем расчета минимального и максимального времени $\Delta t_{\text{ф.у}}^{\text{н}}$, при этом исключаются расчеты по зависимости (5). Минимальное время t^{min} необходимо принять соответствующим оценке «отлично», а максимальное t^{max} — оценке «удовлетворительно». Время выполнения задачи на оценку «хорошо» $t^{\text{хор}}$ определяется по зависимости

$$t^{\text{хор}} = t^{\text{min}} + \frac{t^{\text{max}} - t^{\text{min}}}{P_5 - P_3} (P_5 - P_4),$$

где P_3, P_4, P_5 — вероятность выполнения задачи $P_{\text{оц}}$ на соответствующую оценку [11, 12].

Предложенная методика позволяет рассчитать значение времени $M[\Delta t_{\text{ф.у}}^{\text{н}}]$ при известном составе должностных лиц. При выборе оптимального состава органов управления с целью минимизировать время их работы задача усложняется.

Методика выбора оптимального состава органа управления

Предлагается вариант выполнения этой задачи с использованием элементов решения минимаксной задачи теории расписаний с применением идей метода ветвей и границ [9].

В перечне функций каждого должностного лица есть работы, которые могут выполнять его помощники в любой последовательности. Предлагаемый порядок записи таких работ продемонстрирован в табл. 2.

В условиях данного примера предлагается расширять строку третьего должностного лица на количество строк, равных количеству работ с любой последовательностью выполнения (a, b, c, d). Следовательно, с 15-й по 18-ю работы третьего должностного лица могут одновременно выполнять четыре таких же должностных лица за время $t_{ij \text{ max}} = t_{3,15} = 30$ с. А одно должностное

■ Таблица 1. Длительность выполнения работ в определенной последовательности, с

Должностное лицо	i	Последовательность j								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Начальник	1	5	10					20		35
Заместитель начальника	2		15		$\frac{12}{0}$	$\frac{14}{0}$	$\frac{17}{43}$		23	
Помощник	3		20	30	$\frac{16}{0}$	$\frac{22}{38}$			18	
t_j		5	20	30	0	0	43	20	23	35

■ **Таблица 2.** Порядок записи работ произвольной последовательности

<i>i</i>	Последовательность <i>j</i>									
	1	2	...	14	15	16	17	18	19	...
1										
...				20						
3	<i>a</i>				30					
	<i>b</i>					25				
	<i>c</i>						17			
	<i>d</i>							18		
4									7	
...										

лицо эту же работу сделает за 90 с. Поэтому для уменьшения времени цикла управления иногда необходимо увеличить численный состав органа управления. Для ответа на вопрос об оптимальном составе органа управления предлагается использовать минимаксную задачу теории расписаний.

В терминах теории расписаний эта задача может быть сформулирована следующим образом.

Необходимо определить МО времени работы органа управления, состоящего из *M* должностных лиц, от момента получения задачи до начала передачи полностью сформированных указаний подчиненным. При этом должностные лица выполняют *N* взаимосвязанных работ в определенной последовательности. Возможности должностных лиц по выполнению работ представлены в виде матриц $\|t_{ij \min}\|, \|t_{ij \max}\|$ ($i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}$), где $t_{ij \min}, t_{ij \max}$ — минимальное и максимальное время выполнения *j*-й работы *i*-м должностным лицом, определенное по Перечню работ.

На пункте управления имеются группы должностных лиц. Первая группа ($i = 1$), умеющая выполнять обязанности начальника (группа начальника), имеет *s* членов. Вторая группа ($i = 2$) — заместителя начальника (*q* членов), третья ($i = 3$) — помощника (ω членов) и т. д.

Для решения этой задачи предлагается следующий алгоритм.

1. Определяется МО значения продолжительности каждой работы t_{ij} , распределенной по закону β -распределения, по зависимости [6]

$$\bar{t}_{ij} = \frac{3t_{ij \min} + 2t_{ij \max}}{5}.$$

2. Определяется конкретный численный состав групп должностных лиц органа управления (например: $s = 1; q = 2; \omega = 3$ и т. д.).

3. Определяются подмножества N_i работ для каждой группы, которые могут выполняться всем составом группы одновременно в любой последовательности.

4. Составляется таблица последовательности и длительности работ. В таблице по вертика-

ли располагаются номера групп должностных лиц и их состав, по горизонтали — номера работ. Последовательность задается *j*-м номером работы.

При этом для расположения работ из подмножеств N_i необходимо производить увеличение количества горизонтальных строк (должностей) в группах должностных лиц, если количество работ *z* в подмножестве больше, чем количество должностных лиц.

Последней горизонтальной строкой таблицы является строка значений времени работ на каждом *j*-м шаге (в каждом вертикальном столбце) t_j .

5. Рассчитывается величина времени t_j по следующим правилам:

а) и б) соответствуют п. 1, а), б) правил расчета временных нормативов;

в) работы, выполняемые параллельно разными должностными лицами, сравниваются по общей продолжительности, и выбирается большая продолжительность, значение которой записывается в строке t_j напротив последней выполненной работы; в предыдущих пустых ячейках строки t_j записываются нули;

г) общая продолжительность работ в подмножествах N_i рассчитывается следующим образом.

Допустим, вторая группа имеет подмножество N_i работ, которые она может выполнить одновременно в любой последовательности, и количество работ *z* в подмножестве ($k = \overline{1, z}$) больше числа членов в группе (*q*). Необходимо упорядочить работы внутри подмножества согласно критерию разбиения, обеспечивающему оптимальность расписания по быстродействию

$$\max_i T_i \rightarrow \min, i = \overline{1, M}, k = \overline{1, z},$$

где $T_i = \sum_{j \in N_i} t_{ij}$ — общее время загрузки *i*-й группы.

Рассмотрим алгоритм решения задачи п. 5, г). Правило оценки нижней границы и способ формирования дерева возможных вариантов

основаны на следующих предположениях. Пусть $q < z$ работ распределено по членам группы, начиная с $k = 1$. Каждая из оставшихся работ $z = q$ будет распределена между менее загруженными членами группы так, чтобы их загрузка была приближенно равномерной. При этом условное время занятости каждого члена составит $T_{k=1}^q$. Общее время обслуживания в системе с такой идеализацией будет определяться наибольшей из величин T_k^q

$$\max_i T_i \rightarrow \max_k T_k^q.$$

Следующий вариант распределения работ между членами начинается с работы $k + 1$, и для него определяется $\max T_2^q$. Последним будет вариант распределения для $k = z$. За время обслуживания всех z работ принимается меньшее из $\max T_k^q$.

Это время записывается в строке t_j напротив последней выполненной работы. В предыдущих пустых ячейках строки t_j записываются нули.

6. Величина МО времени работы органа управления Δt определяется по зависимости

$$M[\Delta t] = \sum_{j=1}^N t_j.$$

7. Изменяется численный состав групп должностных лиц и рассчитывается следующее значение $M[\Delta t]$. Расчеты проводят до получения экстремума на кривой значений $M[\Delta t]$. Численность

состава должностных лиц, соответствующая точке экстремума кривой времени, и есть оптимальный состав органа управления.

Заключение

В результате работы получены методики, позволяющие решить вопросы разработки временных нормативов выполнения работ органов управления и комплектования оптимального их состава. Такой подход к разработке временных нормативов дает возможность значительно повысить их обоснованность и качество. Это, несомненно, положительно скажется на повышении уровня обученности должностных лиц органов управления, а соответственно — и на эффективности выполняемых задач формированием (подразделением), в состав которого входят органы управления.

Оптимальный состав органов управления — это залог экономии затрат на содержание формирования (подразделения) и возможность усилить высвободившимся личным составом критические направления.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенные методики позволяют создавать алгоритмы для расчета на ЭВМ не только времени работы органа управления по принятию решения, но и времени выполнения задачи подразделением в целом, что очень важно при обосновании временных затрат для создания нормативов и для проведения исследований процессов управления подразделениями.

Литература

1. Мартыщенко Л. А. Военно-научные исследования и разработка вооружения и военной техники/ МО РФ. — М., 1993. — 301 с.
2. Петухов Г. Б. Основы теории эффективности целе-направленных процессов: учебник. Ч. 2/ МО СССР. — Л., 1990. — 552 с.
3. Аверьянов А. И. Управление в системах РАВ. Ч. 1. Основы теории управления и исследование операций/ МО СССР. — М., 1980. — 368 с.
4. Алтухов П. К. Основы теории управления войсками. — М.: Воениздат, 1984. — 221 с.
5. Богданов А. А. Оценка эффективности артиллерийских комплексов общевойсковых формирований: дис. ... д-ра техн. наук/ ВАА. — СПб., 1993. — 426 с.
6. Абчук В. А. Введение в теорию выработки решений. — М.: Воениздат, 1972. — 342 с.

7. Зуховицкий С. М. Математические методы сетевого планирования. — М.: Наука, 1965. — 145 с.
8. Беляева С. Д. Прикладная математика в примерах и задачах/ МАА. — СПб., 1996. Ч. IV. — 123 с.
9. Староселец В. А. Теория управления и методы обоснования и принятия решения/ МВАУ. — СПб., 2004. — 432 с.
10. Андрийчук В. П. Научно-методический аппарат обоснования перечня и содержания задач, временных и точностных нормативов Курсов подготовки артиллерии: сб. науч. тр. ВУНЦ ВМФ «ВМА». — СПб., 2014. № 43. С. 16–22.
11. Вентцель Е. С. Исследование операций. — М.: Сов. радио, 1972. — 551 с.
12. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 576 с.

UDC 37.02

Methods for Determination of Time Standards and Optimal Composition of Control BodiesAndriychuk V. P.^a, PhD, Milit., Professor, avp-1961@yandex.ru^aMikhailovskaya Military Artillery Academy, 22, Komsomol St., 190110, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: To elaborate an instrument of time standards determination providing increased efficiency of command and control elements training and optimal composition of these elements. **Methods:** Duration of a workflow stage of command and control elements is determined by task accomplishment in terms of scheduling theory used for solving a minimax problem. The task of selecting optimal composition of command and control elements has been solved using minimax problem elements of the scheduling theory applying a branch and bound method. **Results:** The developed methods of determination of workflow execution time by command and control elements with the set composition of officials based on initial data on workflow characteristics allow determining minimal and maximum workflow execution time through its optimal distribution among executive officers using a table method. When elaborating standards total minimal time corresponds to the “excellent” mark and maximum time – to the “satisfactory” mark. Time for the “good” mark is defined according to a dependency which takes into account minimal and maximum time. Methods of selecting an optimal composition of command and control elements are based on the algorithm of workflow time determination method and gradual modification of composition of command and control elements. The optimal number of executive officers corresponds to the extremum point on the total time curve. **Practical relevance:** The proposed methods allow creating algorithms for computer calculation not only of the workflow time of command and control element decision-making but the time of task accomplishment by a unit and the duration of other taken measures.

Keywords — Control Cycle, Optimal Composition, Control Bodies, Decision-Making, Control Objects, Minimum and Maximum Time, Set Composition, Command and Control Elements, Duration, Workflow Stage.

References

1. Martytshenko L. A. *Voenno-nauchnie issledovaniia i razrabotka vooruzheniia i voennoy tekhniki* [Military Scientific Researches and Development of Armament and Military Equipment]. Moscow, MO RF Publ., 1993. 301 p. (In Russian).
2. Petukhov G. B. *Osnovy teorii effektivnosti tselenapravlennykh processov* [The Foundations of Efficiency Theory and Theory of Aim-Oriented Processes]. Part 2. Leningrad, MO SSSR Publ., 1990. 552 p. (In Russian).
3. Averyanov A. I. *Upravlenie v sistemah RAV. Ch. 1. Osnovy teorii upravleniia i issledovanie operatsiy* [Missile and Artillery Systems Control. Part 1. The Foundations of Control Theory and Study of Operations]. Moscow, MO SSSR Publ., 1980. 380 p. (In Russian).
4. Altukhov P. K. *Osnovy teorii upravleniia voiskami* [The Foundations of Troops Control Theory]. Moscow, Voenizdat Publ., 1984. 221 p. (In Russian).
5. Bogdanov A. A. *Otsenka effektivnosti artilleriyskikh kompleksov obshevoiskovykh formirovaniia*. Dis. dokt. techn. nauk [Efficiency Assessment of Combined Arms Artillery Systems. Dr. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, VAA Publ., 1993. 426 p. (In Russian).
6. Abchuk V. A. *Vvedenie v teoriyu vyrabotki resheniy* [Introduction in the Theory of Decision-Making]. Moscow, Voenizdat Publ., 1972. 342 p. (In Russian).
7. Zukhovitskiy S. M. *Matematicheskie metody setevogo planirovaniia* [Mathematical Methods of Network Planning]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 145 p. (In Russian).
8. Belyaeva S. D. *Prikladnaia matematika v primerah i zadachah* [Applied Mathematics in Cases and Problems]. Part IV. Saint-Petersburg, MAA Publ., 1996. 123 p. (In Russian).
9. Staroselets V. A. *Teoriya upravleniia i metody obosnovaniia i prinyatiia resheniia* [Management Theory and Argumentation and Decision-Making Methods]. Saint-Petersburg, MVAU Publ., 2004. 432 p. (In Russian).
10. Andriychuk V. P. Scientific and Methodological Mechanism of Task Register and Content Argumentation, Time and Accuracy Standards of Artillery Training Courses. *Collection of scientific papers*. Saint-Petersburg, Voennyi uchebno-nauchnyi tsentr VMF «Voenno-morskaia akademiia» Publ., 2014, no. 43, p. 16–22 (In Russian).
11. Ventsel E. S. *Issledovanie operatsiy* [Study of Operations]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972. 551 p. (In Russian).
12. Ventsel E. S. *Teoriia veroyatnostey* [Theory of Chances]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p. (In Russian).

УДК 519.61:511-33

ДВУЦИКЛИЧЕСКАЯ М-МАТРИЦА 22-го ПОРЯДКА

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

М. Б. Сергеев^{а, б}, доктор техн. наук, профессор

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

^бСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: на классе квазиортогональных матриц четных порядков, отличных от порядков матриц Адамара, характер оптимального по детерминанту решения зависит от количества нулей в столбцах взвешенной матрицы. Двуматричные формы оптимальных или субоптимальных матриц служат источниками парных комплементарных последовательностей, обобщающих коды Голея и Баркера. Целью работы является пример построения субоптимальной двуматричной матрицы на критическом для конференц-матриц 22-м порядке. **Методы:** экстремальные решения ищутся минимизацией максимума абсолютных значений элементов исследуемых матриц с последующей классификацией их по количеству и значениям уровней, зависящих от порядков. **Результаты:** выделена и описана матричным портретом и значениями уровней модульно шестиуровневая двуматричная квазиортогональная матрица локального максимума детерминанта (М-матрица) 22-го порядка. Сформулировано предположение о замещении не существующих (по известным критериям) матриц Белевича М-матрицами четных порядков. В качестве иллюстрации приводится сравнение двуматричной М-матрицы 22-го порядка и взвешенной матрицы $W(22,20)$ по структуре и по детерминанту. **Практическая значимость:** алгоритмы нахождения двуматричных М-матриц использованы при построении исследовательского программного комплекса. Обобщенные парные комплементарные последовательности составляют основу фильтров, применяемых для сжатия и маскирования изображений.

Ключевые слова — ортогональные матрицы, матрицы Адамара, конференц-матрицы, матрицы Белевича, взвешенные матрицы, детерминант матрицы, двуматричные матрицы, коды Голея, коды Баркера.

В работе [1] определен класс матриц Белевича (конференц-матриц, или С-матриц), известной своей ролью в построении матриц Адамара. Это квадратные матрицы порядка n , кратного 2, с нулевой диагональю и остальными элементами $\{1, -1\}$, обладающие свойством $C^TC = (n - 1)I$, где I — единичная матрица.

Необходимое условие существования упомянутых целочисленных матриц — разложимость числа $n - k$ на сумму квадратов двух целых чисел [2]. При $k = 1$ порядки, для которых не существуют конференц-матрицы, таковы: 22, 34, 58, 70, 78, 94 Порядок 22 является первым исключением, поэтому принципиально важно знать матрицы, которые на нем могут замещать матрицу Белевича.

К числу обобщений С-матриц относятся взвешенные конференц-матрицы $W(n, n - k)$ [3, 4], отличающиеся от них количеством $k \geq 1$ нулевых элементов каждой строки или столбца и уравнением $W^TW = (n - k)I$.

Наиболее известное правило построения взвешенных конференц-матриц четных порядков, отличных от порядков матриц Адамара [5], сводится к построению двуматричных структур

$$W(n, n - k) = \begin{pmatrix} A & B \\ B^T & -A^T \end{pmatrix},$$

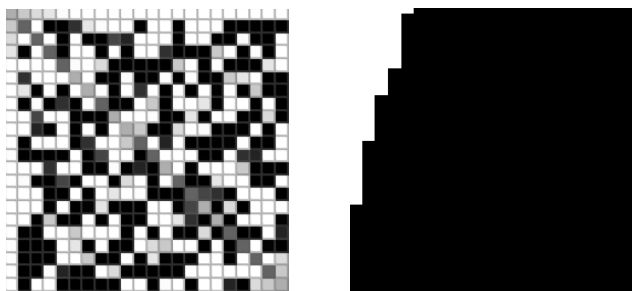
где A, B — циклические матрицы, построенные на базе парных комплементарных последовательностей Голея добавлением к ним нулей [3].

В работах [6, 7] был описан новый, более общий класс М-матриц, отличающихся от взвешенных конференц-матриц допущением большего, чем $\{0, 1, -1\}$, числа значений элементов (уровней) и удовлетворяющих уравнению $M^TM = \mu(n)I$, где $\mu(n)$ — зависящая от порядка весовая функция.

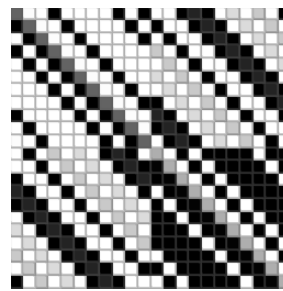
Целочисленные матрицы Белевича и М-матрицы с иррациональными, в общем, уровнями могут обладать как локальным, так и глобальным максимумом детерминанта [7]. Причем на порядках, на которых отсутствуют матрицы Белевича, по критерию максимума детерминанта могут преобладать взвешенные матрицы (порядки 22, 34) или М-матрицы, например, на порядке 58, на котором взвешенная матрица обязана иметь не менее пяти нулей в каждом своем столбце.

Таким образом, М-матрицы полноценно заменяют матрицы Белевича на некоторых значениях порядков, но при этом важным является их строение. В работе [8] предложена шестиуровневая М-матрица 22-го порядка (M_{22}) (рис. 1). Белыми и черными квадратами отмечены элементы 1 и -1 соответственно, а остальные уровни, модули которых имеют значения $\{0.9802, 0.7846, 0.6924, 0.5299, 0.3076\}$, переданы оттенками серого цвета. Приведенная структура не позволяет просто описать М-матрицу, кроме того, неясно, почему эта экстремальная по значению детерминанта матрица не симметрична.

Задача поиска парных комплементарных последовательностей, обобщающих бинарные коды Голея на последовательности с большим числом



■ *Рис. 1.* Портрет шестиуровневой матрицы M_{22} и гистограмма ее элементов



■ *Рис. 2.* Портрет двуциклической шестиуровневой матрицы M_{22}

уровней, в частности, с уровнями M -матриц, может быть решена с помощью опубликованных ранее оптимизационных алгоритмов [9, 10]. Они обладают свойством находить такие комплементарные последовательности кодов при условии, что исходная для итераций матрица представлена не в произвольной, как для приведенной выше M -матрицы, а в двуциклической форме.

Алгоритм, оптимизируя детерминант, сохраняет форму матрицы, приводя к нахождению двуциклической M_{22} в виде, представленном на рис. 2.

Учитывая, что M -матрицы включают в себя трехуровневые взвешенные матрицы и структурно не отличаются существенно от них, внесем поправку в высказанное в работе [4] предположение о замещениях матриц Белевича.

Предположение. На классе квазиортогональных матриц четного порядка, кратного 2, отличного от значений порядков матриц Адамара, на проблемных для матриц Белевича порядках максимальным значением определителя обладают M -матрицы.

Как видно, полученная структура хорошо поясняет исключительные особенности матриц порядка 22. На диагонали данной структуры, как и у матриц Белевича, сосредоточены самые малые по абсолютной величине элементы (они отмечены серым цветом). Но ортогональности столбцов матрицы не достичь без появления сходных элементов в составе внедиагональных блоков.

Компромисс, наблюдаемый у взвешенных матриц, заключается в том, что обе циклические матрицы A и B имеют нулевые главные диагонали.

Определитель взвешенной матрицы $\det(W_{22}) = 204\,800\,000\,000\,000$ близок к $\det(M_{22}) = 149\,120\,095\,399\,252$. В ряде случаев соотношения определителей таких матриц будет меняться на противоположное, особенно для взвешенных матриц малого веса — матриц более чем с двумя нулями в каждом столбце.

Первые строки циклических матриц A и B дают экономичное описание такой структуры, общей для всех последующих M -матриц четных значений порядков. Парные коды (содержимое строк) обладают экстремальными качествами (обеспечивают оптимальное или субоптимальное значение определителя и т. п.), превосходящими, в том числе, и коды, используемые при построении разряженных взвешенных матриц.

Экстремальные по значению детерминанта квазиортогональные матрицы — предмет пристального внимания исследователей. В этой актуальной для практики помехоустойчивого кодирования области систематически публикуются обзоры, содержащие последние достижения [11, 12].

Приведенный в работе вид двуциклических квазиортогональных матриц нов и связан с новым важным обобщением экстремальных кодов Голея и Баркера [11], применяемых при обработке и защите информации.

Литература

1. Belevitch V. Theorem of $2n$ -terminal networks with application to conference telephony // *Electr. Commun.* 1950. Vol. 26. P. 231–244.
2. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. К вопросу существования матриц Мерсенна и Адамара // *Информационно-управляющие системы.* 2013. № 5(66). С. 2–8.
3. Geramita A. V. and Seberry J. *Orthogonal Designs: Quadratic Forms and Hadamard Matrices.* — N. Y.: Dekker. 1979. — 460 p.
4. 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.
5. Hadamard J. Résolution d'une question relative aux determinants // *Bulletin des Sciences Mathématiques.* 1893. N 17. P. 240–246.
6. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. M -матрицы // *Информационно-управляющие системы.* 2011. № 1(50). С. 14–21.

- | | |
|--|--|
| <p>7. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы локального максимума детерминанта // Информационно-управляющие системы. 2014. № 1(68). С. 2–15.</p> <p>8. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. М-матрица 22-го порядка // Информационно-управляющие системы. 2011. № 5(54). С. 87–90.</p> <p>9. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. Алгоритм и программа поиска и исследования М-матриц // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3. С. 82–86.</p> | <p>10. Балонин Ю. Н. Программный комплекс MMatrix-2 и найденные им М-матрицы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 10(112). С. 58–64.</p> <p>11. Colbourn C. J., Dinitz J. H. Handbook of Combinatorial Designs. Sec. Ed. — Chapman and Hall/CRC, 2007. — 967 p.</p> <p>12. Horadam K. J. Hadamard Matrices and Their Applications. — Princeton: Princeton University Press, 2007. — 280 p.</p> |
|--|--|

UDC 519.61:511-33

Two-Circulant M-Matrix of the 22nd Order

Balonin N. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, korbendfs@mail.ru

Sergeev M. B.^{a, b}, Dr. Sc., Tech., Professor, mbse@mail.ru

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

^b Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskiy St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Within a class of quasi-orthogonal matrices of even orders different from Hadamard matrices a nature of the optimal by determinant solutions depends on an amount of zeros in columns of weighing matrices. Two-circulant forms of optimal or suboptimal matrices have been used as a source of complementary pair sequences generalizing Golay and Barker codes. The goal of this paper is to construct an example of a suboptimal two-circulant matrix of the 22nd order which is critical for conference matrices. **Methods:** There have been found extreme solutions by minimization of maximum of matrix elements absolute values with their consequent classification according to an amount and values of levels depending on orders. **Results:** There has been identified and described by matrix portrait and meaning of levels a modular two-circulant six-level quasi-orthogonal matrix of the 22nd order (M-matrix) having the local maximum. There has been formulated a conjecture on replacing Belevitch matrices if they are absent (do not exist due to the known criteria) by odd order M-matrices. To demonstrate the abovementioned there has been given a comparison of two-circulant 22nd order M-matrix and a weighing matrix $W(22,20)$ by its structures and determinants. **Practical relevance:** The algorithms of constructing two-circulant M-matrices have been applied for development of the research software. Generalized complementary pair sequences have been used as a basis of filters for image masking and compression.

Keywords — Orthogonal Matrices, Hadamard Matrices, Conference Matrices, Belevitch Matrices, Weighing Matrices, Matrix Determinant, Two-Circulant Matrices, Golay Codes, Barker Codes.

References

- | | |
|--|---|
| <p>1. Belevitch V. Theorem of 2n-Terminal Networks with Application to Conference Telephony. <i>Electrical Communication</i>, 1950, vol. 26, pp. 231–244.</p> <p>2. Balonin N. A., Sergeev M. B. On the Issue of Existence of Hadamard and Mersenne Matrices. <i>Informatsionno-upravliaiushchie sistemy</i>, 2013, no. 5(66), pp. 2–8 (In Russian).</p> <p>3. Geramita A. V. and Seberry J. Orthogonal Designs: Quadratic Forms and Hadamard Matrices. New York, Dekker, 1979. 460 p.</p> <p>4. Balonin N. A., Sergeev M. B. Weighted Conference Matrix Generalizing Belevitch Matrix at the 22nd Order. <i>Informatsionno-upravliaiushchie sistemy</i>, 2013, no. 5(66), pp. 97–98 (In Russian).</p> <p>5. Hadamard J. <i>Résolution d'une question relative aux déterminants</i> [Resolution of one problem related to the determinants]. <i>Bulletin des Sciences Mathématiques</i>, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).</p> <p>6. Balonin N. A., Sergeev M. B. M-Matrices. <i>Informatsionno-upravliaiushchie sistemy</i>, 2011, no. 1(50), pp. 14–21 (In Russian).</p> | <p>7. Balonin N. A., Sergeev M. B. The Local Maximum Determinant Matrices. <i>Informatsionno-upravliaiushchie sistemy</i>, 2014, no. 1(68), pp. 2–15 (In Russian).</p> <p>8. Balonin N. A., Sergeev M. B. M-Matrix of 22nd Order. <i>Informatsionno-upravliaiushchie sistemy</i>, 2011, no. 5(54), pp. 87–90 (In Russian).</p> <p>9. Balonin Yu. N., Sergeev M. B. The Algorithm and Program for Searching and Studying of M-Matrices. <i>Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki</i>, 2013, no. 3, pp. 82–86 (In Russian).</p> <p>10. Balonin Yu. N. Software Complex MMatrix-2 and M-Matrices Found by it. <i>Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii</i>, 2013, no. 10(112), pp. 58–64 (In Russian).</p> <p>11. Colbourn C. J., Dinitz J. H. Handbook of Combinatorial Designs. Sec. Ed. Chapman and Hall/CRC, 2007. 967 p.</p> <p>12. Horadam K. J. Hadamard Matrices and Their Applications. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2007. 280 p.</p> |
|--|---|

РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ К. В. ГРИГОРЬЕВОЙ «КОНФЛИКТНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ЧАСТЬ 2. СТАТИЧЕСКИЕ КОАЛИЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ»

ФГБОУВПО «СПГУТД», САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЯ, 2013. – 160 с.

ISBN 978-5-7937-0793-0; ISBN 978-5-7937-0906-4

Рецензируемая монография К. В. Григорьевой является продолжением научных разработок автора по созданию математических моделей в задачах, содержащих коалиционные структуры, начатой в работе «Конфликтно-динамические системы. Часть 1. Статические и стохастические коалиционные игры», где представлены алгоритмы решения статических и стохастических коалиционных игр и их модификаций, а также впервые предложено использовать такой принцип оптимальности, как обобщенный PMS-вектор в смешанных стратегиях.

Исследования, положенные в основу второй части «Статические коалиционные модели принятия решений и их приложения» монографии «Конфликтно-динамические системы», направлены на обеспечение решения широкого круга задач в области оптимального управления и теории принятия решений на основе парадигмы многоагентного взаимодействия.

С помощью коалиционных теоретико-игровых моделей могут быть описаны и решены многие задачи управления и теории принятия решений, возникающие в различных практических областях: социальных, политических и экономических науках, психологии, правовых и военных конфликтах, — где принимающая решение «коалиция» располагает информацией о множестве возможных ситуаций, о множестве «стратегий», которые она может принять, и о количественной мере «выигрыша», который она могла бы получить, выбрав в известной ситуации данную стратегию. Автор предлагает построение различных теоретико-игровых статических моделей принятия решений с коалиционными разбиениями и их модификаций для следующего типа задач.

Пусть имеется группа агентов и совокупность каких-либо проектов. Под агентами понимаются все, кто принимает какое-либо решение по какому-либо вопросу. Под проектами можно понимать объекты строительства или инвестирования, транспортные маршруты, государства в международной политике или любые другие объекты, объединенные в совокупность по каким-либо присущим им свойствам. Агенты принимают решение участвовать в проекте или нет. При этом принятие решения каждого агента по

каждому элементу проекта сопряжено с затратами (доходами), отличными от нуля, которые следует минимизировать (максимизировать). Предполагается, что агенты разбиваются на коалиции, формируя тем самым коалиционное разбиение, и игроки, входящие в одну коалицию, действуют в ее интересах с целью максимизировать суммарный коалиционный выигрыш. В коалиционных играх ставится двойная задача: 1) определение оптимального поведения коалиций как отдельных игроков, нахождение выигрышей этих коалиций как результат их оптимального поведения и 2) нахождение приемлемого дележа коалиционного выигрыша между игроками, входящими в коалицию. Соответственно возникают задачи оптимизации, которые можно решить с помощью построения различных теоретико-игровых моделей, например, с помощью статической модели принятия решений с единственной бескоалиционной игрой и фиксированными коалиционными разбиениями или с помощью статической модели принятия решений с различными бескоалиционными играми и фиксированными коалиционными разбиениями.

Более того, для каждого проекта агенты, будучи рациональными, предпочитают выбирать оптимальное, в некотором смысле, коалиционное разбиение из всех возможных. Эта задача решается с помощью статической модели принятия решений с различными бескоалиционными играми на множестве коалиционных разбиений.

Все модели объединены общей проблемой решения набора теоретико-игровых задач для принятия агентами «правильного» выбора. Таким образом, уточняя детали моделей, а именно наличие коалиционных структур и правила построения функций выигрыша, автор выделяет среди статических коалиционных моделей принятия решений однокритериальные и многокритериальные модели; модели с единственной бескоалиционной игрой; модели с различными бескоалиционными играми; модели принятия решений на множестве коалиционных разбиений. Для многокритериальных моделей проводится классификация по используемым методам оптимизации, направленным на сведение многокритериальной модели к соответствующей

однокритериальной, алгоритм решения которой ранее уже построен.

Так, например, предложено использовать минимаксный метод и метод взвешенных коэффициентов многокритериальной оптимизации. В работе представлены также примеры использования «классических» принципов оптимальности в решении многокритериальных биматричных игр, предложенных, в частности, В. Д. Ногиным.

Отдельной проблемой в сведении многокритериальной модели к соответствующей однокритериальной модели является оценивание коэффициентов предпочтения коалиций. Автор предлагает для оценивания коэффициентов предпочтения двух коалиций в случае многокритериальной биматричной модели использовать разработанный А. В. Кокориной алгоритм ранжирования параметров.

В качестве принципов оптимальности решения статических коалиционных моделей принятия решений и их модификаций используются обобщенный PMS-вектор и компромиссное решение. Для решения бескоалиционных и кооперативных игр применяется оптимальность по Парето и арбитражная схема Нэша. Обобщенный PMS-вектор обеспечивает наличие решения для любого набора проектов, поскольку в бескоалиционной игре всегда найдется хотя бы одна ситуация равновесия по Нэшу в смешанных стратегиях.

Монография состоит из двух глав общим объемом 160 страниц, имеет список литературы из 33 наименований.

В первой главе исследуются свойства моделей и их модификаций, результаты исследований оформлены в виде теорем. Все модели достаточно подробно изучены и снабжены иллюстративными примерами.

Во второй главе предлагаются приложения статических теоретико-игровых коалиционных моделей в задачах инвестирования инновационных проектов и классической задаче почтальона на сетевом графе.

На основе разработанных и приведенных в данной монографии моделей можно строить и получать решения достаточно важных прикладных задач. В качестве иллюстрации особо выделяется пример, где исследуется возможность практического применения статических коалиционных моделей в расселении ветхих и аварийных зданий в Санкт-Петербурге (§ 7, 12). Применительно к проблеме расселения в качестве агентов выступают жильцы, в качестве их стратегий — согласие или отказ от переселения в здания, еще не построенные, но проектируемые. Под проектом в данном случае понимается некое конкретное жилье. Непересекающиеся коалиции из членов семьи образуют коалиционную структуру в статической модели принятия решений. Выбранные каждым агентом стратегии образуют ситуацию. Выигрыши каждого игрока задаются на множестве ситуаций отдельно для каждого проекта и определяются различными параметрами, например, такими, как удаленность от метро, от работы или от родственников, проживающих в других районах города; количество этажей; тип дома и др. Таким образом, для каждого проекта формируется многокритериальная коалиционная игра, решая которую можно определить ситуацию равновесия по Нэшу. Применяя алгоритм нахождения компромиссного решения к наборам выигрышей игроков в ситуациях равновесия по Нэшу, автор получает один или несколько компромиссных проектов.

Монография носит законченный характер, содержит принципиально новые результаты и предлагает модели, представляющие интерес как для развития коалиционной теории игр, так и для решения прикладных задач.

*Доктор технических наук,
профессор кафедры прикладной математики
Московского городского психолого-
педагогического университета
М. В. Воронов*

АКМАЛХОДЖАЕВ
Акмал
Илхомович



Программист Института компьютерной безопасности, вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Комплексная защита объектов информатизации». Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — помехоустойчивое кодирование, итеративное декодирование, беспроводные системы связи. Эл. адрес: Akmal.ilh@gmail.com

АНДРЕЕВ
Андрей
Васильевич



Аспирант кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2011 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника». Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — службы каталогов, свободное программное обеспечение, теория множеств, теория графов, операционные системы. Эл. адрес: aathexf@gmail.com

АНДРИЙЧУК
Валерий
Павлович



Профессор кафедры управления ракетными ударами и огнем артиллерии в бою и операции Михайловской военной артиллерийской академии, Санкт-Петербург. В 1995 году окончил Военную артиллерийскую академию им. М. И. Калинина, Санкт-Петербург, по специальности «Командно-штабная оперативно-тактическая ракетных войск и артиллерии». В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата военных наук. Является автором 63 научных публикаций. Область научных интересов — система подготовки военных кадров. Эл. адрес: avp-1961@yandex.ru

БРИТОВ
Георгий
Семенович



Доцент кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1963 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Авиационное приборостроение». В 1968 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 13 патентов на изобретения. Область научных интересов — теория надежности и техническая диагностика информационных систем. Эл. адрес: bgs@ibi.metrocom.ru

ВАКУРИНА
Татьяна
Германовна



Ведущий инженер отдела формирования и реализации программ эксплуатации ракетно-космических систем и управления проектами, ОАО «РКК «Энергия», Королёв. В 2000 году окончила механико-математический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова по специальности «Математика. Прикладная математика». Область научных интересов — информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений. Эл. адрес: tvakurina@yandex.ru

КОЖЕВНИКОВ
Сергей
Сергеевич



Директор аналитического центра ООО «НПК «Разумные решения», Самара. В 2009 году окончил специалитет Самарского государственного аэрокосмического университета имени С. П. Королева по специальности «Информационные технологии в авиа- и ракетостроении», 2010 году — магистратуру Самарского государственного аэрокосмического университета им. С. П. Королева по специальности «Авиа- и ракетостроение». Является автором 17 научных публикаций. Область научных интересов — мультиагентные технологии, решение сложных задач в области управления и планирования ресурсов предприятий, бизнес и системная аналитика. Эл. адрес: koz@smartsolutions-123.ru

КОТЕЛЯ
Владислав
Владимирович



Начальник сектора сопровождения и развития информационной инфраструктуры управления полетами, ОАО «РКК «Энергия», Королев.

В 1999 году окончил Московский государственный университет леса по специальности «Управление и информатика в технических системах», в 2013 году — Российскую академию народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации по специальности «Менеджмент в крупной корпорации».

Область научных интересов — информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений.

Эл. адрес: vlad@scsc.ru

ЛАХИН
Олег
Иванович



Руководитель направления ООО «НПК «Разумные решения», Самара.

В 1998 году окончил Поволжский институт информатики, радиотехники и связи по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», в 2006 году — Самарский государственный экономический университет по Федеральной программе подготовки управленческих кадров.

Является автором 23 научных публикаций.

Область научных интересов — мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени, использующих принципы самоорганизации и эволюции.

Эл. адрес: lakhin@yandex.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

МАКАРЕНКО
Сергей
Иванович



Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 2002 году окончил Ставропольский филиал военного авиационного технического университета им. Н. Е. Жуковского по специальности «Автоматизированные системы управления и обработки информации».

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — информационная безопасность телекоммуникационных систем, эффекты влияния информационно-технических воздействий и преднамеренных деструктивных факторов на телекоммуникационные системы и др.

Эл. адрес: mak-serg@yandex.ru

МАЛЬЦЕВ
Георгий
Николаевич



Профессор кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского.

В 1980 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского. В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 250 научных публикаций и 26 патентов на изобретения.

Область научных интересов — обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных информационных системах и др.

Эл. адрес: georgy_maltsev@mail.ru

МАТЮШИН
Максим
Михайлович



Доцент кафедры динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, начальник отдела ОАО РКК «Энергия» им. С. П. Королева.

В 1997 году окончил Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана по специальности «Ракетные двигатели».

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 40 научных публикаций.

Область научных интересов — технологии системного анализа и моделирования оперативного управления космическими полетами, использующие принципы самоорганизации.

Эл. адрес: matyushin@scsc.ru

МИХАЙЛОВ
Роман
Леонидович



Адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2004 году окончил Череповецкий военный инженерный институт радиоэлектроники по специальности «Радиотехника». Является автором более 20 научных публикаций. Область научных интересов — методы маршрутизации информационных потоков, повышение устойчивости связи на сетевом уровне модели OSI. Эл. адрес: mikhailov-rom2012@yandex.ru

НАЗАРОВ
Андрей
Вячеславович



Начальник кафедры космической радиолокации и радионавигации Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 1994 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы». В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 80 научных публикаций. Область научных интересов — моделирование сложных систем, нейросетевые технологии, техническая диагностика, методы обработки изображений, оптико-информационные системы. Эл. адрес: naz-av@mail.ru

НИКИТИН
Владимир
Степанович



Директор ООО Научно-технологический центр «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, одной монографии и 48 патентов на изобретения, полезные модели и программы для ЭВМ. Область научных интересов — оптико-информационные системы, робототехника. Эл. адрес: 505z@mail.ru

НОВИКОВ
Евгений
Александрович



Докторант кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2002 году окончил Военный инженерно-космический университет им. А. Ф. Можайского по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций. Область научных интересов — оптимальное управление динамическими системами, управление ресурсами телекоммуникационной системы. Эл. адрес: moozg@mail.ru

НОСКОВА
Александра
Игоровна



Аналитик, ООО «НПК «Разумные решения», Самара. В 2012 году окончила Самарский государственный архитектурно-строительный университет по специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция». Область научных интересов — мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени, использующих принципы самоорганизации и эволюции. Эл. адрес: noskova@smartsolutions-123.ru

ПАТРАКОВ
Степан
Сергеевич



Старший инженер лаборатории кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2006 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Эксплуатация бортовых радиоэлектронных систем». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — бортовые и наземные информационно-телеметрические системы, теория скрытой передачи данных. Эл. адрес: patrakovinet@mail.ru

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

СКОБЕЛЕВ
Петр
Олегович



Ведущий научный сотрудник Института проблем управления сложными системами РАН, профессор кафедры инженерии знаний Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Самара. В 1983 году окончил Куйбышевский авиационный институт им. акад. С. П. Королева по специальности «АСУ и прикладная математика». В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 150 научных публикаций и трех патентов на изобретения. Область научных интересов — мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени и др. Эл. адрес: petr.skobelev@gmail.com

ФРЕЙМАН
Владимир
Исаакович



Кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой автоматики и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. В 1996 году окончил Пермский государственный технический университет по специальности «Управление и информатика в технических системах». В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 84 научных публикаций, двух свидетельств на разработку программного обеспечения систем управления аппаратурой связи. Область научных интересов — техническая диагностика и ее применение в технических и социально-экономических системах, управление и контроль качества учебного процесса и др. Эл. адрес: vfrey@mail.ru

СИМОНОВА
Елена
Витальевна



Ведущий аналитик ООО «НПК «Разумные решения», доцент кафедры информационных систем и технологий Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королева (национального исследовательского университета). В 1985 году окончила Куйбышевский авиационный институт им. акад. С. П. Королева по специальности «Автоматизированные системы управления». В 1994 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — разработка интеллектуальных систем управления мобильными ресурсами на основе мультиагентных технологий и др. Эл. адрес: simonova.elena.v@gmail.com

СУХОВ
Тимофей
Михайлович



Начальник сектора отдела телевизионных систем ЗАО «Научно-производственная фирма «ТИРС». В 2007 году окончил Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, по специальности «Информационные системы и технологии в радиоэлектронике». Является автором пяти научных публикаций и одного патента на изобретение. Область научных интересов — сжатие и передача видеoinформации, цветное кодирование, защита видеoinформации. Эл. адрес: tsuhov@mail.ru

ХАНЫКОВ
Игорь
Георгиевич



Аспирант кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Компьютерное моделирование». Является автором семи научных публикаций. Область научных интересов — техническая диагностика, теория систем автоматического управления и компьютерное моделирование динамических систем. Эл. адрес: igorioniak@mail.ru

**ЦВЕТКОВ
Кирилл
Юрьевич**



Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.
В 1987 году окончил Военный инженерно-космический институт имени А. Ф. Можайского по специальности "Комплексы и средства радио- и электропроводной связи", в 2000 году — Санкт-Петербургский государственный университет по специальности "Математик".
В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций и трех патентов на изобретения.
Область научных интересов — применение протоколов множественного доступа в системах спутниковой связи.
Эл. адрес: wavelet3@mail.ru

**ШЕСТОПАЛОВА
Ольга
Львовна**



Доцент, декан факультета испытания летательных аппаратов филиала «Восход» Московского авиационного института, Байконур.
В 1993 году окончила Казахский государственный Национальный университет им. Аль-Фараби, факультет механики и прикладной математики по специальности «Прикладная математика».
В 2006 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 85 научных публикаций, в том числе одной монографии и шести патентов на изобретения.
Область научных интересов — исследование методов повышения надежности и безопасности ракетно-космической техники и объектов наземной космической инфраструктуры и др.
Эл. адрес: mironov-anik@yandex.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

**ЧУБРАЕВА
Лидия
Игоревна**



Профессор, декан факультета интеллектуальных систем управления и нанотехнологий, заведующая кафедрой информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, член-корреспондент РАН, академик Академии электротехнических наук РФ.
В 1970 году окончила Ленинградский институт авиационного приборостроения.
В 1992 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 180 научных публикаций, четырех монографий, 15 изобретений.
Область научных интересов — электромеханика, нетрадиционная электромеханика, прикладная сверхпроводимость.
Эл. адрес: kaf_32@aanet.ru

**ШИШЛАКОВ
Андрей
Владиславович**



Инженер-программист ОАО «Концерн «НПО «Аврора», Санкт-Петербург.
В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Роботы и робототехнические системы».
Область научных интересов — методы синтеза нелинейных электромеханических и электроэнергетических систем автоматического управления, в том числе со сверхпроводниковым оборудованием.
Эл. адрес: shyshlakov@yahoo.com

**ЯКИМОВ
Виктор
Леонидович**



Заместитель начальника кафедры приемных устройств и радиоавтоматики Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.
В 2000 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы космических аппаратов».
В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций.
Область научных интересов — моделирование сложных систем, методы обработки телеметрической информации, техническая диагностика, методы обработки изображений.
Эл. адрес: yakim78@yandex.ru



IV Международный форум Future of Telecom: Optical & LTE Broadband Networking

11 июня 2014г., Radisson Blu Belorusskaya

При организационной поддержке:



При поддержке:

Форум посвящен проблематике развития фиксированных и беспроводных сетей широкополосного доступа в России и за рубежом. В частности на мероприятии будет рассмотрен весь пласт вопросов, связанных с внедрением новейших технологий ШПД на сетях связи, строительством и развитием ВОЛС, мобильных сетей третьего и четвертого поколений, развитием сетевой инфраструктуры, внедрением конвергентных решений, частотным обеспечением операторской деятельности, развитием сервисов проводного и беспроводного интернета, безопасностью на сетях ШПД.

Отдельное внимание будет уделено вопросам государственной политики в сфере обеспечения доступности сетей ШПД для населения всех регионов России (в том числе в новых субъектах РФ – Республике Крым и г. Севастополь). На форуме будут рассмотрены наиболее интересные кейсы, реализованные российскими провайдерами услуг ШПД, и многое другое.

Программа форума ориентирована на топ-менеджмент и руководителей компаний и подразделений. В этот раз на мероприятии планируется участие более 200 делегатов, более 30 представителей деловых и отраслевых СМИ.

Среди докладчиков:

Состав докладчиков может измениться по независящим от организаторов причинам



Александр Крупнов,
президент,
Инфокоммуникационный
Союз



Юрий Аммосов,
руководитель Дирекции
по инновациям,
Аналитический центр при
Правительстве РФ



Ольга Макарова,
директор департамента
интернет и
каналных ресурсов,
МТС



Виталий Шуб,
советник президента,
ТТК



Гульнара Хасьянова,
исполнительный
директор,
Союз LTE



Эльдар Разров,
независимый эксперт



Валерий Тихвинский,
заместитель генерального
директора по
инновационным
технологиям,
АйКомИнвест



Сергей Пехтерев,
генеральный директор,
Сетьтелеком



Юрий Домбровский,
президент,
Ассоциация региональных
операторов связи России



Мария Джушкинова,
руководитель группы
оформления ВОЛС,
МТС



Дмитрий Кулаковский,
директор по маркетингу
и развитию бизнеса,
МГТС



Сергей Алябев,
заместитель директора
департамента
инженерно-технологического
обеспечения,
РТРС

ТВ-партнер:



Образовательный
партнер:



Официальный
информационный партнер:



Продюсер форума **Леонид Волчанинов**
Тел.: +7 (495) 698-63-85
Моб.: +7 (910) 414-78-16
lv@connectica-lab.ru

По вопросам участия **Оксана Бережная**
обращайтесь: Тел.: +7 (495) 698-63-85
Моб.: +7 (926) 427-51-81
ob@connectica-lab.ru

www.telco-forum.com

EXPONET

ВЫСТАВКИ РОССИИ, СНГ и МИРА



**Проект
EXPONET.RU
является ведущим
выставочным
порталом в рунете.**

На его страницах информация о более 4000 предстоящих торгово-промышленных выставках с подробным описанием, условиями участия, более 2000 каталогов участников всевозможных выставок.

Прямо на сайте можно:

- Оформить участие в выставке
- Заказать строительство стенда
- Взять в аренду выставочное оборудование
- Разместить рекламу в СМИ
- Заказать рекламные услуги
- Получить приглашение для посещения выставки

Партнерами портала являются более 230 крупнейших фирм - организаторы выставок из более чем сорока городов России и СНГ, изготовители выставочного оборудования, производители бизнес-сувениров, гостиничные и туристические операторы, рекламные и консалтинговые фирмы, типографии и издательства.

ISSN 1684-8853



www.exponet.ru