

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА**
№ 1, 2016

**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE**
No 1, 2016



**Международный
Научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Федор Иванович Пантелеенко

Редакционная коллегия

В. Ф. Голиков (зам. главного редактора),
В. А. Богущ, Т. В. Борботько, Р. Венерстен (Швеция),
В. А. Ганэ, Н. Н. Гурский, Ю. М. Захарик, Э. Г. Лазаревич,
А. А. Лобаты, В. А. Мищенко, А. Патрин (Польша),
И. А. Сатиков, В. В. Старовойтов, П. П. Урбанович,
А. Н. Чичко, В. Б. Байбурун (Россия),
Е. И. Никифорович (Украина)

**International
Science and Technique Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National Technical
University

Editor-in-chief

Phyodor Panteleenko

Editorial board

V. Golikov (deputy editor-in-chief),
V. Bogush, T. Borbotko, P. Venersten (Sweden),
V. Ganeh, N. Gurskiy, J. Zaharik, E. Lazarevich,
A. Lobaty, V. Mishchenko, A. Patrin (Poland),
I. Satikov, V. Starovoytov, P. Urbanovich,
A. Chichko, V. Bayburin (Russia),
E. Nikiforovich (Ukraine)

Журнал включен в "Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований".

Журнал включен в международные каталоги и базы данных:

- ❖ Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
- ❖ Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
- ❖ Электронно-библиотечная система (ЭБС) издательства Лань
- ❖ DOAJ <https://doaj.org/toc/2414-0481>
- ❖ Google Scholar
- ❖ Киберленинка

- ❖ EBSCO
- ❖ BASE Search
- ❖ OpenAIRE
- ❖ WorldCat
- ❖ OpenDOAR
- ❖ ROAR

Содержание

Contents

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Золотой А. А., Новиков Д. И.

Сопоставление космических изображений поверх-
ности Земли с эталоном цифровой карты местности 4

**Дубровская В. А., Соловьева Т. Н.,
Переварюха А. Ю.**

Неустойчивое критическое равновесие в динамике
сложно структурированной популяции осетровых
рыб 11

Осауленко И. А.

Информационно-аналитическая модель формиро-
вания портфеля региональных проектов 23

Малкин В. А.

Решение двухточечной краевой задачи методом не-
градиентного случайного поиска 29

Лобаты А. А., Яцына Ю. Ф., Арефьев Н. Н.

Оптимальное оценивание случайного процесса по
критерию максимума апостериорной вероятности 35

SYSTEM ANALYSIS

Zalatoi Andrei, Novikau Dmitry

Comparison of space images of a surface of Earth to
a standard of a digital district map 4

**Dubrovskaya V. A., Solovieva T. N.,
Perevaryukha A. Yu.**

Unstable critical equilibrium in the dynamics of comp-
lex structured population of sturgeon 11

Osaulenko I. A.

Informational-analytic model of regional project port-
folio forming 23

Malkin V. A.

Two-point boundary problem solution by non-gradient
random search method 29

Lobaty A. A., Yacina Y. F., Arefyev N. N.

Optimal estimation of random processes on the crite-
rion of maximum aposteriori probability 35

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**Пинг Пей, Петренко Ю. Н.**

Проект беспроводной ячеистой сети для Индустриального парка “Великий камень” 43

Михайлов В. Г.

Исследование, аппроксимация характеристик подушек сидений и их влияние на вибронагруженность водителя ТС 51

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**Золотарев С. А., Мирзаванд М. А.**

Томографическая маммография и томосинтез с использованием OPENGL 61

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ**Соколов А. В., Жданов О. Н., Айвазян О. А.**

Методы синтеза алгебраической нормальной формы функций многозначной логики 69

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ**Макарич М. В.**

Реализация обучающей компьютерной программы на основе лингвистической базы данных автоматической системы обработки текста 78

MANAGEMENT OF TECHNICAL OBJECTS**Ping Pei, Petrenko Yu. N.**

Mesh network development project in great stone industry park 43

Mikhailov V.

Research, approximation of characteristics of pillows of seats and influence on vibration of driver of truck 51

DATA PROCESSING AND DECISION-MAKING**Zolotarev S. A., Mirzavand M. A.**

Tomographic mammography and tomosynthesis using OPENGL 61

INFORMATION SECURITY**Sokolov A. V., Zhdanov O. N., Ayvazian O. A.**

Synthesis methods of algebraic normal form of many-valued logic functions 69

INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATION**Makarych M. V.**

Realization of training programme on the basis of linguistic database for automatic texts processing system 78

Ответственный секретарь редакции

Лакин В. И.

Адрес редакцииул. Франциска Скорины 25/3, Минск,
220114,

Республика Беларусь

Тел. +375 17 267-66-84

e-mail: CA_PI@bntu.by

Executive secretary of the editorial board

V. Lakin

Editorial board address25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus

Tel. +375 17 267-66-84

e-mail: CA_PI@bntu.by

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации
№ 1540 от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь

Подписано в печать 22.03.2016. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Ризография. Усл. печ. л. 7,67. Уч.-изд. л. 3,00. Тираж 150 экз. Заказ 960.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013

© Белорусский национальный технический университет

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

УДК 629.78:528.854.4

А. А. ЗОЛОТОЙ, Д. И. НОВИКОВ

СОПОСТАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ С ЭТАЛОНОМ ЦИФРОВОЙ КАРТЫ МЕСТНОСТИ

*Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие
«Геоинформационные системы» НАН Беларуси (УП «Геоинформационные системы»)*

В статье рассматриваются проблемы сопоставления космических снимков с эталоном цифровой карты местности для задач актуализации картографической информации и мониторинга территорий. Целью является разработка методики автоматизированного выявления совокупных изменений на космических снимках относительно эталона цифровой карты местности в опционально задаваемом окне анализа. Исследования и разработка методики производились путём математического моделирования задачи в среде MATLAB. В статье приводятся последние результаты исследований в виде разработанной методики выявления совокупных изменений объектного состава на ортотрансформированных и геопривязанных космических снимках поверхности Земли относительно эталона векторной цифровой карты местности. Показаны основные результаты сопоставления космических снимков с цифровой картой местности, полученные при испытаниях разрабатываемой методики. Применение данной методики уже сейчас позволяет автоматизировать процесс и сократить время тематического анализа космической информации, получаемой средствами дистанционного зондирования Земли для топографического картографирования.

Ключевые слова: методика, дистанционное зондирование Земли, космический снимок, растровое изображение, цифровая карта местности, векторная графика, сегмент, изменение объектного состава, метрика, близость, схожесть, эталон.

Решения широкого круга практических задач связанных с актуализацией картографической информации и мониторингом местности в настоящее время строятся на сопоставлении цифровых изображений поверхностей территорий, полученных средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с цифровой картой местности (ЦКМ) [1]. Сложность сопоставления космических снимков и ЦКМ обусловлена различной формой их представления. Космические снимки это растровые изображения, а ЦКМ представляются в векторной форме с отрезками линий (далее сегментами) в качестве объектов векторной графики [2–4].

Авторами предлагается методика выявления совокупных изменений объектного состава на ортотрансформированных и геопривязанных космических снимках поверхности Земли относительно эталона ЦКМ. Суть предлагаемой методики заключается в сопоставлении по степеням близости и схожести гештальта [5] сегментов, выделенных из космиче-

ского снимка с сегментами-центроидами (далее центроидами), полученными из ЦКМ. Под схожестью гештальта двух сегментов в статье понимается степень пространственно-наглядного восприятия их возможной принадлежности к одним и тем же пространственным представлениям или объектам.

Блок-схема основных этапов предлагаемой методики сопоставления космических снимков и цифровой карты местности приведена на рис. 1.

В блоке 1 выполняется загрузка изображения космического снимка, векторных слоёв ЦКМ в геодезических координатах и матрицы геопривязки космического снимка в виде RPC-коэффициентов (Rational Polynomial Coefficients) [6]. В блоке 2 осуществляется векторизация космического снимка с использованием любых, доступных канонических средств, например, алгоритмы на основе методов Собеля, Лапласа, Робертса, Превитта, Канни [7–9]. На рис. 2, а для фрагмента панхроматического

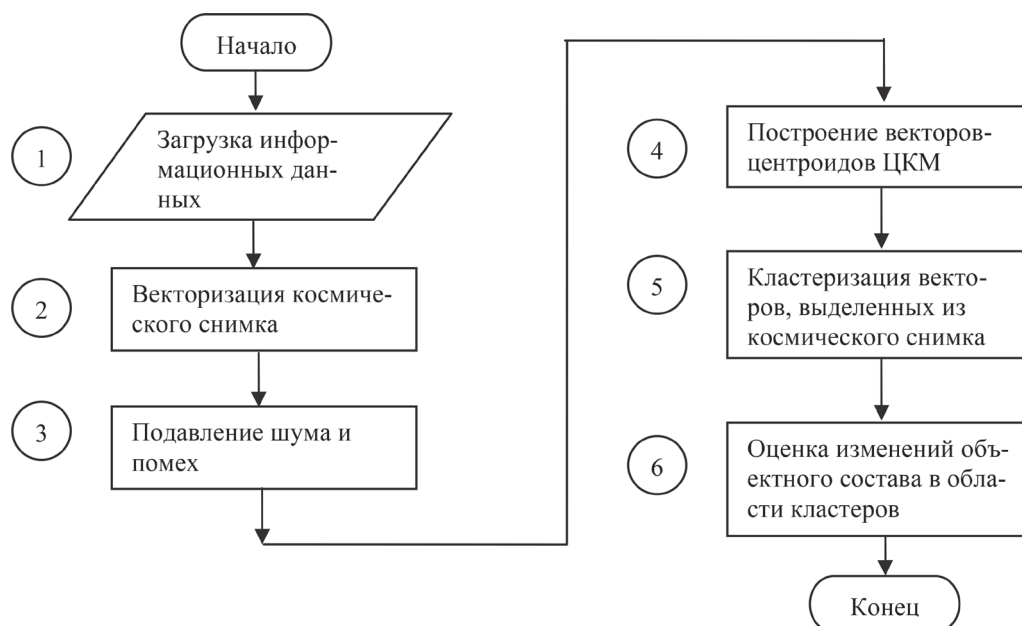


Рис. 1. Блок-схема методики оценки совокупных изменений объектного состава на космических снимках поверхности Земли

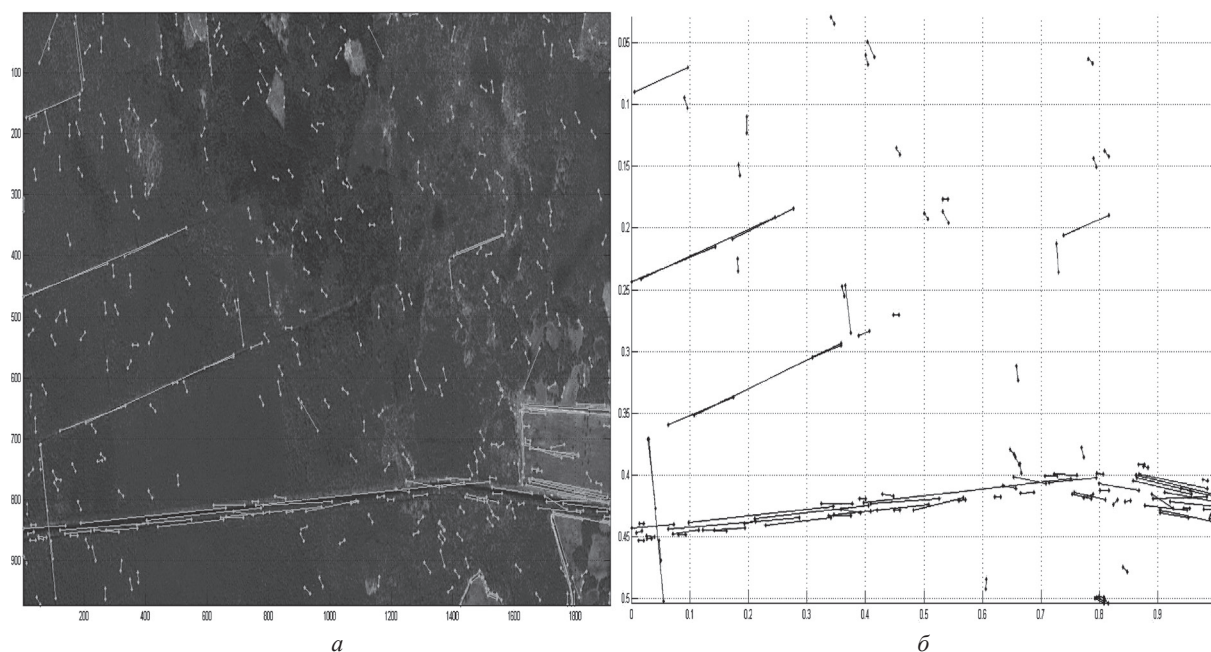


Рис. 2. Результат векторизации фрагмента космического снимка с подавлением шумов и помех

космического снимка, полученного с разрешением 2,1 м, показаны результаты векторизации, настроенной на определение протяжённых объектов, таких как дороги, реки, мелиоративные каналы и т. п.

В блоке 3 на рис. 1 устанавливается вероятная принадлежность выделенных из растрового изображения сегментов целевым пространственным объектам и производится подавление шума и помех. Для этого сегменты разделяются на три группы по длине: длинные, средние и ко-

роткие. В каждой группе, отдельные сегменты заменяются более протяжёнными сегментами. Для этого каждой группе назначаются индивидуальные значения критериев объединения сегментов. В результате формируется векторный слой, описывающий выделенные из космического снимка пространственные объекты.

На рис. 2, б показаны результаты подавления шумов и помех среди сегментов, выделенных из фрагмента космического снимка, представленного на рис. 2, а.

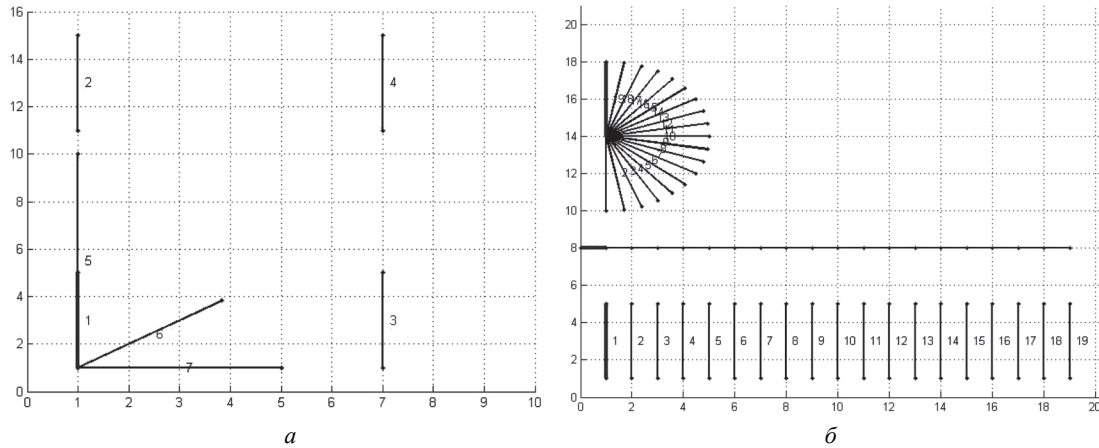


Рис. 3. Типовые сегменты для демонстрации метрик близости и схожести гештальта

В блоке 4 на рис. 1 из сегментов ЦКМ строятся центроиды. По своей природе ЦКМ часто обладают погрешностями и неточностями. Поэтому выделенные из них линейные части объектов в действительности могут представляться не одним, а группой последовательно расположенных сегментов, которые могут отличаться углами и иметь разрывы. Центроиды получаются сокращением подробности описания пространственных объектов ЦКМ алгоритмом Ramer-Douglas-Peucker [10].

В блоке 5 на рис. 1 выполняется распределение сегментов, выделенных из изображения космического снимка, среди центроидов ЦКМ как центров соответствующих кластеров. При этом сегменты проецируются в пространство единичного квадрата. Распределение сегментов среди кластеров производится на основании выбранных метрик близости и схожести гештальта сегментов как компонент целевой функции отбора.

Степень близости двух сегментов находится в виде кратчайшего расстояния между их частями по метрике Чебышева. Расстояние D_1 по метрике близости от сегмента A с координатами конечных точек $P_1^A(x_1^A, y_1^A)$, $P_2^A(x_2^A, y_2^A)$ до сегмента B с координатами конечных точек $P_1^B(x_1^B, y_1^B)$, $P_2^B(x_2^B, y_2^B)$ рассчитывается по формуле:

$$D_1 = \begin{cases} \min\{d_1, d_2, d_3, d_4, n_1^A, n_2^A, n_1^B, n_2^B\}; \\ 0, \text{ если } A \cap B, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} d_1 &= \|P_1^A - P_1^B\|_2; \quad d_2 = \|P_1^A - P_2^B\|_2; \\ d_3 &= \|P_2^A - P_1^B\|_2; \quad d_4 = \|P_2^A - P_2^B\|_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_1^A &= \|P_1^A - O_1^B\|_2; \quad n_2^A = \|P_2^A - O_2^B\|_2; \\ n_2^B &= \|P_2^B - O_2^A\|_2; \quad n_1^B = \|P_1^B - O_1^A\|_2, \end{aligned}$$

$O_1^A(x_1^A, y_1^A)$, $O_2^A(x_2^A, y_2^A)$, $O_1^B(x_1^B, y_1^B)$, $O_2^B(x_2^B, y_2^B)$ – основания перпендикуляров, опущенных соответственно из точек P_1^A , P_2^A , P_1^B , P_2^B на прямые, которым принадлежат сегменты A и B .

Расстояние D_2 по метрике схожести гештальта от сегмента A до сегмента B рассчитывается по формуле:

$$D_2 = \frac{\max\{d_1 + d_2, d_3 + d_4\}}{2(1 - |\sin \phi| + 10^{-6})} + 2 \frac{|L_A - L_B|}{L_A + L_B}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} d_1 &= \left(\frac{a_B x_1^A + b_B y_1^A + c_B}{\sqrt{L_A}} \right)^2; \\ d_2 &= \left(\frac{a_B x_2^A + b_B y_2^A + c_B}{\sqrt{L_A}} \right)^2; \\ d_3 &= \left(\frac{a_A x_1^B + b_A y_1^B + c_A}{\sqrt{L_B}} \right)^2; \\ d_4 &= \left(\frac{a_A x_2^B + b_A y_2^B + c_A}{\sqrt{L_B}} \right)^2; \end{aligned}$$

$a_A, b_A, c_A, a_B, b_B, c_B$ – коэффициенты уравнений прямых, которым принадлежат сегменты A и B соответственно; L_A, L_B – длины сегментов A и B .

Поведение метрик близости и схожести гештальта сегментов демонстрируется на сопоставлении типовых сегментов, имеющих различные размеры и расположение относительно

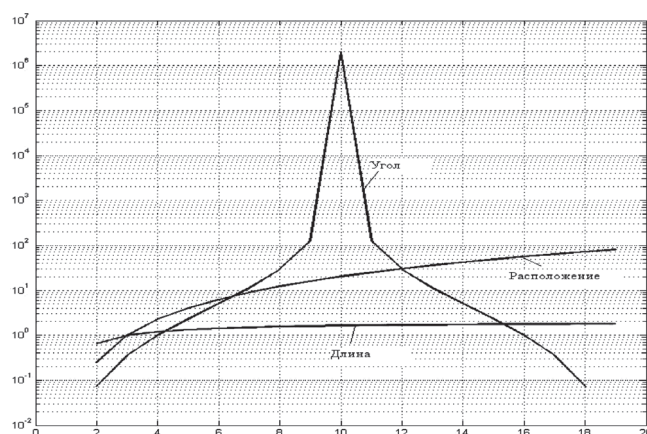


Рис. 4. Зависимости расстояния, вычисленного по метрике схожести гештальта сегментов от изменения расположения, длины и взаимного угла

некоторых базовых сегментов, обозначенных жирной линией (рис. 3).

Значения расстояний по метрикам для сегментов на рис. 3, а в пространстве единичного квадрата, приведены в таблице. Из таблицы видна инвариантность расстояния, вычисленного по метрике схожести гештальта к взаимному смещению сегментов вдоль прямой, коллинеарной обоим сегментам.

Расстояния, вычисленные по метрикам близости и схожести гештальта сегментов на рис. 3, а

Сегмент	1	2	3	4	5	6	7
Близость	0,00	6,00	6,00	8,49	0,00	0,00	0,00
Схож. гешт.	0,00	0,00	9,00	9,00	0,77	3,41	2,00·10 ⁶

На рис. 4 показаны зависимости расстояний вычисленных по метрике схожести гештальта сегментов (рис. 3, б) от изменения расположения, длины и взаимного угла между сегментами.

По горизонтали на рис. 4 отложены номера сегментов от 1 до 19 приведенных в каждой из трёх групп на рис. 3, б. Сегменты первой группы имеют относительно базового вектора (который выделен жирным цветом) разные взаимные углы при прочих равных условиях. Во второй группе на рис. 3б сегменты отличаются длиной, в третьей – расположением.

Результаты сопоставления космического снимка и ЦКМ, приведены на рис. 5. Оценка совокупных изменений объектного состава космического снимка в области кластеров (блок 6 на рис. 1) выполнялась в следующей последовательности.

Среди сегментов, выделенных из космического снимка и сгруппированных в кластерах,

образованных центроидами ЦКМ, строятся вторые центроиды в каждом кластере (далее центроиды снимка). Центроиды снимка описывают линейные части пространственных объектов, которые предположительно находятся на снимке в областях кластеров. Вычисляются взвешенные значения метрики схожести гештальта центроидов снимка и центроидов ЦКМ, которые отражают изменения объектного состава снимка относительно ЦКМ в области кластеров.

Значение весового коэффициента, уменьшающего геометрическую длину проекции сегмента, в нормированном пространстве единичного квадрата вычисляется по формуле:

$$k_L = 1 - \frac{d}{0,04}, \quad (3)$$

где k_L – коэффициент уменьшения геометрической длины проекции сегмента на направление центроида снимка; d – расстояние от сегмента до его проекции, вычисленное по метрике близости.

Степени совокупных изменений объектного состава космического снимка относительно ЦКМ в области кластеров N нормируется в диапазон от 0 до 1, и оцениваются по формуле:

$$N = \frac{\sum k_L L_p}{(n-1)L_c}, \quad (4)$$

где k_L – весовой коэффициент уменьшения геометрической длины проекции сегмента на направление центроида снимка; L_p – геометрические длины проекций сегментов на направление центроида снимка в пространстве единичного квадрата; n – число проекций; L_c – геометрические длины центроидов снимка.

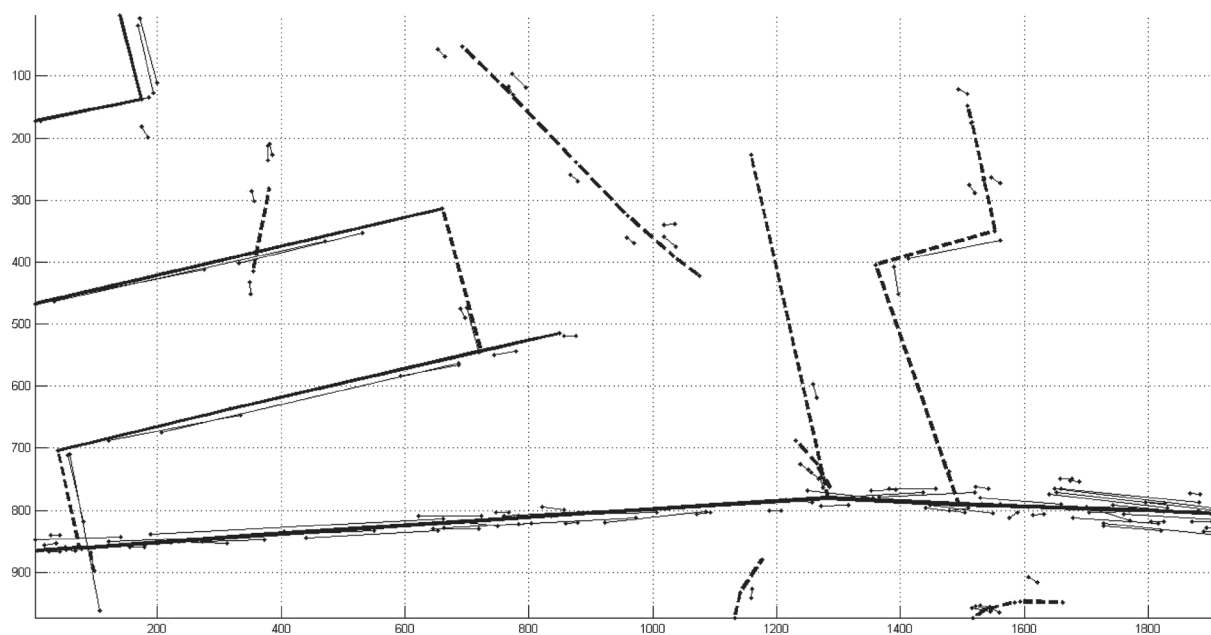


Рис. 5. Результаты выявления совокупных изменений объектного состава на фрагменте космического снимка относительно ЦКМ

Сегменты на рис. 5 спроецированы в пиксельное координатное пространство космического снимка. Сегменты, выделенные из космического снимка, обозначены на рис. 5 тонкими сплошными линиями. Толстыми сплошными линиями обозначены сегменты ЦКМ, в области которых на космическом снимке нет изменений объектного состава. Толстыми штриховыми линиями выделены сегменты ЦКМ, в области которых на космическом снимке есть изменения объектного состава. При этом было принято пороговое значение $N = 0,7$.

По результатам работы алгоритма внимание оператора привлекается к участкам космического снимка в областях сегментов ЦКМ, выделенных на рис. 5 толстыми штриховыми линиями.

Разработка и проверка алгоритма, реализующего предлагаемую в статье методику, производилась авторами в среде MATLAB по данным более 120 космических снимков, из ресурсов Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли (БКСДЗ). В настоящее время, космические снимки БКСДЗ, предоставляются Белорусским космическим аппаратом «БКА» и российским космическим аппаратом «Канопус-В № 1», входящими в состав российско-белорусской орбитальной группировки и имеющими схожие ха-

рактеристики. Слои ЦКМ были взяты из открытых интернет-источников. К настоящему времени удалось добиться гарантированного выявления в среднем до 71 % изменений на космических снимках, реально подтвержденных относительно ЦКМ.

Заключение

Предложена методика сопоставления космических снимков поверхности Земли и ЦКМ, позволяющий выявлять совокупные изменения объектного состава на ортотрансформированных и геопривязанных космических снимках относительно эталона ЦКМ. Областью применения разработанной методики являются задачи актуализации карт и мониторинга местности. Панхроматические космические снимки разрешением от 2 до 4 м могут использоваться для работы с ЦКМ масштабом до 1 : 25 000 при обновлении тематических карт и до 1 : 50 000 при обновлении государственных топографических и навигационных карт. Мультиспектральные космические снимки разрешением 10,5–11 м целесообразно использовать для работы с ЦКМ масштабом не более 1:100 000. Объективность выявления совокупных изменений объектного состава, определяется точностью геодезической привязки изображений космических снимков к ЦКМ.

Литература

1. **Замятин А. В., Марков Н. Г.** Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. – М.: Физматлит, 2007. – 176 с.
2. **Пыт'ев Ю. П., Чуличков А. И.** Методы морфологического анализа изображений. – М.: Физматлит, 2010. – 336 с.
3. **Huang C. P.** An Integrated Edge Detection Method Using Mathematical Morphology / C. P. Huang, R. Z. Wang // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2006. – Vol. 16, № 3. – P. 406–412.
4. Scalable Vector Graphics // The Free Encyclopedia [An electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Scalable_Vector_Graphics. – Date of access: 10.12.2015.
5. Гештальт // Филосовская энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/2073/ГЕШТАЛЬТ. – Дата доступа: 10.12.2015.
6. Ортокоррекция космических снимков с использованием RPC // Географические информационные системы и дистанционное зондирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/ortho-rpc.html>. – Дата доступа: 10.12.2015.
7. **Гонсалес Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1070 с.
8. **Анисимов Б. В.** Распознавание и цифровая обработка изображений. – М.: Высш. школа, 1983. – 295с.
9. **Canny John.** A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986, Vol. Pami-8, No. 6, P. 679–698.
10. Ramer-Douglas-Peucker algorithm // The Free Encyclopedia [An electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Ramer-Douglas-Peucker_algorithm. – Date of access: 10.12.2015.

References

1. **Zamyatin A. V., Markov N. G.** The analysis of dynamics of an earth surface according to remote sensing of Earth. – M.: Fizmatlit, 2007. – 176 p.
2. **Pyt'ev Y. P., Chulichkov A. I.** Methods of the morphological analysis of images. – M.: Fizmatlit, 2010. – 336 p.
3. **Huang C. P.** An Integrated Edge Detection Method Using Mathematical Morphology / C. P. Huang, R. Z. Wang // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2006. – Vol. 16, № 3. – P. 406–412.
4. Scalable Vector Graphics // The Free Encyclopedia [An electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Scalable_Vector_Graphics. – Date of access: 10.12.2015.
5. Gestalt // The Filosovsky Encyclopedia [An electronic resource]. – Access mode: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/2073/ГЕШТАЛЬТ. – Date of access: 10.12.2015.
6. Orthocorrection of space pictures with use of RPC // Geographical information systems and remote sensing [An electronic resource]. – Access mode: <http://gis-lab.info/qa/ortho-rpc.html>. – Date of access: 10.12.2015.
7. **Gonsales R.** Digital image processing / R. Gonsales, R. Vuds. – M.: Technosphaera, 2005. – 1070 p.
8. **Anisimov B. V.** Recognition and digital image processing. – M.: Vysshaya Shkola, 1983. – 295 p.
9. **Canny John.** A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986, Vol. Pami-8, No. 6, P. 679–698.
10. Ramer-Douglas-Peucker algorithm // The Free Encyclopedia [An electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Ramer-Douglas-Peucker_algorithm. – Date of access: 10.12.2015.

UDC 629.78:528.854.4

*Zalatoi Andrei, Novikau Dmitry***COMPARISON OF SPACE IMAGES OF A SURFACE OF EARTH
TO A STANDARD OF A DIGITAL DISTRICT MAP**

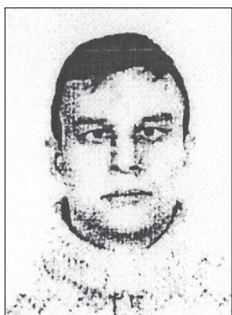
In article problems of comparison of space pictures with a standard of a digital district map for tasks of updating of cartographical information and monitoring of the territories are considered. The purpose is development of a technique of automated detection of cumulative changes in space pictures concerning a standard of a digital district map in optionally the set analysis window. Researches and development of a technique were made by mathematical simulation of the task in the environment of MATLAB. The last results of researches in the form of the developed technique of detection of cumulative changes of object composition in the orthotransformed and geobound space pictures of the Earth's surface concerning a standard of a vectorial digital district map are given in article. The main results of comparison of space pictures to a digital district map received in case of tests of the developed technique are shown. Application of this technique allows to automate process already now and to reduce time of the subject analysis of the space information obtained by Earth remote-sensing instruments for topographical mapping.

Keywords: technique, remote sensing of Earth, space picture, bitmap image, digital district map, vector graphics, segment, change of object composition, metrics, closeness, similarity, standard.



ЗОЛОТОЙ Андрей Анатольевич – к. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник УП «Геоинформационные системы», e-mail: andrewgis@tut.by

ZALATOI Andrei – Candidate of Science (Engineering), Associate professor, Leading researcher at UE Geoinformation Systems



НОВИКОВ Дмитрий Игоревич – ведущий инженер-программист УП «Геоинформационные системы», e-mail: ndidima@tut.by

NOVIKAU Dmitry – Leading software engineer at UE Geoinformation Systems

Работа выполнена в рамках программы научных исследований Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли (Мониторинг-СГ)» по заданию мероприятия 2.5 «Создать экспериментальный образец программных средств тематической обработки для аппаратно-программного комплекса распределенной системы анализа и мониторинга космической информации с использованием блочно-параллельной обработки данных в условиях высокопроизводительных систем» № г. р. 20141528.

УДК 519.6, 573.7

В. А. ДУБРОВСКАЯ, Т. Н. СОЛОВЬЕВА, А. Ю. ПЕРЕВАРЮХА

НЕУСТОЙЧИВОЕ КРИТИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ В ДИНАМИКЕ СЛОЖНО-СТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОПУЛЯЦИИ ОСЕТРОВЫХ РЫБ

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН)

В статье рассматриваются последствия существования особых состояний, определяющих стремительный характер дальнейшего развития популяционных процессов. Вероятна связь подобных критических состояний с оптимальной численностью субпопуляционных объединений, образующихся при эволюционной адаптации вида с ограниченным доступом к ресурсам для размножения. Предложена модель популяционного процесса, формализующая влияние неравномерной скорости роста у двух различных репродуктивных групп на смертность мигрирующих рыб в ювенольный период развития. В вычислительной среде исследована гибридная система, описывающая последствия существования для популяции ситуации непропорционального снижения мигрирующей молодежи в реке, установленной нами по данным стремительного сокращения нереста волжского осетра. Для эксплуатируемой популяции пороговый эффект после неустойчивого равновесия с минимально необходимой для благополучного размножения вида численностью служит отсчетом реализации «коллапса». Известен ряд примеров подобного особого сценария длительной деградации наиболее ценной для промысла репродуктивной группы. Помимо явного резкого сокращения эффективности воспроизводства, пороговый эффект при коллапсе отражается в неблагоприятном проявлении доминировавшего ранее эволюционного тренда для выживаемости отдельных форм жизненного цикла рыб в условиях реорганизации промысла. Интересно, что для волжской севрюги наблюдается иная форма нелинейности по сведениям об эффективности нереста.

Ключевые слова: модели популяций, репродуктивный цикл, критические состояния, сценарий коллапса промысловых запасов

Введение

На импровизированном филогенетическом древе методик построения динамических моделей выделяются три крупные ветви. Исторически первое направление формализует взаимодействие конкурирующих популяций на основе систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Их расширением являются системы с введением отклоняющегося по времени аргумента $N(t - \tau)$. Биосистема в подобных моделях помимо экологических характеристик обладает приписанными ей математическими свойствами: эквивалентности и подобия, т. е. любая малая часть популяции или биомассы сохраняет целиком все присущие свойства.

Третью ветвь дискретных моделей, ориентированную на определение механизмов внутренней регуляции численности при ограничивающем влиянии выделенных внешних фак-

торов, обозначим как моделирование жизненного цикла. Детализированные модели развития будут интересны, если возникает проблема разделения популяции в ареале по размерно-возрастным, гендерным, иммунологическим, расовым и прочим существенным признакам. Некоторые признаки служат значимой эволюционной адаптацией субпопуляций на этапе видообразования, но не всегда могут гарантировать успешность группы по отношению к антропогенному вмешательству. Вмешательство не всегда носит априори пагубный для вида характер, как например организация искусственного воспроизводства, но нарушает естественную частоту встречаемости аллельных генов.

Регулярно возникают важные непредвиденные специалистами явления. Практическая организация рационального использования биоресурсов на основе математического аппарата

регрессионных моделей при рассмотрении хода развития ситуаций классифицируемых как «коллапсы запасов» оценивается как труднореализуемая. Восстановление рыбных запасов после их истощения происходит не так быстро, как ожидалось. Темпы не согласуются с рассчитанными ранее популяционным характеристикам, будь то осетровые Волги, нильский окунь оз. Виктория, североатлантическая треска Канады [1] или анчоус в зоне перуанского апвеллинга.

Падение вылова констатировалось совершенно неожиданно для экспертов. В современной англоязычной литературе утвердился астрономический термин «collapse» изначально означавший гравитационное схлопывание объекта и отличный по смыслу от употреблявшегося ранее «overfishing» – перелов. Подобные специфические варианты развития процессов отличаются резкой сменой нестационарных режимов и требуют для прогностического описания совершенствования математического аппарата. Среди обсуждавшихся вариантов мы могли бы выделить непрерывно-событийное (гибридное) расширение вычислительного базиса как наиболее биологически обоснованное.

Вычерпывание истощенных официальным ловом остатков осетровых Каспийского моря и продолжение нелегального их истребления сегодня можно объяснить социальным неблагополучием региона. Однако, коллапсы рыбных запасов отмечались не раз в странах со стабильной экономической ситуацией, развитым экологическим сознанием общества, действующей научно-обоснованной системой учета и регулирования допустимого вылова. В статье нами предлагается модель для объяснения порогового эффекта в скорости восполнения запасов, установленного по анализу данных наблюдений о воспроизводстве волжского осетра, имеющего две не полностью изолированные репродуктивные группы.

1. Нелинейная реализация репродуктивной активности

Один из факторов развития коллапса – завышение промразведкой реальной величины запасов. В случае с запоздало остановленным в 2010 г. промыслом осетровых рыб Каспия важный нюанс в том, что не были оправданы ожидания от рыболовных мероприятий. Спе-

циалисты ориентировались на существенно завышенные показатели эффективности искусственного выпуска заводской молоди трех видов. Вероятно, скрытые негативные факторы кроются в эволюционно сложившемся жизненном цикле анадромных рыб.

Получить описание пороговых состояний реалистично в рамках развитой в промысловой ихтиологии системной концепции факторов зависимой от плотности выживаемости [2]. Анализ интерпретации выводов из полученных ранее моделей показывает, что теория формирования запасов рыб уже при первоначальном своём обосновании предполагала неочевидную специалистам экологам нелинейную динамику. Проблема казалась только в правильном определении ее формы по известным данным наблюдений. Для получения кривых воспроизводства ожидаемой куполообразной формы предлагались довольно сложные преобразования исходных данных наблюдений с использованием логарифмических регрессий по специально вводимым индексам родительского запаса и другие замысловатые построения.

Пример попытки построения кривой воспроизводства Рикером по детерминированным данным (рис. 1) интересен с точки зрения хаотической динамики [3]. По оси абсцисс – запас, по ординат – пополнение, оставлены даты, соответствующие значениям на графике. Точки в плоскости запас×пополнение лежат точно по стрелкам траектории, проведенным нами от биссектрисы координатного угла геометрического места стационарных точек (диаграмма «лестница Ламерея»), так как тут анализировались данные о численности тихоокеанской горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* с двухлетним жизненным циклом.

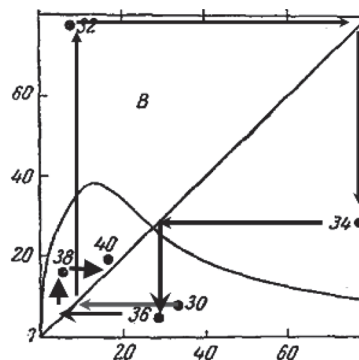


Рис. 1. Аппроксимация аperiодических данных в [3] кривой воспроизводства

Колебания численности горбуши по имеющимся данным, начиная с точки 1930 г. в строгом смысле апериодические. Однако нарисованная им аппроксимационная кривая обладает единственной стационарной точкой пересечения с биссектрисой. Точка по приведенному графику должна быть устойчивой для системы под действием итераций, так как наклон касательной к кривой в точке пересечения явно меньше $\pi/4$. Колебаний с большой амплитудой проведенная кривая предсказывать не может, так как точки должны были бы группироваться в некотором ограниченном радиусе от биссектрисы координатного угла или демонстрировать по крайней мере направление стягивания. Можно предположить, что для горбуши характерно семейство параметрически зависимых кривых с одним максимумом и точкой перегиба, но точка 34 отображается прямо на пересечении с проведенной Рикером биссектрисой (местом стационарных точек). Далее траектория резко отклоняется. Наиболее вероятно, что для данной системы не существует устойчивых стационарных точек, и в том числе принадлежащих циклам конечного периода.

Возникла теория о различных факторах регуляции смертности и оптимальном соотношении плотности производителей на нерестилищах. Теория помогала объяснить нестабильный характер воспроизводства облавливаемых популяций рыб, прежде всего мигрирующих для размножения в реки. Отсутствие строгой пропорциональной зависимости между нерестовым запасом и сезонным пополнением часто ставила в тупик экономику рыбного промысла. Канадский ихтиолог У. Е. Рикер, рассматривая причины уменьшения пополнения при возрастании нерестового стада, предложил теоретическую концепцию о существовании зависимости запаса и пополнения. Тогда в ихтиологии доминировали представления о том, что в разреженной популяции резко улучшаются индивидуальные показатели роста. Как следует из гипотетической кривой на рис. 1. считалось, что воспроизводство способно стремительно возрастать по дуге гиперболы выхода на пологое плато. Потому Рикер в [3] предложил простую, как казалось, формулу для вычисления численности пополнения $R = f(S)$ от исходного запаса:

$$f(S) = aS \exp(-bS), \quad (1)$$

где S – от «stock» величина нерестового запаса, b – коэффициент, отражающий величину, обратную количеству выметанной икры при котором число выжившей молоди максимально, соответственно $b \ll 1$; a – репродуктивная характеристика. Для (1) имеем куполообразную кривую воспроизводства с единственным нетривиальным пересечением с биссектрисой координатного угла $R = S$ и единственной точкой перегиба.

Позднее Рикер несколько пересмотрел исходные базовые гипотезы о роли каннибализма в гибели икры лососевых и предположил, что кривая воспроизводства способна иметь более одного максимума. В частности он сделал вывод о невозможности поддерживать максимально допустимые уловы несколько лет подряд и о важных для долговременной эксплуатации популяции следствиях ступенчатой зависимости [4]. В работе [5] описан эффект, названный им «лезвие ножа» для очень резкого перепада в эффективности восполнения, но многочисленные работы по оптимизации промысла продолжали брать (1) как основополагающую форму при расчете промыслового возврата.

Помимо удобства расчета оптимального вылова, в виде отсечения заходящего на нерест излишка, при применении модели (1) возникает ряд сложностей. При увеличении количества отложенной икры выживаемость молоди будет стремиться к нулю. Свойство противоречит наблюдениям над аквариумными популяциями, где пополнение уменьшается до $Q > 0 = \text{const}$. Для компьютерного моделирования сообществ гидробионтов (1) часто использовалась как кусочно-гладкая. При превышении заданного критического количества $S > S_c$ количество выжившей молоди директивно устанавливали константой Q .

При низких численностях производителей (1) предсказывает увеличение эффективности воспроизводства. При стремящемся к нулю количестве отложенной икры, выживаемость пополнения стремится к предельному значению выживаемости:

$$\frac{dR}{dS} = a \exp(-bS)(1 - bS),$$

$$\lim_{S \rightarrow 0} a \exp(-bS)(1 - bS) = a.$$

Подобное свойство не соответствует фундаментальным представлениям экологии о су-

существовании нижней критической численности у популяций позвоночных животных. Неоднократно подтверждалось для не заботящихся о потомстве видов, что существует оптимальный для воспроизводства диапазон численности репродуктивной части популяции. При уменьшении численности эффективность воспроизводства многих видов мигрирующих рыб с не стайным поведением должна снижаться, так как уменьшается вероятность встречи особей разного пола в пригодных для размножения участках рек.

2. Итерационные структуры хаотической динамики

В развиваемом подходе «кривая воспроизводства» это базовый (в том смысле, что должен предполагать расширение модели для учета искусственного воспроизводства запасов рыб) оператор эволюции итерационной динамической системы. Модель (1) обладает интересными свойствами, о которых не знал ее разработчик и потому не предложил для них адекватной биологической интерпретации. Аналогичными свойствами динамики обладают кривые воспроизводства Шепарда и Кушинга. Иначе движется траектория модели пополнения Бивертон-Холта. Исследование возникновения бифуркаций приводит к мысли, что математические свойства дискретных вычислительных структур лишь в незначительной части диктуются заложенными в основе моделей экологическими гипотезами. Различие гипотез не гарантирует отличий в качественном поведении траектории модели. Ведь существует всего три типа бифуркаций (прямых и обратных) и три топологических типа аттракторов для таких моделей.

Представим процесс изменения состояния популяции, определяемый зависимостью запаса и получаемого в сезоне пополнения в виде динамической системы, математического объекта, для которого можно указать набор величин: динамических переменных, характеризующих состояние системы. Значения переменных в последующий момент времени рассчитываются из текущих значений по определенному правилу (называемому оператором эволюции). Динамическая система представляется тройкой $\langle M, T, \psi \rangle$, состоящей из фазового пространства M , времени T , оператора эволюции ψ . В случае непрерывного времени

для $\forall x \in M; \forall t, s \in T$ выполняется условие: $\psi(\psi(x, t), s) = \psi(x, s + t)$. В дискретном представлении оператор эволюции задает отображение фазового пространства в себя: $\psi: M \rightarrow M$. В гибридном случае нам будут нужны две иерархии представления модельного времени: непрерывные кадры и события.

Множество $\{\psi^{(t)}(x)\}_{t \in T}$ представляется фазовой траекторией точки x . Графически эволюция диссипативной динамической системы во времени представляется движением точек в фазовом пространстве к аттрактору, подмножеству фазового пространства $A \subseteq M$ инвариантное относительно эволюции: $\psi^{(t)}(A) = A$ для всех $t \in T$ и такое, что существует окрестность U множества A , в которой для всех $y \in U$ выполняется:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi^{(t)}(y) = A.$$

Регулярные аттракторы устойчивое состояние равновесия с неподвижной точкой x^* для которой выполняется $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi^{(t)}(y) = x^*$, и устойчивый цикл, отвечающий режиму периодических автоколебаний: $\psi^t(x^*) = \psi^{t+s}(x^*)$. Множество точек, приводящих за конечное время к некоторому замкнутому множеству A , есть его область притяжения Ω_A .

Рассмотрим дискретную систему заданную функциональными итерациями $\{\psi^{(j)}\}_{j \geq 0}$. В вычислительной среде наблюдаем $R_0, R_1, R_2, \dots$ последовательность точек определенных условием $R_{j+1} = \psi(R_j), \forall j \geq 0$ описывающими перестроения системы. Фазовым пространством исследования динамики (1) примем интервал $M = [0, a(b \exp(a/e) + 1)^{-1}]$.

Качественное поведение зависит от параметра a , он является управляющим. До определенного значения a , не превышающего бифуркационное, траектория стремится к точечному аттрактору $A \equiv R^* = \ln a / b$. Первый метаморфоз поведения происходит, когда производная, вычисленная в неподвижной точке, перестаёт удовлетворять критерию устойчивости. Для (1) это происходит при выполнении условия $a > e^2$:

$$\begin{aligned} \psi'(R) &= ae^{-bR} - bRae^{-bR}, \\ \psi'(R^*) &= ae^{-b \frac{\ln a}{b}} - b \frac{\ln a}{b} ae^{-b \frac{\ln a}{b}} = \frac{a(1 - \ln a)}{e^{\ln a}} = \\ &= 1 - \ln a. \\ 1 - \ln a &= -1, \quad a = e^2. \end{aligned}$$

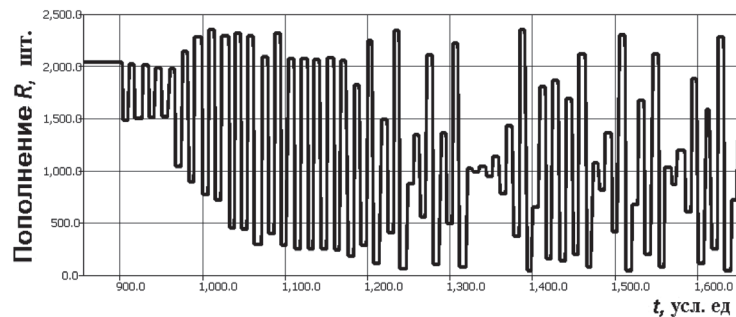


Рис. 2. Динамика (1) при увеличении репродуктивной характеристики

Параметр b не влияет на топологические характеристики фазового портрета. Динамическая система стремится в устойчивое циклическое состояние с периодом 2: глобальный аттрактор, состоящий из двух периодических точек. Факт, что $x_{n+1} = ax_n e^{-bx_n}$ имеет в большом диапазоне параметра цикл, говорит о том, что не стоит от построенного по эмпирическим данным графика ожидать характерной куполообразной кривой.

Если далее увеличивать параметр a , будет происходить увеличение амплитуды колебаний, и по достижению порогового значения $a > 12,51$, произойдет бифуркация удвоения периода и установится цикл $p = 4$. При дальнейшем увеличении a будет происходить каскад бифуркаций удвоения периода. При значении $a > 14,8$ невозможно выделить устойчивых точек или замкнутого цикла. Происходит детерминированный хаос, напоминающий стохастический процесс очень чувствительный к начальным условиям. Траектория притягивается к подмножеству фазового пространства, получившему из-за своих геометрических свойств название «странный аттрактор». Универсальным сценарием перехода к хаосу через бесконечный каскад удвоений, описанным на примере квадратичной итерации $x_{n+1} = \lambda x_n(1 - x_n)$ Фейгенбаумом [6], спектр нелинейных эффектов не ограничивается. В ограниченных диапазонах при $a > 14,8$ возникают окна периодичности.

В $x_{n+1} = ax_n e^{-bx_n}$ наблюдаем последовательность касательных бифуркаций с появлением устойчивых циклов периодов $p \neq 2^i$. Ли и Йорк в 1975 г. в статье «Period three implies chaos» доказали, что если итерация функции $R_{j+1} = \psi(R_j)$ при некотором значении одного из параметров имеет цикл периода $p = 3$, то отображение имеет и бесконечное множество циклов других периодов, и континуум непериодиче-

ских траекторий. Если для некоторой рикеровской популяции удалось бы реализовать последовательное увеличение репродуктивной характеристики (a – это опосредованный параметр) то ее временная динамика походила бы на рис. 2. На примерах искусственного выпуска молоди подобных изменений не отмечалось. Подобный метод дискретных параметрических итераций одной функции принципиально не подходит для описания искусственного воспроизводства.

Появлению $p = n$ предшествует явление «перемежаемости» как подвид хаотического движения. Перемежаемостью называют режим чередования во времени почти регулярных колебаний (ламинарная фаза) с интервалами хаотического поведения (турбулентная фаза). Перед появлением циклических точек три области близкие к экстремумам графика третьей итерации функции $f^3(S)$ образуют так называемые каналы близкие к биссектрисе (на рис. 3 указаны стрелками), по которым из одного другой в строгой последовательности долго движется траектория, что соответствует ламинарной фазе. Выходы траектории из канала знаменуют короткие турбулентные фазы. Ситуации, когда регулярная динамика прерывается резкими интервалами неустойчивости, появляются в реальной популяционной динамике, в частности это характерно для насекомых. Подобные турбулентные вспышки вредителей по размаху флуктуаций превосходят стационарные режимы. В динамике унимодальных итераций фаза перемежающейся турбулентности ограничена диапазоном между началами узких каналов движения траектории всегда ниже.

Перемежаемость и окна периодичности не исчерпывают все возможности поведения траектории, и метаморфозы единственного гло-

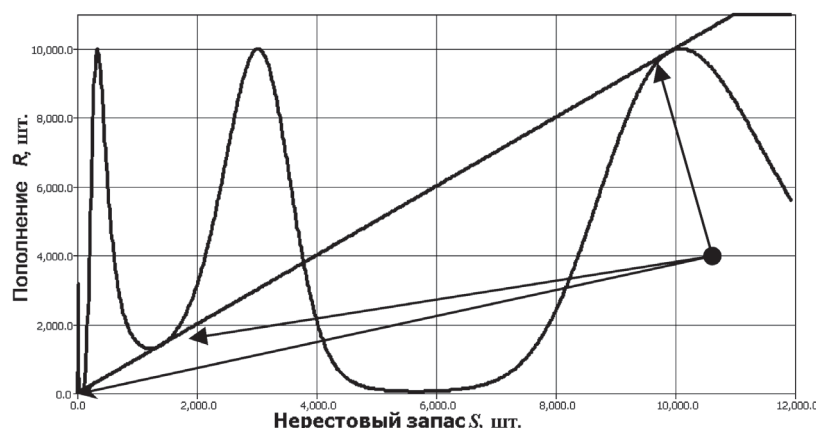


Рис. 3. Третья итерация $f(f(f(S)))$ функции (1) перед появлением цикла 3

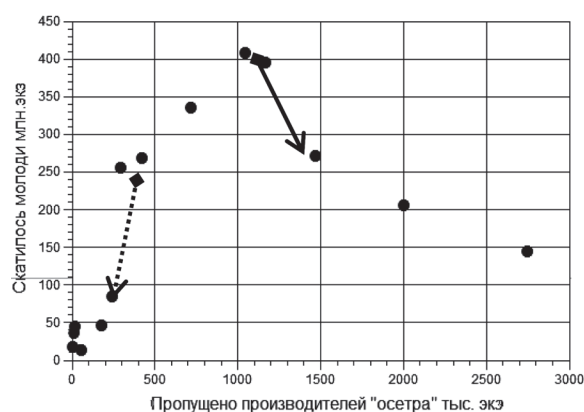


Рис. 4. Обработка данных о воспроизводстве осетра

бального аттрактора у итераций простой функции (1). Анализ других эффектов уже не укладывается в рамки краткого обзора.

3. Проблема порога в эффективности воспроизводства

Общей задачей наших исследований является анализ на основе вычислительных модельных сценариев антропогенно-обусловленных процессов деградации биоресурсов водных экосистем. Не для всех рыб актуальна теория пополнения, в гораздо большей степени ее методы обоснованы для анадромных видов, заходящих из морей для нереста на речном грунте. Для каспийских осетровых имеются интересные данные о многолетнем пропуске на нерест производителей волжского осетра и севрюги после зарегулирования стока Волги в [7]. Основным фактором эффективности нереста считался гидрологический режим реки [8], нарушенный с 1960 г. при гидростроительстве каскада ГЭС. Изучение ретроспективных описательных источников о рыбном промысле Нижней Волги и режиме судоходства предсказывают существование и других

механизмов регуляции. Частая повторяемость маловодных лет, нарушавшая речное судоходство и красочно описанная в заметках Адамом Олеарием в середине XVII века не подрывала обилие промысла.

Выявить нелинейные критические особенности в формировании пополнения позволили обработанные нами методом скользящей средней (рис. 4) сведения о количестве скатывающейся в реку молоди осетра. Количество пропущенных на нерест в Волгу производителей за период наблюдений изменялась существенно: от 2500 тыс. экз. в 1979–81 гг. до 25 тыс. в 2000-х гг. [9]. В настоящее время мы не имеем достоверной информации о нынешнем состоянии популяции *Acipenser gueldenstaedtii* и численности нерестовой ее части. С 2010 г. все каспийские популяции осетровых внесены в «Красную книгу» и промысел запрещен. Существует проблема выявления возможного образования локальных стад осетровых, которые можно идентифицировать по использующимся рыбами для размножения нерестовым рекам. В отличие от лососевых рыб у севрюги

у осетра наблюдается заход в реку, как весной, так и осенью, что определяет выделение озимой репродуктивной расы, созревание которой происходит по ходу миграции в пресной воде. Опубликованные в различных источниках сведения с 1968 г. об общей численности осетровых Каспия по данным тралового учета многими специалистами оцениваются как сомнительные и менее достоверные, чем информация о проходе производителей на нерестилища в створе реки. Оценки общей численности получались путем экстраполяции уловов с отдельных квадратов на всю акваторию при траловых обловах, пересчитанные с использованием достаточно интервально варьируемого показателя – коэффициента уловистости трала.

Выявлен статистически достоверный пороговый эффект скачкообразного перехода эффективности воспроизводства на некий отличный от нуля минимальный уровень. Кривая воспроизводства осетра (на рис. 4 среднее по трем ближайшим) характеризуется как изломанная куполообразная. Мы можем восстановить отчетливо кусочно-гладкую кривую, а не сгущение точек, так как популяционная динамика определялась в большей степени промысловой смертностью, чем искомой зависимостью $R = f(S)$ запас-восполнение. Пунктирной стрелкой указан сдвиг, когда при пропуске менее $350 \cdot 10^3$ шт. непропорционально резко уменьшается количество скатывающейся в море молодежи. От 500 до $1500 \cdot 10^3$ мы будем считать диапазоном оптимально-равновесного состояния запаса $\bar{R}$. Сплошной стрелкой отмечен эффект падения воспроизводства вероятно связанный с переполнением нерестилищ после перекрытия створа Волгоградской ГЭС. Количество молодежи от озимых и яровых производителей в имеющихся данных не разделялось. Исторически озимая репродуктивная раса доминировала по биопродуктивности. Скопление на нерестилищах привело на рубеже 1980 гг. при определении объема общих допустимых уловов к представлениям «о недоиспользованности» промыслом запасов озимой репродуктивной группы. В итоге при попытке сохранить яровых рыб для воспроизводства реализовался длительный перелов. Резкое снижение вылова произошло в 1989–90 гг, так как второго порога кривой никто из специалистов не мог ожидать.

4. Разработка модели воспроизводства с ростовыми характеристиками

Задачей разработки новой модели запас-восполнение определено создание гибкого математического аппарата для согласования характера поведения имитационной модели динамики популяции со статистическими данными о численности молодежи волжских осетровых в различные годы. В рамках проекта интересны новые гипотезы о причинах резких изменений вне диапазона оптимальной численности нерестового стада.

В современных условиях на примере осетровых Каспия очевидно, что сокращение запаса не сильно повышает индивидуальную упитанность мигрирующих производителей. Кормовая база осетровых в Северном Каспии после столь резкого сокращения их запаса не продемонстрировала стремительного увеличения [10]. В очередной раз не подтвердись на практике идеи моделей формы «хищник-жертва». Объяснение заключается в том, что регуляция жизненного цикла вида-ресурса адаптивна к его потребителю. М. Г. Карпинский дал очень интересное эволюционное объяснение тому, что сокращение потребителей не привело к развитию донной кормовой фауны. Видообразование в изолированном водоеме шло по пути адаптации стратегии размножения к прессу выедания рыбами.

Конкурентные факторы смертности у таких крупных рыб, не имеющих естественных врагов, действуют на самых ранних стадиях развития. Они выражаются в гибели от асфиксии личинок и замедлении развития молодежи, прохождения стадий жизненного цикла. Потому нет особого смысла в новом математическом описании распространять на весь неполовозрелый этап жизненного цикла негативные факторы, агрегировано выраженные отрицательным показателем степени b в модели Рикера. Поведение модели зависит от математических особенностей выбранной функции воспроизводства. Может показаться неожиданным, но на реализацию бифуркаций влияет количество точек перегиба кривой.

Наличие ограниченных пищевых ресурсов в неявном виде учитывалось известными моделями. Все известные дискретные модели воспроизводства имели дело с неявными, обобщенными, абстрагированными по смыслу

параметрами. Мы поставили задачу использовать непосредственные популяционные характеристики в дифференциальных уравнениях выживаемости.

Общим недостатком существующих дискретных моделей является игнорирование декомпенсационного фактора смертности. Декомпенсационные факторы – увеличивающие смертность при уменьшении плотности особей обычно отмечают для животных с коллективным поведением. У мигрирующих анадромных видов снижается эффективность нереста из-за уменьшения доли реально использованной в репродуктивном цикле отложенной икры при $S \ll \bar{S}$ от предполагаемого ее количества. Гибкий способ учета влияния таких явлений это очевидная необходимость при моделировании воспроизводства подвергающихся длительному перелову запасов рыб.

Возможный дополнительный контур опосредованного влияния на выживаемость состоит в изменении пищевых потребностей по мере развития на ранних стадиях развития. Несогласованность эволюционно сложившегося жизненного цикла и современной гидрологической ситуации может привести к тому, что пик начала миграции молоди осетровых может быть сдвинут к началу сезонного уменьшения ее кормовой базы.

На важный вопрос о включении непосредственно исходной численности икры $N(0)$ в правую часть уравнения выживаемости молоди мы ответим отрицательно.

Формализуем увеличение пищевых потребностей молоди. До зарегулирования русла молодь озимой группы скатывалась к морю более крупной, значит долгий затратный маршрут миграций был оправдан лучшей жизнестойкостью потомства. Уменьшение веса молоди может сказать отрицательным фактором для дальнейшей выживаемости. Потому логично ввести в уравнение некоторое оптимальное значение размерного развития $\bar{w}$, текущее квадратичное отклонение ввести в уравнение убыли численности. Будем исходить из того факта, что скорость роста находится в обратной зависимости от численности поколения, но не в обратно пропорциональной. Это согласуется с данными наблюдений ихтиологов за многими рыбами, но не всегда выполняется в выростных прудах при искусственном выра-

щивании молоди осетровых [11], где при увеличении плотности может возникать два отчетливых максимума распределения. Описывать убыль численности поколения $N(t)$ на интервале модельного времени $[0, T]$ будут следующие объединённые в систему дифференциальные уравнения (α, β, c – константы):

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = - \left(\alpha \sqrt{(w(t) - \bar{w})^2} N(t) + \theta(S) \beta \right) N(t) \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{\sqrt[3]{N^k(t) + \zeta}}, \quad \theta(S) = \frac{1}{1 - \exp(-cS)} \end{cases} \quad (2)$$

где: S – величина нерестового запаса; $w(t)$ – отражает уровень размерного развития поколения, влияющий на увеличение пищевых потребностей; g – параметр, учитывающий ограниченность количества доступных для молоди кормовых объектов. Убывающая функция $\theta(S) \rightarrow 1$ отражает действие эффекта Олли. Как мы отмечали выше, при существенном снижении величины запаса S резко сокращается эффективность воспроизводства, что было установлено для популяций волжской севрюги и русского осетра. ζ – параметр, учитывающий ограничение темпов развития не зависящее от численности; коэффициент давления скученности варьируется в пределах $2 < k < 3$; λ – средняя плодовитость особей; α – коэффициент декомпенсационной смертности; β – коэффициент декомпенсационной смертности; $t \in [0, T]$ интервал уязвимости; c – параметр, характеризующий степень действия эффекта Олли, не проявляется если численность взрослой популяции соответствует $\bar{S}$, однако существенный для осетровых. Начальные условия (2) $w(0) = w_0$, $N(0) = \lambda S$, где запас выражается вычислением $S = N(T)$.

Модель (2) исследовалась с применением разработанной в Санкт-Петербурге инструментальной среды моделирования *AnyLogic-5*, предоставляющей выбор численных методов с изменяющимся шагом интегрирования для работы с системами ОДУ первого порядка записанными в форме Коши. График получен в инструментальной среде из последовательности численного решений задачи Коши (2) для вычисления численности выживших особей поколения к моменту времени T . Зависимостью новой модели является кривая со сглаженным кусочно-гладким куполом и уменьшающимся наклоном ниспадающей правой ветви.

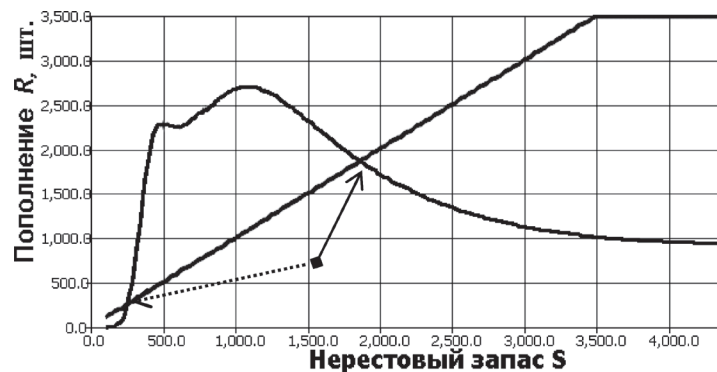


Рис. 5. Модельная кривая воспроизводства

Кривая имеет ненулевую горизонтальную асимптоту (рис. 5), две нетривиальные точки пересечения с биссектрисой координатного угла $R = S$ (на рис. 5 указаны стрелками). Точка первого пересечения находится значительно дальше от главного максимума, чем вторая стационарная точка и наклон касательной в обеих точках больше чем $\pi/4$.

Заключение

Фазовое пространство в случае гибридной динамической системы на основе системы (2) разделяется на две области притяжения: Ω_1 и Ω_2 . Границей между ними является неустойчивая особая точка первого пересечения кривой с биссектрисой координатного угла. Анализ устойчивости неподвижных точек динамической системы, реализованной в инструментальной среде моделирования, можно проводить с использованием свойства второй итерации $\psi^2(S)$. Необходимым и достаточным условием устойчивости неподвижной точки x^* одномерного отображения является неравенство второй итерации $\psi^2(x) > x$ при $x < x^*$ и $\psi^2(x) < x$ при $x > x^*$. Аттрактором области притяжения Ω_2 у итераций полученной модельной зависимости является цикл из двух циклических точек. Казалось бы повторяется сценарий бифуркационных изменений модели Рикера. Однако, полученная зависимость характеризуется непостоянством знака у дифференциального инварианта Шварца. Для сохранения всюду отрицательного знака шварциана необходимо не более одной точки перегиба. Согласно критериям Сингера отрицательный знак величины шварциана служит критерием реализации бесконечного удвоения циклов [12].

Поведение траектории динамической системы, с использованием в качестве оператора

эволюции (2), качественно отличается от системы на основе (1) возможностью притяжения к двум аттракторам и, соответственно, наличием двух областей притяжения, границей между которыми служит репеллер – неустойчивая особая точка первого пересечения кривой с биссектрисой координатного угла. Траектории с начальными условиями, разделенными репеллером, покидают его окрестность и приближаются к разным аттракторам. Один из аттракторов точка $(0,0)$ на плоскости $R_n \times R_{n+1}$. Если численность популяции соответствует области притяжения этого аттрактора, произойдет вымирание популяции. Данное свойство отражает наличие минимально допустимой для продолжительного существования биологического вида численности.

Подобная рис. 5 кривая на самом деле очень благоприятна для промысла при рациональном отношении к запасам. При организации интенсивного промысла популяция с кривой воспроизводства предложенной нами модели может значительно время поддерживать устойчивые высокие уловы. Первый перелов каспийских осетровых произошел к началу XX века, что отражено не сухой статистикой, а красочными описаниями рыбного изобилия на Нижней Волге 1860 г. в записках Александра Дюма.

Если уровень изъятия закритический, то после максимального вылова уловы начинают медленно и неуклонно сокращаться, что не внушает опасений экспертам за судьбу промысла. Как показывает практика, специалисты ихтиологи могут обосновать временное ухудшение воспроизводства ухудшением благоприятности общей гидрологической обстановки, загрязнением и иными не связанными с чрезмерным промыслом причинами. После кажущегося уравнивания произойдет резкое

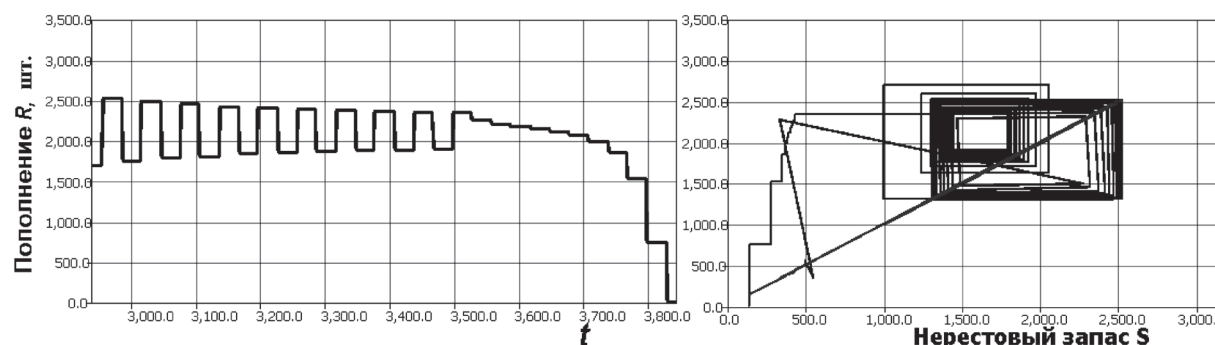


Рис. 6. Сценарий стремительной деградации при незначительном перелове

и неожиданное для специалистов сокращение уловов. Темпы восполнения запаса потеряют эффективность, и популяция резко потеряет промысловое значение. В вычислительном эксперименте рис. 6 (временная диаграмма и Ламерея) доля изъятия всего на сотую превысила критическое значение.

По такому сценарию огромный многолетний Каспийский промысел рухнул в конце 1980-х, когда рекордные уловы были в 1977–78 гг. Популяции реки Кура деградировали еще раньше. Модель показывает, что даже 0,8 промыслового изъятия популяция способна выдерживать, но при изъятии 0,81 произойдет стремительная и необратимая деградация.

Разработанная модель формирования поколения видоспецифична для волжского осетра с двумя репродуктивными расами. В настоящее время только разрабатываются иммунохимические методы идентификации субпопуляционных группировок осетровых [13]. Система уравнений (2) не предлагается на роль обобщающей модели в теории формирования пополнения промысловых рыб. Динамику нереста горбуши на рис. 1 невозможно описать использовавшимися ранее двумя топологическими типами аттракторов итерационных систем [14]. Третий топологический тип помимо кан-

торовского множества и предельного цикла не применялся в популяционных моделях.

Данные о воспроизводстве волжской севрюги показывают иной вид зависимости. Присутствуют две разделенные экстремумом резко восходящие ветви без ниспадающей левой. Подобный характер может быть результатом объединения данных по двум репродуктивно изолированным группам со сравнимой численностью. Проводимые нашими коллегами иммунохимические сравнения позволяют предполагать накопление существенных физиологических отличий у севрюги Южного Каспия [15].

Для описания зависимости $f(S)$ каждого вида осетровых рыб в одном ареале обитания требуется собственная видоспецифичная модель. Наша практика показывает, что развитие инвазионного процесса одного вида в разном биотическом окружении протекает различными путями. При всем разнообразии вариантов особенностей репродуктивного цикла формализацию различных регулирующих факторов можно проводить достаточно универсальным методом организации непрерывно-событийных моделей [16].

*Работа выполнена при поддержке РФФИ.
Проект № 16-37-00028 для молодых ученых.
Руководитель к. т. н. Соловьева Т. Н.*

Литература

1. Costello C., Gaines S. D., Lynham J. Can Catch Shares Prevent Fisheries Collapse? // Science. – 2008. – Vol. 321, Iss. 5896. – P. 1678–1681.
2. Neave F. Principles affecting the size of pink and chum salmon population in British Columbia // Journal of the fisheries research board of Canada. – 1953. Vol. 9. – P. 450–491.
3. Ricker W. E. Stock and recruitment // J. Fisheries research board of Canada. – 1954. – № 11. – P. 559–623.
4. Ricker W. E. Two mechanisms that make it impossible to maintain peak period yields from stocks of Pacific salmon and other fishes // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. – 1973. – Vol. 30. – P. 1275–1286.
5. Ricker W. E. Big Effects from Small Causes: Two Examples from Fish Population Dynamics // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. – 1963. – Vol. 20. P. 257–264.
6. Feigenbaum M. J. Universal behavior in nonlinear systems // Physica D. – 1983. – Vol. 7. – № 1. – P. 16–39.
7. Вещев П. В., Гутенева Г. И. Эффективность естественного воспроизводства осетровых в низовьях Волги в современных условиях // Экология. – 2012. – № 2. – С. 123.

8. Вещев П. В. Влияние гидрологических факторов на эффективность размножения севрюги // Гидробиологический журнал. – 2002. – № 1. – С. 111–122.
9. Ходоревская Р. П., Рубан Г. И., Павлов Д. С. Поведение, миграции, распределение и запасы осетровых рыб Волго-Каспийского бассейна. – М.: КМК, 2007. – С. 242.
10. Карпинский М. Г. Биоценозы бентоса среднего и южного Каспия // Океанология. – 2003. – № 3. – С. 400–409.
11. Рябова Г. Д. Изменчивость морфометрических и генетических характеристик молоди севрюги при выращивании в прудах с различной плотностью посадки // Генетика. – 2006. – № 2. – С. 244–255.
12. Singer D. Stable orbits and bifurcations of the maps on the interval // SIAM J. of Appl. Math. – 1978. – Vol. 35. – P. 260–268.
13. Переварюха Ю. Н., Гераскин П. П., Переварюха Т. Ю. Сравнительный иммунохимический анализ внутривидовых особенностей сывороточных белков севрюги *Acipenser stellatus* (Acipenseriformes, Acipenseridae) Каспийского бассейна // Вопросы ихтиологии. – 2011. – № 3. – С. 405–410.
14. Perevaryukha A. Y. Cyclic and unstable chaotic dynamics in models of two populations of sturgeon fish // Numerical Analysis and Applications. – 2012. – Т. 5. – № 3. – С. 254–264.
15. Переварюха Т. Ю. Антигенный состав сывороточных белков уральской и куринской популяций севрюги *Acipenser stellatus* (Acipenseriformes, Acipenseridae) // Естественные науки. – 2010. – № 2. – С. 150–155.
16. Переварюха А. Ю. Итерационная непрерывно-событийная модель вспышки численности полужесткокрылого фитофага // Биофизика. – 2016. – Т. 61. – Вып. 2. – С. 395–404

References

1. Costello C., Gaines S. D., Lynham J. Can Catch Shares Prevent Fisheries Collapse? // Science. – 2008. – Vol. 321, Iss. 5896. – P. 1678–1681.
2. Neave F. Principles affecting the size of pink and chum salmon population in British Columbia // Journal of the fisheries research board of Canada, 1953. Vol. 9. № 9. P. 450–491.
3. Ricker W. E. Stock and recruitment // Journal Fisheries research board of Canada, 1954. № 11. C. 559–623.
4. Ricker W. E. Two mechanisms that make it impossible to maintain peak period yields from stocks of Pacific salmon and other fishes // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. – 1973. – Vol. 30. – P. 1275–1286.
5. Ricker W. E. Big Effects from Small Causes: Two Examples from Fish Population Dynamics // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. – 1963. – Vol. 20. P. 257–264.
6. Feigenbaum M. J. Universal behavior in nonlinear systems // Physica D. – 1983. – Vol. 7. – № 1. – P. 16–39.
7. Veshchev P. V., Guteneva G. I., Mukhanova R. S. Efficiency of natural reproduction of sturgeons in the Lower Volga under current conditions // Russian Journal of Ecology. – 2012. – № 2. – P. 142–147.
8. Veshchev P. V. Influence of hydrological factors on the reproduction efficiency of stellate sturgeon // Hydrobiological Journal. – 2002. – № 6. – P. 111–122.
9. Khodorevskaya R. P., Ruban G. I., Pavlov D. S. Behaviour, migrations, distribution, and stocks of Sturgeons in the Volga-Caspian Basin. – Neu Wulmstorf: World Sturgeon Conservation Society Special Publication, 2009. – 233 p.
10. Karpinskii M. G. Benthos biocoenoses in the Middle and South Caspian sea // Oceanology. – 2003. – № 3. – P. 376–386.
11. Ryabova G. D. Variation in morphometric and genetic characteristics of stellate sturgeon juveniles raised at different densities // Russian Journal of Genetics. – 2006. – № 2. – P. 182–191.
12. Singer D. Stable orbits and bifurcations of the maps on the interval // SIAM J. of Appl. Math. – 1978. – Vol. 35. – P. 260–268.
13. Perevaryukha Y. N., Geraskin P. P., Perevaryukha T. Y. Comparative immunochemical analysis of intraspecies distinctions of serum proteins of starred sturgeon *Acipenser stellatus* (Acipenseriformes, Acipenseridae) from the Caspian Basin // Journal of Ichthyology. – 2011. – № 5. – P. 392–397.
14. Perevaryukha A. Y. Uncertainty of asymptotic dynamics in bioresource management simulation // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2011. – № 3. – P. 491–498.
15. Perevaryukha T. Y. Antigenic composition of whey protein Ural and Kura stellate sturgeon populations *Acipenser stellatus* (Acipenseriformes, Acipenseridae) // Natural Sciences. – 2010. № 2. – P. 150–155.
16. Perevaryukha A. Y. An Iterative Continuous-Event Model of the Population Outbreak of Phytophagous Hemiptera // Biophysics. – 2016. – Vol 61. – Iss. 2. – P. 395–404.

Поступила 01.03.2016

Dubrovskaya V. A., Solovieva T. N., Perevaryukha A. Yu.

UNSTABLE CRITICAL EQUILIBRIUM IN THE DYNAMICS OF COMPLEX STRUCTURED POPULATION OF STURGEON

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS (SPIIRAS)

The article deals with the consequences of the existence of special conditions that determine the character of the rapid further development of population processes. The most probable connection of these critical conditions deals with the optimal

number of subpopulation groups. These groups are formed by the evolutionary adaptation of the form of restricted access to resources for reproduction. We have proposed a model of population processes, which formalizes the influence of uneven growth rate for two different groups of reproductive sturgeon mortality of migratory fish in the juvenile period of *Acipenser gueldenstaedtii* development. In the computing environment was investigated the hybrid system, which simulates the effects of the existence of the situation for the population of migrating juvenile disproportionate reduction in the river. Such cases are established by us according to the rapid decline in sturgeon spawning the Volga. For the exploited population threshold effect after the unstable equilibrium with the minimum necessary for the well being of the form number is the count in the implementation of the «collapse». The phenomenon of collapse detached among all scenarios the most valuable long-term degradation of the reproductive group. In addition to the apparent sharp reduction in reproductive performance, threshold effect is reflected in the adverse events previously dominated evolutionary trend for the survival of certain forms of the life cycle of fish in terms of reorganization of the fishery. Informative, that the Volga stellate sturgeon *Acipenser stellatus* observed some form of non-linearity in the efficiency of spawning and require a different kind of fish-specific mathematical model.

Keywords: population models, reproductive cycle, critical states, collapse of the Caspian sea sturgeon stocks.



Дубровская Виктория Андреевна

В 2014 г. окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника». Аспирант, специалист по программированию на языке Java. Соавтор двух научных работ по тематике моделирования природных процессов и информационной безопасности. Участник научных конференций «Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2015)» и X-й Всероссийской Конференции-школы молодых исследователей «Современные проблемы математического моделирования».

Участвует в выполнении двух проектов РФФИ.



Соловьева Татьяна Николаевна

В 2008 г. окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, магистр по специальности «Информатика и вычислительная техника». Старший преподаватель Кафедры вычислительных систем и сетей. В 2013 г. в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН защитила диссертацию «Разработка и анализ методов диагностирования специальных классов управляемых динамических систем», кандидат технических наук по специальности «Системный анализ». Руководит проектом РФФИ № 16-37-00028 «Разработка непрерывно-событийной вычислительной модели эффективности воспроизводства

каспийской севрюги в условиях неопределенности репродуктивной изоляции субпопуляционных группировок». Соавтор 12 научных работ по моделированию управляемых динамических систем различных классов.



Переварюха Андрей Юрьевич

В 2002 г. окончил Астраханский государственный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». В Информационно-вычислительном центре Каспийского НИИ Рыбного хозяйства разрабатывал распределенную информационную систему анализа данных экологического мониторинга состояния Каспийского бассейна. В Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН защитил диссертацию «Анализ динамики возобновляемых биоресурсов с использованием комплекса гибридных моделей», кандидат технических наук по специальности «Системный анализ». С 2012 г. старший научный сотрудник лаборатории Прикладной информатики СПИИРАН. Автор 46 научных работ по анализу структурных связей и моделированию нелинейных явлений в биологических процессах. Завершил 3 проекта РФФИ.

УДК 658.012

И. А. ОСАУЛЕНКО

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРТФЕЛЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ

Черкасский национальный университет имени Богдана Хмельницкого

Статья посвящена проблеме формирования портфеля региональных проектов в контексте взаимодействия основных движущих сил регионального развития. Рассматриваются особенности процессов инновационного развития на региональном уровне и их влияние на формирование портфеля проектов. Анализируются существующие подходы к моделированию портфеля и формальные критерии выбора проектов. Параллельно описывается организация взаимодействия ключевых субъектов регионального развития. Целью статьи является исследование информационных аспектов выбора проектов в процессе взаимодействия основных движущих сил регионального развития и обоснование аналитической модели наполнения регионального портфеля с учетом склонности заинтересованных сторон к достижению консенсуса. Для конкретизации функций движущих сил регионального развития используется концепция «тройной спирали». Утверждается, что в качестве инициатора регионального проекта может выступать любой из компонентов инновационной триады «наука–бизнес–государство», однако ему необходима поддержка двух оставшихся составляющих. Для исследования взаимоотношений субъектов в процессе осуществления совместной деятельности предлагается использовать теорию несилового взаимодействия. Одним из ее ключевых понятий является информационное расстояние, характеризующее склонность сторон к достижению консенсуса на основе статистических данных. Для уточнения взаимных позиций сторон по каждому из направлений развития предлагается использовать проекции информационных расстояний на оси соответствующих направлений. Другим важным параметром модели, влияющим на поддержку проекта, является информированность о нем заинтересованных сторон. Для определения информированности предлагается использовать формализованное описание проекта в виде фиксированного набора параметров, для каждого из них экспертным путем устанавливаются весовые коэффициенты. Параллельно определяется точность задания каждого из параметров для представленного на рассмотрение проекта. На основе установленных значений информационных расстояний и информированности определяется значимость каждого проекта. После ранжирования проектов по значимости происходит комплектование портфеля по каждому из направлений с учетом ограничений по количеству проектов и доступным ресурсам.

Ключевые слова: портфель проектов, региональное развитие, тройная спираль, несиловое взаимодействие, информированность

Введение

Планирование процессов инновационного развития на региональном уровне управления характеризуется рядом особенностей. Одной из них является наличие факторов влияния как сверху, так снизу. Воздействие сверху обусловлено необходимостью учета общегосударственных интересов и может касаться, в частности, построения стратегических транспортных и энергетических коммуникаций, решения масштабных экологических проблем, проведения международных спортивных форумов. Еще одной причиной инициирования региональных проектов сверху может стать потребность в устранении или уменьшении диспропорций

в социально-экономическом развитии различных территорий. Подобная проблема в той или иной мере характерна как для постсоветских государств, так и большинства стран Европы. В свою очередь, локализованные на соответствующей территории предприятия также могут претендовать на поддержку своих инновационных идей со стороны регионального общества и включение предложенных ими проектов в программы регионального развития, что дает возможность воспользоваться рядом предусмотренных для таких случаев механизмов, среди которых бюджетное финансирование или предоставление налоговых льгот.

Вторая отличительная черта планирования регионального развития состоит в необходимости выявления и наиболее полного учета насущных проблем и потребностей местных жителей. Для решения указанных задач среди прочих мероприятий необходимо предусмотреть налаживание эффективной системы коммуникаций со всеми заинтересованными сторонами, что позволит не только наметить приоритетные направления развития, но и выявить имеющиеся на этом пути препятствия, а также заранее определить круг потенциальных участников соответствующих проектов.

Указанные обстоятельства подчеркивают достаточную сложность и комплексный характер проблемы планирования портфеля региональных проектов. При этом большинство существующих исследований ограничиваются рассмотрением ее отдельных аспектов. В частности, одним из базовых направлений является построение математических моделей выбора оптимального портфеля на уровне компании. В качестве наиболее перспективного решения предлагается создание многокритериальной нечеткой модели, которая среди прочих параметров должна учитывать соответствие портфеля проектов стратегическим целям организации [1]. Дополнительные требования связывают с обеспечением сбалансированности портфеля по вхождению краткосрочных и долгосрочных проектов, наличию исследовательских проектов и новых прикладных разработок, соотношению проектных рисков и ожидаемого эффекта от реализации проектов. Кроме того, берется во внимание взаимосвязь портфеля проектов с портфелями активов и ресурсов [2]. Отдельные публикации посвящены использованию систем поддержки принятия решений для анализа и селекции проектов. Одна из таких систем предусматривает проведение анализа предварительного отбора и анализа проектов с последующим переходом в он-лайн режим, где реализованы функции выбора оптимального портфеля и его регулирования. Для визуализации портфеля используется матрица «время завершения – уровень риска» [3]. Одним из основных критериев включения проекта в региональный портфель или программу регионального развития предлагается считать его ценность, определяемую как отно-

шение установленной экспертным путем полезности проекта к требуемым затратам на реализацию. Дополнительно рассматривается структура управления программой регионального развития, сформированная по корпоративному типу с учетом принципов государственно-частного партнерства [4]. В этой связи представляют интерес не только формальные критерии выбора региональных проектов, но и организация взаимодействия ключевых субъектов регионального развития в процессе формирования соответствующего портфеля, особенно в части информационного обмена и согласования позиций.

Исходя из вышеизложенного, определим целью данной статьи исследование информационных аспектов выбора проектов в процессе взаимодействия основных движущих сил регионального развития и обоснование аналитической модели наполнения регионального портфеля с учетом склонности заинтересованных сторон к достижению консенсуса.

Основная часть исследования

Детальное рассмотрение вопросов формирования портфеля региональных проектов начнем с конкретизации основных субъектов, принимающих участие в данном процессе, для чего представляется целесообразным воспользоваться популярной в настоящее время концепцией «тройной спирали», которая предусматривает активное сотрудничество науки, бизнеса и государства как неотъемлемое условие инновационного развития [5]. Каждый элемент указанной триады выполняет свои специфические функции, в частности, вузы и научные учреждения ответственны за генерирование перспективных идей и подготовку кадров, бизнес осуществляет коммерциализацию предложенных разработок с целью получения прибыли, задачей государственных органов является установление приоритетных направлений развития и создание благоприятных условий для проведения исследований и функционирования инновационных предприятий. Также существуют определенные задачи, для решения которых необходимы совместные усилия. При этом наиболее отчетливо результаты взаимодействия проявляются именно на региональном уровне благодаря лучшему пониманию имеющихся проблем и существующего потен-

циала, возможности оперативного согласования решений и координации ресурсов.

Основываясь на положениях концепции «тройной спирали», будем считать, что инициатором того или иного регионального проекта может являться один из ее элементов. В то же время, для реализации такого проекта в большинстве случаев необходимо обеспечить поддержку со стороны двух оставшихся составляющих. В свою очередь, такая поддержка будет зависеть от информации о проекте, которую они получают, а также в значительной мере от их отношения к источнику этой информации.

Для исследования взаимоотношений различных субъектов в процессе осуществления совместной деятельности во многих случаях целесообразно использовать теорию несилового взаимодействия [6]. Одним из основных понятий указанной теории является информационное расстояние, которое определяется частотой достижения согласия между двумя заинтересованными сторонами в общей статистике ситуаций, требовавших принятия решения. Очевидно, данный параметр теоретически может изменяться от нуля (безоговорочное согласие, в понятиях теории несилового взаимодействия два объекта сливаются воедино) до единицы (полный антагонизм, фактическая невозможность любой совместной деятельности). В случае отсутствия дополнительной информации вероятность достижения консенсуса в текущей ситуации обратно пропорциональна информационному расстоянию. Если же информационное описание предмета принятия решения содержит существенные детали, которые могут изменить внутреннее состояние участника процесса (в терминах теории несилового взаимодействия – интроформацию), то и его позиция относительно предложенного другим участником варианта решения может измениться в ту или иную сторону. Предполагается, что имеются достаточные основания для применения подобного подхода в задаче выбора региональных проектов [7].

При этом следует учитывать, что стратегия регионального развития, как правило, включает в себя различные направления, каждое из которых должно быть наполнено необходимыми мероприятиями. Соответственно, входящие в региональный портфель проекты могут относиться к промышленности, транспорту,

энергетике, сельскому хозяйству, информационным технологиям, образованию, медицине, культуре, экологии и другим сферам. Будем считать, что в качестве инициатора того или иного проекта выступает один из компонентов инновационной триады, а два других могут его поддерживать или не поддерживать в данном конкретном случае, причем уровень поддержки предположительно зависит от информационного расстояния между ними. Однако, в связи с наличием многих различных направлений деятельности, вполне вероятно, что специфика предметной области проекта некоторым образом будет влиять на склонность сторон к достижению согласия. Исходя из этих соображений, представим, что информационное расстояние в треугольнике основных движущих сил регионального развития будет определяться в многомерном пространстве, причем измерения соответствуют отдельным направлениям развития.

Далее перейдем к определению параметров модели. Будем считать, что стратегия регионального развития включает n направлений. По каждому из них первоначально предлагается к реализации m_i проектов, $i = 1, \dots, n$, среди которых m_{is} инициированы представителями науки, m_{ib} – коммерческими структурами, m_{ig} – местными органами власти. Для реализации некоторого проекта P_{ij} , $j = 1, \dots, m_i$, требуются ресурсы в объеме r_{ij} . При этом суммарный объем выделяемых на проекты данного направления ресурсов равняется r_i , а окончательное число принятых к реализации проектов m_{ri} может изменяться в установленных пределах от минимального $m_{r_{\min i}}$ до максимального $m_{r_{\max i}}$ значения. Нижняя граница определяется необходимостью обеспечить сбалансированность регионального портфеля путем включения в его состав достаточного количества проектов по каждому из направлений развития, верхняя – нецелесообразностью распыления средств на мелкие проекты, которые не могут принести значительного эффекта. Таким образом, если $\sum r_{ij} > r_i$ или $m_i > m_{r_{\max i}}$, требуется применение некоторой процедуры селекции проектов.

Поиск решения поставленной задачи будем осуществлять с учетом изложенных выше положений теории несилового взаимодействия. Обозначим информационные расстояния меж-

ду наукой и бизнесом, наукой и государственными структурами, бизнесом и государственными структурами соответственно d_{sb} , d_{sg} , d_{bg} . Для определения позиций указанных сторон относительно заданного направления регионального развития будем рассматривать проекции информационных расстояний на ось i -й предметной области, которые обозначим через d_{sbi} , d_{sgi} , d_{bgi} . Рассмотрим ситуацию, при которой инициатором некоторого проекта P_{ij} является научная составляющая триады основных движущих сил регионального развития. Если значения d_{sbi} и d_{sgi} невелики, данный проект изначально будет иметь хорошие шансы на включение в состав регионального портфеля. Однако, когда информационное расстояние по i -й оси между коммерческой и государственной составляющими сведено к минимуму при одновременном отдалении представителей науки, такой проект может не получить необходимой поддержки. В этом случае особенно важное значение приобретает информационное воздействие на все заинтересованные стороны, которое будет сопровождать собственно подачу проекта. Иными словами, инициатору проекта следует обеспечить максимальную информированность других потенциальных участников, чтобы каждый из них мог принять обоснованное решение о поддержке или отклонении представленной идеи. При этом описание проекта должно быть достаточно подробным и содержать не только цели, сроки выполнения, необходимые ресурсы и ожидаемый эффект, но и детальный анализ окружения с указанием степени влияния продукта проекта на социально-экономическое развитие территории в целом.

Таким образом, шансы проекта на включение в состав регионального портфеля уменьшаются с увеличением информационного расстояния между инициатором и другими сторонами процесса принятия решений и возрастают с увеличением их информированности. Сложность состоит в формальном определении количественной оценки уровня информированности. В качестве возможного решения предлагается следующий подход. Предположим, что любой региональный проект быть описан при помощи l параметров, причем к параметрам в данном случае будем относить как расчетные значения, измеряемые в конкретных единицах, такие как стоимость, длительность,

объем необходимых ресурсов, так и преимущественно качественные характеристики, в частности, цели проекта, окружение, возможные исполнители. При этом точность определения k -го параметра проекта P_{ij} является величиной интегральной, при необходимости вбирающей в себя оценку как числовой, так и текстовой информации. В то же время, различные параметры проектов могут иметь неодинаковое влияние на формирование целостного представления о них. В таком случае представляется целесообразным введение соответствующих весовых коэффициентов, определяемых экспертным путем. С учетом вышеизложенного, информированность заинтересованных сторон о проекте P_{ij} может быть рассчитана следующим образом:

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^l a_k q_{ijk}}{l},$$

где a_k – весовой коэффициент k -го параметра, определяется для всех проектов, претендующих на включение в состав регионального портфеля, $\sum a_k = 1$; q_{ijk} – точность определения k -го параметра проекта P_{ij} , $q_{ijk} \in [0; 1]$.

На основании имеющихся данных об информационных расстояниях в треугольнике основных движущих сил регионального развития и установленного уровня информированности о предложенных ими проектах определяется значимость проекта:

$$Z_{ij} = b_1 D_i + b_2 S_{ij},$$

где Z_{ij} – значимость проекта P_{ij} ; b_1 , b_2 – коэффициенты, зависящие от условий взаимодействия; D_i – сумма информационных расстояний по соответствующей оси между инициатором проекта и двумя другими участниками процесса принятия решения;

$$D_i = \begin{cases} d_{sbi} + d_{sgi}, \\ d_{sbi} + d_{bgi}, \\ d_{sgi} + d_{bgi}, \end{cases}$$

где проект предлагается соответственно научной, коммерческой или государственной составляющей.

Далее предложенные по каждому из направлений проекты ранжируются по значимости, после чего они включаются в региональный портфель в порядке уменьшения получен-

ных оценок. Наполнение i -й составляющей портфеля продолжается до тех пор, пока не превышено допустимое количество проектов или выделенных на данное направление ресурсов.

В некоторых случаях появляется возможность расширить региональный портфель за счет привлечения внешних ресурсов, в связи с чем появляются дополнительные требования к информированности соответствующих уполномоченных органов. В частности, это может быть обоснование важности проекта не только для данного региона, но и для соседних территорий с целью получения поддержки из центрального бюджета или подготовка детального англоязычного описания проекта в расчете на получение международной технической помощи.

Заключение

В данной работе исследованы наиболее существенные факторы, влияющие на выбор про-

ектов в процессе взаимодействия основных движущих сил регионального развития, и предложена информационно-аналитическая модель формирования регионального портфеля. Новизна данной модели состоит в использовании критерия информационного расстояния по базовым направлениям развития между ключевыми субъектами принятия решений и применении формализованной процедуры определения информированности заинтересованных сторон о представленном на рассмотрение проекте. Преимуществом предложенного подхода является возможность учета в процессе принятия решения как количественных, так и качественных характеристик проектов, а также определения путей улучшения взаимодействия движущих сил регионального развития в части обоснования предлагаемых проектов, что в дальнейшем повышает шансы на успешную реализацию портфеля.

Литература

1. **Матвеев, А. А.** Модели и методы управления портфелями проектов / А. А. Матвеев, Д. А. Новиков, А. В. Цветков. – М.: ПМСОФТ, 2005. – 206 с.
2. **Кендалл, Д. И.** Современные методы управления портфелями проектов и офис управления проектами: Максимизация ROI / И. Кендалл, К. Роллинз; пер. с англ. – М.: ПМСОФТ, 2004. – 576 с.
3. **Ghasemzadeh, F.** Project portfolio selection through decision support / F. Ghasemzadeh, N. P. Archer // Decision Support Systems. – 2000. – № 29. – P. 73–88.
4. **Рыбак, А. И.** Методологические основы управления программами развития регионов Украины / А. И. Рыбак, Г. С. Панафидин // Управление развитием сложных систем. – 2014. – № 19. – С. 71–77.
5. **Ицкович, Г.** Тройная спираль. Университеты – предприятия – государство. Инновации в действии / Г. Ицкович; пер. с англ. – Томск, ТУСУР, 2010. – 238 с.
6. **Тесля, Ю. Н.** Введение в информатику природы / Ю. Н. Тесля. – К.: Маклаут, 2010. – 255 с.
7. **Осауленко, И. А.** Механизмы проектно-ориентированного взаимодействия движущих сил регионального развития / И. А. Осауленко // Вестник Черкасского государственного технологического университета. Серия: технические науки. – 2015. – № 1. – С. 56–61.

References

1. **Matveev, A. A., Novikov, D. A., Tsvetkov A. B.** (2005). Models and methods of project portfolio management. Moscow, Russia, PMSOFT, 206.
2. **Kendall, G. I., Rollinz, S. C.** (2004). Advanced project portfolio management and the Project management office: Multiplying ROI. Translated from English. Moscow, Russia, PMSOFT, 576.
3. **Ghasemzadeh, F., Archer, N. P.** (2000). Project portfolio selection through decision support. Decision support systems, Amsterdam, Netherlands, 29, 73–88.
4. **Rybak, A. I., Panafidin, G. S.** (2014). Methodological programs management basics of the regions of Ukraine development. Management of development of complex systems. Kyiv, Ukraine, KNUCA, 19, 71–77.
5. **Etzkowitz, H.** (2010). The Triple Helix. University – Industry – Government. Innovation in action. Translated from English. Tomsk, Russia, TUSUR, 238.
6. **Teslia, Yu. N.** (2010). Introduction to information science of nature. Kyiv, Ukraine, Maklout, 255.
7. **Osaulenko, I. A.** (2015). Mechanisms of project-oriented interaction of the regional development's motive forces. Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho technologichnoho universitetu. Series: technical science. Cherkassy, Ukraine, ChDTU, 1, 56–61.

Поступила 01.03.2016

Osaulenko I. A.

INFORMATIONAL-ANALYTIC MODEL OF REGIONAL PROJECT PORTFOLIO FORMING

Bohdan Khmelnytsky National University at Cherkassy

The article is devoted to the problem of regional project portfolio management in context of interaction of the regional development's motive forces interaction. The features of innovation development on the regional level and their influence on the portfolio forming process considered. An existing approaches for portfolio modelling and formal criterion of the projects selection analyzed. At the same time the organization of key subjects of regional development interaction described. The aim of the article is investigation of informational aspects of project selection in process of the main development's motive forces interaction and analytic model of portfolio filling validation. At that an inclination of stakeholders to reach a consensus taking into account. The Triple Helix conception using for concrete definition of the functions of the regional development's motive forces. Asserted, that any component of innovation triad «science–business–government» can be an initiator of regional project, but it need to support two another components. Non-power interaction theory using for investigation of subjects interrelations in process of joint activity proposed. One of the key concept of the theory is information distance. It characterizes inclination of the parties to reach a consensus based on statistics. Projections of information distance onto directions of development axes using for more accurate definition of mutual positions in the all lines of development proposed. Another important parameter of the model which has an influence on the project support is awareness of stakeholders about it. Formalized description of project in the form of fast set of parameters proposes to use for determination of the awareness. The weighting coefficients for each parameter by expert way. Simultaneously the precision of the each parameter setting for all presented projects determines. On the base of appointed values of information distances and awareness amount of each project defines. After the projects ranking filling of the portfolio in the all lines taking into account limits of projects number and available resources occurs.

Keywords: *project portfolio, regional development, triple helix, non-power interaction, awareness.*



Осауленко Игорь Анатольевич, 1972 г. р., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой интеллектуальных систем принятия решений, факультет вычислительной техники, интеллектуальных и управляющих систем, Черкасский национальный университет имени Богдана Хмельницкого. Научные интересы: управление проектами, информационные системы в экономике, системный анализ.

Адрес: Украина, 18029, г. Черкассы, бульвар Т. Г. Шевченко, 81, ЧНУ им. Б. Хмельницкого, корп. 3, каб. 112, кафедра ИСПР, тел. +38 (0472) 45-04-75.

В. А. МАЛКИН

РЕШЕНИЕ ДВУХТОЧЕЧНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ МЕТОДОМ НЕГРАДИЕНТНОГО СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА

Военная академия Республики Беларусь

В статье рассматривается способ численного решения двухточечной краевой задачи при определении оптимального управления динамической системой с помощью принципа максимума Понтрягина. Определение начальных условий сопряженной системы уравнений осуществляется методом неградиентного случайного поиска.

Метод неградиентного случайного поиска основан на применении стохастических процедур к решению целого ряда задач, в том числе и детерминированных. При решении задачи определения оптимального управления динамической системой с использованием принципа максимума Понтрягина требуется найти такие начальные условия сопряженной системы уравнений, при которых значения переменных этой системы удовлетворяют известным конечным условиям $Y(t_k)$.

Решение задачи заключается в случайном выборе вектора начальных условий из некоторой области значений, численном интегрировании основной и сопряженной систем и последующей статистической обработке полученных результатов. Статистическая обработка осуществляется с целью получения математического ожидания и СКО тех значений начальных условий, при которых конечные значения попадают в некоторую область Θ_0 относительно точки $Y(t_k)$. Для обеспечения репрезентативности выборки, по которой производится оценка математического ожидания и СКО, предлагается адаптивная рекуррентная процедура поиска с поэтапным уменьшением размера области Θ_0 . Выборочные оценки параметров распределения являются основой для определения начальных условий сопряженной системы уравнений на следующем этапе поиска.

Приводится пример решения задачи для объекта управления первого порядка. Полученные результаты подтверждают возможность применения предлагаемого подхода к решению задачи синтеза оптимального управления динамической системой с использованием принципа максимума Понтрягина.

Ключевые слова: динамическая система, оптимальное управление, принцип максимума Понтрягина, метод неградиентного случайного поиска.

Введение

Двухточечная краевая задача возникает при определении оптимального управления динамической системой с использованием принципа максимума Понтрягина [1]. Принцип максимума сформулирован как необходимый признак оптимальности для нелинейных систем и необходимый и достаточный признак для линейных систем управления.

Решение задачи оптимизации заключается в определении такого вектора управления динамической системой U , который удовлетворяет заданным ограничениям $U \in U_0$ и обеспечивает экстремум функционалу качества

$$\Psi = \int_{t_0}^{t_k} L(X, U, t) dt,$$

где X – n -мерный вектор состояния системы, U – m -мерный вектор управления, $[t_0, t_k]$ – интервал функционирования системы.

Общая процедура поиска оптимального управления в соответствии с принципом максимума заключается в расширении пространства состояния путем добавления $n+1$ -й координаты $x_{n+1} = \dot{\Psi}$ и отыскании такого управления, которое обеспечивает максимум функции Гамильтона $H(X, Y, U, t_0, t_k)$:

$$U = \arg \max_{U \in U_0} H(X, Y, U, t_0, t_k), \quad (1)$$

где Y – $n+1$ -мерный вектор состояния сопряженной системы.

Вектор состояния динамической системы удовлетворяет дифференциальным уравнениям:

$$\dot{x}_i = f_i(X, U, t), \quad x_i(t_0) = x_{i0}, \quad i = 1, 2, \dots, n+1. \quad (2)$$

Уравнения сопряженной системы имеют вид:

$$\dot{y}_i = \phi_i(X, Y, U, t) = - \sum_{j=1}^{n+1} y_j \frac{\partial f_j}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n+1. \quad (3)$$

При этом для системы сопряженных уравнений (3) известны конечные условия интегрирования $y_i(t_k) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$), $y_{n+1}(t_k) = -1$.

Функция Гамильтона определяется соотношением

$$H(X, Y, U, t_0, t_k) = \sum_{i=1}^{n+1} y_i f_i.$$

Таким образом, поиск оптимального управления сводится к решению двух задач: отысканию максимума функции (1) по вектору U и решению двух систем дифференциальных уравнений (2) и (3) с частично заданными начальными и конечными условиями. Поскольку в большинстве случаев вторая задача не имеет точного аналитического решения, для ее решения используются численные методы интегрирования. При этом появляется неопределенность в выборе начальных условий для сопряженной системы уравнений $y_i(t_0)$, $i = 1, 2, \dots, n + 1$. Обычно начальные условия задаются произвольно и затем с помощью итерационной процедуры осуществляется поиск таких значений $y_i(t_0)$, при которых переменные $y_i(t_k)$ будут удовлетворять заданным конечным значениям. Какие-либо общие подходы к построению детерминированных итерационных процедур поиска вектора начальных условий $Y(t_0)$ отсутствуют. Все зависит от конкретных особенностей задачи и опыта исследователя.

В статье предлагается способ отыскания начальных значений сопряженной системы при решении задач оптимизации с использованием принципа максимума Понтрягина, основанный на применении метода неградиентного случайного поиска (НСП) [3, 4].

Постановка и решение задачи

Пусть задана динамическая система, описанная в пространстве состояний дифференциальными уравнениями (2). Заданы начальный t_0 и конечный t_k моменты функционирования системы. Для решения задачи оптимизации осуществляется численное интегрирование уравнений (2) и (3) на интервале $[t_0, t_k]$ при заданных начальных условиях системы уравнений (2). Вектор оптимального управления $U_{\text{опт}}(X, Y)$ находится на каждом шаге интегрирования в соответствии с формулой (1). Для сопряженной системы уравнений (3) известны значения координат вектора состояния

в конечный момент времени $Y(t_k)$. Требуется найти такие начальные значения координат вектора $Y(t_0)$, при которых с учетом определения $U_{\text{опт}}(X, Y)$ из соотношения (1) фазовые траектории основной и сопряженной систем будут удовлетворять уравнениям (2) и (3), а значения фазовых координат сопряженной системы в конечный момент времени будут равны y_{ik} ($i = 1, 2, \dots, n + 1$).

Рассматривается решение данной задачи методом неградиентного случайного поиска. Метод НСП заключается в случайном выборе начальной точки $Y(t_0)$ из некоторой области G_0 (рис. 1), получении решения систем уравнений (2) и (3) и последующей статистической обработке результатов.

В результате проведения N циклов интегрирования систем уравнений (2) и (3) запоминаются те значения вектора $Y(t_0)$, при которых обеспечивается попадание вектора $Y(t_k)$ в заданную область G_k , содержащую требуемое конечное значение Y_k (событие Θ). В результате статистической обработки координат y_{0i} , удовлетворяющих событию Θ , определяются оценки их математического ожидания m_i^Θ и среднеквадратического отклонения σ_i^Θ . Для следующего цикла интегрирования начальные значения координат сопряженной системы определяются по формуле

$$y_{0i}(k+1) = m_i^\Theta(k) + \sigma_i^\Theta(k) e_r, \quad i = 1, 2, \dots, n + 1, \quad (4)$$

где e_r – центрированная равномерно распределенная случайная величина с единичной дисперсией.

В качестве границы области G_0 выбирается сфера с центром в точке Y_k и заданным радиусом R . На первом этапе решения задачи суще-

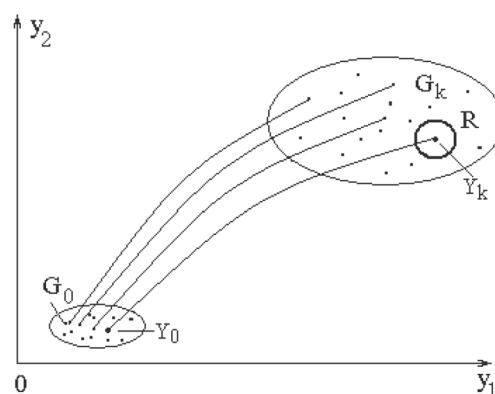


Рис. 1. Выбор начальных условий в методе НСП

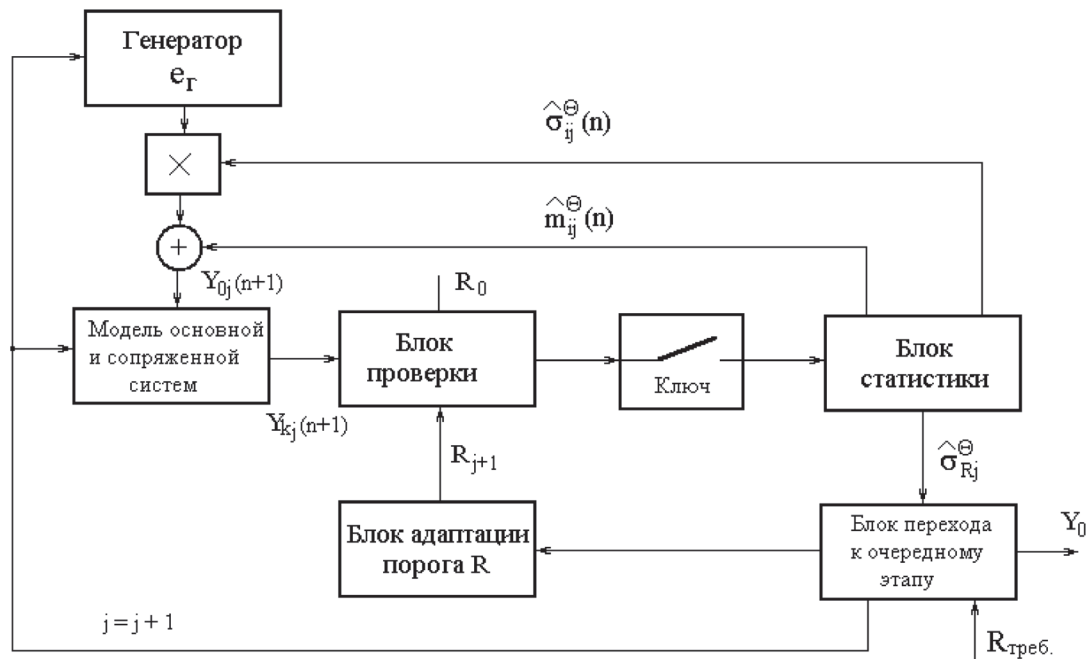


Рис. 2. Структурная схема определения начальных условий сопряженной системы

ствует большая неопределенность в выборе области начальных условий сопряженной системы, что может привести к малой вероятности выполнения события Θ . Поэтому на начальных этапах решения задачи величина R должна выбираться достаточно большой, чтобы обеспечить репрезентативность выборки начальных значений, для которых выполняется событие Θ . С другой стороны, величина R характеризует точность решения задачи и должна удовлетворять требованию $R < R_{\text{треб}}$, где $R_{\text{треб}}$ – требуемая точность решения задачи.

Из этого следует, что процесс поиска решения должен быть поэтапным с адаптацией на каждом этапе значения величины R . Адаптация величины R может осуществляться по оценке СКО разброса модуля значений вектора $|Y_k^\Theta - Y_k|$ на предыдущем этапе решения задачи:

$$R(j) = \alpha \hat{\sigma}_R(j-1), \quad (5)$$

где $\hat{\sigma}_R(j-1)$ – оценка СКО вектора $|Y_k^\Theta - Y_k|$ на предыдущем этапе, $0 < \alpha < 1$ – коэффициент, определяемый экспериментально в процессе решения задачи.

Окончание решения задачи выполняется по условию $R < R_{\text{треб}}$. Структурная схема решения задачи определения начальных условий сопряженной системы методом НСП представлена на рис. 2.

Пример

Требуется найти оптимальное управление $u_0(t)$ для объекта, описываемого уравнением первого порядка $\dot{x}(t) = -5x(t) + u(t)$, $x(0) = x_0$, которое минимизирует функционал

$$\Psi = 0,5 \int_0^{T_k} (x^2(t) + u^2(t)) dt. \quad (6)$$

Для поиска оптимального управления используем принцип максимума Понтрягина. Сделаем замену переменных $x(t) = x_1(t)$ и увеличим размерность пространства состояний, включив в него координату $x_2(t)$, удовлетворяющую уравнению

$$\dot{x}_2(t) = 0,5x_1^2(t) + 0,5u^2(t), \quad x_2(0) = 0.$$

Тогда уравнения для составляющих вектора состояния основной системы будут иметь вид (аргумент t опущен):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1 = -5x_1 + u, & x_1(0) = x_0, \\ \dot{x}_2 = f_2 = 0,5x_1^2 + 0,5u^2, & x_2(0) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

Сопряженная система уравнений в соответствии с соотношением (3) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -y_2x_1 + 5y_1, & y_1(T_k) = 0, \\ \dot{y}_2 = 0, & y_2(T_k) = -1, \end{cases} \quad (8)$$

Из второго уравнения системы (8) следует, что $y_2(t) = \text{const} = -1$. Тогда гамильтониан H будет равен

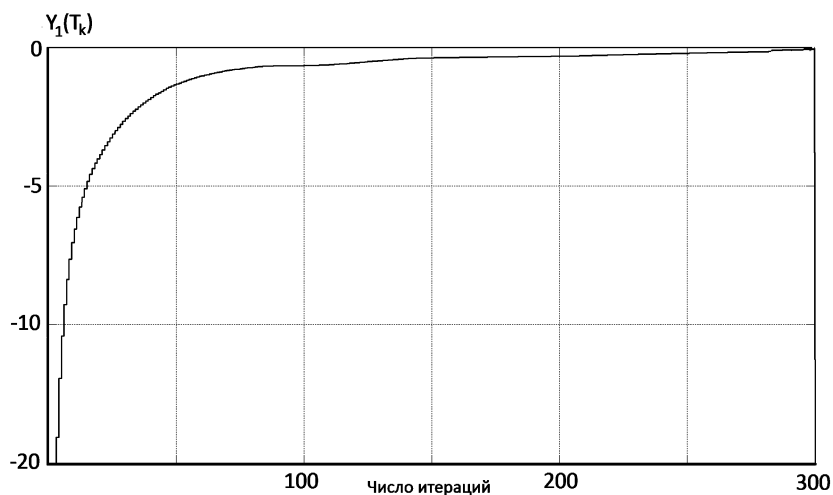


Рис. 3. Процесс приближения $y_1(T_k) \rightarrow 0$ при решении задачи методом НСП

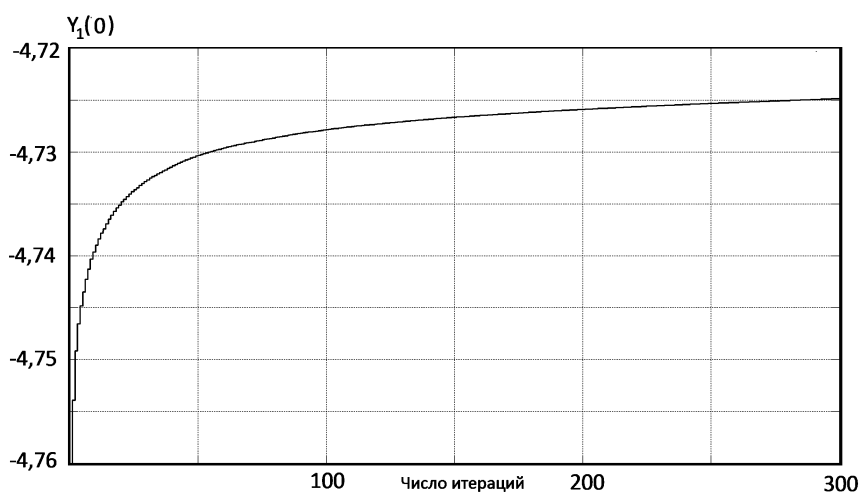


Рис. 4. Процесс приближения $y_1(0) \rightarrow y_{10}$ при решении задачи методом НСП

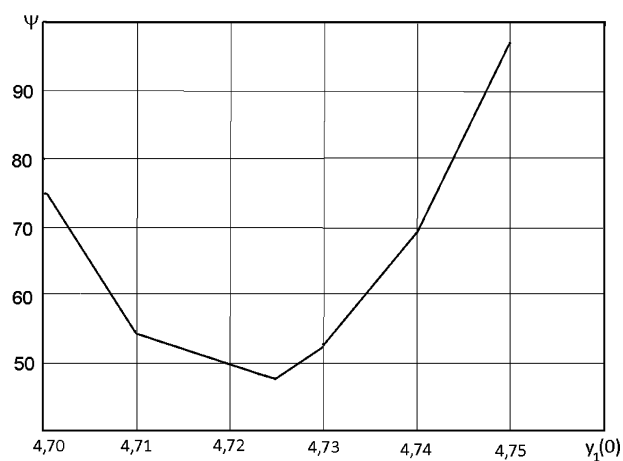


Рис. 5. Зависимость критерия оптимальности от начального условия сопряженной системы

$$H = \sum_{i=1}^2 y_i f_i = -5x_1 y_1 + y_1 u - 0,5x_1^2 - 0,5u^2.$$

Максимум величины H в открытой области управления определяется из соотношения

$$\frac{\partial H}{\partial u} = y_1 - u = 0. \text{ Следовательно, оптимальное управление будет равно } u_0 = y_1.$$

Искомое решение получается путем интегрирования системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -5x_1 + y_1, & x_1(0) = x_0, \\ \dot{y}_1 = 5y_1 + x_1, & y_1(T_k) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

Задаваясь значением величины $y_1(0) = -5$ и применяя рекуррентный алгоритм (4), получаем искомое значение $y_{10} = -4,725$. Численное интегрирование системы уравнений (9) осуществлялось в среде MATLAB.

Обсуждение результатов

На графиках рис. 3 и рис. 4 показаны итерационные процессы приближения $y_1(T_k) \rightarrow 0$

и $y_1(0) \rightarrow y_{10}$ в процессе поиска решения методом НСП.

График зависимости критерия оптимальности (6) от начального условия y_{10} представлен на рис.5. Из представленного графика видно, что полученное методом НСП решение обеспечивает минимум критерия оптимальности. Для обеспечения приближения конечного значения $y_1(T_k)$ к нулю с погрешностью $R = 0,01$ потребовалось $j = 300$ этапов решения задачи при количестве испытаний на каждом этапе $n = 100$. Общее число итераций – $3 \cdot 10^4$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Понтрягин, Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – М.: Наука, – 1969.
2. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987.
3. Гладков, Д. И. Оптимизация систем неградиентным случайным поиском / Д. И. Гладков. – М.: Энергоиздат, 1984.
4. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М.: Наука, 1987.
5. Фельдбаум, И. Е. Основы теории оптимальных автоматических систем / И. Е. Фельдбаум. – М.: Наука, – 1966.
6. Казаков, И. Е. Оптимизация динамических систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев. – М.: Наука, 1980.
7. Брайсон, А. Е. Прикладная теория оптимального управления / А. Е. Брайсон, Хо Ю Ши. – М.: Мир, 1972.
8. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М.: Дрофа, 2006.
9. Методы классической и современной теории автоматического управления: / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – Т4: Теория оптимизации САУ.

Поступила 01.03.2016

V. A. MALKIN

TWO-POINT BOUNDARY PROBLEM SOLUTION BY NON-GRADIENT RANDOM SEARCH METHOD

Military Academy of the Republic of Belarus

The numerical solution of two-point boundary problem when determining optimal control of dynamical system by means of Pontryagin's maximum principle is considered. The initial conditions of conjugate set of equations are determined by use of non-gradient random search method.

The non-gradient random search method based on application of stochastic procedures for range of problems solving, including the deterministic ones. When solving the task of optimal control estimation of dynamical system by means of Pontryagin's maximum principle the initial conditions of conjugate set of equations must be determined, provided that dynamical system's variables values meet the known terminal conditions $Y(t_k)$.

The problem's solution lie in random selection of vector of initial conditions in some actual range, numerical integration of basic and conjugate systems and subsequent processing of findings. Statistic processing gives the mean and RMS estimations of initial conditions values, providing terminal conditions values hit in some domain Θ_0 relative to $Y(t_k)$ point. For the purpose of ensuring of representative sampling for mean and RMS values estimation the adaptive recurrent search procedure with step-by-step domain Θ_0 contraction is introduced. The initial conditions of conjugate set of equations on the next search stage are determined on a base of sample estimates of distribution's parameters.

The example problem solution for third-order control object is given. The findings confirm the possibility of proposed approach utilization for optimal control synthesis of dynamical system by means of Pontryagin's maximum principle.

Keywords: dynamical system, optimal control, Pontryagin's maximum principle, non-gradient random search method.



Малкин Виталий Александрович, доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры авиационных радиоэлектронных систем учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Сфера научных интересов: системный анализ, системы управления и наведения пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов.

УДК 629.7+531.383

А. А. ЛОБАТЫЙ, Ю. Ф. ЯЦЫНА, Н. Н. АРЕФЬЕВ

ОПТИМАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА АПОСТЕРИОРНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ

Белорусский национальный технический университет

Рассматривается задача получения уравнения для апостериорной плотности вероятности стохастического марковского процесса при линейной модели измерений. В отличие от распространенных подходов, основанных на рассмотрении в качестве критерия оптимизации минимума среднего квадрата ошибки оценивания, в данном случае в качестве критерия оптимизации рассматривается максимум апостериорной плотности вероятности оцениваемого процесса.

Априорная плотность вероятности оцениваемого процесса изначально считается гауссовой дифференцируемой функцией, что позволяет разложить её в ряд Тейлора без использования в промежуточных преобразованиях характеристических функций и разложения на гармоники. Для малых интервалов времени плотность вероятности вектора ошибок измерений по определению так же задается гауссовой с нулевым математическим ожиданием. Это даёт возможность получить математическое выражение для функции невязки, характеризующей отклонение значений реального измерения процесса от его математической модели.

Для определения оптимальной апостериорной оценки вектора состояния задается предположение, что эта оценка соответствует ее математическому ожиданию – максимуму апостериорной плотности вероятности. Это даёт возможность на основе формулы Байеса для априорной и апостериорной плотности вероятности получить уравнение Стратоновича-Кушнера.

Использование уравнения Стратоновича-Кушнера при различных видах и значениях вектора сноса и матрицы диффузии марковского стохастического процесса позволяет решать различные задачи фильтрации, идентификации, сглаживания и прогноза состояния системы, как для непрерывных, так и для дискретных систем. Дискретная реализация разработанных непрерывных алгоритмов апостериорной оценки позволяет получить конкретные дискретные алгоритмы для реализации в бортовом компьютере мобильной робототехнической системы.

Ключевые слова: математическая модель, пространство состояний, стохастическое уравнение, критерий оптимизации, математическое ожидание, вектор сноса, матрица диффузии.

Введение. В современных системах управления подвижными объектами, к которым относится большой класс беспилотных (летательных, наземных, надводных и т. п.) аппаратов, для получения информации о внешней среде и состоянии объекта управления используются источники информации различной физической природы и конструктивного устройства. В условиях интенсивного развития информационных систем и технологий большое значение имеет разработка алгоритмов обработки информации, поступающей от различных источников [1, 2].

Эволюция вектора состояния $X(t)$ таких систем в общем случае может описываться нелинейным векторно-матричным уравнением вида

$$\dot{X}(t) = \varphi(X, U, t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где $X = [x_1, \dots, x_n]^T = X(t)$ – n -мерный вектор фазовых координат системы, φ – нелинейная векторная функция, X_0 – случайный вектор начального состояния, $U(t)$ – детерминированный вектор управлений (внешних воздействий).

Источники информации о состоянии системы представляют собой вектор $Z(t)$ размерности $m \leq n$. Математическая модель совокупности измерителей в общем случае может описываться стохастическим векторно-матричным уравнением в форме Ланжевена

$$\dot{Z}(t) = \mu(Z, X, t) + H(t) \cdot \zeta(t), \quad Z(t_0) = Z_0. \quad (2)$$

Здесь μ – нелинейная векторная функция, $H(t)$ – матрица коэффициентов, $\zeta(t)$ – вектор случайных ошибок измерений. Большинство современных высокоточных измерителей можно считать безынерционными, а их инструмен-

тальные погрешности в пределах рабочих полос пропускания диапазонов частот можно считать белыми шумами.

Задача состоит в том, чтобы на основе вектора измерений $Z(t)$ и известных математических моделей (1) и (2) получить оптимальную по заданному критерию оценку вектора состояния $\hat{X}(t)$ объекта управления или части фазовых координат вектора $X(t)$, чтобы впоследствии использовать $\hat{X}(t)$ для управления объектом.

В зависимости от вида функций и критерия оптимизации могут быть построены конкретные алгоритмы получения оценки $\hat{X}(t)$. Наибольшее распространение получили алгоритмы, основанные на линейной форме математической модели системы (1) и безынерционном измерителе (2). Такие математические модели объекта управления и измерителя имеют вид [3, 4]

$$\dot{X}(t) = D(t)X(t) + U(t) + B(t)\xi(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (3)$$

$$Z(t) = C(t) \cdot X(t) + H(t) \cdot \zeta(t). \quad (4)$$

Здесь $D(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $H(t)$ – матрицы коэффициентов, $\xi(t)$, $\zeta(t)$ – векторы некоррелированных белых гауссовых шумов с нулевыми математическими ожиданиями и матрицами интенсивностей $G(t)$ и $N(t)$, соответственно.

В качестве критерия оптимизации чаще всего рассматривается минимум среднего квадрата ошибки оценивания $\min M[(\hat{X}(t) - X(t))^2]$, где $M[\dots]$ – символ математического ожидания.

Заметим, что практически любые математические модели систем с мультипликативными и небелыми шумами путем расширения вектора состояния и использования формирующих фильтров [5] можно свести к моделям с белыми аддитивными шумами. Модели вида (3) и (4) позволяют получить достаточно строгий вывод алгоритма вычисления оптимальной оценки $\hat{X}(t)$.

Модель измерителей (4) во многих случаях можно считать адекватной реальным устройствам (датчикам). В то же время линейная модель объекта управления (3) как правило, существенно отличается от нелинейной модели (1). Ошибки линеаризации, методические допущения порождают неопределенности в построении моделей процесса $X(t)$.

Случайные процессы вида (3) с аддитивными белыми шумами являются марковскими

(точнее – марковскими первого порядка) [6], так как закон распределения такого процесса зависит только от его значений в текущий момент времени (непосредственно предшествующий будущему) и не зависит от того, какие значения принимал этот процесс в момент времени, предшествующий данному. Для марковского процесса плотность распределения вероятности (ПРВ) вектора фазовых координат $X(t)$ полностью определяется двумя функциями – первой функцией плотности вероятности $f_1(X, t)$ и плотностью вероятности перехода $f_1(X(t_1)|X(t))$. В некоторых случаях марковский процесс удобно описывать с помощью характеристических функций, связанных с плотностями $f_1(X, t)$ и $f_1(X(t_1)|X(t))$ через преобразование Фурье [7].

Непрерывный марковский процесс (3) может быть построен как предел суммы большого числа малых приращений. В соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей закон распределения суммы индивидуально малых случайных величин с ростом числа слагаемых сводится к нормальному закону распределения [8]. Следовательно, для многомерного случайного марковского процесса $X(t)$ ПРВ имеет вид

$$f(X, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |\Theta|}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X(t) - m_x(t))^T \Theta^{-1} (X(t) - m_x(t)) \right\}. \quad (5)$$

В выражении (5) $|\Theta|$ – определитель ковариационной матрицы Θ вектора $X(t)$, $m_x(t)$ – математическое ожидание вектора $X(t)$. В скалярной форме выражение (5) имеет вид

$$f(X, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |\Theta|}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2 |\Theta|} \sum_{p, q=1}^n \Theta^{pq} (x_p - m_{xp})(x_q - m_{xq}) \right\}, \quad (6)$$

где Θ^{pq} – алгебраическое дополнение элемента Θ_{pq} в определителе $|\Theta|$.

Рассмотрим эволюцию ПРВ вектора $X(t)$ на бесконечно малом (элементарном) интервале времени Δt . Разложим функцию $f(X, t)$ вида (6) в ряд Тейлора в окрестностях точки $t + \Delta t$.

$$f(x, t) = f(X, t + \Delta t) + \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial x_k} [\Delta m_k(X, t) f(X, t + \Delta t)] +$$

$$+ \frac{1}{2!} \sum_{k,l=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_k \partial x_l} [\Delta m_{kl}(X,t) f(X,t+\Delta t)] +$$

$$+ \frac{1}{3!} \sum_{k,l,r=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_k \partial x_l \partial x_r} [\Delta m_{klr}(X,t) f(X,t+\Delta t)] + \dots$$

В выражении (7) через Δm обозначены условные математические ожидания и условные корреляционные моменты приращений компонент $x_k(t)$ вектора $X(t)$ при изменении аргумента t на малом интервале Δt .

$$\Delta m_k(X,t) = M[x_k(t+\Delta t) - x_k(t)] =$$

$$A_k(X,t)\Delta t + o(\Delta t),$$

$$\Delta m_{kl}(X,t) = M[(x_k(t+\Delta t) - x_k(t))(x_l(t+\Delta t) - x_l(t))] = B_{kl}(X,t)\Delta t + o(\Delta t), \quad (8)$$

$$\Delta m_{klr}(X,t) = M[(x_k(t+\Delta t) - x_k(t))(x_l(t+\Delta t) - x_l(t))(x_r(t+\Delta t) - x_r(t))] = o(\Delta t),$$

$$\Delta m_{klr\dots}(X,t) = o(\Delta t),$$

где $o(\Delta t)$ – величина высшего порядка малости чем Δt ; $k, l, r, \dots = 1, 2, 3, \dots$

В выражениях (8) $A_k(X,t)$ – компоненты вектора сноса $A(X,t)$, $B_{kl}(X,t)$ – компоненты матрицы диффузии $B(X,t)$ процесса $X(t)$ вычисляются по формулам [9]

$$A_k(X,t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} M \left[\frac{x_k(t+\Delta t) - x_k(t)}{\Delta t} \right], \quad (9)$$

$$B_{kl}(X,t) =$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} M \left[\frac{(x_k(t+\Delta t) - x_k(t))(x_l(t+\Delta t) - x_l(t))}{\Delta t} \right]. \quad (10)$$

Условные вероятностные моменты Δm порядков выше второго имеют порядок малости $o(\Delta t)$ в соответствии с определением [6] марковского процесса.

Разделив обе части выражения (7) на Δt и перейдя к пределу $\Delta t \rightarrow 0$ с учетом выражений (9)–(10) и того, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(X+\Delta t) - f(X,t)}{\Delta t} = \frac{\partial f(X,t)}{\partial t},$$

получим многомерное уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова для априорной ПРВ процесса $X(t)$ [3, 5, 9].

$$\frac{\partial f(X,t)}{\partial t} = -\nabla_x^T [A(X,t)f(X,t) +$$

$$+ \frac{1}{2} \nabla_x^T [\nabla_x^T (B^T(X,t)f(X,t))]]], \quad (11)$$

где $\nabla_x^T = \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \dots \frac{\partial}{\partial x_n} \right]$ – векторный оператор дифференцирования.

Иногда уравнение (11) записывают в форме

$$\frac{\partial f(X,t)}{\partial t} = -\text{div } \pi(X,t), \quad (12)$$

где $\text{div} = \nabla_x^T$, $\pi(X,t)$ – плотность потока вероятности вида

$$\pi(X,t) = A(X,t)f(X,t) -$$

$$- \frac{1}{2} \nabla_x^T [\nabla_x^T (B^T(X,t)f(X,t))]. \quad (13)$$

Уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова (11) или (12) является уравнением в частных производных параболического типа. Его решение представляет значительную трудность, однако на основе его использования можно решить ряд задач, в частности – задачу апостериорного оценивания фазовых координат системы, описываемой марковской математической моделью.

Для определения апостериорной плотности вероятности $\hat{f}(X,t+\Delta t)$ процесса $X(t)$, описываемого выражением (3) с учетом математической модели измерений (4) используем формулу Байеса [9] для плотностей вероятности

$$\hat{f}(X,t+\Delta t) =$$

$$= \frac{f(X,t+\Delta t)f(Z,t+\Delta t|X(t))}{\int_{-\infty}^{\infty} f(X,t+\Delta t)f(Z,t+\Delta t|X(t))dX}. \quad (14)$$

В выражении (14) $f(X,t+\Delta t)$ – априорная ПРВ, эволюция которой в пространстве и во времени описывается уравнением (12). $f(Z,t+\Delta t|X(t))$ – условная ПРВ вектора $Z(t+\Delta t)$ при фиксированном состоянии вектора $X(t)$ в момент времени t .

Для малых интервалов времени Δt ПРВ входящего в выражение (4) вектора ошибок измерений $\zeta(t+\Delta t)$ по определению [4] является гауссовой с нулевым математическим ожиданием. В соответствии с выражением (4) ПРВ $f(Z,t|X(t))$ также является гауссовой с математическим ожиданием $C(t)\hat{X}(t)$, где $\hat{X}(t)$ – математическое ожидание апостериорной ПРВ $\hat{f}(X,t)$. Для симметричной ПРВ $\hat{f}(X,t)$ век-

тор $\hat{X}(t)$ соответствует максимуму $\hat{f}(X, t)$. Следовательно, ПРВ $\hat{f}(Z, t + \Delta t | X(t))$ имеет вид

$$f(Z(t + \Delta t) | X(t)) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m |Q(t + \Delta t)|}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \rho(\hat{X}, Z, t + \Delta t) \right\}, \quad (15)$$

где $|Q(t + \Delta t)|$ – определитель дисперсионной матрицы процесса $\zeta(t + \Delta t)$ (интенсивность шума), $\rho(X, Z, t + \Delta t)$ – функция невязки [3, 4, 5], в данном случае вычисляемая по формуле

$$\begin{aligned} \rho(X, Z, t + \Delta t) = & \left[Z(t + \Delta t) - C(t + Q) \hat{X}(t + \Delta t) \right]^T \times \\ & \times Q^{-1}(t + \Delta t) \left[Z(t + \Delta t) - C(t + Q) \hat{X}(t + \Delta t) \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

С учетом (15) выражение (14) для момента t представим в виде

$$\begin{aligned} \hat{f}(X, t) = f(X, t) \times \\ \exp \left[-\frac{1}{2} \rho(\hat{X}, Z, t) \right] \times \\ \times \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(X, t) \exp \left[-\frac{1}{2} \rho(\hat{X}, Z, t) \right] dX}{\int_{-\infty}^{\infty} f(X, t) \exp \left[-\frac{1}{2} \rho(\hat{X}, Z, t) \right] dX}. \end{aligned} \quad (17)$$

Рассматривая эволюцию ПРВ $\hat{f}(X, t)$ на элементарном малом интервале Δt разложим экспоненциальную функцию по времени в ряд Маклорена ($e^\lambda \approx 1 + \lambda + o(t)$).

$$\begin{aligned} \hat{f}(X, t + \Delta t) = f(X, t + \Delta t) - \\ 1 + \left[-\frac{1}{2} \rho(\hat{X}, Z, t) \right] \times \\ \times \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(X, t) \left[1 - \frac{1}{2} \rho(\hat{X}, Z, t) \right] dX}{\int_{-\infty}^{\infty} f(X, t) \left[1 - \frac{1}{2} \rho(\hat{X}, Z, t) \right] dX}. \end{aligned} \quad (18)$$

В выражении (18) учтем, что на интервале Δt априорная ПРВ $f(X, t + \Delta t) = f(X, t) + \Delta t \operatorname{div} \pi(X, t)$, $\pi(X, t)$ – априорная плотность потока вероятности процесса $X(t)$ вида (13).

После соответствующих преобразований выражения (18), удерживая члены первого порядка малости относительно Δt , получим выражение [9]

$$\begin{aligned} \hat{f}(X, t + \Delta t) = \hat{f}(X, t) - \Delta t \cdot \operatorname{div} \pi(X, t) - \\ - \frac{1}{2} \Delta t \rho(\hat{X}, Z, t) \hat{f}(X, t) + \Delta t \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{div} \pi(X, t) dX + \\ + \frac{1}{2} \Delta t \hat{f}(X, t) \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\hat{X}, Z, t) \hat{f}(X, t) dX, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\operatorname{div} \pi(X, t) = \nabla_x^T \pi(X, t)$.

Предполагая существование предела

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \left[\hat{f}(X, t + \Delta t) - \hat{f}(X, t) \right] = \frac{\partial \hat{f}(X, t)}{\partial t}, \quad (20)$$

после предельного перехода получим интегродифференциальное уравнение Стратоновича-Кушнера для апостериорной плотности вероятности [3, 5, 9]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{f}(X, t)}{\partial t} = -\operatorname{div} \pi(X, t) - \\ - \frac{1}{2} \left[\rho(\hat{X}, Z, t) - \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\hat{X}, Z, t) \hat{f}(X, t) dX \right] \hat{f}(X, t), \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} \pi(X, t) = A(X, t) \hat{f}(X, t) - \\ - \frac{1}{2} \left[\nabla_x^T (B^T(X, t) \hat{f}(X, t)) \right]^T. \end{aligned} \quad (22)$$

Использование уравнение (21) позволяет решать различные задачи [3, 4, 5, 9, 11] фильтрации, идентификации, прогноза состояния стохастических систем.

Умножив обе части выражения (21) на $X(t)$ и проинтегрировав по X в бесконечных пределах, получим апостериорное уравнение для математического ожидания $M[X(t)] = \hat{X}(t)$, которое является оптимальной оценкой вектора $X(t)$ по критерию максимума апостериорной вероятности.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(X, t) \hat{f}(X, t) dX - \\ - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\nabla_x^T (B^T(X, t) \hat{f}(X, t)) \right]^T dX - \\ - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} (X(t) - \hat{X}(t)) \rho(\hat{X}, Z, t) \hat{f}(X, t) dX. \end{aligned} \quad (23)$$

В выражении (23) учтено, что при $X(t) = \pm\infty$,

$$\hat{f}(X, t) = 0 \text{ и } \frac{\partial \hat{f}(X, t)}{\partial X} = 0.$$

В простейшем случае линейной постановки задачи, когда процесс $X(t)$ описывается уравнением (3), а измеритель – выражением (4), вектор сноса имеет вид $A(X, t) = D(t)X(t) + U(t)$, а матрица диффузии равна интенсивности шума $\xi(t)$ $B(X, t) = G(t)$. В этом случае выражение (23) принимает вид [3, 4]

$$\dot{\hat{X}}(t) = D(t)\hat{X}(t) + U(t) + R(t)C^T(t)Q^{-1}(t) \times \\ \times [Z(t) - C(t)\hat{X}(t)], \hat{X}(t_0) = M[X_0]. \quad (24)$$

В выражении (24) $R(t)$ – апостериорная корреляционная матрица, дифференциальное уравнение для которой получается умножением выражения (21) на $[X(t) - \hat{X}(t)][X(t) - \hat{X}(t)]^T$ и интегрированием по X в бесконечных пределах.

$$\dot{R}(t) = D(t)R(t) + R(t)D^T(t) + G(t) - \\ - R(t)C^T(t)Q^{-1}(t)C(t)R(t), R(t_0) = R_0. \quad (25)$$

Выражения (24) и (25) представляют собой классический фильтр Калмана (Калмана-Бьюси) [3, 4].

Заметим, что точно такой же результат получается при выводе фильтра Калмана (24)-(25) для линейной постановки задачи по критерию минимума среднего квадрата ошибки на основе использования интегрального уравнения Винера-Хопфа [5]. Однако использование дифференциального уравнения Стратоновича-Кушнера (21) даёт больше возможностей для получения различных алгоритмов апостериорной обработки информации [10, 11, 12].

ВЫВОД

Таким образом, получен оригинальный вывод уравнения Стратоновича-Кушнера для апо-

стериорной плотности вероятности стохастического марковского процесса $X(t)$. При этом априорная плотность вероятности процесса $X(t)$ изначально считается гауссовой дифференцируемой функцией, что позволяет разложить ее в ряд Тейлора без использования в промежуточных преобразованиях характеристических функций и их разложения на гармоники в ряд Фурье.

Для малых интервалов времени плотность вероятности вектора ошибок измерений по определению так же является гауссовой с нулевым математическим ожиданием. Это дает возможность получить выражение для функции невязки, характеризующей отклонение значений реального измерения процесса от его математической модели.

Для определения оптимальной апостериорной оценки вектора состояния задаем, что эта оценка соответствует ее математическому ожиданию – максимуму симметричной апостериорной плотности вероятности. Это даёт возможность на основе формулы Байеса для априорной и апостериорной плотности вероятности получить уравнение Стратоновича-Кушнера.

Использование уравнения Стратоновича-Кушнера при различных видах и значениях вектора сноса и матрицы диффузии марковского стохастического процесса позволяет решать различные задачи фильтрации, идентификации, сглаживания и прогноза состояния системы, как для непрерывных, так и для дискретных систем. Дискретная реализация разработанных непрерывных алгоритмов апостериорной оценки позволяет получить конкретные дискретные алгоритмы для их реализации в бортовом компьютере мобильной робототехнической системы.

Литература

1. Красильщиков, М. Н. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / М. Н. Красильщиков, Г. Г. Серебряков. – М.: Физматлит, 2009. – 558 с.
2. Алешин, Б. С. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Б. С. Алешин, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморский. – М.: Физматлит, 2006. – 424 с.
3. Балакнишнан, А. В. Теория фильтрации Калмана: Пер. с англ. / А. В. Балакнишнан. – М.: Мир, 1988. – 1000 с.
4. Синицын, И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева / И. Н. Синицын. – М.: Университетская книга, 2006. – 640 с.
5. Пупков, К. П. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / К. П. Пупков, Н. Д. Егупов. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 656 с.
6. Тихонов, В. И. Марковские процессы / В. И. Тихонов, И. Н. Миронов. – М. А.: Советское радио, 1977. – 450 с.
7. Пугачев, В. С. Теория стохастических систем / В. С. Пугачев, И. Н. Синицын. – М.: Логос, 2004. – 1000 с.
8. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.
9. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М.: Наука, 1987. – 304 с.

10. Лобатый, А. А. Особенности применения фильтров Калмана-Бьюси в комплексах ориентации и навигации / А. А. Лобатый, А. С. Бенкафо. – М.: Доклады БГУИР, 2013. – С. 67–71.
11. Лобатый, А. А. Оценка навигационных параметров подвижного объекта в условиях многорежимности / А. А. Лобатый, А. С. Бенкафо. – М.: Доклады БГУИР, 2014. – С. 52 с.
12. Лобатый, А. А. Структурно-параметрическая нечеткая коррекция алгоритма фильтрации / А. А. Лобатый, А. С. Бенкафо, А. С. Абуфанас. – М.: Системный анализ и прикладная информатика, 2014. – С. 4–8.

References

1. Krasilchikov, M. N. Modern information technologies in problems of navigation and guidance maneuverable unmanned aerial vehicles / M. N. Krasilchikov, G. G. Serebryakov. – M.: FIZMATLIT, 2009. – 558 p.
2. Aleshin, B. S. Orientation and navigation of mobile objects: modern information technology / B. S. Aleshin, K. K. Veremeyenko, A. I. Chernomorski. – M.: FIZMATLIT, 2006. – 424 p.
3. Balakrishnan, A. V. Kalman filtering theory: Per. from English. / A. V. Balakrishnan. – M.: Mir, 1988. – 1000 p.
4. Sinitsyn, I. N. Kalman filters and Pugachev / I. N. Sinitsyn. – M.: University Book, 2006. – 640 p.
5. Pupkov, K. P. Methods of classical and modern automatic control theory. 5 t / K. P. Pupkov, N. D. Egupov. – M.: Publisher MSTU. NE Bauman, 2004. – 656 p.
6. Tikhonov, V. I. Markov Processes / V. I. Tikhonov, I. N. Mironov. – M.: Soviet Radio, 1977. – 450 p.
7. Pugachev, V. S. Theory of stochastic systems / V. S. Pugachev, I. N. Sinitsyn. – M.: Logos, 2004. – 1000 p.
8. Wentzel, E. S. Probability theory / E. S. Wentzel. – M.: Higher School, 1999. – 576 p.
9. Kazakov, I. E. Methods of optimization of stochastic systems / I. E. Kazakov, D. I. Gladkov. – M.: Nauka, 1993. – 270 p.
10. Lobaty, A. A. Features of the Kalman-Bucy filter complexes in orientation and navigation / A. A. Lobaty, A. S. Benkafo. – Minsk: Reports BSUIR, 2013. – P. 67–71.
11. Lobaty, A. A. Evaluation of navigation parameters of the movable object in a multimode / A. A. Lobaty, A. S. Benkafo. – Minsk: Reports BSUIR, 2014. – P. 52–58.
12. Lobaty, A. A. Structural-parametric correction fuzzy filtering algorithm / A. A. Lobaty, A. S. Benkafo, A. S. Abufanas. – Minsk: System Analysis and Applied Computer Science, 2014. – P. 4–8.

Поступила 01.03.2016

LOBATY A. A., YACINA Y. F., AREFYEU N. N.

OPTIMAL ESTIMATION OF RANDOM PROCESSES ON THE CRITERION OF MAXIMUM A POSTERIORI PROBABILITY

Belarusian National Technical University

The problem of obtaining the equations for the a posteriori probability density of a stochastic Markov process with a linear measurement model. Unlike common approaches based on consideration as a criterion for optimization of the minimum mean square error of estimation, in this case, the optimization criterion is considered the maximum a posteriori probability density of the process being evaluated.

The a priori probability density estimated Gaussian process originally considered a differentiable function that allows us to expand it in a Taylor series without use of intermediate transformations characteristic functions and harmonic decomposition. For small time intervals the probability density measurement error vector, by definition, as given by a Gaussian with zero expectation. This makes it possible to obtain a mathematical expression for the residual function, which characterizes the deviation of the actual measurement process from its mathematical model.

To determine the optimal a posteriori estimation of the state vector is given by the assumption that this estimate is consistent with its expectation – the maximum a posteriori probability density. This makes it possible on the basis of Bayes' formula for the a priori and a posteriori probability density of an equation Stratonovich-Kushner.

Using equation Stratonovich-Kushner in different types and values of the vector of drift and diffusion matrix of a Markov stochastic process can solve a variety of filtration tasks, identify, smoothing and system status forecast for continuous and for discrete systems. Discrete continuous implementation of the developed algorithms posteriori assessment provides a specific, discrete algorithms for the implementation of the on-board computer, a mobile robot system.

Keywords: mathematical model, state space, stochastic equations, optimization criteria, the expectation, the demolition of the vector, diffusion matrix.

**Lobaty A. A.**

Doctor of science, professor. In 2000 he established chair «Information systems and technologies» in Belorussian National Technical University, department of «International Institute of Distance Education». His research interests include algorithms, concepts, and architecture for digital signal processing systems. He has extensive consulting experience in control of unmanned aerial vehicles. He is author and coauthor of many papers in scientific magazines, conference proceedings, and a number of books. He has number of university and state awards for achievements in teaching and research.

**Yacina Y. F.**

Director of the State Research and Production Enterprise unmanned multipurpose complexes. A specialist in the field of research and development of control systems of mobile robotic systems for various application. Head of research and development project on the creation of unmanned aerial vehicles.



Nikolay Arefiev received the graduate degree in software engineering from the Belarusian National Technical University in 2014 and the Master's degree in system analysis and control of information processing in 2015. He is currently working on PhD degree program. His current research interests include control of unmanned aerial objects.

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT OF
TECHNICAL OBJECTS**

PEI PING, YURY N. PETRENKO

MESH NETWORK DEVELOPMENT PROJECT IN GREAT STONE INDUSTRY PARK

Belarusian National Technical University

Wireless Mesh network (WMN) are increasingly becoming popular as low cost alternatives to wired network for providing broadband access to users. A wireless mesh network (WMN) is a communication networks made up of radio nodes organized in a mesh topology. It is also a form of wireless network. Wireless mesh networks often consist of mesh clients, mesh routers and gateways. The mesh clients are often laptops, cell phones and other wireless devices while the mesh routers forward traffic to and from the gateways, which may, but need not, be connected, to the Internet. In this paper, we discuss different radio frequency range in wireless connected to Access Point (AP) and the project from Belarus – China great stone industry park in Mesh network. The China-Belarus industrial park is a territorial entity with the area of approximately 80 sq. km with a special legal status for the provision of comfortable conditions for business conducting. The Park is located in a unique natural complex 25 km far from Minsk, the capital of the Republic of Belarus. It is in close proximity to the international airport, railway lines, a transnational highway Berlin-Moscow. The result of analysis shows distribution of AP and covering services in great stone industry park. Mesh network provides robustness and load balancing in wireless networks communication.

Keywords: *Mesh network, equipment, project, testing.*

1. Mesh Network Introduction

More demanding about wireless broadband access by person follow with wireless communications and mobile computing development of technology. Wireless Mesh Networks broadband access technology as the «last kilometer» is the most interesting for scientists and engineers in development. Wireless Mesh Network which combines the advantages from wireless local area network WLAN and Ad Hoc networks. It is a high capacity, high speed, covering widely networks. At the same hierarchical topology, wireless Mesh network has reliable transmission, global coverage, scalability and low upfront investment properties. The principle of wireless Mesh network technology is a low-power multi-hop system. The message packet passes from one node to another node until the packet reaches the destination in Mesh network.

2. The advantages in Mesh network

1. Reliability is greatly enhanced to compared with a single-hop networks. For example there is a temporary local interference (such as another radio signal or an object) may prevent or reduce

a data rate of conventional networks; alternative path mesh technology could simply unaffected by a transmission data. Similarly, any node in a mesh network hardware failure will not cause mesh completely ineffective. Redundant mesh technology also increases the effective bandwidth because multiple data streams can be transmitted simultaneously. For example, home networking environment can put the video data stream from the living room to the bedroom for DVD player, a TV set. At the same time, the audio data stream from a home computer connects to a portable MP3 player pool.

2. The low cost of laying infrastructure for wireless access to Internet is currently the main way through the laying of Wi-Fi hotspots. It is basically a wireless local area network (WLAN). It consists of a plurality of WLAN wireless network. Wireless 802.11 is based WLAN users access to Internet. In order to make the entire city we can achieve wireless access because of the limited coverage of 802.11 signals. You must establish a lot of access points with the help of wired or fiber optic cables that are connected to the Internet. It is clear that the costs will be high-

er. At the same time too wired access is also greatly reduced by laying speed. There is wireless Mesh network to Internet with only a few access points, so this network greatly reduces network infrastructure costs. Laying speed can be reduced from 70% to 75% of using operating system costs of a wireless network service providers.

3. Flexible networking, easy to maintain due to the characteristics of wireless Mesh networking is we should add wireless router (WR) where needed and other small wireless devices with existing facilities to broadband wireless access network consisting of wireless mesh network selection feature is the link interrupted or partial expansion and upgrade. It does not affect the entire network operation, thereby increasing network flexibility, feasibility and compared to traditional networks that are more powerful and more perfect.

4. Mesh network has two advantages to compare with the cellular network. The first is transmission rate greatly improved: the current network using wireless Mesh network technology, and can be fused with other wireless network technologies (such as Wi-Fi, UWB, etc.), the rate can theoretically reach 54 Mbit/s, or even higher. At present, the development of the 3G technology, the theoretical transfer rate in the high-speed mobile environment supports only 144 Kbit/s, walk slow moving environment supports 384 Kbit/s, even in the stationary state also reach 2 Mbit/s. The second is mesh network has low investment costs. A significant reduction in Wireless Mesh Network backbone network construction costs, not only its infrastructure AP, IR (Intelligent Router, intelligent router), WR than the cellular mobile communication system base stations and other equipment cheaper and network configuration and maintenance should be simple and more convenient.

5. The wireless Mesh network compared with WLAN (Wi-Fi) has two advantages. The first is in expanding coverage: Today transmission distance Wi-Fi network maximum 300 m. And because of its ability to penetrate poor, can not pass through metal, water, or other high-density material. So under normal circumstances, in general home or office Wi-Fi network transmission distance is about 25~50 m, and is prone to «blind spots.» The multi-hop routing based wireless Mesh network and its approximate unlimited scalability,

can easily be completely cover a larger area. The second is about robustness: Implementing network robustness usual approach is to use multiple routers to transmit data. If a router fails, the information is transmitted through an alternate path from the other routers. E-mail is one such example, the message information is divided into several packets and then sent over the Internet via a plurality of routers, and finally reach the information assembled into a user's inbox. Mesh network is more robust than single-hop network, because it does not depend on the performance of one single node.

Wireless Mesh network not only has an irreplaceable role in specific areas battlefield, disaster relief but also in our daily public communication services has a great potential. It will bring major changes in the field of wireless broadband wireless Mesh network technology.

3. The Theory of Wireless Mesh Networks

Wireless mesh network is the third topology infrastructure in following figer. Fig. 1 [1]. Each device in a wireless mesh network is typically called a mesh node and is connected with multiple other mesh nodes at the same time. Wireless mesh networks are also multi hop networks because each mesh node can reach another node going through multiple hops and leveraging other nodes as repeaters. The major advantage of wireless mesh networks is the intrinsic redundancy and, consequently, reliability because a mesh network is able to reroute traffic through multiple paths to cope with link failures, interference, power failures or network device failures.

Two types of wireless mesh networks are usually implemented for commercial and government applications.

3.1. Structured wireless mesh networks

In an unstructured wireless mesh network, each mesh node typically uses an Omni-directional antenna and is able to communicate with all the other mesh nodes that are within the transmission range. Wireless links in an unstructured wireless mesh network are not planned and link availability is not always guaranteed. Depending on the density of the mesh network, there may be many different links available to other mesh nodes or none at all. Unstructured mesh networks are usually implemented with non-line of sight radios

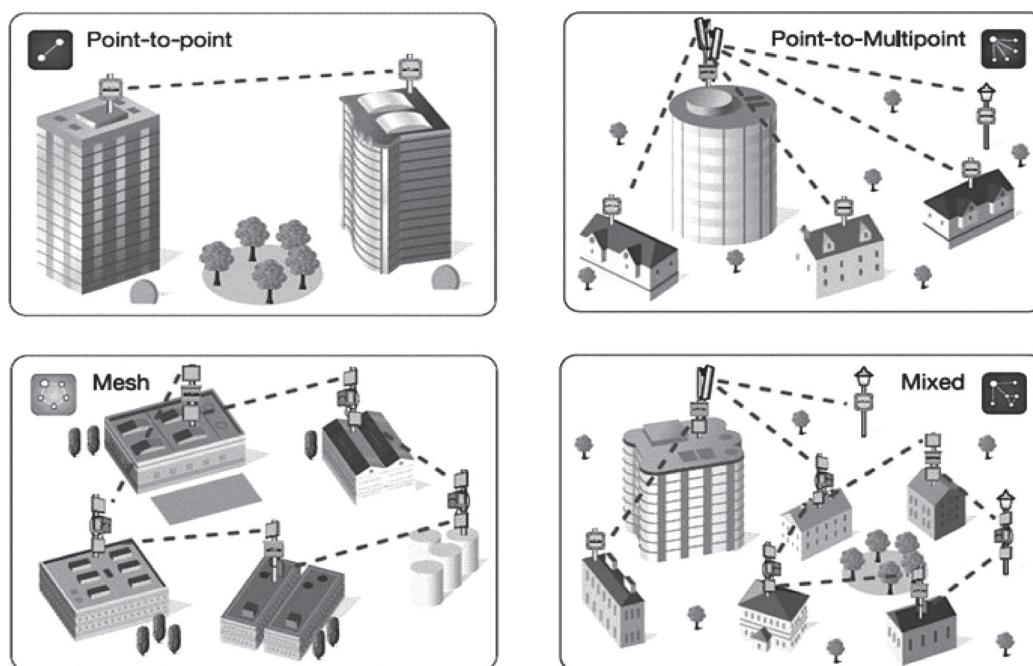


Fig. 1. Point-to-point, Point-to-Multipoint and Mesh Networks

(NLOS) using low frequency and low bandwidth radios operating, for example, in the UHF bands, such as 400 MHz or in the license-free band at 900 MHz. Unstructured wireless mesh networks leverage one single channel shared by all the radios. Therefore, the higher the number of hops a transmission requires, the lower the overall throughput of the network will be.

Structured wireless mesh networks are planned networks typically implemented using multiple radios at each node location and multiple directional antennas. A ring topology using multiple directional wireless links is commonly used in a structured wireless mesh network to enable each radio to seamlessly reroute traffic through different paths in the event of node or link failures. Structured wireless mesh networks can provide two or more alternative paths from each mesh node location and typically use high frequency radios and microwave links with directional antennas. The distance between nodes in a structured wireless mesh network can be up to tens of miles using long-range directional microwave links. Structured wireless mesh networks are often used for mission-critical applications such as wireless video surveillance, public safety, and industrial automation. They provide the ideal network architecture in case a site requires a highly reliable and available wireless network for a broadband application such as video, voice and data

streaming. Each link in a structured wireless mesh network operates on an independent channel and, therefore, the number of hops for a specific transmission does not affect the overall throughput of the network.

Wireless mesh networks have been studied for many years in academia since the early '90s, initially mainly with military applications in mind, and then they started to get significant commercial traction between 2005 and 2010. Fig. 2 [2].

Temporary wireless mesh video surveillance: military and government organizations use wireless mesh networks frequently for rapid deployment of wireless video surveillance in war zones or during hostage situations. Wireless mesh networks have also been used to provide temporary video surveillance to protect major sporting or political events.

Urban wireless video surveillance and public safety: law enforcement agencies have been using wireless mesh networks to create city-wide wireless network infrastructure and stream high resolution video across large cities without compromising reliability or needing to trench large portions of the city area. In the United States most mesh networks for public safety work on the 4.9 GHz public safety band.

Industrial Automation and Condition Monitoring: large industrial plants and oil & gas facilities have been using low-frequency unstructured

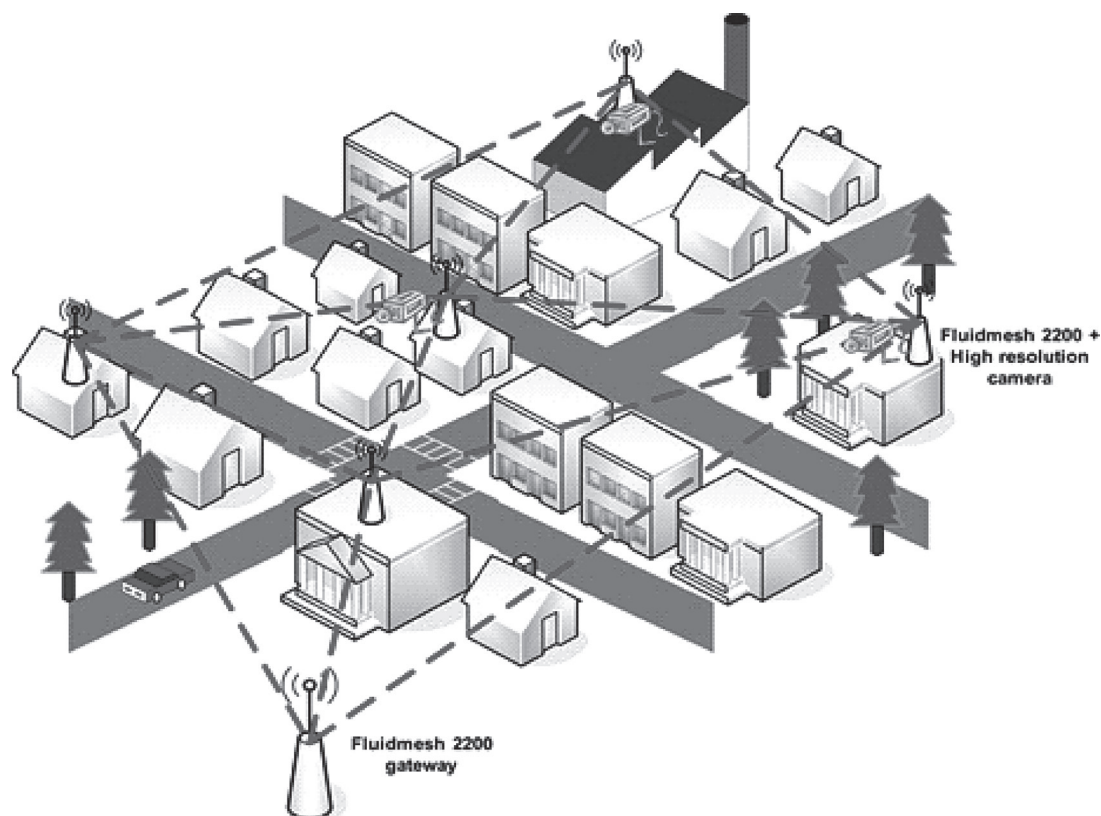


Fig. 2. Wireless Mesh Network

mesh networks for condition monitoring and sensor data collection. At the same time, industrial automation has leveraged structured mesh networks operating at 5 GHz (5.4 GHz, 5.7 GHz and 5.8 GHz license-free bands) to high-throughput applications such as video and voice streaming.

Mining Automation: Mines have been pushing to constantly increase their efficiency leveraging automaton and technology. Large open pit mines have been using outdoor wireless mesh networks for video surveillance, truck automation and condition monitoring. Both low throughput and high throughput applications in mines often rely on a wireless mesh network due to the lack of any other telecom infrastructure.

Environmental monitoring and precision agriculture: farming is using increasingly more automation and technology to increase profitability. Farmers are adding sensors to their fields, tractors and vineyards to be able to act in a more precise and timely manner, spending less money and wasting less resources. Low frequency wireless mesh networks using sensor networks have been deployed frequently for environmental conditional monitoring both in vineyards and industrial crop farming. At the same time, high frequency wire-

less mesh networks in the 5 GHz band (5.4 GHz, 5.7 GHz and 5.8 GHz license-free bands) are getting more traction for tractor automation and precision agriculture as high resolutions cameras become a critical component in automating tractors and in collecting aerial images from drones.

3.2. Wireless Mesh Network Equipment

The single-radio wireless AP be used as a wired terminal nodes AP and wireless endpoint applications. AP RF 2.4 GHz contains an access module. Single-radio wireless AP does not have the Mesh routing functions. Multi-RF wireless AP.

Multi-RF wireless AP is a high-capacity equipment, used as a core node Mesh Network under normal circumstances. It has a multi-RF wireless AP contains four high-performance wireless module, which three 5.8 GHz backhaul module, a 2.4 GHz access module.

3.3. Wireless Mesh Solutions of Outdoor

In large LAN planning, you need to choose a different networking according to the needs of specific business. According to network planning and operational needs of different network types as follow: Fig. 3 [5].

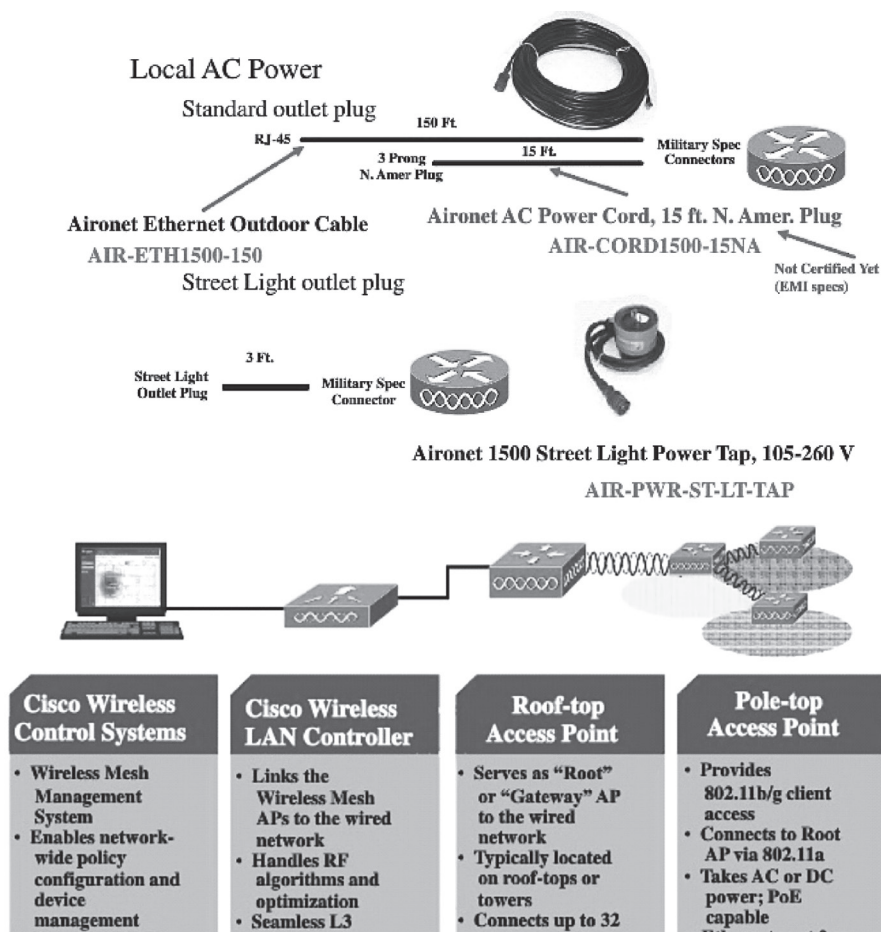


Fig. 3. Equipment and organization structure in Mesh network

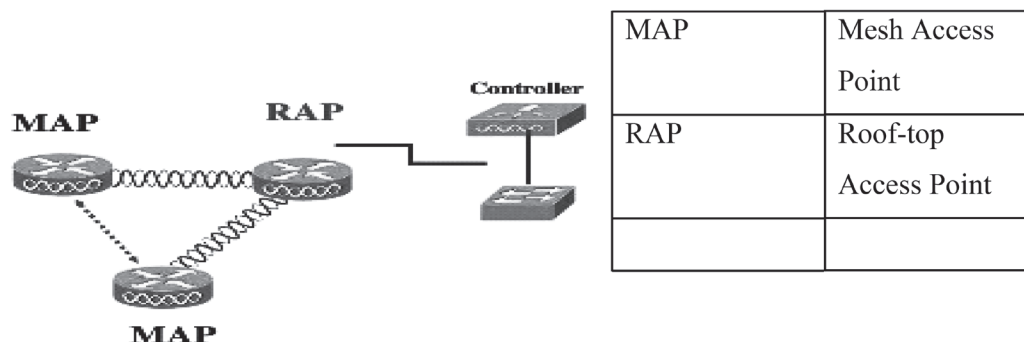


Fig. 4. Mesh Encryption

If to select a common standard 802.11a protocol, the maximum output rate of 54 Mbps, the average throughput of 20–25 Mbps frequency: 5.15–5.25 GHz, 5.25–5.35 GHz, 5.47–5.725 GHz, 5.725–5.875 GHz.

If to select 802.11b maximum output rate of 11 Mbps, the average throughput of 5 Mbps frequency range: 2.4–2.5 GHz.

802.11g maximum output rate of 54 Mbps, an average throughput of 10–20 Mbps, the frequency range: 2.4–2.5 GHz.

802.11n maximum output rate of 540 Mbps, the average throughput of 200 Mbps, the frequency range: 2.5 or 5 GHz.

APs automatically establish connection to controller Roof Top AP RAP) via wired connection Pole-top AP (POP, also MAP) via self-configuring backhaul connection Pole-top AP uses Cisco's Adaptive Wireless Path Protocol to establish best path to Root AP authenticates to controller and downloads configuration and radio parameters. Fig. 4 [6].

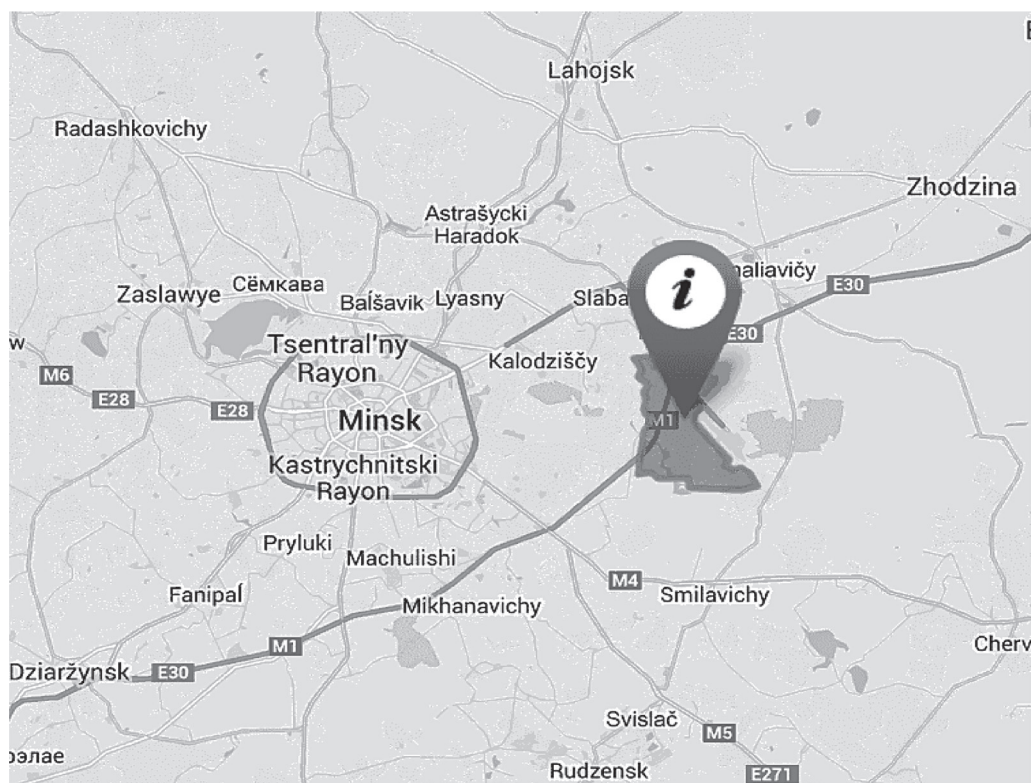


Fig. 5. The location of great stone industrial park

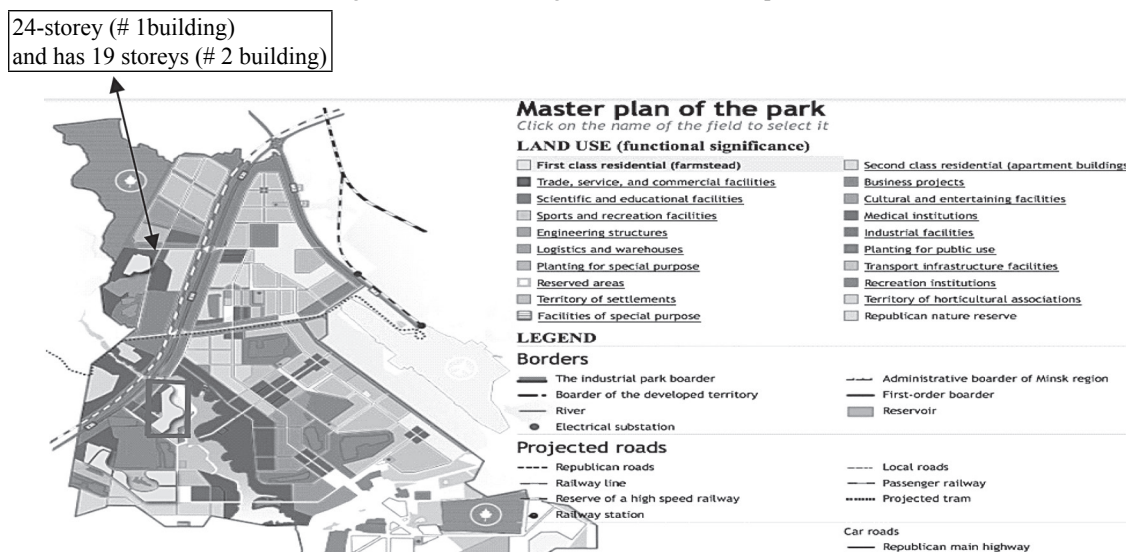


Fig. 6. Location of Marked building in industrial park

4. Background of the project

The China-Belarus Industrial Park. Fig. 5 [7]. (Russian: Китайско-Белорусский индустриальный парк, Chinese: 中国-白俄罗斯工业园) is a special economic zone in Belarus, established under the intergovernmental agreement between the People's Republic of China and the Republic of Belarus. The planning area is 91.5 square kilometers.

Park infrastructure will include industrial, transportation facilities and residential areas, providing social occasions, office and shopping centers, as well as financial and research centers.

Primary residence and secondary residence are located in the southwest and central industrial park continues about 8–9 km away. There will be check-expected 120, 000 employees. In order to create a cozy and comfortable living environment for employees and provide convenience of information

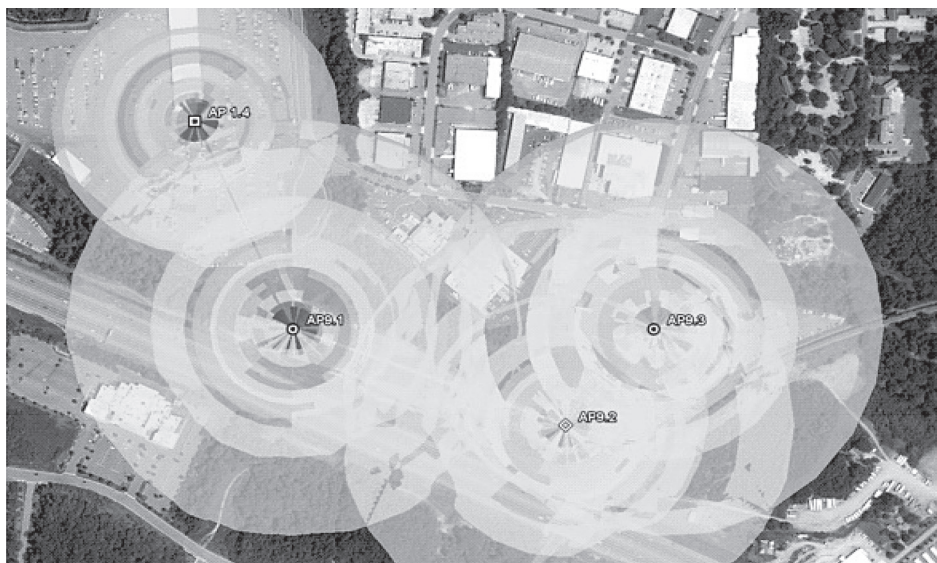


Fig. 7. Coverage distance of mesh access point

(to different international customers and experts) to visit, at the same time in order to increase competitiveness and attract more talent, industry Park raised the need for residential requirements of the overall wireless coverage. At the beginning of this program for the apartment building all the rooms offer broadband Internet access, the latter for security considerations will increase the number of video surveillance and Wi-Fi languages. Fig. 6 [8].

Case for modern apartments in the southwest area coverage. As shown in this area there is an apartment about apartment 50 m, width 34 m, 24-storey (# 1), another apartment 70 meters long from north to south, east to west 50m, has 19 storeys (# 2). There are two apartments around 6–4 layers of low apartment.

Designing

1. The cover from the outdoor to indoor.
2. Equipment laying try to select relatively high position.
3. For network services, can provide a private network and public network separate VLAN settings.

According to conclusions, per square kilometer (0.62137 square miles), and finally by calculating the entire industrial park would need at least 315 to ensure complete coverage of AP obtained. According to calculations required at this time covering at least two AP.

According to Building 2 were covered with projections at this time need 4 AP. Fig. 7 [8].

References

1. **HaiTao, Y.** The Mesh Network Routing Protocol Development Based On Linux System / Y. HaiTao, Z. JieYing, Sun Yat – Sen University. 2014. 30–65 pp.
2. **ZongKui, F.** Wireless Mesh Network Embedded Platform Development / F. ZongKui «Silicon» No.4, 2015
3. **LiHui, Z.** The Development of Wireless Mobile Mesh Network Routing Protocol / Z. LiHui, South China University Of Technology. 2010. – 54 pp.
4. **WenFang, J.** The AODV Algorithm Development in Wireless Mesh Network / J. WenFang, Li. Z, M. JinWang «Computer Engineer And Design». No. 15. 2010.
5. **Ping, P.** Mesh networks / P. ping // [электронный ресурс]. режим доступа: «<https://rep.bntu.by/handle/data/12210>» <https://rep.bntu.by/handle/data/12210> – дата доступа: 15.01.2015.
6. **Ping, P.** Mesh Network Simulation / P. Ping // [электронный ресурс]. режим доступа: «<https://rep.bntu.by/handle/data/122208>» <https://rep.bntu.by/handle/data/122208> – дата доступа: 15.01.2015.
7. **Ping, P.** Mesh Network Simulation / P. Ping, Yury N. Petrenko – System Analysis and Applied Information Science. Vol. 2, 2015, pp. 19–25.
8. **Glatz, E.** Wireless Mesh Networks: Introduction Basic Concepts / E Glatz. New York. 2012. pp. 15–17, 22–26.
9. **Musaloiu-Elefteri, R.** PRACTICAL WIRELESS MESH NETWORKS AND THEIR APPLICATIONS / R Musaloiu-Elefteri, Johns Hopkins University. 2010. – 22 pp.
10. **Jun, J. Sichitiu, M. L.** The nominal capacity of wireless mesh networks in IEEE Wireless Communications / 10.2003. 8–14 pp.

11. **Chen, S. M. Lin, P. Yang, S. R.** A study on distributed/centralized scheduling for wireless mesh network in Proceedings of the 2006 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing / S. M. Chen, P. Lin, S. R. Yang, Canada. 2006. 599–604 pp.

Поступила 01.03.2016

Пей Пинг, Ю. Н. Петренко

ПРОЕКТ БЕСПРОВОДНОЙ ЯЧЕЙСТОЙ СЕТИ ДЛЯ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ПАРКА «ВЕЛИКИЙ КАМЕНЬ»

Беспроводная ячеистая сеть (WMN) все чаще становится популярным решением из-за низкой стоимости как альтернатива проводной сети для предоставления широкополосного доступа для пользователей. Беспроводная ячеистая сеть (WMN) представляет собой коммуникационные сети, состоящие из радио узлов, организованных в топологии сети.

Беспроводные сети состоят из сети клиентов, сетевых маршрутизаторов и шлюзов. Клиенты сети - это часто ноутбуки, сотовые телефоны и другие беспроводные устройства, в то время как сетевые маршрутизаторы пересылают трафик и из шлюзов, которые могут, но не обязательно, быть подключены к Интернету. В статье рассматриваются разные каналы радио беспроводной связи, подключенные к точке доступа (AP) в рамках Белорусско-Китайского проекта промышленного парка «Большой Камень», который является территориальным образованием площадью около 80 кв. Км с особым правовым статусом для предоставления комфортных условий для ведения бизнеса. Парк расположен в уникальном природном комплексе в 25 км от Минска, столицы Республики Беларусь. Он находится в непосредственной близости от международного аэропорта, железнодорожных линий и транснациональной магистрали Берлин-Москва. Результат анализа показывает распределение точек доступа, обеспечивающих принципиальные функции на территории промышленного парка. При этом обеспечивается надежность и балансировка нагрузки в беспроводных ячеистых сетях связи.

Ключевые слова: ячеистая сеть, оборудование, проект, тестирование.



Yury N. Petrenko, IEEE member, graduated from Metallurgical College (Enakievo, Ukraine), and began working career in 1954 as a steelworker at open-hearth Steel Works Plant in Donetsk; he received the Engineer degree (with honors) in electrical engineering from the Belarusian Polytechnic Institute (now Belarusian National Technical University – BNTU) in 1962 and PhD in 1971. In 1965–66, he was a research fellow at the University of California, Berkeley. Since 1974, he has been an Associate professor (in 1995–2005 professor) at the department of Automatic Control of Electrical Drive Systems of BNTU. In 1972–73 he was a UN (UNIDO) expert in Automation in Sofia (Bulgaria) and Vienna. In 1985 he was honored as inventor of the USSR. In 1980–90th, he was a visiting lecturer and research fellow in Syria (Tishrin University, Latakia and Aleppo University), Czechoslovakia, Lebanon and Cuba. He has been teaching Automatic Control of Electric Drives, Numerical Control Systems and Programmable Logic Controllers.

He is an author, Editor and Co-Author of 7 books, recommended by Ministry of Education for University and College -level engineering education and 2 Monographs (in coop). His main research interests in recent years include data signal processing, new control techniques applied to power electronics and electric drives.



Pei Ping was born in Xi An, China. He received the bachelor's degree in information technology engineering from Rovaniemi University of Applied Sciences, Finland, in 2013. Science 2015, he is currently working toward the Master Degree at the department of information systems and technologies in Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus. His fields of interest include Networking Protocols, Ethernet LAN, Wireless Communication

УДК 629.113.073

В. Г. МИХАЙЛОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ, АППРОКСИМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДУШЕК СИДЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ ВОДИТЕЛЯ ТС

ООО «Мидивисана», г. Минск

Рассмотрена ситуация, сложившаяся в области моделирования колебаний транспортных средств (ТС), акцентировано внимание на низкие виброзащитные свойства сидений. Одной из причин, которой является слабая изученность реальных характеристик элементов сиденья, включая подушку. Приведена методика испытаний подушек сидений, получены зависимости изменения их параметров от толщины прокладки подушки и категории резины.

Предложена усовершенствованная математическая модель подушки сиденья, обеспечивающая хорошее совпадение амплитудно-частотной характеристики в полосе частот 2–20 Гц и блок-схема ее реализации в пакете Matlab/Semulink, позволяющие более точно моделировать колебания на рабочем месте водителя транспортного средства. Исследовано влияние подушки на виброзащитные свойства поддрессоренного сиденья при движении грузового автомобиля по булыжному шоссе. Установлено, что изменение толщины прокладки подушки практически не влияет на изменение уровня вибраций водителя на поддрессоренном сиденье. Выбор толщины прокладки для подушки сиденья больше обуславливается физиологическими факторами – обеспечение равномерного распределения давления на тело водителя и систему кровообращения.

Ключевые слова: Транспортное средство, подушка, сиденье, вибрация, виброзащитные свойства, моделирование колебаний на рабочем месте водителя.

Введение

Подушка сиденья является одним из элементов, влияющих на виброзащитные свойства поддрессоренного сиденья транспортного средства и корректность расчетов. Как правило, в качестве упругого и демпфирующего элемента подушки используется латексная губчатая резина 1-й и 2-й категории твердости. Большинство исследователей при расчетах плавности хода подушку не учитывают [1–3], используя одномассовую модель сиденья. В многом это связано с отсутствием экспериментальных данных по параметрам подушек, а также информации о ранее проведенных работах [4–6]. Вместе с тем в случае использования неподдрессоренного сиденья подушка значительно (в 3–4 раза) усиливает колебания водителя в области 3,5–7 Гц [4], [5]. Последние совпадают с собственными частотами внутренних органов человека [3]. Их резонанс вызывает неприятные ощущения. Низкие виброзащитные свойства подушек обусловили широкое применение поддрессоренных сидений, начиная

с 70 годов прошлого столетия. Однако до настоящего времени, несмотря на наличие прекрасного дизайна, проработанной эргономики, различных автоматических регулировок (под массу водителя, по высоте, наклону подушки, спинки, внедрение пневматической подвески), виброзащитные свойства большинства существующих поддрессоренных сидений остаются низкими. Коэффициент передач вибраций (усиления) поддрессоренных сидений с газонаполненным амортизатором составляет 1,3, 1,2, 0,8, 0,7 в октавных полосах частот 2, 4, 8, 16 Гц [5, 6, 8]. Одной из причин, этого является слабая изученность реальных характеристик основных элементов сиденья, включая подушку. Использование при расчетах упрощенных линейных моделей не позволяет объяснить это и требует изучения данной проблемы. В связи широким применением сейчас компьютерного моделирования для оценки плавности хода ТС необходимо располагать реальными характеристиками всех элементов, включая подушку сиденья. Данному вопросу и посвящена эта

работа. Она обобщает ранее проведенные автором на Минском автозаводе экспериментальные исследования [4], [5], [6] (мало доступные широкому кругу из-за давности лет), новую математическую аппроксимацию характеристик и реализацию модели подушки в пакете Matlab/Simulink, а также результаты влияния подушки на вибронегруженность водителя грузового автомобиля, движущегося по булыжному шоссе.

Методика стендовых исследований и использованная аппаратура

Исследование подушек включало в себя:

- а) определение статических упругих характеристик;
- б) определение виброзащитных характеристик подушек сиденья;
- в) определение динамических, упругих и демпфирующих характеристик.

Определение статической упругой характеристики подушки и подвески сиденья производилось на стенде Минского автомобильного завода при медленном нагружении и разгрузке указанных элементов сиденья.

В качестве опорной поверхности при исследовании статической характеристики подушки использовался, согласно ГОСТ16526, стальной диск диаметром 300 мм и толщиной 4 мм. Измерение усилий, приложенных к указанным элементам сиденья, осуществлялось с помощью образцового динамометра сжатия ДОС-0,5-200. Прогиб регистрировался через каждые 5 мм с помощью миллиметровой линейки. Статическая жесткость подушки и подвески сиденья определялась по тангенсу угла наклона касательной в точке, соответствующей $P = 600$ Н.

Виброзащитные характеристики подушек снимались на электродинамических вибростендах ВЭДС-200А и ВЭДС-400А (рис. 1.1) при максимальных амплитудах синусоидальных вертикальных ускорений основания, на которое крепилась подушка (подвеска сиденья), равных 1; 1,5; 2 м/с², в диапазоне частот 2–20 Гц. Виброзащитные характеристики подушек оценивались по коэффициенту передачи K_{Π} , которой определялся по отношению эффективной амплитуды вертикальных ускорений груза на подушке к величине эффективных ускорений основания

$$K_{\Pi} = \frac{\ddot{z}_{\text{гр}}}{\ddot{z}_{\text{осн}}}.$$

Применяемый при испытаниях подушек груз состоял из трех плоских, жестко скрепленных между собой дисков диаметром 300 мм, имеющих массу 60 кг.

Измерение ускорений груза и основания производилось с помощью пьезоэлектрических датчиков ускорений KD-3,5а, виброизмерителя SM-231 и октавно-полосового фильтра OF-201 (аппаратура фирмы «RFT», суммарная погрешность 2–3% с учетом погрешности считывания показаний стрелочного прибора).

Для повышения точности при воспроизведении на стенде заданных величин ускорений учитывался небольшой завал частотной характеристики прибора SM-231 вместе с датчиком в низкочастотной области и вводилась соответствующая коррекция измерения.

Определение динамических характеристик подушек сидений заключалось в получении и регистрации двухкоординатной зависимости усилия, приложенного к сиденью, от относительного прогиба подвески при синусоидальном возбуждении основания сиденья на частоте 5 Гц.

Усилие, приложенное к подушке, определялось косвенным путем – через величину вертикальных ускорений подрессоренной массы сиденья ($m_{\text{гр}} = 60$ кг) по формуле,

$$F = m_{\text{гр}} \ddot{z}_{\text{гр}}.$$

Вертикальное ускорение груза и относительная деформация подушки измерялись с помощью датчика ускорений BWH-201, индуктивного датчика перемещения JWT-302 с пределом измерений +10 мм и тензоусилителя UM-131 (аппаратура фирмы «PFT»). Регистрация результатов испытаний производилась с помощью электронного двухкоординатного осциллографа «Universal Indicator B-00» и кинокамеры (аппаратура фирмы «Disa Electronic» Дания). Погрешность устройств <1%.

Схема замеров и регистрации динамических характеристик подушки представлена на рис. 1.

Примененный при определении динамических характеристик подушек груз состоял из трех плоских, жестко скрепленных между собой дисков, имеющих массу 60 кг. Обработка

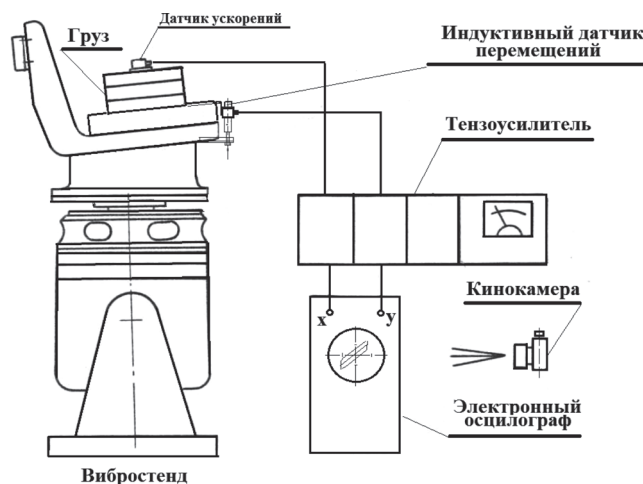


Рис. 1. Схема замеров и регистрации динамических характеристик подушки сиденья

полученных фотоснимков характеристик производилась в фотолаборатории с помощью фотопувеличителя (восьмикратное увеличение).

Жесткость подушки сиденья определялась по тангенсу угла наклона касательной к средней линии динамической характеристики при абсциссе относительных перемещений, равной нулю.

С целью упрощения модели подушки демпфирование в ней было представлено в виде линейного амортизатора с эквивалентным коэффициентом вязкого сопротивления $k_{\text{сопр}}$, который рассчитывался по формуле

$$k_{\text{сопр}} = \frac{\nu m_{\text{гр}}}{\sqrt{K_{\text{п}}^2 - 1}},$$

где ν – резонансная частота груза на подушке, 1/сек; f – резонансная частота груза на подушке, Гц; $f = \frac{1}{6,283} \sqrt{\frac{C}{m_{\text{гр}}}}$ – резонансная частота

груза на подушке, Гц; $K_{\text{п}}$ – усредненный коэффициент передачи на резонансной частоте колебаний груза на подушке; $m_{\text{гр}} = 60$ кг – масса груза.

Указанная расчетная формула для $k_{\text{сопр}}$ получена путем упрощения ниже приведенной общеизвестной формулы [12], учитывая, что при резонансе $\nu \leftrightarrow \omega_0$,

$$K_{\text{п}} = \frac{\ddot{Z}_{\text{гр}}}{\ddot{Z}_{\text{осн}}} = \sqrt{\frac{\omega_0^4 + \left(\frac{k_{\text{сопр}}}{m_{\text{гр}}}\right)^2 \nu^2}{(\nu^2 - \omega_0^2)^2 + \left(\frac{k_{\text{сопр}}}{m_{\text{гр}}}\right)^2 \nu^2}},$$

где ν и ω_0 – соответственно частота вынужденных и собственных колебаний груза на подушке;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{m_{\text{гр}}}}$$

Помимо коэффициента вязкого сопротивления, определялся также параметр затуханий колебаний груза на подушке ψ по общеизвестной формуле

$$\psi = \frac{k_{\text{сопр}}}{2\sqrt{N}m_{\text{гр}}},$$

где C и $k_{\text{сопр}}$ – соответственно динамическая жесткость и коэффициент вязкого сопротивления подушки; $m_{\text{гр}} = 60$ кг – масса груза на подушке.

Результаты стендовых исследований

На основании проведенных исследований получены статические, динамические и виброзащитные характеристики подушек сидений, приведенные на рис. 2–4. Их основные параметры были аппроксимированы к линейным зависимостям и их показателям.

Из приведенных на рис. 2–4 зависимостей видно, что с увеличением толщины прокладки с 50 до 120 мм уменьшаются статические и динамические жесткости подушек, а также снижается частота резонанса груза на подушке. При указанном изменении толщины прокладки статическая жесткость подушки из резины 1-й категории твердости снижается с 39,1 до 18,2 кН/м, а динамическая – с 90,5 до 32 кН/м. Частота резонанса груза на подушке при этом уменьшается с 5,6 до 3,48 Гц. Для подушек из

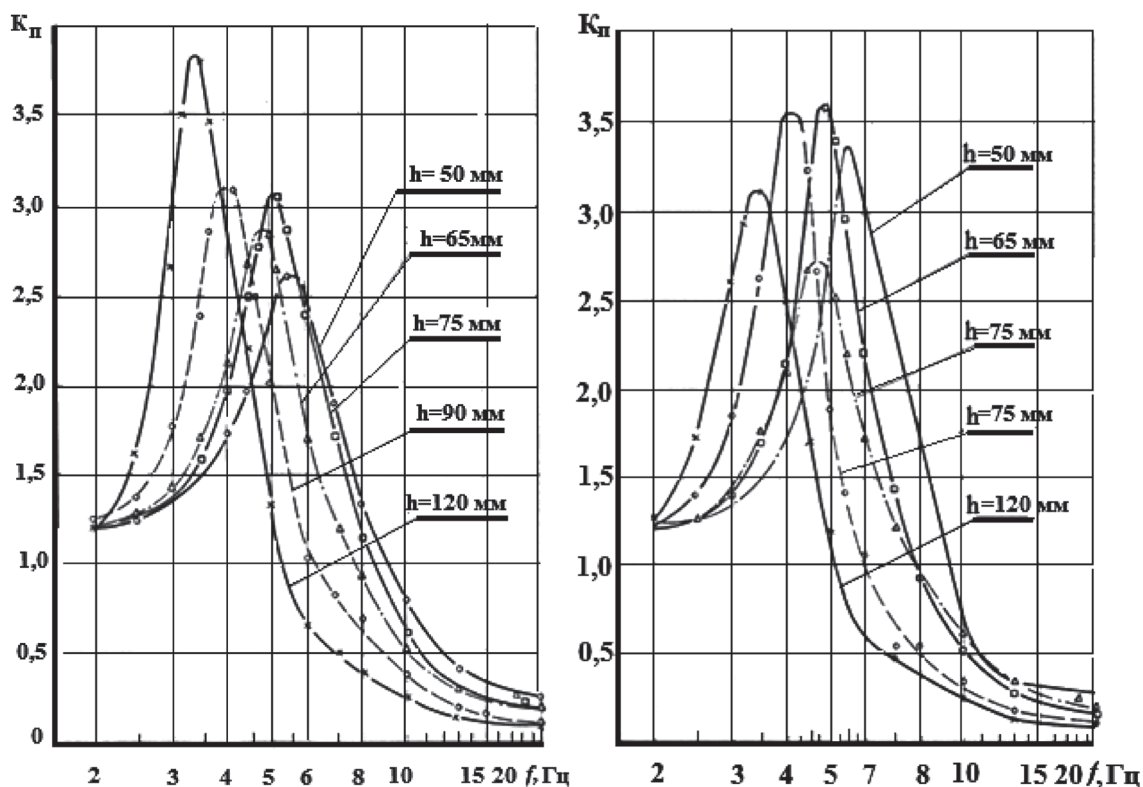


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики колебаний груза на подушках сидений в зависимости от толщины подушки и категории твердости резины (слева 1-й категории, справа 2-й)

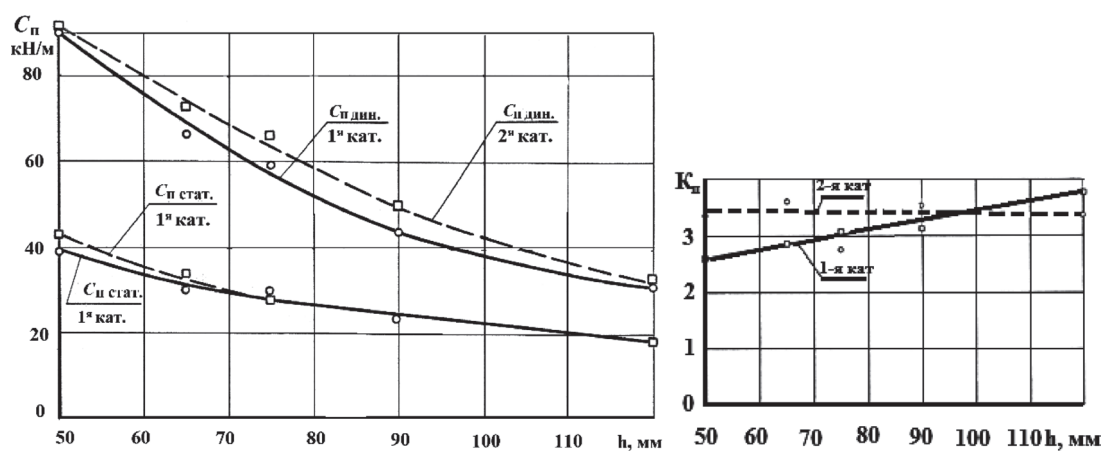


Рис. 3. Изменение статической, динамической жесткости подушки и коэффициента передачи вибраций в зависимости от категории резины и толщины прокладки

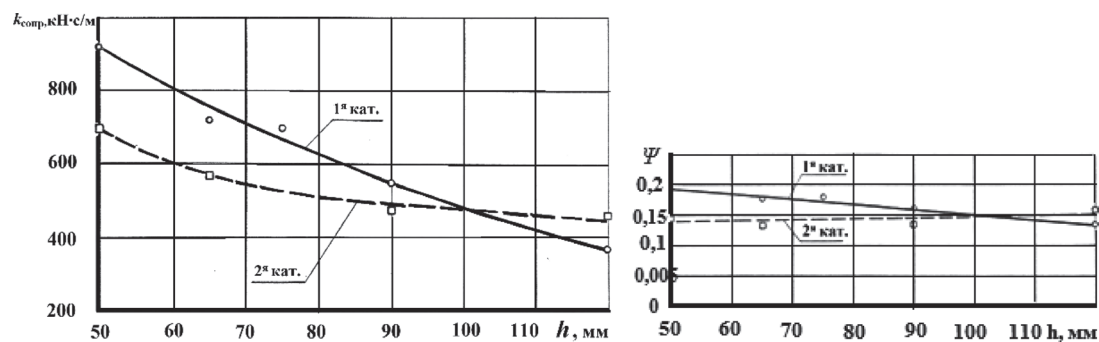


Рис. 4. Изменение коэффициентов вязкого сопротивления и параметра затухания в зависимости от категории резины и толщины прокладки

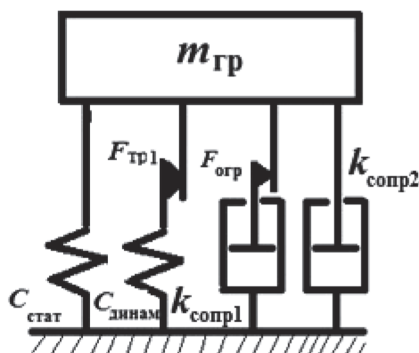


Рис. 5. Модель подушки, обеспечивающая более корректное совпадение в октавной полосе 16 Гц

резины 2-й категории твердости наблюдается аналогичный характер изменения указанных параметров.

Анализ приведенных на рисунках данных показывает, что:

- при динамическом нагружении жесткость подушки в 1,8–2,4 раза больше, чем в статике;
- параметр затуханий колебаний груза на подушке составляет 0,13–0,19 и 0,145–0,16 соответственно для подушек из резины 1-й и 2-й категории твердости;

– подушки из резины 1-й категории твердости при толщине прокладки $H = 50–100$ мм обеспечивают несколько лучшее затухание колебаний ($k_{сопр} = 912–285$ Н·с/м), чем подушки из резины 2-й категории твердости ($k_{сопр} = 687–285$ Н·с/м).

Проверка полученных значений динамической жесткости и коэффициентов вязкого сопротивления показала, что обеспечивается хорошее совпадение расчетной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) с экспериментальной и приемлемая для расчетных исследований точность аппроксимации виброзащитных свойств подушки в диапазоне частот 2–13 Гц, где расхождение расчетных и экспериментальных коэффициентов передачи не превышает 10–15%. На частоте 20 Гц расхождение увеличивается и достигает 30–40%. Учитывая, что уровень вибрации в октавной полосе 16 Гц (11,2–22,4 Гц) небольшой и не является лимитирующим для большинства грузовых автомобилей, это дает основание для использования линейной модели подушки при расчетном исследовании сиденья, когда не требуется высокая точность в этой области.

В тех случаях когда требуется более высокая точность (расхождение <10%) в октавной полосе 16 Гц, целесообразно использовать сле-

дующую модель (рис. 5), в виде 2-х упругих элементов (соответствующих статической и динамической жесткостям. Последняя ограничена величиной «сухого» трения и двух демпфирующих элементов (один с чисто линейной, а другой с линейной характеристиками, но с ограниченной максимальной величиной).

Усилия упругих и демпфирующих элементов можно описать следующими уравнениями, базируясь на анализе работ [6–8],

$$F_{тр1} = \begin{cases} C_{дин} \int_0^t (\dot{Z}_{осн.} - \dot{Z}_{гр}) dt \\ F_{тр1} > C_{дин} \int_0^t (\dot{Z}_{осн.} - \dot{Z}_{гр}) dt > -F_{тр1}; \\ F_{тр1} \text{ если } C_{дин} \int_0^t (\dot{Z}_{осн.} - \dot{Z}_{гр}) dt > F_{тр1}; \\ -F_{тр1} \text{ если } C_{дин} \int_0^t (\dot{Z}_{осн.} - \dot{Z}_{гр}) dt < -F_{тр1}; \end{cases}$$

$$F_{огр} = \begin{cases} k_{зат1} \int_0^t (\dot{Z}_{осн.} - \dot{Z}_{гр}) dt \\ F_{огр} > k_{сопр1} \int_0^t (\dot{Z}_{осн.} - \dot{Z}_{гр}) dt > -F_{огр}; \\ F_{огр} \text{ если } k_{сопр1} \int_0^t (\dot{Z}_{осн.} - \dot{Z}_{гр}) dt > F_{огр}; \\ -F_{огр} \text{ если } k_{сопр1} \int_0^t (\dot{Z}_{осн.} - \dot{Z}_{гр}) dt < -F_{огр}; \end{cases}$$

$$F_{стат} = C_{стат} (Z_{осн} - Z_{гр}); F_{сопр2} = k_{сопр2} (\dot{Z}_{осн} - \dot{Z}_{гр})$$

где $C_{стат}$, $C_{дин}$ – статическая и динамическая жесткость подушки; $k_{сопр1}$, $k_{сопр2}$ – коэффициенты вязкого сопротивления в подушке; $F_{тр1}$, $F_{огр}$ – максимальные значения трения, ограничивающего усилия от динамической жесткости и демпфирующего элемента; $\dot{Z}_{осн.}$, $\dot{Z}_{гр}$ – текущее значение виброскорости основания и груза на подушке; $Z_{стат}$, $Z_{гр}$ – текущее значение перемещений основания и груза на подушке.

Параметры этих элементов в зависимости от толщины прокладки приведены на рис. 6. Значения величин: $F_{огр} = 0,005$ кН·с/м, $F_{тр1} = 0,0029$ кН·с/м.

Блок-схема реализации этой модели в пакете Matlab/Simulink приведена на рис. 7.

Влияние подушки на вибронагруженность водителя ТС. Исследование влияния подушки

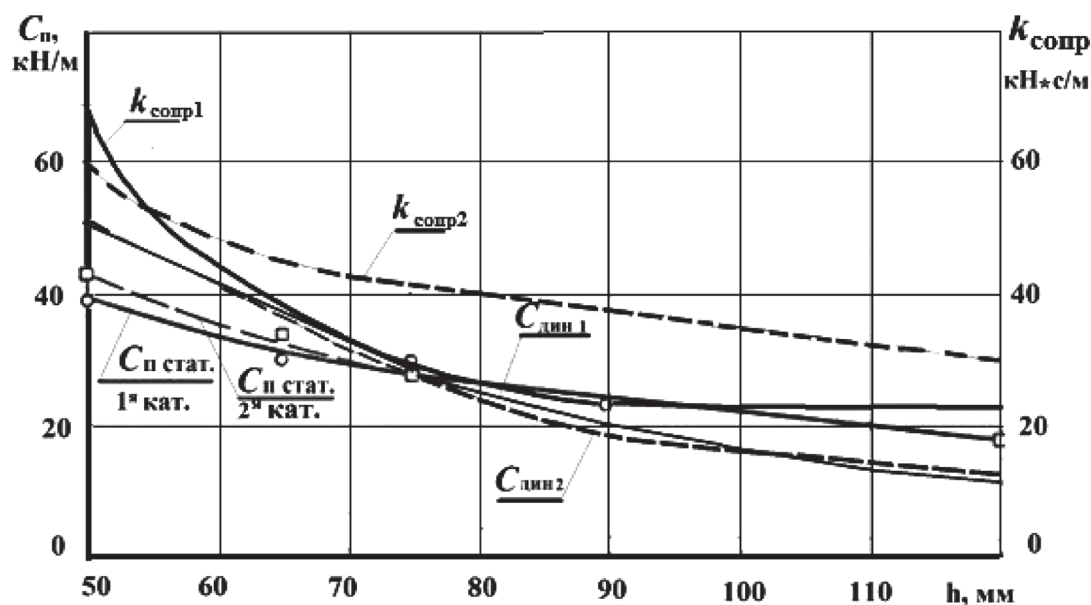


Рис. 6. Изменение параметров усовершенствованной колебательной модели подушки в зависимости от категории резины и толщины прокладки

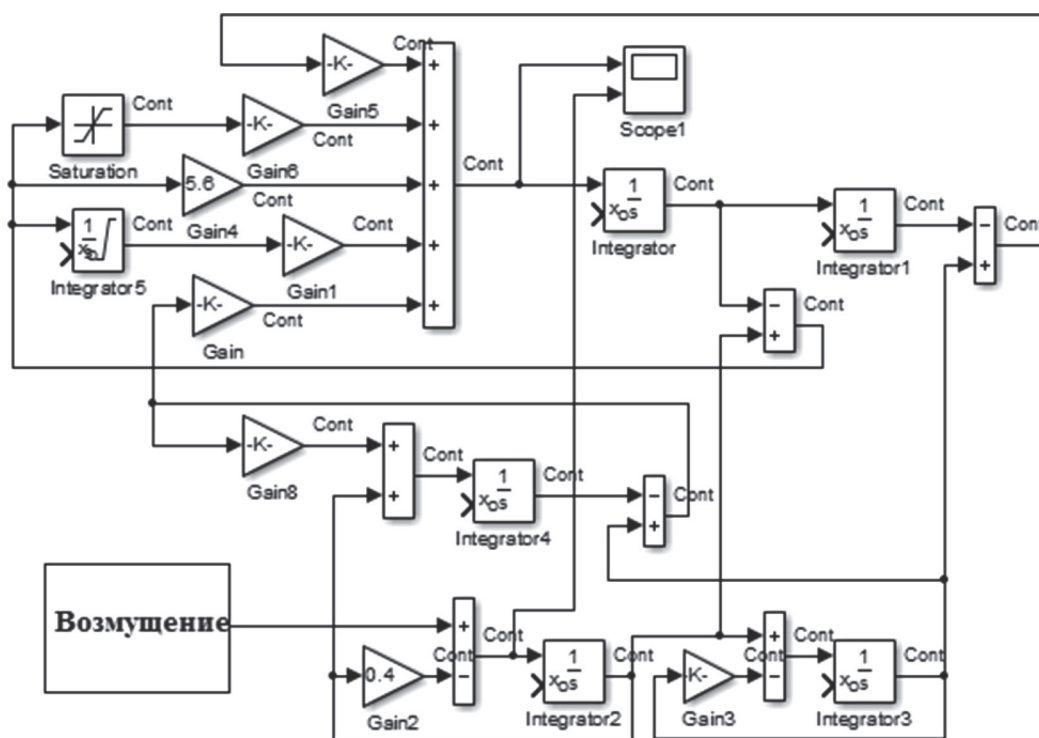


Рис. 7. Блок-схема реализации усовершенствованной модели подушки в пакете Matlab/Simulink

подрессоренного сиденья на вибронагруженность водителя проведено путем виртуального моделирования колебаний грузового автомобиля 6х6, движущего по булыжному шоссе с реальным микропрофилем. Использована колебательная модель, приведенная в работе [9]. Влияние толщины прокладки подушки показано на рисунке 8. Из него видно, что изменение толщины подушки практически мало влияет

на уровень вибраций водителя. Такой же характер наблюдался при экспериментальных исследованиях сидений, проведенных на седельных тягачах [6]. По данным работы [10] выбор толщины прокладки больше обуславливается физиологическими факторами – обеспечение равномерного распределения давления на таз водителя и кровообращения. Однако исключить подушку из колебательной модели

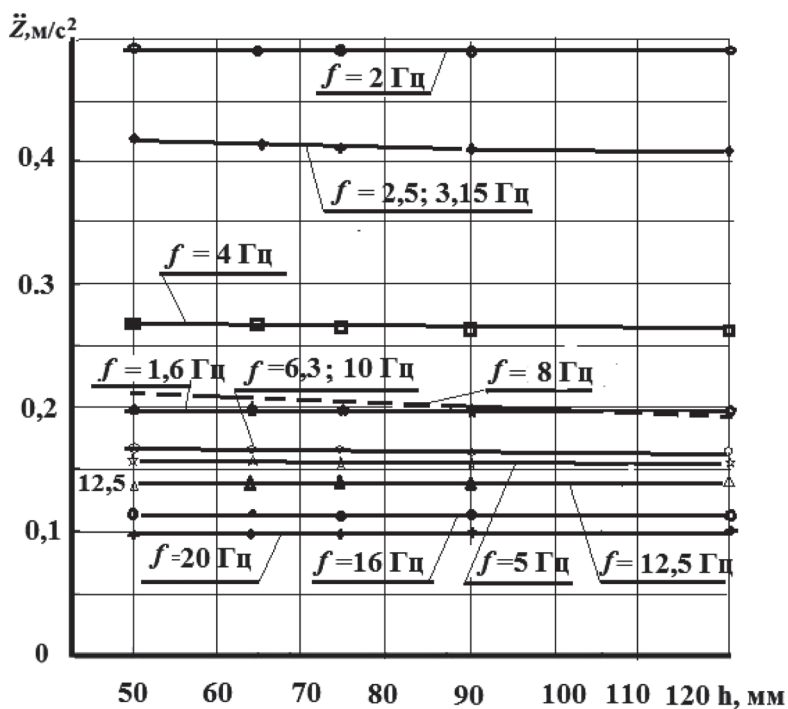


Рис. 8. Влияние подушки на уровень вибраций водителя ТС в третьоктавных полосах частот

нежелательно, так как это приводит к увеличению некорректности получаемых данных в октавах 8, 16 Гц [6]. Исходя из опыта производителей оптимальная толщина подушки составляет 75–80 мм.

Заключение

1. Проведенными исследованиями определены статические и динамические характеристики подушек сидений. Получены их зависимости от толщины прокладки и категории твердости резины.

2. Установлено, что:

- при динамическом нагружении (5 Гц) жесткость подушки увеличивается в 1,8–2,4 раза по сравнению со статическими замерами;

- параметр затуханий колебаний груза на подушке составляет 0,13–0,19 и 0,145–0,16 соответственно для подушек из резины I-й и 2-й категории твердости;

- подушки из резины I-й категории твердости при толщине прокладки $H = 50$ –120 мм обеспечивают несколько лучшее затухание колебаний ($k_{\text{сопр}} = 912$ –285 Н·с/м), чем подушки из резины 2-й категории твердости ($k_{\text{сопр}} = 687$ –285 Н·с/м).

3. Линейная модель подушки обеспечивает приемлемую погрешность (10–15%) в полосе

частот 2–13 Гц. Однако на частоте 20 Гц (октавная полоса 16 Гц (11,2–22,4 Гц)) расхождение возрастает до 30–40%. Линейная модель может быть использована, когда не требуется высокая точность расчетов в этой области.

4. В тех случаях, когда требуется более точное совпадение АЧХ в широком диапазоне необходимо использовать предложенную усовершенствованную модель в виде 2-х упругих элементов (соответствующих статической и динамической жесткостям, последняя ограничена величиной «сухого» трения) и двумя амортизаторами (один с линейной, а другой с нелинейной характеристиками с ограниченными величинами) с подобранными параметрами.

5. В случае использования подрессоренного сиденья изменение толщины подушки незначительно влияет на уровень вибраций водителя. Выбор толщины прокладки больше обуславливается физиологическими факторами – обеспечение равномерного распределения давления на таз водителя и кровообращения. Однако исключать подушку из колебательной модели нежелательно, так как это приводит к увеличению некорректности получаемых данных в октавах 8, 16 Гц. Исходя из опыта производителей оптимальная толщина подушки составляет 75–80 мм.

Литература

1. **Микулик, Т. Н.** Исследование влияния параметров сиденья на вибронагруженность оператора (водителя) / Т. Н. Микулик, Г. Н. Рейзина // Грузовик, Машиностроение». – 2014. – № 4 +прил. – С. 30–32.
2. **Микулик, Т. Н.** Определение влияния параметров подвески сиденья водителя на вибрационную мощность / Т. Н. Микулик // Грузовик &. – 2008. – № 4. – С. 33–34.
3. **Мусарский Р. А.** Оптимизация элементов виброзащиты поддресоренного сиденья / Р. А. Мусарский, В. И. Шишкин // Машиноведение, 1980, № 4, с. 38–43.
4. **Михайлов, В. Г.** Исследование динамических характеристик подушек сиденья / В. Г. Михайлов // Минск, 1979, – 12 с., – Рукопись представлена Белорусским политехническим институтом. Деп. в БелНИИТИ 27 авг. 1979 г., № 64.
5. **Михайлов, В. Г.** Исследование виброзащитных свойств поддресоренных сидений / В. Г. Михайлов, В. В. Шпакковский // В кн.: Эффективное использование научных разработок – важнейший резерв повышения производительности и качества. – Минск: Деп. в БелНИИТИ, 1977, с. 24–26.
6. **Михайлов, В. Г.** Исследования системы поддресоривания сиденья водителя грузового автомобиля: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03/ В. Г. Михайлов – Минск: БПИ, 1982. – 231 л.
7. **Кольцов В. И.** Модель листовой рессоры / В. И. Кольцов, Ю. В. Пирковский, В. И. Ковицкий // Автомобильная промышленность 1970, № 10. С. 14–16.
8. **Михайлов, В. Г.** Анализ моделей трения в подвесках транспортных средств / В. Г. Михайлов // Трение и износ, 2014, Т. 2, № 35, с. 198–206.
9. **Михайлов, В. Г.** Анализ вибронагруженности штабной машины / В. Г. Михайлов, Д. В. Мишута // Сб. науч. Трудов Военной Академии Респ. Беларусь. – 2015. – Вып. № 1. – С. 88–92.
10. **Шишкин В. И.** Динамические и эргономические исследования и оптимизация характеристик взаимодействия водителя и автомобиля: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03/ В. И. Шишкин, Горький, 1977, 234 с.

Reference

1. **Mikulik, T. N.** Research of influence of parametres of a seat on vibration of the operator (driver) / T. N. Mikulik, G. N. Rejzina// the Truck, Mechanical engineering « – 2014.– № 4 – pp. 30–32.
2. **Mikulik, T. N.** Definition of influence of parametres of a hanger of a seat of the driver on vibrating power / T. N. Mikulik // the truck &. – 2008. – № 4. – pp. 33–34.
3. **Musarsky, R. A.** Optimizatsiya of elements of Protection against vibrations spring seats / R. A. Musarsky, V. I. Shishkin // Mashinovedenie, 1980, № 4, pp. 38–43.
4. **Mikhailov, V. G.** Research of dynamic characteristics of pillows of a seat / V. G. Mikhailov// Minsk, 1979, – 12 pp., – the Manuscript is presented by the Belarus polytechnical institute. dep. in BelNIINTI 27 aug. of 1979, № 64.
5. **Mikhailov, V. G.** Research vibroisolation properties of spring seats / V. G. Mikhailov, V. V. Shpakovsky// In Сол.: The Effective utilisation of scientific workings out – the major reserve of increase of productivity and quality. – Minsk: Dep. in BelNIINTI, 1977, pp. 24–26.
6. **Mikhailov, V. G.** Research of system of cushioning of a seat of the driver of the truck: diss. ... Cand. Tech. Sci.: 05.05.03 / V. G. Mikhailov – Minsk: БПИ, 1982. – 231 l.
7. **Koltsov V. I.** Model of a sheet spring plate / V. I. Koltsov, JU. V. Pirkovsky, V. I. Kovitsky// Motor industry 1970, № 10. С. 14–16.
8. **Mikhailov, V. G.** Analiz of friction models in hangers of vehicles / V. G. Mikhailov// the Friction and deterioration, 2014, Vol. 2, № 35, pp. 198–206.
9. **Mikhailov, V. G.** Analiz vibration of the staff car / V. G. Mikhailov, D. V. Mishuta// Col. science works of Military Academy Resp. Belarus. – 2015. – Vol. 1. – pp. 88–92.
10. **Shishkin, V. I.** Dynamic both ergonomic researches and optimisation of characteristics of interaction of the driver and the car: dis. ... Cand. Tech. Sci.: 05.05.03/V. I. Shishkin, Gorki, 1977, 234 p.

Поступила 01.01.2016

Vladimir Mikhailov

RESEARCH, APPROXIMATION OF CHARACTERISTICS OF PILLOWS OF SEATS AND INFLUENCE ON VIBRATION OF DRIVER OF TRUCK

Are considered a situation developed in the field of modelling of fluctuations of vehicles (truck), the attention on low vibroisolation properties of seats is focused. One of the reasons which the weak level of scrutiny of real characteristics of a pillow of a seat is. The technique of tests of pillows of seats is resulted, dependences of change of their parametres on a thickness of a layer pad of a pillow and a rubber category are received.

The advanced mathematical model of a pillow of the seat, providing good coincidence of the peak-frequency characteristic in a strip of frequencies of 2–20 Hz and the block-schema of its realisation in package MATLAB\SIMULIK is offered, al-

lowing more to model fluctuations on a workplace of the driver of a vehicle more precisely. Pillow influence on vibration properties of seats is investigated.

Keywords: the Vehicle, a pillow, a seat, vibration, vibroisolation properties, modelling of fluctuations on a workplace of the driver.



Владимир Георгиевич Михайлов, канд. техн. наук 05.05.03, ведущий инженер ООО «Мидивисана», г. Минск.

Специалист в области автомобилестроения, испытаниям подвесок, рам ТС, пневматики, гидравлики, тензометрирования, моделирования динамических систем в пакетах MATLAB\SIMULIK, ADAMS, оценки напряженно-деформированного состояния в пакете ANSYS, разработки систем CALS\PLM (PDM, ERP). Tel.: + 375-(029)785-09-16. E-mail: sapr7@mail.ru.

Vladimir Georgievich Mikhailov, Cand. Tech. Sci. 05.05.03, the leading engineer Open Stock Company «midivisana», Minsk.

The expert in the field of automotive industry, to tests of suspenders, frames of the Soft, a pneumatic, hydraulics, тензометрирования, modelling of dynamic systems in packages MATLAB\SIMULIK, ADAMS, estimations of the is intense-deformed condition in package ANSYS, developing of Software system of engineering CALS\PLM (PDM, ERP). Tel.: + 375(029) 785-09-16. E-mail: sapr7@mail.ru.

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND
DECISION-MAKING**

S. A. ZOLOTAREV¹, M. A. MIRZAVAND²

TOMOGRAPHIC MAMMOGRAPHY AND TOMOSYNTHESIS USING OPENGL

¹*Institute of Applied Physics of NAS of Belarus*

²*Belarusian National Technical University*

Computed tomography is still being intensively studied and widely used to solve a number of industrial and medical applications. The simultaneous algebraic reconstruction technique (SART) and Bayesian inference reconstruction (BIR) are considered as advantageous iteration methods that are most suitable for improving the quality of the reconstructed 3D-images. The paper deals with the parallel iterative algorithms to ensure the reconstruction of three-dimensional images of the breast, recovered from a limited set of noisy X-ray projections. Algebraic method of reconstruction with simultaneous iterations – SART and iterative method for statistical reconstruction of BIR are deemed to be the most preferred iterative methods. We believe that these methods are particularly useful for improving the quality of breast reconstructed image. We use the graphics processor (GPU) to accelerate the process of reconstruction. Preliminary results show that all investigated methods are useful in breast reconstruction layered images. However, it was found that the method of classical tomosynthesis SAA is less efficient than iterative methods SART and BIR as the worst suppress the anatomical noise. Despite the fact that the estimated ratio of the contrast / noise ratio in the presence of internal structures with low contrast is higher for classical tomosynthesis method the SAA, its effectiveness in the presence of highly structured background is low. In our opinion the best results can be achieved using statistical iterative reconstruction BIR.

Keywords: cone beam computed tomography, mammography, image reconstruction, image processing, image enhancement

Introduction

Digital tomographic mammography is a promising technology that can provide a three-dimensional structural information with using the three-dimensional reconstruction of the breast image from a set of two-dimensional projection mammography [1–2]. As was shown in [3] tomographic mammography can significantly reduce the effect of «camouflage» of overlapping breast tissue and improve the detection of damaged areas. Manufacturers of numeral mammography systems have developed tomographic mammograph prototypes and conduct clinical tests in order to find advantages that they can provide in comparison with the conventional digital mammography. The concept of using traditional tomosynthesis for the purpose of tomographic mammography was proposed in [4]. Later, it was developed in [5].

The number of X-ray projections is restricted by the general X-ray dose that is received by a patient when collecting them; this dose must be comparable to the one received by a patient during standard mammography (i. e., two digital X-ray

images). Essentially, the reconstruction of a 3D breast image is limited-angle cone beam tomography. Parallelization reconstruction algorithm was based on the use of graphics library OpenGL [8, 9].

Materials and methods

1. Tomographic mammography

In order to check the feasibility of the cone beam tomographic reconstruction of a breast given a limited viewing angle, the following methods are used: SART, SAA, and BIR. The efficiency of the methods is checked by reconstructing the following 3D-images of three different medical mammographic phantoms: 1) CIRS Model 015 Mammographic Accreditation Phantom (ACR phantom); 2) Mammography BR3D Phantom; and 3) MTM-100 Tissue-Equivalent Phantom. The experimental X-ray projections (mammograms) were obtained using Mammoscan mammography apparatus (ADANI) that is equipped with a special manipulator for rotating the medical model objects (phantoms) under study. The system of the X-ray data collection involves a special manipula-

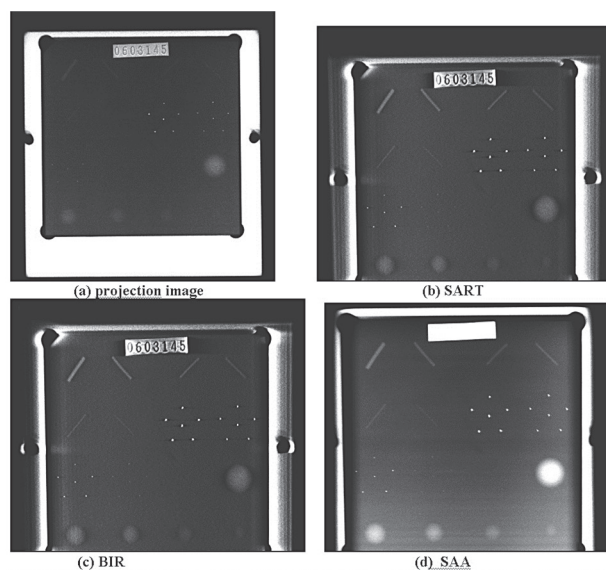


Fig. 1.1. Comparison of (a) the central projection and the reconstructed layers of the ACR phantom that are obtained using (b) SART, (c) BIR, and (d) SAA

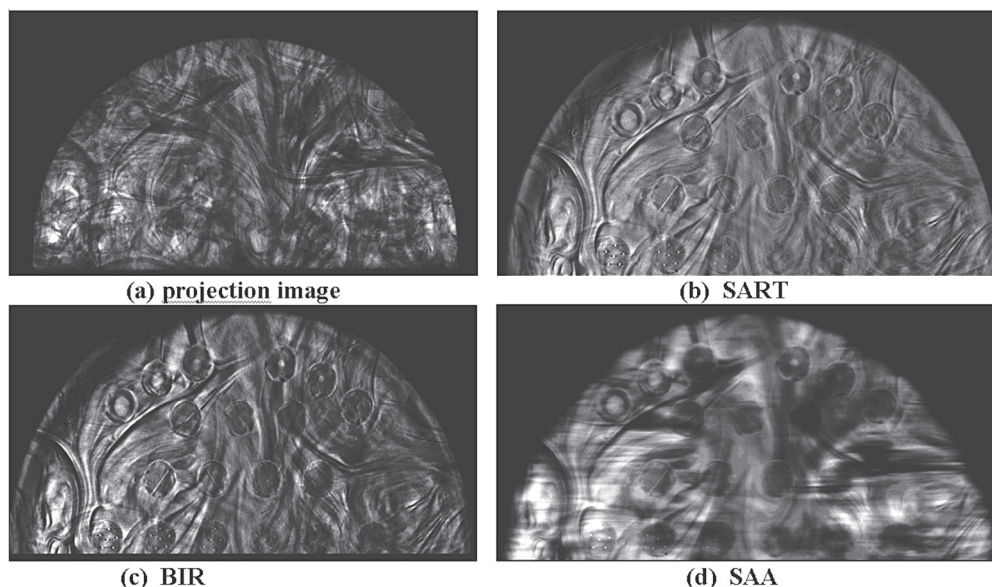


Fig. 1.2. Comparison of (a) the central projection and the reconstructed layers of the BR3D phantom that are obtained using (b) SART, (c) BIR, and (d) SAA

tor that rotates medical physical phantoms around a horizontal axis. The X-ray projection images located within the angular range 20° are collected for the 21-st angle with the stepping 2° . Fig. 1.1 and 1.2 show the results of reconstructing three medical phantoms (characteristic layers of 3D-images are presented).

In order to estimate the reconstructed images, the contrast and *RMS* are calculated and the contrast/noise ratio (*CNR*) for selected structural elements, such as masses and calcifications located in the focal plane, is determined. The contrast/noise ratio is calculated as follows:

$$CNR = \frac{\bar{I}_{feature} - \bar{I}_{BG}}{\sigma_{BG}},$$

where $\bar{I}_{feature}$ and $\bar{I}_{BG}$ are the average intensities of pixels of the object and background, respectively, and σ_{BG} is the *RMS* value of the intensity of background pixels. The background region required for estimating the noise level is chosen depending on the maximal internal object to be examined. A square region of size 55×55 pixels, which is away from all internal objects and outer boundaries of the 3D-image under study, is used. This region is located in the layer where the internal ob-

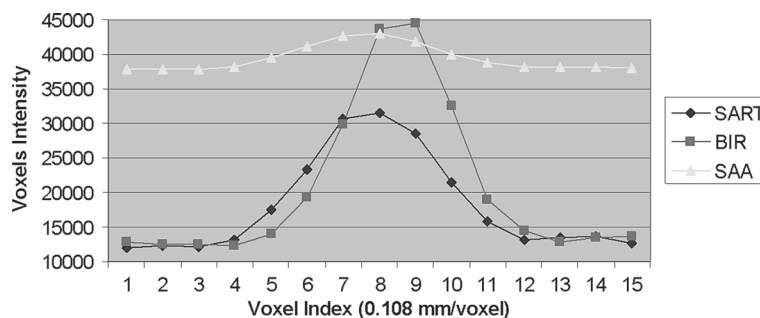


Fig. 1.3. Profiles intensities of voxels along the lines passing through C7 calcification in the images obtained by the methods SART, BIR and SAA

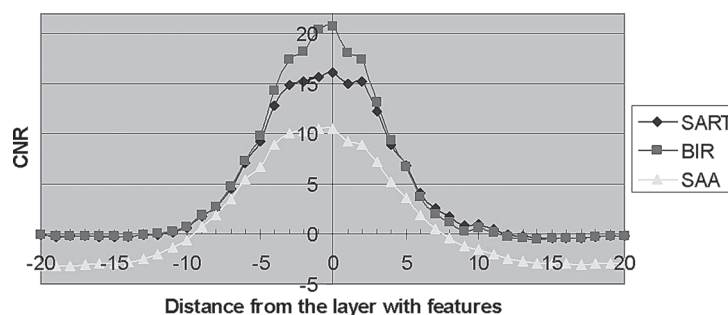


Fig. 1.4. CNR profiles calcifications C7. Methods of SART, BIR, SAA

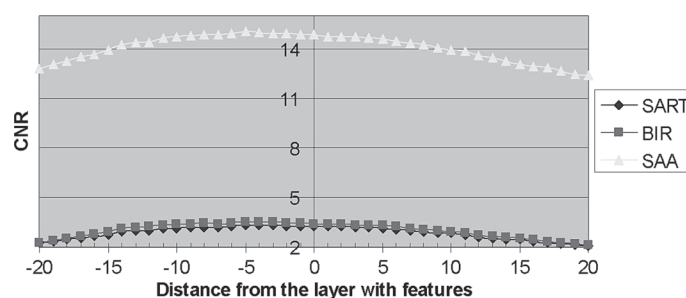


Fig. 1.5. CNR profiles for the «masses» M12. Methods of SART, BIR, SAA

ject is. The region of size 10×10 pixels with the center coincident with the center of the calcification is used to estimate the parameters of the calcifications. In order to obtain the required estimates, the ACR mammographic accreditation phantom is proved to be the most suitable for all the reconstruction methods. First, note that SAA reconstructs internal objects with low contrast and considerably smoothens their borders, while both iteration methods (SART and BIR) reconstruct the internal features with much better contrast and distinguish the edges of inhomogeneities more clearly. On the other hand, SAA provides a smoother background image with very low noise, while both iteration methods considerably increase the noise level.

Fig. 1.3 shows the profiles of pixels intensities along the lines passing through the center of the

calcification (number 7; below C7) for SAA, SART, and BIR. Fig. 1.4 shows that the best of the contrast/noise ratio for calcifications image provides a method of statistical iterative reconstruction.

2. Reconstruction of the breast image using the methods BIR and FBP for projections of real patients

The mammography projection data has been provided by University Medical Center Mannheim. We are experienced in this work a heuristic iterative algorithm on theoretical grounds close to the algorithm published in [10] but differs primarily by the fact that we use the correction of the current approach by minimizing the residuals for the radial integrals, not intensities. The proposed reconstruction algorithm (Bayesian Inference Engine, BIR) [11] can be written as

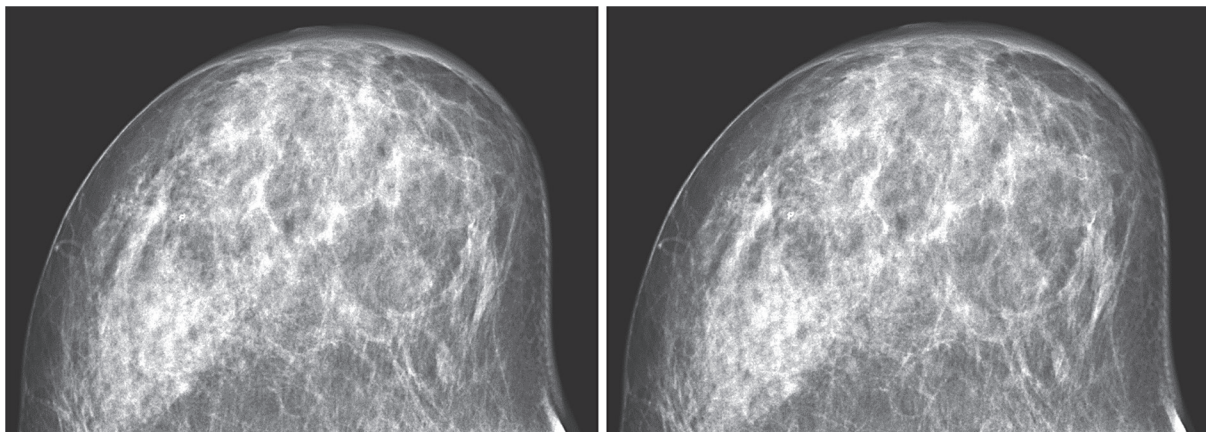


Fig. 2.1. X-ray projection breast of patient for angles $-1,04^\circ$ (left) and $0,32^\circ$ (right)

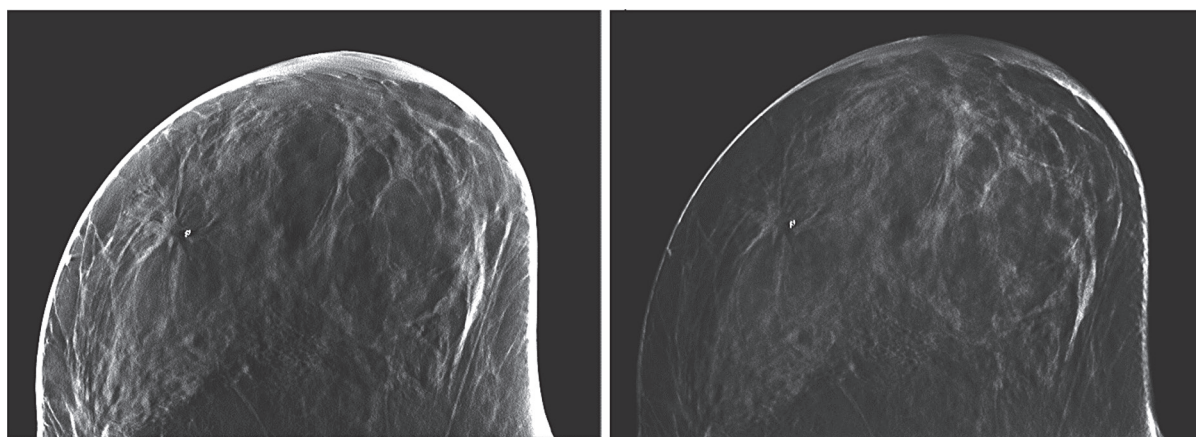


Fig. 2.2. The orthogonal cross-sectional images xoy for slice number 28. Simens reconstruction (left) and BIR reconstruction (right)

$$x_j^{(k+1)} = x_j^{(k)} \left[1 + \lambda^{(k)} \frac{\sum_{i=1}^I \frac{A_{ij}}{\sum_{j=1}^J A_{ij}} \left(p_i - \sum_{j=1}^J A_{ij} x_j^{(k)} \right)}{\sum_{j=1}^J A_{ij} x_j^{(k)}} \right], \quad (2.1)$$

where $x_j^{(k)}$ – the value of the j -th component of the vector of unknowns at the k -th iteration, A_{ij} – elements of the projection matrix, p_i – the value of the measured radial integral in the pixel number i , $\lambda^{(k)}$ – sequence relaxation parameter values ($0 < \lambda^{(k)} < 1$).

Correction algorithm represented by the formula (2.1) is nearly as convenient for parallelization via graphics library OpenGL, as well as a well-known algorithm SART [6]. Fig. 2.1 shows the projection breast of one of the patients for angles $-1,04^\circ$ and $0,32^\circ$. For tomographic reconstructions were used 25 X-ray projections. All the projections are arranged in an angular range of 50 degrees. Results of reconstructions are shown below in Fig. 2.2.

3. Results

The traditional shift-and-add (SAA) tomosynthesis is established to be less efficient than SART and BIR in terms of the anatomical-noise reduction and blurring of reconstructed 3D images between conjugate layers. Despite the fact that the estimated contrast-noise ratio, given internal structures with low contrast, is higher for SAA as compared to SART and BIR, its efficiency is very low given the highly structured background. In our opinion, optimal results can be achieved using BIR.

The experiments with the ACR phantom show that SAA provides less noisy images of low-contrast internal objects (masses) with a higher contrast-noise ratio (see Fig. 1.5) as compared to SART and BIR. However, both iteration methods provide the considerable improvement of the contrast of the reconstructed images that involve both high-contrast and low-contrast internal inclusions and considerably reduce the blurring between layers and the corresponding artifacts.

The experiments with the BR3D medical phantom, which has a complex heterogeneous background that simulates the internal structure of the breast, show that SAA results in sharp blurring artifacts along the motion of the X-ray source and, therefore, considerably reduces the contrast and spatial resolution of the internal structure of the reconstructed 3D images (see Fig. 1.2). Thus, the main advantages of both iteration methods are 1) the considerably better contrast for both the internal objects of the mass type and the high-density internal object of the calcification type and 2) reduction of the blurring between horizontal layers of reconstructed 3D-images and the overall number of various artifacts.

After analyzing the results of breast reconstruction using the standard method of FBP (Simens) and statistical iterative method BIR radiologists came to the underwritten opinion. Radiologists think that the BIR case looks much better when it comes to representation of the parenchyma, and glandularity (given that the glandular tissues have a different contrast than the fattier tissues; one can better differentiate between them). They also said that the resolution seemed to be higher for the BIR. The spiculated lesion is evident at both reconstructions (would most likely be detected at both), but may appear more dense at the BIR. In-plane artifacts appear for both meth-

ods for instance for the calc in the center of the mass, but seem somewhat decreased for the BIR method. Out-of-plane artifacts evidently appear for calcifications for both methods. Radiologists think that the lesion in the FBP looks more 'flat', while it appears more 3D-like in the Bayesian; sharper edges in the FBP; more soft appearance in the Bayesian. This is shown in Figure 2.2. The in-plane artifacts also seem to be more pronounced in the FBP for the coarse calcification. The FBP generally seem to be more noisy.

Conclusions

The authors developed three-dimensional image reconstruction algorithms for a circular scan pattern in the conical X-ray beam. It is shown that by using the GPU and OpenGL libraries can be more than an order to increase the speed of the algorithm, and the simultaneous use of the regularization method anisotropic total variation provided significant reduction in the noise component while maintaining good contrast of the reconstructed image. In this paper the authors proposed to develop a parallel heuristic algorithm for the reconstruction of the circular scan pattern in the conical X-ray beam. For the reconstruction of the image of the breast is the most preferred method of statistical iterative reconstruction BIR.

References

1. **Niklason L. T.** Digital tomosynthesis in breast imaging. / L. T. Niklason // *Radiology* – 1997. – Vol. 205. – P. 399–406.
2. **Wu T.** Tomographic mammography using a limited number of low-dose cone-beam projection images / T. Wu // *Med. Phys.* – 2003. – Vol. 30. – P. 365–380.
3. **Kopans D.** Digital tomosynthesis and other applications / D. Kopans // *RSNA Program Book 2005*. – 2005. – P. 130.
4. **Ziedses des Plante, B. G.** Eine neue methode zur differenzierung in der roentgenographie (planigraphie) / B. G. Ziedses des Plante // *Acta Radiologica*. – 1932. – Vol. 13. – P. 182–192.
5. **Dobbins J. T., Godfrey D. J.** Digital X-Ray Tomosynthesis: current state of the art and clinical potential / J. T. Dobbins, D. J. Godfrey // *Phys. Med. Biol.* – 2003. – Vol. 48. – P. 65–106.
6. **Andersen A. H.** Algebraic reconstruction in CT from limited views / A. H. Andersen // *IEEE Trans. Med. Imag.* – 1989. – Vol. 8. – P. 50–55.
7. **Segal M.** Fast shadows and lighting effects using texture mapping / M. Segal, C. Korobkin, R. van Widenfelt, J. Foran, and P. E. Haeberli // *SIGGRAPH'92*. – 1992. – Vol. 26. – P. 249–252.
8. **Vengrinovich V. L.** Iterative methods of tomography / V. L. Vengrinovich, S. A. Zolotarev // Minsk: «Belorusskaya Nayka», – 2009. – 227 p.
9. **Jia R. Q.** A fast algorithm for the total variation model of image denoising / H. Q. Zhao // *Adv. Comput. Math.* – 2010. – Vol. 33. – P. 231–241.
10. **Lange K., Fessler J. A.** Globally Convergent Algorithms for Maximum a Posteriori Transmission Tomography / K. Lange, J. A. Fessler // *IEEE Trans. on Image Processing*. – 1995. – Vol. 8. – No 10. – P. 1430–1438.
11. **Zolotarev S. A., Mirzavand M. A.** Fast iterative kilovoltage cone beam tomography / S. A. Zolotarev, M. A. Mirzavand // «System analysis and applied information science». – 2015. – No 4. – P. 31–35. (In Russ.)

Поступила 01.03.2016

С. А. ЗОЛОТАРЕВ¹, М. А. МИРЗАВАНД²

ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ МАММОГРАФИЯ И ТОМОСИНТЕЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ OPENGL

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет

Компьютерная томография продолжает интенсивно исследоваться и широко использоваться для решения различных промышленных и медицинских проблем. Алгебраический метод реконструкции с одновременными итерациями (SART) и Байесовская итерационная реконструкция (BIR) являются передовыми итерационными методами, которые наиболее подходят для улучшения качества реконструированных трехмерных изображений. В работе рассмотрены параллельные итерационные алгоритмы, обеспечивающие реконструкцию трехмерных изображений молочной железы, восстановленных из ограниченного набора зашумленных рентгеновских проекций. Алгебраический метод реконструкции с одновременными итерациями – SART и итерационный метод статистической реконструкции BIR рассматриваются здесь как предпочтительные итерационные методы. Мы считаем, что эти методы являются вполне пригодными для улучшения качества реконструируемых изображений молочной железы. Для ускорения процесса реконструкции мы используем графический процессор (GPU). Предварительные результаты показывают, что все исследуемые методы являются пригодными для послойной реконструкции изображений молочной железы. Однако было установлено, что метод классического томосинтеза SAA является менее эффективным, чем итерационные методы SART и BIR, так как хуже подавляет анатомический шум. Несмотря на то, что оцененное отношение контраст/шум при наличии внутренних структур с низким контрастом является более высоким для метода классического томосинтеза SAA, его эффективность в присутствии сильно структурированного фона является низкой. По нашему мнению оптимальные результаты могут быть достигнуты при использовании статистической итерационной реконструкции BIR.

Ключевые слова: Коническая вычислительная томография, реконструкция изображений, обработка изображений, улучшение изображений.



Золотарев Сергей Алексеевич

Адрес: 220072, г. Минск, ул. Академическая д. 16, Институт прикладной физики НАН Беларуси.

Рабочий тел.: + 375 17 2842304

Е-mail: zolotarev@iaph.bas-net.by, sergei.zolotarev@gmail.com

Дата и место рождения: 7 мая 1956 года, город Воронеж, Россия.

Образование:

Высшее, в 1978 году окончил Воронежский технологический институт, г. Воронеж.

В 1992 г. защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук «Исследование сложных центров и фокусов двумерных автономных голоморфных дифференциальных систем» по специальности:

01.01.02 – дифференциальные уравнения и математическая физика.

В 2010 г. защитил диссертацию на соискание степени доктора технических наук «Реконструктивные оболочечные методы томографического контроля и новые вычислительные алгоритмы промышленной томографии» по специальностям:

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации.

Опыт работы:

Специалист в области решения обратных задач из неполных данных и качественной теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Разработчик алгоритмов и программного обеспечения для компьютерной томографии объектов при ограниченном угле обзора и малом числе рентгеновских проекций. Разработчик метода оболочечной реконструкции изображений многоуровневых объектов, имеющих конечное число различных однородных частей. Разработчик новых параллельных алгоритмов, использующих графические процессоры и MPI. Главное направление исследований – вычислительная диагностика и рентгеновская малоракурсная томография промышленных и биологических объектов.

Краткая научная биография:

С 1973 по 1978 – Студент Воронежского технологического института, факультет автоматизации и комплексной механизации химико-технологических процессов.

С 1978 по 1985 – Работал инженером на предприятиях России и Белоруссии.

С 1985 по 1988 – аспирант-очник Института математики НАН Беларуси.

С 1988 по 2005 – младший научный сотрудник, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории вычислительной диагностики Института прикладной физики НАН Беларуси.

С 2005 по 2008 – докторант Института прикладной физики НАН Беларуси.

С 2008 по 2011 – ведущий научный сотрудник Института прикладной физики НАН Беларуси.

С 2011 и по настоящее время – главный научный сотрудник Института прикладной физики НАН Беларуси.

Основные научные результаты:

Разработал новые методы промышленной томографии, основанные на реконструкции изображений внутренней структуры и свойств объектов контроля и соответствующих им параллельных алгоритмов, которые могут быть использованы при ограниченном доступе к объекту контроля и недостатке требуемой для реконструкции мощности рентгеновского источника.

**Мирзаванд Мохсен Али**

Адрес: 220101, г. Минск, проспект Рокоссовского д. 7, кв. 82.

Домашний тел. + 375 17 367 8835

Мобильный тел. + 375 29 661 1885, Велком.

Email: mohsen.mirzavand@yahoo.co.uk

Дата и место рождения 1982 г., г. Хоррамабад, Иран.

Образование:

Высшее, в 2010 году окончил полный курс Белорусского государственного технического университета (БНТУ) по специальности «Информационные системы и технологии».

Краткая научная биография:

В 2010 году поступил в магистратуру при БНТУ. В 2011 году окончил магистратуру и поступил в аспирантуру БНТУ, которую окончил в 2014 году по специальности «Системный анализ и обработка информации».

В настоящее время работает в ИООО «Логистический центр «Прилесье», 220040 г. Минск, ул. М. Богдановича 124–5Н, начальником отдела автоматизации.

Основные научные результаты:

Автор восемнадцати научных публикаций, в том числе шести статей в рецензируемых журналах. Участник пяти научных конференций, в том числе международных. Область научных интересов: промышленная томография, автоматизация, методы конечных элементов, параметрические геометрические модели компонентов конструкций.

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

INFORMATION SECURITY

УДК 510.644

А. В. СОКОЛОВ, О. Н. ЖДАНОВ, О. А. АЙВАЗЯН

МЕТОДЫ СИНТЕЗА АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ НОРМАЛЬНОЙ ФОРМЫ ФУНКЦИЙ МНОГОЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ

¹Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина²Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. академика М. Ф. Решетнева

Стремительное развитие методов помехоустойчивого кодирования, криптографии, теории синтеза сигналов, основанных на принципах многозначной логики, диктуют необходимость более полного изучения форм представления функций многозначной логики. В частности, для булевых функций широкое распространение получила алгебраическая нормальная форма, известная также как полином Жегалкина, которая хорошо описывает многие криптографические свойства булевых функций. В настоящей статье формализуется понятие алгебраической нормальной формы функции многозначной логики. Предложены методы синтеза алгебраической нормальной формы 3-функций и 5-функций, которые работают по аналогии с преобразованием Ридда-Маллера для булевых функций: на основе рекуррентно синтезируемых матриц преобразования. Выдвинута гипотеза, определяющая правила синтеза матриц как для перехода от таблицы истинности к коэффициентам алгебраической нормальной формы, так и обратного преобразования для любого, наперед заданного количества переменных 3-функции либо 5-функции. В статье также введено определение алгебраической степени нелинейности функций многозначной логики и S -блока подстановки, основанных на принципах многозначной логики. Так, разработанный метод синтеза алгебраической нормальной формы 3-функций применен к известной конструкции рекуррентного синтеза S -блоков длины $N = 3^k$, в результате чего вычислены их алгебраические степени нелинейности. Полученные результаты могут стать основой как для дальнейших теоретических исследований, так и для практического применения: разработки новых криптографических примитивов, корректирующих кодов, алгоритмов сжатия информации, сигнальных конструкций, алгоритмов блочного и поточного шифрования, основанных на перспективных принципах многозначной логики. Кроме того, методы синтеза алгебраической нормальной формы функций многозначной логики являются основой для их программной и аппаратной имплементации.

Ключевые слова: алгебраическая нормальная форма, многозначная логика, преобразование Ридда-Маллера.

Введение

Современный этап развития информационных технологий характеризуется активным исследованием свойств и внедрением принципов многозначной логики. То обстоятельство, что многозначная логика допускает более двух ($q > 2$) истинностных значений для высказываний, делает её привлекательной для создания корректирующих кодов, криптографических алгоритмов, алгоритмов сжатия информации, а также для построения систем сигналов. Так, в работах [1, 2] изучено применение q -ичных ортогональных преобразований для технологии CDMA, в работе [3] изучаются свойства корректирующих кодов, работы [4, 5] посвящены разработке методов синтеза сигнальных конструкций, основанных на принципах многозначной логики.

В работе [6] заложены основы конструирования криптографических примитивов на базе многозначной логики, в рамках чего предложен метод построения оптимальных троичных криптографических S -блоков подстановки длины 3^k , $k \in \mathbb{N}$.

Тем не менее, развитие методов телекоммуникационных технологий, основанных на возможностях многозначной логики, все еще находится на начальном этапе, что делает актуальной как с практической, так и с теоретической точки зрения задачу изучения форм представления функций многозначной логики или, кратко, q -функций.

Важнейшим инструментом, положенным в основу многих методов оценки криптографических свойств булевых функций, является полином Жегалкина, или алгебраическая нор-

мальная форма (АНФ). Так, с помощью АНФ оценивается алгебраическая степень нелинейности S -блоков подстановки, вводится понятие расстояния нелинейности [7]. На основе АНФ булевых функций предложен метод построения таких совершенных алгебраических конструкций, как бент-функции [8], которые играют существенную роль в теории кодирования и криптографии. АНФ также является основой построения важных в теории кодирования корректирующих кодов Рида-Маллера [9].

Отметим также, что АНФ булевых функций важны для реализации программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Еще одним применением АНФ является построение генераторов псевдослучайных ключевых последовательностей [10].

Из перечисленного уже ясна актуальность построения методов синтеза АНФ произвольной q -функции.

С другой стороны, быстрые методы нахождения АНФ, как и точное определение АНФ введено в литературе только для булевых функций, что ограничивает дальнейшее развитие теории и практики использования принципов многозначной логики в телекоммуникационных системах.

Целью настоящей статьи является разработка методов синтеза АНФ 3-функций и 5-функций.

1. Методы синтеза АНФ булевых функций

Способ представления булевых функций с помощью АНФ был предложен в 1927 году российским исследователем Иваном Жегалкиным [11] и с тех пор получил значительное распространение, связанное со многими свойствами, которые следуют из данной формы представления.

Определение 1 [12]. Полиномом Жегалкина называется полином над Z_2 с коэффициентами $a_i \in \{0,1\}$, содержащий операции «Исключающее ИЛИ» и «Конъюнкция».

Жегалкиным была доказана теорема: каждая булева функция может быть единственным образом представлена в виде АНФ.

Полином Жегалкина, состоящий из $N = 2^k$ термов, в общем виде может быть легко записан для булевых функций k переменных при любом, наперед заданном, значении k . Например, для булевых функций четырех перемен-

ных общий вид АНФ может быть представлен следующим образом:

$$f_i(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i T_i = a_0 + a_4 x_4 + a_3 x_3 + a_{34} x_3 x_4 + a_2 x_2 + a_{24} x_2 x_4 + a_{23} x_2 x_3 + a_{234} x_2 x_3 x_4 + a_1 x_1 + a_{14} x_1 x_4 + a_{13} x_1 x_3 + a_{134} x_1 x_3 x_4 + a_{12} x_1 x_2 + a_{124} x_1 x_2 x_4 + a_{123} x_1 x_2 x_3 + a_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4, \quad (1)$$

где коэффициенты $a_i \in \{0,1\}$ являются различными для различных булевых функций.

Задача поиска АНФ конкретной булевой функции сводится к нахождению значений коэффициентов $A = \{a_i\}$. Для решения данной задачи в литературе предложено достаточно большое количество методов, например, метод на основе карт Карно, метод треугольника, метод Паскаля и другие. Тем не менее, с вычислительной точки зрения, наиболее привлекательным является преобразование Рида-Маллера [12], позволяющие получить все коэффициенты АНФ путем умножения таблицы истинности булевой функции на матрицу Рида-Маллера L , которая строится в соответствии с рекуррентным правилом

$$L_1 = [1], \quad L_{2n} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes L_n = \begin{bmatrix} L_n & L_n \\ 0 & L_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\otimes$ – знак произведения Кронекера.

Матрица L обладает тем свойством, что над алфавитом $\{0,1\}$ для любого ее порядка выполняется равенство $L^{-1} = L$.

С учетом (2) для булевых функций k переменных могут быть легко найдены все коэффициенты её АНФ путем умножения матрицы преобразования порядка $N = 2^k$ на таблицу истинности булевой функции f . Естественным является и обратное преобразование

$$A = fL_n, \quad f = AL_n, \quad (3)$$

Таким образом, (3) полностью определяет прямое и обратное преобразование Рида-Маллера, позволяющее путем простого матричного умножения получить коэффициенты АНФ произвольной булевой функции.

2. Метод синтеза АНФ 3-функций

Аппарат алгебраической нормальной формы булевых функций, являющийся мощным инструментом их исследования и практического использования, может быть расширен на

q -функции, которые получили существенное распространение в современных информационных технологиях.

Определение 2 [6]. Функцией q -значной логики k переменных называется отображение $\{0, 1, 2, \dots, q-1\}^k \rightarrow \{0, 1, 2, \dots, q-1\}$, q – простое. При $q = 2$ получаем булевы функции.

Функция трехзначной логики (3-функция) – это отображение $\{0, 1, 2\}^k \rightarrow \{0, 1, 2\}$, т. е. правило, однозначно сопоставляющее вектору из k координат, принимающих значения 0, 1, 2 значение 0, 1 или 2.

Аналогично полиномам Жегалкина для случая булевых функций мы вводим определение алгебраической нормальной формы q -функций.

Определение 3. Алгебраической нормальной формой q -функции называется полином Φ над Z_q степени $\deg(\Phi) < q$ с коэффициентами $a_i \in \{0, 1, \dots, q-1\}$, содержащий операции «Сумма по модулю q » и «Умножение по модулю q ».

Пример. Рассмотрим 3-функции $k = 2$ переменных, таблица истинности которых имеет длину $N = 9$ и может быть представлена в общем виде

$$f = \{f_{00}, f_{01}, f_{02}, f_{10}, f_{11}, f_{12}, f_{20}, f_{21}, f_{22}\}. \quad (4)$$

С другой стороны, в соответствии с Определением 2 для 3-функций двух переменных можно выписать полином АНФ в общем виде

$$f(x_1, x_2) = a_{00} + a_{01}x_2 + a_{02}x_2^2 + a_{10}x_1 + a_{11}x_1x_2 + a_{12}x_1x_2^2 + a_{20}x_1^2 + a_{21}x_1^2x_2 + a_{22}x_1^2x_2^2, \quad (5)$$

где $a_{ij} \in \{0, 1, 2\}$ – искомые коэффициенты.

Для того чтобы связать искомые коэффициенты a_{ij} с элементами таблицы истинности 3-функции (4), записываем соответствующую систему уравнений

$$\begin{cases} f_{00} = a_{00}; \\ f_{01} = a_{00} + a_{01} + a_{02}; \\ f_{02} = a_{00} + 2a_{01} + a_{02}; \\ f_{10} = a_{00} + a_{10} + a_{20}; \\ f_{11} = a_{00} + a_{01} + a_{10} + a_{02} + a_{11} + a_{20} + a_{12} + a_{21} + a_{22}; \\ f_{12} = a_{00} + 2a_{01} + a_{10} + a_{02} + 2a_{11} + a_{20} + a_{12} + 2a_{21} + a_{22}; \\ f_{20} = a_{00} + 2a_{10} + a_{20}; \\ f_{21} = a_{00} + a_{01} + 2a_{10} + a_{02} + 2a_{11} + a_{20} + 2a_{12} + a_{21} + a_{22}; \\ f_{22} = a_{00} + 2a_{01} + 2a_{10} + a_{02} + a_{11} + a_{20} + 2a_{12} + 2a_{21} + a_{22}, \end{cases} \quad (6)$$

где знак «+» следует понимать как сложение по модулю 3.

Представляя найденную систему уравнений в матричной форме, получаем, соответственно, матрицу L_9^{-1} для случая 3-функций двух переменных

$$L_9^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Проведенные эмпирические исследования позволили выдвинуть гипотезу: построение матриц обратного преобразования АНФ L_n^{-1} порядка n , кратного трем, может быть осуществлено в соответствии со следующей рекуррентной формулой

$$L_{3n}^{-1} = \begin{bmatrix} L_n^{-1} & 0 & 0 \\ L_n^{-1} & L_n^{-1} & L_n^{-1} \\ L_n^{-1} & 2L_n^{-1} & L_n^{-1} \end{bmatrix}, \quad L_1^{-1} = [1], \quad (8)$$

где по знаком «0» понимается нулевая матрица порядка n .

Вычислительные эксперименты, проведенные в среде Matlab, позволили подтвердить правильность выдвинутой гипотезы для практически ценных значений $n < 6$. Тем не менее, аналитическое доказательство (8) может представлять математический интерес, и являться предметом дальнейших исследований.

Для нахождения матрицы прямого преобразования (необходимой для расчета коэффициентов АНФ) матрица L_n^{-1} должна быть обращена

$$L = (L^{-1})^{-1} = \text{adj}(L) \cdot \det^{-1}(L), \quad (9)$$

где $\text{adj}(L)$ – союзная матрица над алфавитом $\{0, 1, 2\}$, $\det^{-1}(L)$ – элемент, обратный к определителю матрицы L .

Для матрицы (7), т. е. для случая 3-функций двух переменных обратная матрица имеет следующий вид

$$L_9 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Отметим важное свойство: в отличие от случая булевых функций, для q -функций при $q > 2$ матрицы прямого и обратного преобразования АНФ не совпадают.

Основываясь на (7), (8) и (9), можем записать регулярный метод нахождения АНФ 3-функций произвольного количества переменных в виде шагов.

Шаг 1. Основываясь на (8) с учетом (7) найти матрицу обратного преобразования L_n^{-1} необходимого порядка $n = 3^k$.

Шаг 2. На основе (9) либо же с использованием одного из известных алгоритмов обращения матриц над алфавитом $\{0, 1, \dots, q-1\}$ [13] найти матрицу L .

Шаг 3. В соответствии с (3) вычислить искоемые коэффициенты АНФ.

Рассмотрим пример, иллюстрирующий работу предложенного метода. Пусть, например, задана 3-функция пяти переменных в виде своей таблицы истинности

$f = \{00022211100022211100022211100022$
 $211100022211100022211100022211100022$
 $211100022211100022211100022211100022$
 $211111100022211102022111101022011100$ (11)
 $022211100120211100221200022211100022$
 $211100022211122211100022211002022211$
 $2010222111000222121001222101002\}.$

Путем умножения таблицы истинности булевой функции (11) на матрицу L_{243} , построенную в соответствии с (8), получаем коэффициенты АНФ интересующей нас 3-функции

$A = \{000200000000000000000000000000$
 $0000000000000000000000000000000000$
 $0000000000000000000000000000000000$
 $0000000000000000000000000000000000$
 $0000000000000000000000000000000000$ (12)
 $0000000010000000000000000000000000$
 $0000000000000000000000000000000000$
 $0000000000000000000000000000000000\},$

а также, собственно, АНФ

$$\Phi(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 2x_4 + x_1x_2^2 + x_1x_2^2x_3x_4x_5 + x_1^2x_2x_3x_4^2x_5^2. \quad (13)$$

Подстановка значений $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ в (13) позволяет снова вернуться к таблице истинности (11), что подтверждает правильность полученной АНФ.

Отметим, что подобно преобразованию Рида-Маллера (3), применение разработанного регулярного метода нахождения АНФ 3-функ-

ций по вычислительной сложности эквивалентно умножению матрицы на вектор, при условии, что матрица преобразования найдена заблаговременно. Данное свойство предложенного метода обуславливает его высокую практическую ценность.

3. Метод синтеза АНФ 5-функций

Аналогичным образом могут быть найдены матрицы преобразования L^{-1} и L для случая 5-функций. Эмпирические исследования позволили сформулировать гипотезу: матрицы L^{-1} для 5-функции любого числа переменных могут быть найдены с помощью следующей рекуррентной формулы

$$L_{5n}^{-1} = \begin{bmatrix} L_n^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_n^{-1} & L_n^{-1} & L_n^{-1} & L_n^{-1} & L_n^{-1} \\ L_n^{-1} & 2L_n^{-1} & 4L_n^{-1} & 3L_n^{-1} & L_n^{-1} \\ L_n^{-1} & 3L_n^{-1} & 4L_n^{-1} & 2L_n^{-1} & L_n^{-1} \\ L_n^{-1} & 4L_n^{-1} & L_n^{-1} & 4L_n^{-1} & L_n^{-1} \end{bmatrix},$$

$$L_1^{-1} = [1], \quad (14)$$

где под знаком «0» понимается нулевая матрица порядка n .

Для обращения матриц над конечными полями существуют хорошо разработанные методы, см., например, [13].

В качестве примера приведем матрицы L_{25}^{-1} и L_{25} соответственно.

$$L_{25}^{-1} = \begin{bmatrix} 10000000000000000000000000000000 \\ 11111000000000000000000000000000 \\ 12431000000000000000000000000000 \\ 13421000000000000000000000000000 \\ 14141000000000000000000000000000 \\ 100001000010000100001000010000 \\ 111111111111111111111111111111 \\ 124311243112431124311243112431 \\ 134211342113421134211342113421 \\ 141411414114141141411414114141 \\ 1000020000400003000010000 \\ 1111122222444443333311111 \\ 1243124312431243124312431 \\ 1342121342421343421313421 \\ 1414123232414143232314141 \\ 1000030000400002000010000 \\ 1111133333444442222211111 \\ 1243131243431242431212431 \\ 1342134213421342134213421 \\ 1414132323414142323214141 \\ 1000040000100004000010000 \\ 1111144444111114444411111 \\ 1243143124124314312412431 \\ 1342142134134214213413421 \\ 14141414141414141414141414141 \end{bmatrix},$$

$$L_{25} = \begin{bmatrix} 10000000000000000000000000000000 \\ 04231000000000000000000000000000 \\ 04114000000000000000000000000000 \\ 04321000000000000000000000000000 \\ 44444000000000000000000000000000 \\ 0000040000200003000010000 \\ 0000001324034120214304231 \\ 0000001441032230233204114 \\ 0000001234031420241304321 \\ 000001111133333222244444 \\ 0000040000100001000040000 \\ 0000001324042310423101324 \\ 0000001441041140411401441 \\ 0000001234043210432101234 \\ 0000011111444444444411111 \\ 0000040000300002000010000 \\ 0000001324021430341204231 \\ 0000001441023320322304114 \\ 0000001234024130314204321 \\ 000001111122222333344444 \\ 4000040000400004000040000 \\ 0132401324013240132401324 \\ 0144101441014410144101441 \\ 0123401234012340123401234 \\ 11111111111111111111111111111 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Обобщая метод, разработанный ранее для 3-функций, приведем пример, иллюстрирующий полученные результаты для 5-функций. Пусть 5-функция трех переменных задана своей таблицей истинности

$$f = \{01234043210314203142043211234014 \\ 402131341443112303401234324440212411 \\ 324140440123444104121341022443421234 \\ 010233134141143314240\}. \quad (16)$$

Путем умножения таблицы истинности 5-функции (16) на матрицу L_{125} получаем коэффициенты АНФ

$$A = \{01000000000300000000000000000000 \\ 0040000000000000000100000200000000000 \\ 000000000000000000030000000000000000 \\ 000000000000000000000000\}, \quad (17)$$

и теперь легко выписать АНФ рассматриваемой 5-функции

$$\Phi(x_1, x_2, x_3) = x_3 + 3x_2^2x_3 + 4x_1x_2x_3^4 + \\ + x_1^2 + 2x_1^2x_2x_3 + 3x_1^3x_2^2x_3^2. \quad (18)$$

Непосредственными вычислениями значений $\Phi(x_1, x_2, x_3)$ легко проверить правильность полученной формулы.

4. Некоторые практические приложения разработанных методов

В качестве примера работы предложенных методов синтеза АНФ функций многозначной логики исследуем алгебраическую степень не-

линейности, предложенных в [6] оптимальных троичных S -блоков подстановки. Так, рассмотрим оптимальный S -блок длины $N = 27$

$$S_{27} = \{0, 2, 24, 26, 25, 14, 13, 12, 1, 9, 11, 6, 8, 7, 23, \\ 22, 21, 10, 18, 20, 15, 17, 16, 5, 4, 3, 19\}, \quad (19)$$

который можно представить в виде трех 3-функций трех переменных

$$\begin{cases} f_1 = \{002221110110002221221110002\}; \\ f_2 = \{002221110002221110002221110\}; \\ f_3 = \{020212101020212101020212101\}, \end{cases} \quad (20)$$

для каждой из которых, зная соответствующую матрицу L_{27} , нетрудно найти АНФ

$$\begin{cases} \Phi_1(x_1, x_2, x_3) = 2x_3 + x_3^2 + 2x_2 + x_1; \\ \Phi_2(x_1, x_2, x_3) = 2x_3 + x_3^2 + 2x_2; \\ \Phi_3(x_1, x_2, x_3) = x_3 + x_3^2 + 2x_2. \end{cases} \quad (21)$$

Для нахождения алгебраической степени нелинейности S -блока подстановки (19) воспользуемся определением [7].

Определение 4 [7]. Алгебраической степенью нелинейности функции (обозначение: $\deg(f)$) называется степень слагаемого в полиноме АНФ, содержащего наибольшее число переменных.

Определение 5 [14]. Алгебраическая степень нелинейности S -блока подстановки определяется как минимум среди алгебраических степеней его компонентных функций.

Таким образом, с учетом (21) нетрудно установить, что алгебраическая степень нелинейности S -блока подстановки (19) $\deg(S_{27}) = 2$.

Проведенные выборочные исследования S -блоков подстановки, генерируемых с помощью метода рекуррентного увеличения длины [6], позволили установить, что алгебраическая степень нелинейности S -блоков подстановки не возрастает при увеличении их длины с помощью метода [6].

Задача изучения алгебраических степеней нелинейности подстановочных конструкций, основанных на принципах многозначной логики и задача синтеза оптимальных, с точки зрения максимизации алгебраической степени нелинейности S -блоков подстановки, все еще ожидают своего решения.

Заключение

1. Предложены методы синтеза алгебраической нормальной формы 3-функций и 5-функций допускающие нахождение коэффициентов

АНФ для q -функции любой длины. При этом, определено обратное преобразование, позволяющее получить таблицу истинности 3-функций или 5-функций при наличии вектора коэффициентов АНФ. Сложность предложенных методов практически эквивалентна сложности операции умножения матрицы на вектор.

2. Рассчитаны АНФ компонентных 3-функций оптимальных S-блоков подстановки. Установлено, что недостатком метода рекуррентно-

го увеличения длины оптимальных S-блоков подстановки является тот факт, что с увеличением длины их алгебраическая степень нелинейности не возрастает.

3. Предложенные методы синтеза АНФ могут быть использованы как для тестирования криптографических примитивов или построения корректирующих кодов, так и для аппаратной или программной реализации 3-функций и 5-функций.

Литература

1. **Мазурков, М. И.** О влиянии вида ортогонального преобразования на пик-фактор спектра в системах с CDMA / М. И. Мазурков, А. В. Соколов, Н. А. Барабанов. – Информатика та математичні методи в моделюванні, 2015. – Т. 5, № 1. – С. 28–37.
2. **Falkowski, B. J.** Application of Sign Hadamard-Haar Transform in Ternary Communication System / B. J. Falkowski, S. Yan. – International Journal of Electronics, 1995. – Vol. 79(5). – P. 551–559.
3. **Кузнецов, В. С.** Троичные каскадные коды с модуляцией КАМ-9 и их возможности / В. С. Кузнецов. – «Инфо-Электросвязь», 2009. – С. 30–33.
4. **Мазурков, М. И.** Системы широкополосной радиосвязи / М. И. Мазурков – Одесса: Наука и Техника, 2010, с. 340. – ISBN 978-966-8335-95-2.
5. **Петелин, Ю. В.** Перспективы использования сигнально-кодовых конструкций типа троичных M-последовательностей в спутниковых каналах связи / Ю. В. Петелин, М. А. Ковалев, А. А. Макаров // Информационно-управляющие системы. – 2006. – №. 5. – С. 32–35.
6. **Жданов, О. Н.** Алгоритм построения оптимальных по критерию нулевой корреляции не двоичных блоков замен / О. Н. Жданов, А. В. Соколов. – Проблемы физики, математики и техники, 2015. – № 3(24). – С. 94–97.
7. **Логачев, О. А.** Булевы функции в теории кодирования и криптологии / О. А. Логачев, А. А. Сальников, В. В. Ященко. – М.: Издательство МЦНМО. – 2004. – 472 с.
8. **Qingshu, Meng** A novel algorithm enumerating bent functions / Qingshu Meng, Min Yang, Huanguo Zhang, Jingsong Cui // Discrete Mathematics, 2008. – Volume 308, Issue 23, 2008. – P. 5576–5584.
9. **Мак-Вильямс, Ф. Дж.** Теория кодов исправляющих ошибки / Ф. Дж. Мак-Вильямс, Н. Дж. А. Слоэн. – М.: Связь, 1979. – с. 745.
10. **Мазурков, М. И.** Генератор ключевых последовательностей на основе дуальных пар бент-функций / М. И. Мазурков, Н. А. Барабанов, А. В. Соколов. – Труды Одесского политехнического университета, 2013. – Вып. 3 (42). – С. 150–156.
11. **Жегалкин, И. И.** Арифметизация символической логики / И. И. Жегалкин. – Матем. сб., 1929. – 305–338.
12. **Ростовцев, А. Г.** Криптография и защита информации / А. Г. Ростовцев. – СПб.: Мир и Семья. – 2002.
13. **Кормен, Т.** Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – М.: Вильямс, 2006. – с. 1328.
14. **Соколов, А. В.** Новые методы синтеза нелинейных преобразований современных шифров / А. В. Соколов. – Lap Lambert Academic Publishing, Germany, 2015. – 100 с.

References

1. **Mazurkov, M. I.** On the effect of the type of orthogonal transform on PAPR of signal spectrum in CDMA systems / M. I. Mazurkov, A. V. Sokolov, N. A. Barabanov. – Informatika ta matematichni metodi v modeljuvanni, 2015. – Vol. 5, № 1. – P. 28–37.
2. **Falkowski, B. J.** Application of Sign Hadamard-Haar Transform in Ternary Communication System / B. J. Falkowski, S. Yan. – International Journal of Electronics, 1995. – Vol. 79(5). – P. 551–559.
3. **Kuznecov, V. S.** Trinity concatenated codes with QAM-9 and their capabilities / V. S. Kuznecov. – «Info-Jelektrosvjaz», 2009. – P. 30–33.
4. **Mazurkov, M. I.** Broadband radio systems / M. I. Mazurkov. – Odessa: Nauka i Tehnika, 2010, p. 340. – ISBN 978-966-8335-95-2.
5. **Petelin, Ju. V.** Perspectives of using of signal-code structures such as ternary M-sequences in the satellite communication channels / Ju. V. Petelin, M. A. Kovalev, A. A. Makarov // Informacionno-upravljajushhie sistemy. – 2006. – №. 5. – P. 32–35.
6. **Zhdanov, O. N.** Algorithm of construction of optimal according to criterion of zero correlation nonbinary S-boxes / O. N. Zhdanov, A. V. Sokolov. – Problems of physics, mathematics and technics, 2015. – № 3(24). – P. 94–97.
7. **Logachev, O. A.** Boolean functions in coding theory and cryptology / O. A. Logachev, A. A. Sal'nikov, V. V. Jashhenko. – M: Izdatel'stvo MCNMO. – 2004. – 472 p.

8. **Qingshu, Meng** A novel algorithm enumerating bent functions / Qingshu Meng, Min Yang, Huanguo Zhang, Jingsong Cui // Discrete Mathematics, 2008. – Volume 308, Issue 23. – P. 5576–5584.
9. **MacWilliams, F. J.** Theory of Error-Correcting Codes / F. J. MacWilliams, N. J. A. Sloane. – M.: Svjaz', 1979. – p. 745.
10. **Mazurkov, M. I.** The key sequences generator based on bent functions dual couples / M. I. Mazurkov, N. A. Barabanov, A. V. Sokolov. – Works of the Odessa polytechnic university. – Vol. 3 (42). – P. 150–156.
11. **Zhegalkin, I. I.** Arithmetization of symbolic logic / I. I. Zhegalkin. – Matem. sb., 1929. – P. 305–338.
12. **Rostovcev, A. G.** Cryptography and Data Protection / A. G. Rostovcev. – SPb.: Mir i Sem'ja. – 2002.
13. **Kormen, T.** Construction and analysis of algorithms / T. Kormen, Ch. Lejzerson, R. Rivest, K. Shtajn, – M.: Vil'jams, 2006. – p. 1328.
14. **Sokolov, A. V.** New methods of the synthesis of non-linear transforms of modern ciphers / A. V. Sokolov. – Lap Lambert Academic Publishing, Germany, 2015. – p. 100.

Поступила 01.03.2016

A. V. Sokolov, O. N. Zhdanov, O. A. Ayvazian

SYNTHESIS METHODS OF ALGEBRAIC NORMAL FORM OF MANY-VALUED LOGIC FUNCTIONS

The rapid development of methods of error-correcting coding, cryptography, and signal synthesis theory based on the principles of many-valued logic determines the need for a more detailed study of the forms of representation of functions of many-valued logic. In particular the algebraic normal form of Boolean functions, also known as Zhegalkin polynomial, that well describe many of the cryptographic properties of Boolean functions is widely used. In this article, we formalized the notion of algebraic normal form for many-valued logic functions. We developed a fast method of synthesis of algebraic normal form of 3-functions and 5-functions that work similarly to the Reed-Muller transform for Boolean functions: on the basis of recurrently synthesized transform matrices. We propose the hypothesis, which determines the rules of the synthesis of these matrices for the transformation from the truth table to the coefficients of the algebraic normal form and the inverse transform for any given number of variables of 3-functions or 5-functions. The article also introduces the definition of algebraic degree of nonlinearity of the functions of many-valued logic and the S-box, based on the principles of many-valued logic. Thus, the methods of synthesis of algebraic normal form of 3-functions applied to the known construction of recurrent synthesis of S-boxes of length $N = 3^k$, whereby their algebraic degrees of nonlinearity are computed. The results could be the basis for further theoretical research and practical applications such as: the development of new cryptographic primitives, error-correcting codes, algorithms of data compression, signal structures, and algorithms of block and stream encryption, all based on the perspective principles of many-valued logic. In addition, the fast method of synthesis of algebraic normal form of many-valued logic functions is the basis for their software and hardware implementation.

Keywords: algebraic normal form, many-valued logic, Reed-Muller transform.



Артем Соколов родился 15 апреля 1990 года в Одессе, УССР. Получил степень бакалавра (с отличием) по специальности «Системы технической защиты информации» в 2011 году, степень магистра (с отличием) по специальности «Системы технической защиты информации, автоматизация её обработки» в 2013 году и степень кандидата технических наук по специальности «Системы защиты информации» в 2014 году в Одесском национальном политехническом университете, г. Одесса, Украина.

С 2012 по 2014 работал младшим научным сотрудником кафедры Информационной безопасности в Одесском национальном политехническом университете. С 2014 года является старшим преподавателем кафедры Информационной безопасности Одесского национального политехнического университета. Является автором монографии и более 30 научных статей. Научные интересы включают в себя методы защиты информации на основе совершенных алгебраических конструкций, методы синтеза алгоритмов шифрования данных и нелинейных S-блоков.

Артем Соколов награжден Золотой медалью за высокие достижения в учебе, Дипломом победителя в конкурсе Магистров, 2013 год; Дипломом победителя Всеукраинского конкурса научно-исследовательских работ «Телекоммуникационные системы и сети», 2012 год; Дипломом за высокие академические и исследовательские достижения, 2010 год.



Жданов Олег Николаевич родился 16 апреля 1964 года. В 1986 году окончил Красноярский Государственный Университет. Кандидатская диссертация по специальности «математический анализ» защищена в 1994 году. В настоящее время доцент кафедры безопасности информационных технологий Сибирского Государственного Аэрокосмического университета.

Читаемые лекционные курсы: «Криптографические методы защиты информации» (имеется удостоверение Института Криптографии, Связи и Информатики о соответствующем повышении квалификации), «Теоретико-числовые алгоритмы криптографии», «Теория надежности».

Общее количество публикаций 73, из них 7 – учебные пособия (в соавторстве с учениками).

Сфера научных интересов: системы дифференциальных уравнений в частных производных, являющиеся моделями процессов в механике сплошных сред. Получены точные решения уравнений пластичности плоского напряженного состояния, предложен новый подход к исследованию смешанной задачи для системы уравнений плоского напряженного состояния среды Мизеса, построен алгоритм нахождения решения задачи Коши для системы уравнений, описывающей одномерный поток гранулированного материала.

Еще одной областью научных интересов является защита информации: разработка реализации алгоритмов шифрования данных при передаче по открытому каналу с привлечением к этой работе студентов старших курсов для выполнения ими курсового и дипломного проектирования. Совместно с учениками разработал методику выбора ключевой информации для реализации алгоритмов блочного шифрования. Получено авторское свидетельство (совместно с Чалкиным Т. А.) на программный комплекс, реализующий выбор ключевой информации для шифрования данных по действующему стандарту России.

Два ученика стали лауреатами стипендии губернатора Красноярского края, а один – лауреат стипендии Правительства России и победитель конкурса на лучшую студенческую научную работу.

Награжден Благодарственным Письмом Законодательного Собрания Красноярского края. Награжден нагрудным знаком Министерства Образования и Науки РФ «За развитие научно-исследовательской работы студентов».



Айвазян Оганнес родился в Ереване, АССР, в 1990 году. Получил степень бакалавра по специальности «Компьютерные науки» в 2011 году, степень специалиста по специальности «Информационные системы проектирования» в 2012 году в Одесском национальном политехническом университете, г. Одесса, Украина.

С ноября 2013 года является аспирантом по специальности «Компьютерные системы и компоненты» и работает инженером-программистом. Научные интересы включают в себя методы недрвоичного обнаружения и исправления ошибок, методы сглаживания и экстраполяции данных, квантовая обработка информации.

Айвазян Оганнес награжден грамотами за призовые места на олимпиадах.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В ОБРАЗОВАНИИ**

**INFORMATION
TECHNOLOGIES
IN EDUCATION**

УДК 808.2: 159.937

М. В. МАКАРИЧ

РЕАЛИЗАЦИЯ ОБУЧАЮЩЕЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ НА ОСНОВЕ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ТЕКСТА

Белорусский национальный технический университет

Вследствие постоянного увеличения объема электронной текстовой информации современное общество испытывает острую потребность в автоматизированной обработке естественного языка (ЕЯ). Главное предназначение систем автоматической обработки ЕЯ – анализировать и синтезировать тексты, то есть преобразовывать тексты из их исходного вида в некоторое абстрактное представление, приближенное к представлению смысла, и обратно. Целью предлагаемой работы является разработка лингвистического и информационного обеспечения автоматической системы для обработки англоязычных публицистических текстов и ее последующая реализация в виде обучающей компьютерной программы. В статье рассматриваются примеры различных подходов к технологии создания лингвистической базы данных для систем обработки текста естественного языка. Автор дает подробное описание основных структурных блоков принципиально нового лингвистического процессора: лексико-семантического, синтаксического и семантико-синтаксического. Основным преимуществом данного процессора является использование в алфавитном словаре специальных семантических кодов в соответствии с разработанной лексико-семантической классификацией. Это позволяет автоматической системе точно определять семантические функции ключевых слов, входящих в выделенные в процессе синтаксического анализа группы. Что, в свою очередь, помогает избежать ошибок, характерных для такого рода систем.

Ключевые слова: система автоматической обработки ЕЯ, лингвистическое и информационное обеспечение, лингвистический процессор, обучающая компьютерная программа.

Введение

Естественный язык (ЕЯ) является неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. Однако вследствие постоянного увеличения объема электронной текстовой информации современное общество испытывает острую потребность в автоматизированной обработке ЕЯ. Главное предназначение систем автоматической обработки ЕЯ – анализировать и синтезировать тексты, то есть преобразовывать тексты из их исходного вида в некоторое абстрактное представление, приближенное к представлению смысла, и обратно. Помимо этого главного предназначения, направленного на решение фундаментальной задачи моделирования ЕЯ, имеется и прикладной аспект. Способность автоматической системы понимать и строить тексты может быть использована в приложениях, способных принести конкретную пользу. Предлагаемая работа посвящена разработке лингвистического и информационного обеспе-

чения автоматической системы для обработки англоязычных текстов и ее последующей реализации в виде обучающей компьютерной программы.

Общее описание и структура базы данных автоматической системы

Как уже говорилось выше, целью данной работы является разработка лингвистического и информационного обеспечения, на основе которого может быть создана система или, другими словами, построена функциональная модель, позволяющая раскрыть суть механизма создания такого текста, который был бы максимально удобным для восприятия человеком. Анализ литературы, содержащей общие принципы процесса автоматической обработки текстов ЕЯ, показывает, что такого рода системы должны содержать три последовательных блока: лексико-грамматический, синтаксический и блок семантического анализа текстов [1].

Целью *лексико-грамматического анализа* является разбор входного потока слов с распознаванием частей речи: существительное, прилагательное, глагол, наречие и т. д., а также других морфологических параметров, таких как род, число, падеж и др. Основой данного блока является автоматический словарь. В настоящее время наиболее используемыми являются словари словоформ, где для любого слова хранятся все его возможные формы с указанием возможных лексико-грамматических классов. Для распознавания неизвестных, т. е. не содержащихся в словаре слов могут быть реализованы алгоритмы идентификации, использующие формальные признаки частей речи (окончания, суффиксы и т. п.) [2].

На этапе лексико-грамматического анализа решается и проблема устранения лексической многозначности слов. Большое количество слов имеют одинаковое написание, но являются различными частями речи. Любому входному слову текста, учитывая контекст, необходимо поставить в соответствие единственный лексико-грамматический код. Данная задача является легко выполнимой применительно к русскому языку. Его развитая морфология позволяет осуществить это практически со стопроцентной точностью. В английском языке простой алгоритм, присваивающий каждому слову в тексте наиболее вероятный лексико-грамматический код, работает с точностью 95–96% [3].

Для улучшения точности анализа используются два подхода: вероятностно-статистический и основанный на продукционных правилах, оперирующих словами и кодами. Вероятностно-статистические методы используют статистику встречаемости различных кодов и слов, снятой с некоторого эталонного текста. В результате каждому слову в предложении ставится в соответствие наиболее вероятный лексико-грамматический класс. Алгоритмы, основанные на продукционных правилах, используют правила собранные автоматически, либо подготовленные квалифицированными экспертами-лингвистами. Оба подхода дают примерно одинаковый результат. При их использовании отдельно либо в различных комбинациях точность лексико-грамматического анализа английского языка улучшается до 96–98%, что сравнимо с точностью ручной обработки.

Синтаксический анализ подразумевает сегментирование (фрагментацию) текста на предложения или близкие к ним фрагменты для построения синтаксических структур. Процедура автоматического синтаксического анализа позволяет получить при помощи алгоритмов формализованную синтаксическую структуру предложения. Результатом работы автоматической системы синтаксического анализа является представление синтаксической структуры входного предложения обрабатываемого текста в виде синтаксического дерева. Исходной информацией для работы такой системы служит морфологическое представление слов в виде цепочки кодов, репрезентирующих грамматический класс слова и его словоизменительные характеристики. Таким образом, морфологический анализ путем кодификации слов текста обеспечивает доступ к денотативной информации. На следующем этапе создается семантическая структура текста с помощью синтаксических, семантических и пунктуационных средств. Существует определенный параллелизм между синтаксической и семантической структурами, который проявляется в соответствии структурных связей семантическим. Исследователями замечено сходство результатов системы автоматического анализа текста и, например, лингвиста, изучающего язык и действующего в противоположном направлении. Данный факт подтверждает гипотезу о том, что язык хорошо коррелирован на самых различных уровнях. Это значит, что синтаксическая структура, полученная на основе только грамматических критериев, очень близка синтаксической структуре, полученной на основе семантических критериев, в пользу чего говорят многие данные, накопленные лингвистикой за последние годы.

Семантический анализ заключается в выделении из документа основных смысловых единиц (слов, словосочетаний) и определении ассоциативных, причинно-следственных и др. связей между ними [4]. Основным средством для этого является некоторая система правил. Семантический этап – базовая составляющая систем автоматического понимания текста. Он выступает в роли посредника и должен согласовать три разных «языка» [5]:

- язык построенных системой лингвистических структур (плюс другие лингвистические знания), получаемые им на входе;

- язык той предметной области, к которой относится текст и термины которой желательно использовать при построении выходной структуры;

- язык пользователя, для которого система автоматической обработки текста должна предоставить информацию.

Информация, которую автоматическая система обработки текста получает из текста, должна быть изложена на языке, понятном пользователю как с естественно-языковой точки зрения, так и с точки зрения той предметной области, которой он владеет как специалист. Иначе результат работы системы не может быть назван информацией для этого конкретного пользователя – адресата информации.

В зависимости от конкретных задач обработки текста автоматическая система может не содержать всех трех блоков: лексико-грамматического, синтаксического и семантического, или содержать дополнительные блоки, необходимые для конкретной системы. Примером может служить система, разработанная для распознавания в тексте концептов и семантических отношений между ними типа «субъект-акция-объект», отношений типа «причина-следствие» и «часть-целое» [6]. Данная система реализует следующие этапы обработки поступившего на ее вход текста: переформатирование, лексический (распознавание границ слов и предложений), лексико-грамматический, синтаксический и семантический анализ.

Таким образом, выбор подхода к разработке систем автоматического экстрагирования информации связан с конкретной задачей, поставленной перед системой автоматической обработки.

С учетом того, что целью нашего исследования является выделение главных субъектов, объектов и их действий из англоязычных публицистических текстов, в общую структуру системы автоматической обработки включены следующие блоки:

1. Блок лексико-семантического анализа слов входящего предложения, опирающийся на алфавитный словарь исследуемых текстов, содержащий семантические коды в соответствии с разработанной лексико-семантической классификацией.

2. Блок синтаксического анализа, основой которого являются списки граничных сигналов

для синтаксического анализа английского предложения и выявления в нем членов предложений (группы подлежащего, группы сказуемого и т. п.).

3. Блок семантико-синтаксического анализа, определяющий семантические функции ключевых слов, входящих в выделенные в процессе синтаксического анализа группы слов. Работа данного блока построена с использованием семантических функций формального языка TABLING [7] и позволяют компьютеру ответить на ряд самых важных вопросов, касающихся содержания текста, путем построения таблицы его основного содержания. Здесь, в соответствии со значением семантических функций языка TABLING, составляющие основного содержания текста означают:

(AGA) – субъект 1, активный одушевленный инициатор некоторого действия или события.

(AGN) – субъект 2, активный неодушевленный инициатор некоторого действия или события.

(ONG) – предмет, главный объект некоторого события текста.

(R) – действие, репрезентация конкретного действия активного одушевленного инициатора.

(PRP) – свойство (признак) – свойство предмета, процесса, материала, зафиксированного в тексте.

(LOC) – место совершения некоторого события текста.

(TIM) – время совершения некоторого события текста.

Реализация созданной базы данных в обучающей компьютерной программе

Между любой теоретической моделью и ее компьютерной реализацией имеется двусторонняя зависимость. С одной стороны, компьютерная система должна как можно более точно воплотить разработанные теоретические принципы. Это, в первую очередь, представление каждого предложения обрабатываемого текста на нескольких уровнях (морфологическом, поверхностно-синтаксическом и глубинно-синтаксическом), изображение синтаксического строения предложения в виде дерева зависимостей между словами и признание словаря, наряду с грамматикой, важнейшим ком-



Рис. 1. Структура окна в обычном режиме

понентом лингвистической модели. С другой стороны, компьютерная модель имеет неоценимое значение для развития теории, поскольку служит объективным и надежным полигоном для проверки и отладки теоретических положений и конкретных решений. Дело в том, что как только мы покидаем область исследуемой группы текстов и переходим на более абстрактные уровни представления, мы лишаемся возможности непосредственно оценивать результаты. Лишь компьютерное моделирование предоставляет исследователю возможность наглядно увидеть, насколько адекватна действительности разработанная им теоретическая схема.

Предложенная нами теоретическая модель автоматической системы для обработки текстов ЕЯ ранее уже была реализована в компьютерной программе автоматического реферирования TRT [8]. Другая прикладная система, в составе которой описанная теоретическая модель была опробована – обучающая компьютерная программа для совершенствования навыка просмотрового чтения текстов на английском языке. Программа реализована на языке программирования C# (Sharp). Структура окна программы в обычном режиме приведена на рис. 1.

Как видно на рис. 1, основным элементом окна является рабочая область для загрузки одного из предложенных англоязычных текстов. Работа с элементами окна производится с помощью выбора необходимого файла в строке заголовка. После ознакомления с содержанием текста обучаемый переходит в режим контроля знаний при помощи кнопки «Go To Test», находящейся в правом верхнем углу. Кон-



Рис. 2. Структура окна в режиме тестирования



Рис. 3. Структура окна в режиме контроля результатов

трольные вопросы сформулированы таким образом, чтобы проверить правильность понимания предложенного текста: *Кто главное действующее лицо текста? О чем говорится в тексте? Какие основные действия совершают главные действующие лица? И т. д.* (рис. 2).

После заполнения всех соответствующих рабочих областей появляется возможность проверить правильность данных ответов при помощи кнопки «Check Answers» в левом нижнем углу. На рис. 3 приведен пример исправленных ответов на поставленные вопросы: выбранные обучаемым ответы приведены в строке «Your Answer», а аналогичные правильные – в строке «Correct Answer».

Заключение

Созданная нами на основе разработанной лингвистической базы данных компьютерная программа может быть использована в качестве тренажера на практических занятиях по английскому языку для формирования навыка

восприятия и интерпретации англоязычного публицистического текста. Структура лингвистической базы созданной программы содержит три блока: блок лексико-семантического анализа, блок синтаксического анализа и блок семантико-синтаксического анализа. Программа открыта для доработки и может быть использована для работы с англоязычными текстами другой предметной области при внесении дополнительного материала в автоматический алфавитный словарь. Это является основным преимуществом представленной про-

граммы в процессе ее использования на практических занятиях по английскому языку, так как преподаватель может значительно сэкономить время в поиске необходимого и эффективного учебного материала в зависимости от того, какую методическую цель он ставит перед собой. С помощью интернет-ресурсов можно ввести новый лексический, страноведческий материал, сделать занятие более наглядным, закрепить учебный материал, вооружить студентов стратегиями саморазвития.

Литература

1. Пиотровский, Р. Г. Методы автоматического анализа и синтеза текста / Р. Г. Пиотровский [и др.]. – Минск: Высшая школа, 1985. – 222 с.
2. Воронцов, А. В. Промышленная реализация системы лексико-грамматического анализа текстовых документов / А. В. Воронцов // Вестн. МГЛУ. Сер. 1, Филология. – 2007. – № 1(26). – С. 189–203.
3. Jurafsky, D. Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition / D. Jurafsky, J. Martin. – New Jersey: Prentice Hall, 2000. – 934 p.
4. Todhunter, J. Semantic processor for recognition of whole-part relations in natural language documents: US Patent Appl. 20070156393 / J. Todhunter, I. Sovpel, D. Pastanohau and others; Intention Machine Corp. – Serial no. 686660; Series code 11; Filed 15.03.2007. – 2007.
5. Леонтьева, Н. Н. Автоматическое понимание текстов: системы, модели, ресурсы: учеб. Пособие для студентов лингвистических факультетов вузов / Н. Н. Леонтьева. – Москва: Академия, 2006–304 с.
6. Совпель, И. В. Автоматическое распознавание основных типов знаний в текстовых документах / И. В. Совпель // Искусственный интеллект ISSN1561–5359 – НАН Украины «Наука и просвещение» – 2007. – № 3 – С. 328–332.
7. Зубов, А. В. Семантико-синтаксический язык для записи текстов в памяти ЭВМ / А. В. Зубов // Функционирование и развитие языковых систем. Сборник научных трудов. – Минск: Высшая школа, 1990. – С. 110–117.
8. Макарич, М. В. Автоматическая система для создания табличного реферата группы текстов / М. В. Макарич. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012–145c.

References

1. R. G. Piotrovsky, Automatic text analysis and synthesis methods. Minsk: Vyshejschaya shkola, 1985. – 222 p.
2. A. V. Vorontsov, Industrial implementation of a system for lexical and grammatical analysis of text documents. J. Vestn. MSLU, Vol. 1(26), pp. 189–203, 2007.
3. D. Jurafsky, Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition. New Jersey: Prentice Hall, 2000. – 934 p.
4. J. Todhunter, I. Sovpel, D. Pastanohau, Semantic processor for recognition of whole-part relations in natural language documents: US Patent Appl. 20070156393; Intention Machine Corp. – Serial no. 686660; Series code 11; Filed 15.03.2007.
5. N. N. Leonteva, Automatic text interpretation: Systems, models, resources: Handbook for students of linguistic faculties. Moscow: Akademy, 2006–304 c.
6. I. V. Sovpel, Automatic recognition of basic knowledge in text. J. Artificial intelligence, Vol. 3, pp. 328–332, 2007.
7. A. V. Zubov, A semantic and syntactic language for text entry in computer memory. Functioning and development of language systems: Collection of scientific papers. Minsk: Vyshejschaya shkola, pp. 110–117, 1985.
8. M. V. Makarych, Automatic system for creating a table abstract of texts. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012–145 p.

Поступила 01.03.2016

M. V. MAKARYCH

REALIZATION OF TRAINING PROGRAMME ON THE BASIS OF LINGUISTIC DATABASE FOR AUTOMATIC TEXTS PROCESSING SYSTEM

Belarusian National Technical University

Due to the constant increasing of electronic textual information, modern society needs for the automatic processing of natural language (NL). The main purpose of NL automatic text processing systems is to analyze and create texts and represent their content. The purpose of the paper is the development of linguistic and software bases of an automatic system for process-

ing English publicistic texts. This article discusses the examples of different approaches to the creation of linguistic databases for processing systems. The author gives a detailed description of basic building blocks for a new linguistic processor: lexical-semantic, syntactical and semantic-syntactical. The main advantage of the processor is using special semantic codes in the alphabetical dictionary. The semantic codes have been developed in accordance with a lexical-semantic classification. It helps to precisely define semantic functions of the keywords that are situated in parsing groups and allows the automatic system to avoid typical mistakes. The author also represents the realization of a developed linguistic database in the form of a training computer program.

Keywords: NL automatic text processing systems, linguistic and software bases, linguistic processor, training computer program.



Макарич Марина Васильевна

E-mail: 2348843@tut.by.

Доцент кафедры английского языка № 2 БНТУ, кандидат филологических наук (специальность 10.02.21 – прикладная и математическая лингвистика), доцент. Также имеет диплом БНТУ (БПИ, факультет роботов) по специальности – автоматизация и комплексная механизация машиностроения. Научные интересы: педагогический аспект технического образования и лингвистическое обеспечение информационных систем.

Makarych Marina, Associate Professor of the 2nd English Department of the Belarusian National Technical University, PhD in Applied and mathematical linguistics. In addition she has B. Sc. in robotics (e-mail: 2348843@tut.by).

Her scientific interests focus on engineering education and interdisciplinary education that combines linguistics and computer science.

РИНЦ, SCIENCE INDEX

Адрес входа: http://elibrary.ru/project_risc.asp

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) – это национальная информационно-аналитическая система, аккумулирующая более 2 миллионов публикаций российских авторов, а также информацию о цитировании этих публикаций из более 3000 российских журналов. Она предназначена не только для оперативного обеспечения научных исследований актуальной справочно-библиографической информацией, но является также и мощным инструментом, позволяющим осуществлять оценку результативности и эффективности деятельности научно-исследовательских организаций, ученых, уровень научных журналов и т. д.

Регистрация авторов

Регистрация пользователя в Научной электронной библиотеке является необходимым условием для получения доступа к полным текстам публикаций, размещенных на платформе eLIBRARY.RU, независимо от того, находятся ли они в открытом доступе или распространяются по подписке. Зарегистрированные пользователи также получают возможность создавать персональные подборки журналов, статей, сохранять историю поисковых запросов, настраивать панель навигатора и т.д.

Для работы с авторским профилем в системе SCIENCE INDEX также необходимо вначале зарегистрироваться, но уже в качестве автора. Регистрация автора в SCIENCE INDEX объединена с регистрацией пользователя на портале Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU. Для регистрации в SCIENCE INDEX нужно просто заполнить несколько дополнительных полей.



Homepage

Publisher: Belarusian National Technical University

Society/Institution: Belarusian National Technical University

Country of publisher: Belarus

Platform/Host/Aggregator: Elpub.ru

Date added to DOAJ: 12 Feb 2016

LCC Subject Category: Technology: Technology (General): Industrial engineering. Management engineering: Information technology

Publisher's keywords: complicated technical systems, system analysis, data processing, information technologies, information security

Language of fulltext: Russian, English

Full-text formats available: PDF

PUBLICATION CHARGES

Article Processing Charges (APCs): No.

Submission Charges: No.

Waiver policy for charges? No.

EDITORIAL INFORMATION

Double blind peer review

Editorial Board

Aims and scope

Instructions for authors

Time From Submission to Publication:
8 weeks

More