

ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2024
Т. 16, № 4

ISSN 2075-809X (Print)
ISSN 2409-6547 (Online)

СЕРИЯ

«МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА. ФИЗИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Основной целью серии «Математика. Механика. Физика» является публикация и распространение оригинальных результатов научных исследований в области математики, механики и физики, а также их приложений в естественных, технических и экономических науках.

Редакционная коллегия

д.ф.-м.н., профессор **Загребина С.А.** (гл. редактор)
к.ф.-м.н., доцент **Голубев Е.В.** (отв. секретарь)
д.ф.-м.н., профессор **Бескачко В.П.** (ЮУрГУ)
к.ф.-м.н., профессор **Заляпин В.И.** (ЮУрГУ)
д.ф.-м.н., профессор **Ковалев Ю.М.** (ЮУрГУ)

Редакционный совет

д.т.н., профессор **Богомолов А.В.** (Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, г. Москва)
д.ф.-м.н., профессор **Бровко Г.Л.** (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва)
д.ф.-м.н., профессор **Бучельников В.Д.** (Челябинский государственный университет, г. Челябинск)
профессор **Гундетти Д.** (Болонский университет, г. Болонья, Италия)
д.ф.-м.н., профессор **Жуковский В.И.** (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва)
д.ф.-м.н., профессор **Зелик С.В.** (Университет Суррея, г. Гилфорд, Великобритания)
д.ф.-м.н., профессор **Короткий А.И.** (Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, г. Екатеринбург)
Ph. D., профессор **Ким Джейван** (Корейский институт передовых исследований KIAS, г. Сеул, Южная Корея)
Ph. D., профессор **Ким Кишик** (ИННА-Университет, г. Инчон, Южная Корея)
д.ф.-м.н., профессор **Кундикова Н.Д.** (Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург)
д.ф.-м.н., профессор **Меньших В.В.** (Воронежский институт МВД Российской Федерации, г. Воронеж)
д.ф.-м.н., профессор **Пинчук С.И.** (Университет штата Индиана, г. Блумингтон, США)
Ph. D., ассистент-профессор **Пузырев Е.С.** (Университет Вандербильта, г. Нэшвилл, США)
д.т.н., профессор **Равшанов Н.К.** (Ташкентский университет информационных технологий, г. Ташкент, Узбекистан)
д.ф.-м.н., доцент **Труханов А.В.** (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь)
д.т.н., профессор **Уткин Л.В.** (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)
Prof. dr. ir. **Ферпуст И.** (Католический университет, г. Лёвен, Бельгия)
д.ф.-м.н., Ph. D., профессор **Штраус В.А.** (Университет Симона Боливара, г. Каракас, Венесуэла)



BULLETIN

OF THE SOUTH URAL
STATE UNIVERSITY

2024

Vol. 16, no. 4

SERIES

“MATHEMATICS.
MECHANICS. PHYSICS”

ISSN 2075-809X (Print)
ISSN 2409-6547 (Online)

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.
Seriya “Matematika. Mekhanika. Fizika”

South Ural State University

The main purpose of the series “Mathematics. Mechanics. Physics” is to promote the results of research in mathematics, mechanics and physics, as well as their applications in natural, technical and economic sciences.

Editorial Board

- S.A. Zagrebina**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation
E.V. Golubev, Candidate of Physics and Mathematics, Associated Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation
V.P. Beskachko, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation
V.I. Zalyapin, Candidate of Physics and Mathematics, Associated Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation
Yu.M. Kovalev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Editorial Council

- A.V. Bogomolov**, Doctor of Engineering, Professor, State Scientific Center of the Russian Federation – A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, the Russian Federal Medical-Biological Agency, Moscow, Russian Federation
G.L. Brovko, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Moscow State University, Moscow, Russian Federation
V.D. Buchelnikov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation
D. Guidetti, Full Professor of Mathematical Analysis, University of Bologna, Bologna, Italy
V.I. Zhukovsky, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Moscow State University, Moscow, Russian Federation
S.V. Zelik, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, University of Surrey, Guildford, United Kingdom
A.I. Korotkii, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
Jaewan Kim, Ph. D., Professor, Korea Institute for Advanced Study KIAS, Seoul, South Korea
Kisik Kim, Ph. D., Professor, INHA-University, Incheon, South Korea
N.D. Kundikova, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Institute of Electrophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
V.V. Menshikh, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Voronezh Institute of Russian Ministry of Internal Affairs, Voronezh, Russian Federation
S.I. Pinchuk, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Indiana University, Bloomington, United States of America
Y.S. Puzyrev, Ph. D., Assistant Professor, Vanderbilt University, Nashville, United States of America
N.K. Ravshanov, Doctor of Engineering, Professor, Tashkent University of Information Technologies, Tashkent, Uzbekistan
A.V. Trukhanov, Doctor of Physics and Mathematics, Associated Professor, Scientific Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
L.V. Utkin, Doctor of Engineering, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation
I. Verpoest, Dr. ir., Professor, Catholic University, Leuven, Belgium
V.A. Strauss, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, University of Simon Bolivar, Caracas, Venezuela

СОДЕРЖАНИЕ

Математика

- АНЧЕКОВ М.И., БЖИХАТЛОВ К.Ч., МАКОЕВА Д.Г., НАГОЕВ З.В., НАГОЕВА О.В., ПШЕНОКОВА И.А. Социоонтологический мультиагентный нейрокогнитивный метод роботизированного контроля регламента процессов в рабочей зоне торгового предприятия..... 5
- ВОЛКОВ Д.М., САВЕЛЬЕВ А.И. Метод фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика на основе адаптивного альфа-бета-фильтра Калмана..... 16
- GONCHAROV N.S., SVIRIDYUK G.A. Stochastic Wentzel System of Free Fluid Filtration Equations on a Hemisphere and On Its Edge..... 24
- КАДЧЕНКО С.И., РЯЗАНОВА Л.С. Алгоритмы вычисления собственных чисел начально-краевых задач для волнового дифференциального уравнения, заданного на графе с изменяющимися ребрами..... 29
- КОРЖОВ А.В., СУРИН В.А., ЧЕСКИДОВА М.А., ЛОНЗИНГЕР П.В., САФОНОВ В.И., БЕЛОВ К.Н. Разработка алгоритма обнаружения дефектов в стеклянных изоляторах на основе компьютерного зрения с использованием нейросетевого подхода..... 35
- ЛАРКИН Е.В., БОГОМОЛОВ А.В., ПРИВАЛОВ А.Н., АКИМЕНКО Т.А. Математическое обеспечение иерархического цифрового управления сложным технологическим объектом.... 43
- ОДИНАЕВ В.А., ШИГАПОВ И.И., ДОЛГОВ В.А., САСЬКОВ К.Г. Математическая модель дизель-генератора переменного тока со статической нагрузкой 56
- ПАРАМОНОВ А.А., КАЛАЧ А.В. Моделирование чрезвычайных ситуаций с применением почти-периодического анализа изображений структуры тайфунов 67
- СПЕСИВЦЕВ А.В., СОКОЛОВ Б.В. Математические модели выполнения унифицированных арифметических операций с нечеткими числами при формализации экспертных знаний 75
- ШЕПЕЛЕВ В.Д., ГЛУШКОВ А.И., ЛЕВАШЕВ А.Г. Математическое обеспечение мониторинга выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта в зоне регулируемого пересечения на основе нейросетевых алгоритмов..... 85

Механика

- КРАСИЛЬНИКОВ А.В., НЕСМИЯНОВ Е.И., ШЕСТАКОВСКАЯ Е.С., ПОПЦОВ А.Г., КОВАЛЕВ А.Е., ЯЛОВЕЦ А.П. Исследование поправочного коэффициента кристалла фторида лития в процессе его ударного сжатия и изоэнтропической разгрузки..... 96

Персоналии

- ВЫДАЮЩИЙСЯ СИБИРЯК-КИБЕРФИЗИК (к полувековому юбилею Романа Валерьевича Мещерякова)..... 107

CONTENTS

Mathematics

- ANCHEKOV M.I., BZHIKHATLOV K.Ch., MAKOEVA D.G., NAGOEV Z.V., NAGOEVA O.V., PSHENOKOVA I.A. Socio-Ontological Multi-Agent Neurocognitive Method of Robotic Control of Process Regulations in the Working Area of a Retail Enterprise..... 5
- VOLKOV D.M., SAVELIEV A.N. Method of Noise Filtering in Gyroscopic Sensor Signal based on Adaptive Alpha-Beta Kalman Filter 16
- GONCHAROV N.S., SVIRIDYUK G.A. Stochastic Wentzel System of Free Fluid Filtration Equations on a Hemisphere and On Its Edge..... 24
- KADCHENKO S.I., RYAZANOVA L.S. Algorithms for Calculating the Eigenvalues of Initial-Boundary Value Problems for a Wave Differential Equation set in a Graph with Varying Edges 29
- KORZHOV A.V., SURIN V.A., CHESKIDOVA M.A., LONZINGER P.V., SAFONOV V.I., BELOV K.N. Development of an Algorithm for Detecting Defects in Glass Insulators based on Computer Vision using a Neural Network Approach..... 35
- LARKIN E.V., BOGOMOLOV A.V., PRIVALOV A.N., AKIMENKO T.A. Mathematical Support for Hierarchical Digital Control of a Complex Technological Object 43
- ODINAEV V.A., SHIGAPOV I.I., DOLGOV V.A., SASKOV K.G. Mathematical Model of an AC Diesel Generator with Static Load 56
- PARAMONOV A.A., KALACH A.V. Simulation of Emergencies using Almost Periodic Analysis of Images of Typhoon Structure 67
- SPESIVTSEV A.V., SOKOLOV B.V. Mathematical Models for Performing Unified Arithmetic Operations with Fuzzy Numbers in the Formalization of Expert Knowledge..... 75
- SHEPELEV V.D., GLUSHKOV A.I., LEVASHEV A.G. Mathematical Support for Monitoring Pollutant Emissions from Vehicles in the Regulated Intersection Area based on Neural Network Algorithms 85

Mechanics

- KRASILNIKOV A.V., NESMIYANOV E.I., SHESTAKOVSKAYA E.S., POPTSOV A.G., KOVALEV A.E., YALOVETS A.P. Studying the Correction Factor of a Lithium Fluoride Crystal During its Shock Compression and Isoentropic Unloading..... 96

Personalia

- OUTSTANDING SIBERIAN CYBERPHYSICIST (Dedicated to the 50th Anniversary of Roman Valerievich MESHCHERYAKOV) 107

СОЦИООНТОЛОГИЧЕСКИЙ МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ НЕЙРОКОГНИТИВНЫЙ МЕТОД РОБОТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ РЕГЛАМЕНТА ПРОЦЕССОВ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ТОРГОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

М.И. Анчехов¹, К.Ч. Бжихатлов¹, Д.Г. Макоева², З.В. Нагоев¹, О.В. Нагоева², И.А. Пшенокова¹

¹ Кабардино-Балкарский научный центр РАН, г. Нальчик, Российская Федерация

² Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН, г. Нальчик, Российская Федерация
E-mail: zaliman@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена научная проблема организации роботизированного контроля нарушений регламентов процессов в рабочей области торгового предприятия. Исследуется возможность применения интеллектуального агента на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры при проектировании системы управления поведением автономного робота-ритейлера. Описан оригинальный социоонтологический метод синтеза стратегий управления поведением автономных роботов в составе человеко-машинного коллектива при решении задач автоматизации рабочих процессов торгового предприятия. Приведены результаты вычислительных экспериментов и сравнения эмпирических и социоонтологических мультиагентных нейрокогнитивных методов идентификации и онтологизации нарушений регламента процессов рабочей среды торгового зала гипермаркета с использованием автономного мобильного робота-ритейлера.

Ключевые слова: искусственный интеллект; робототехника; мобильный автономный робот; мультиагентные системы; нейрокогнитивные архитектуры.

Постановка задачи

Номенклатура видов товаров, представленных в торговом зале и на складе современного гипермаркета, может составлять десятки тысяч позиций. Соответственно, совокупное количество наличных единиц каждого из этих видов может достигать сотен тысяч. С учетом высокой динамики ассортимента товаров, глобального характера торговых сетей, активно вводящих в оборот локальные продукты, общее количество видов товаров в базах данных сети гипермаркетов может достигать миллионов позиций, а количество наличных единиц товаров, соответственно, – десятков миллионов единиц.

Как правило, для каждого гипермаркета действует свой внутренний регламент, который определяет порядок и особенности организации процессов движения товара от момента поступления на склад до выноса покупателем, который его приобрел. Нарушения регламента рабочих процессов ведут к значительным материальным и имиджевым потерям, однако, учитывая массовость, эпизодичность, неопределенность, частичную наблюдаемость процессов, организация строгого выполнения этого регламента представляется задачей, трудно выполнимой без применения специальных средств автоматизации, что и определяет актуальность темы настоящего исследования.

В данной работе для решения задачи обеспечения регламента процессов в гипермаркете применена система автоматизации на основе мобильного автономного робота (*робот-ритейлер*) под управлением системы искусственного интеллекта, построенной на основе т. н. *мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры* [1]. В контексте этой задачи робот-ритейлер должен заменить в работе несколько сотрудников торгового зала, выполняя функции расстановки товара, мониторинга его оборота и анализа состояния торгового зала.

С этой целью необходимо было решить ряд нетривиальных задач искусственного интеллекта и принятия решений, таких как задача онтологизации роботом рабочей среды, управления его ориентацией и навигацией, организации естественно-языкового (диалогового) управления поведением робота, задача идентификации проблем (нарушений регламента) и построения их решений (онтологизация проблем). Синтез интеллектуальной системы управления автономного робота, способной к эффективному решению всех этих подзадач, осложняется условиями реальной среды, помимо вышеперечисленных трудностей принятия решений включающих в себя еще и стохастичность, неопределенность, неструктурированность, динамичность, активность и другие. Поэтому в качестве системы управления робота-ритейлера была выбрана мультиагентная нейрокognитивная архитектура, представляющая собой один из формальных аппаратов разработки систем *универсального искусственного интеллекта*.

Система управления поведением сложного мобильного робота в условиях реальной среды, в принципе, всегда представляет собой разновидность когнитивной архитектуры, так как необходимо обеспечивать согласованную работу многих подсистем робота: сенсорной, эффекторной, ориентации и навигации, функционального назначения, энергообеспечения и др. [2–4].

В обзорных работах [5–7] дан анализ современного состояния концептуальных и формальных подходов к разработке и реализации систем универсального искусственного интеллекта и управляющих когнитивных архитектур.

Подробное описание мультиагентных нейрокognитивных архитектур и их применение в качестве формальной основы интеллектуальных систем управления поведением автономных мобильных роботов приводится в [1, 8, 9].

Пусть в момент дискретного времени τ_c в здании гипермаркета (на всех складах и во всех торговых залах) находится n_c товаров g_j^i вида t_i , общее количество которых в базе знаний сети гипермаркетов равно значению t^{max} , из которых в данном гипермаркете в момент времени τ_c представлено t_c^{max} позиций. Каждый из видов товаров t_i характеризуется потребительскими свойствами, выраженными параметрами p_k^i (*потребительские параметры товара*), а каждая единица g_j^i этого товара еще и описывается параметрами s_{hc}^{ij} (*ситуативные параметры единицы товара*), определяющими текущий статус, положение и историю эволюций (оформление, перемещение, динамика цен, сроков годности и т. п.) данной единицы товара в течение всего времени ее пребывания в гипермаркете – от момента разгрузки на складе до момента, когда она покидает здание вместе с покупателем, либо в связи с другими причинами.

Единица товара и ее эволюции в гипермаркете полностью описываются вектором параметров:

$$g_j^i \left(p_1^i, p_2^i, \dots, p_{k_{i\max}}^i, S_{jc^b}^i, S_{jc^b+1}^i, S_{jc^b+2}^i, \dots, S_{jc^e}^i \right), \quad S_{jc}^i = \left(s_{1c}^{ij}, s_{2c}^{ij}, \dots, s_{n_{ij\max c}}^{ij} \right),$$

где S_{jc}^i – кортеж значений параметров s_{hc}^{ij} в момент времени τ_c , τ_{c^b} – время прибытия (разгрузки) единицы товара на склад, τ_{c^e} – время выбытия единицы товара из торгового зала,

$\Delta\tau_{c^b}^{c^e} = \tau_{c^e} - \tau_{c^b}$ – общее время пребывания единицы товара в гипермаркете.

Эволюции единицы товара g_j^i во время ее пребывания в гипермаркете $\Delta\tau_{c^b}^{c^e}$ могут осуществляться в связи с течением времени τ_c , изменением условий ее хранения (пребывания) на складе и в торговом зале, описывающихся частью параметров s_{hc}^{ij} , либо – в связи с действиями

$\delta_{a_x q c}^{ij c^e q}$, выполняемыми с этой единицей товара сотрудниками гипермаркета a_x , либо – с действиями $\delta_{b_y q c}^{ij c^e q}$, выполняемыми покупателями b_y , либо – с действиями b_{r_z} , выполняемыми роботами-ритейлерами r_z .

Предполагается, что в гипермаркете развернута система автоматизации торговли, включающая в себя мультиагентную группировку роботов-ритейлеров: $R_z(r_1, r_2, \dots, r_{z_{\max}})$, множество стационарных средств наблюдения: $V_z(v_1, v_2, \dots, v_{z_{\max}})$, средства обеспечения каналов сетевого взаимодействия всех устройств в составе системы между собой, терминалов и приложений доступа пользователей, программных модулей децентрализованной системы управления товарооборотом гипермаркета, распределенной базы знаний, вычислительных машин, серверов, центров обработки и хранения данных, стационарных пунктов подготовки и обмена аккумуляторов роботов-ритейлеров.

На рис. 1 приведено изображение автономного мобильного торгового робота (робот-ритейлер), являющегося частью такого комплекса. Данный робот представляет собой опытный образец, разработанный в федеральном научном центре «Кабардино-Балкарский научный центра РАН».

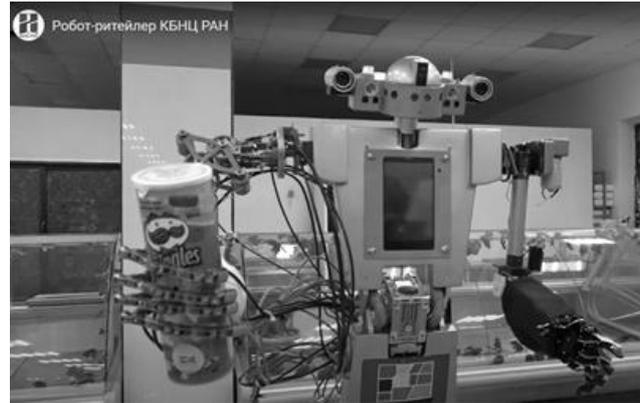


Рис. 1. Автономный мобильный торговый робот

Робот-ритейлер снабжен сенсорной подсистемой, состоящей из анализаторов потоков данных с двух видеокамер, нескольких микрофонов, десятков ультразвуковых и инфракрасных дальномеров, небольшого лидара, нескольких десятков тензорных датчиков и датчиков изгиба, установленных на двух многозвенных антропоморфных манипуляторах с несколькими десятками степеней свободы каждый. Эффекторную подсистему робота дополняют колесные движители, громкоговорители и дисплей.

Система управления роботом представляет собой интеллектуального программного агента \aleph_o^{λ} , формализованного на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры [10]. В этом обозначении верхний индекс λ указывает на уровень вложенности интеллектуального программного агента (ранг), что необходимо, так как управляющая мультиагентная нейрокогнитивная архитектура рекурсивная и сама состоит из агентов нижнего ранга – т. н. агентов-нейронов (агнейронов).

Примем что для каждого товара g_j^i работниками гипермаркета в неявном виде определена оптимальная траектория пребывания в гипермаркете:

$$g_{jf}^{i*} \left(P_{1fc^b}^{ic^{e*}}, P_{2fc^b}^{ic^{e*}}, \dots, P_{k^{\max} fc^b}^{ic^{e*}}, S_{jfc^b}^{i*}, S_{jfc^b+1}^{i*}, \dots, S_{jfc^e}^{i*} \right), P_{kfc^b}^{ijc^{e*}} = \left(p_{kfc^b}^{ij*}, p_{kfc^b+1}^{ij*}, p_{kfc^b+2}^{ij*}, \dots, p_{kfc^e}^{ij*} \right)$$

где $p_{kfc^b+x}^{ij*}$ – оптимальное значение свойства $p_{kfc^b+x}^{ij*}$ товара g_j^i на шаге дискретного времени $c^b + x$.

Будем считать, что в силу различных обстоятельств (действия персонала, покупателей, физико-климатические условия, режимы энергопотребления, интенсивность оборота товаров и т. п.) у товара g_j^i складывается некоторая фактическая траектория пребывания в гипермаркете:

$$g_{jf}^i \left(P_{1fc^b}^{ic^e}, P_{2fc^b}^{ic^e}, \dots, P_{k^{\max} fc^b}^{ic^e}, S_{jfc^b}^i, S_{jfc^b+1}^i, S_{jfc^b+2}^i, \dots, S_{jfc^e}^i \right),$$

$$P_{kfc^b}^{ijc^e} = \left(p_{kfc^b}^{ij}, p_{kfc^b+1}^{ij}, p_{kfc^b+2}^{ij}, \dots, p_{kfc^e}^{ij} \right),$$

в общем случае, отличная от оптимальной траектории g_{jf}^{i*} , такая, что отличия можно охарактеризовать с помощью глобальной функции рассогласования:

$$E(g_{jf}^{i*}, g_{jf}^i) = \gamma_1 \sum_{k=1}^{k^{i \max}} \sum_{c=c^b}^{c^e} \varepsilon(p_{kfc}^{ij*}, p_{kfc}^{ij}) + \gamma_1 \sum_{h=1}^{h^{i \max}} \sum_{c=c^b}^{c^e} \varepsilon(s_{hfc}^{ij*}, s_{hfc}^{ij}),$$

$$\varepsilon(p_{kfc}^{ij*}, p_{kfc}^{ij}) = \begin{cases} 0, & p_{kfc}^{ij} \in [p_{kfc}^{ij*} - \Delta p_{kfc1}^{ij*}; p_{kfc}^{ij*} + \Delta p_{kfc2}^{ij*}], \\ 1, & p_{kfc}^{ij} \notin [p_{kfc}^{ij*} - \Delta p_{kfc1}^{ij*}; p_{kfc}^{ij*} + \Delta p_{kfc2}^{ij*}], \end{cases} \quad \varepsilon(s_{hfc}^{ij*}, s_{hfc}^{ij}) = \begin{cases} 0, & s_{hfc}^{ij} \in [s_{hfc}^{ij*} - \Delta s_{hfc1}^{ij*}; s_{hfc}^{ij*} + \Delta s_{hfc2}^{ij*}], \\ 1, & s_{hfc}^{ij} \notin [s_{hfc}^{ij*} - \Delta s_{hfc1}^{ij*}; s_{hfc}^{ij*} + \Delta s_{hfc2}^{ij*}], \end{cases}$$

$$\gamma_1 \in [0; 1], \gamma_2 \in [0; 1],$$

где $\varepsilon(p_{kfc}^{ij*}, p_{kfc}^{ij})$, $\varepsilon(s_{hfc}^{ij*}, s_{hfc}^{ij})$ – локальные функции рассогласования, $\Delta p_{kfcx}^{ij*}, \Delta s_{hfcx}^{ij*}$ – смещения границ диапазонов рассогласования значений соответствующих параметров, γ_1, γ_2 – взвешивающие коэффициенты.

Задача обеспечения выполнения регламента процессов в торговом зале гипермаркета с помощью автономного мобильного робота-ритейлера сводится к синтезу такого поведения этого робота, которое обеспечивало бы минимизацию *общей глобальной функции рассогласования*:

$$E \xrightarrow{\forall \delta_{ic}^{oc^e} \in \Omega_{c^b}^{oc^e}} \min, E = \sum_{i=1}^{i^{\max}} \sum_{j=1}^{j^{\max}} \lambda_{ij} E(g_{jf}^{i*}, g_{jf}^i), \lambda_{ij} \in [0; 1],$$

где $\delta_{ic}^{oc^e}$ – множество планов действий (вариантов поведения) интеллектуального агента \mathbb{N}_o^{δ} , управляющего роботом R_o^{δ} , $\Omega_{c^b}^{oc^e}$ – множество всех планов действий этого агента, λ_{ij} – взвешивающие коэффициенты.

Мультиагентная нейрокогнитивная архитектура онтологизации и идентификации нарушений регламента процессов

Структурно-функциональная схема минимального агента мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры, управляющего синтезом поведения робота-ритейлера, приведена на рис. 2.

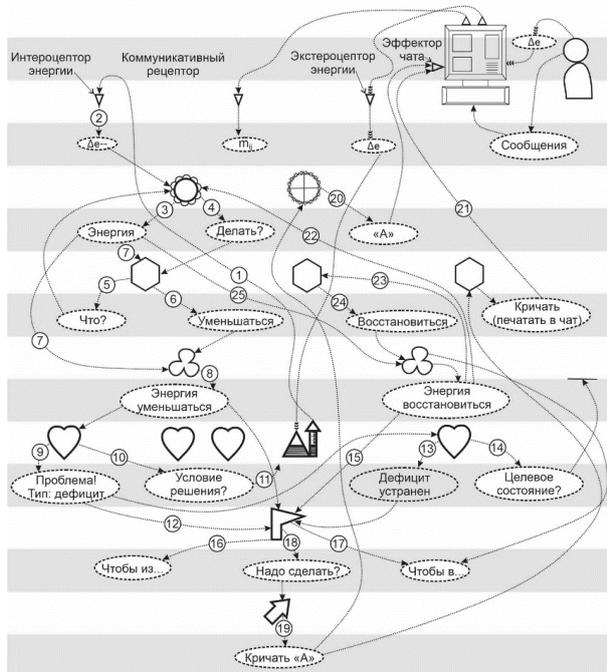


Рис. 2. Структурно-функциональная схема начальной нейрокогнитивной архитектуры интеллектуального агента

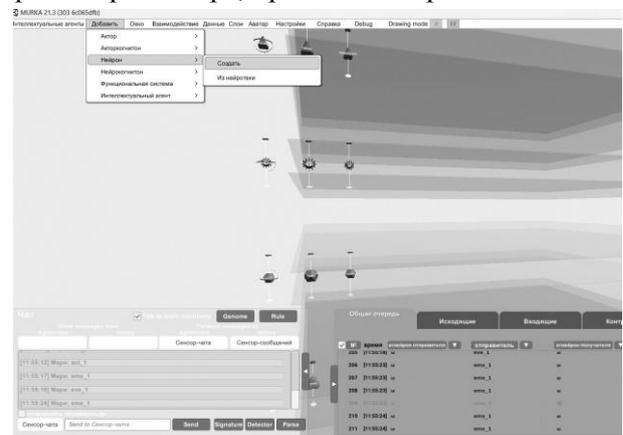


Рис. 3. Трехмерная визуализация мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры агента

Трехмерная визуализация мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры агента, построенная с помощью программы виртуального прототипирования интеллектуальных нейрокогнитивных агентов, разработанной в Кабардино-Балкарском научном центре РАН, представлена на рис. 3.

Мультиагентная нейрокогнитивная архитектура представляет собой универсальный формализм для разработки интеллектуальных агентов, способных к автономному обнаружению (*идентификации*) проблем универсального спектра и синтезу их решений (*онтологизации*) на основе использования т. н. *n-отображений*, представ-

ляющих собой т. н. мультиагентные функции, задающие отображения между множествами состояний агентов-нейронов, расположенных в функциональных узлах когнитивной архитектуры [1]. Такие узлы, отвечающие за распознавание входных сигналов, формирование состояний на их основе, построение оценки этих состояний, синтез и выбор оптимальных целей и планов действий, показаны на рис. 3 в виде отдельных уровней трехмерной визуализации имитационной модели.

Последовательное прохождение сигналов через каскад n -отображений, имитирующих ситуативно-детерминированный рост и деградацию аксо-дендрональных связей (т. н. алгоритм онтонейроморфогенеза) между имитационными моделями нейронов, находящихся в этих когнитивных узлах, формирует пространство альтернативных планов действий и внутреннее представление критериев выбора оптимального плана в соответствии с решаемой оптимизационной задачей. Концепция и алгоритм онтонейроморфогенеза описаны в [1, 11], мультиагентные функции определены в [12].

На рис. 2 агенты-нейроны разных типов, находящиеся в функциональных узлах различных уровней последовательного конвейера когнитивной архитектуры, представлены различными двумерными пиктограммами, а на рис. 3 соответствующие им имитационные модели агентов-нейронов показаны трехмерными моделями различной формы.

Содержательный смысл мультиагентного метода идентификации состоит в обмене сообщениями между агентами-нейронами с целью обнаружения по входным данным с устройств сенсорной подсистемы робота состояний нарушения регламента. Для этого интеллектуальная система управления организует выполнение роботом-ритейлером процесса перманентной онтологизации процессов в рабочей среде торгового зала гипермаркета.

Задача автономного построения онтологий процессов в рабочей среде гипермаркета состоит в том, чтобы породить и накопить в распределенной базе знаний Γ_q знания обо всех потребительских свойствах и эволюциях всех единиц всех видов товаров, которые пребывают в гипермаркете:

$$\forall i, \forall j, \forall k, \forall h, \forall c, \forall x, \forall y, \forall z: \exists \Gamma_o^{qijkhxyz} \in \Gamma_q = \bigcup_{z=1}^{z_{\max}} \gamma_z^q + \bigcup_{d=1}^{d_{\max}} \gamma_d^q,$$

где γ_z^q – бортовая база знаний робота-ритейлера r_2 , а γ_d^q – одна из стационарных баз знаний в составе системы автоматизации торговли гипермаркета.

Интеллектуальный агент, используя систему ориентации и навигации мобильного робота-ритейлера, организует регулярный обход торгового зала и фиксацию всех текущих изменений. Методы идентификации и онтологизации процессов рабочей области и фактов нарушения регламента организации этих процессов основаны на использовании единого мультиагентного нейрокогнитивного метода синтеза исследовательского поведения интеллектуального агента в реальной среде.

Для того чтобы дать общее представление о мультиагентном нейрокогнитивном методе, далее приведем его фрагмент, предварительно разъяснив, что в применяемом в нем формальном описании n -отображения аргументы в скобках обозначают сообщения, отправляемые нейронами из предыдущего функционального узла когнитивной архитектуры, а результат отображения, приведенный слева от знака равенства, – сообщения, отправляемые нейронами текущего когнитивного узла, нижние индексы указывают на множество нейронов – отправителей входных сообщений, а верхние индексы – на множество нейронов – отправителей выходных сообщений:

$$\begin{aligned} Y_{R^A}^{ijk1} &= H_{K_{1R^O}^{ijk}}^{K_{1R^A}^{ijk}} \left(Y_{R^O}^{ijk1} \right), Y_{R^O}^{ijk1} = H_{K_{1R^A}^{ijk}}^{K_{1R^O}^{ijk}} \left(Y_{R^A}^{ijk1} \right), Y_{R^V}^{ijk1} = H_{K_{1R^O}^{ijk}}^{K_{1R^V}^{ijk}}, K_{1R^A}^{ijk} \left(Y_{R^O}^{ijk1}, Y_{R^A}^{ijk1} \right), \\ Y_E^{ijk2} &= H_{K_{1R^V}^{ijk}}^{K_{2E}^{ijk}} \left(Y_{R^V}^{ijk1} \right), Y_{R^V}^{ijk1} = H_{K_{2E}^{ijk}}^{K_{1R^V}^{ijk}} \left(Y_E^{ijk2} \right), Y_C^{ijk8} = H_{K_{2E}^{ijk}}^{K_{8C}^{ijk}} \left(Y_E^{ijk2} \right), Y_E^{ijk2} = H_{K_{8C}^{ijk}}^{K_{2E}^{ijk}} \left(Y_C^{ijk8} \right), \\ Y_N^{ijk9} &= H_{K_{2E}^{ijk}}^{K_{9N}^{ijk}} \left(Y_E^{ijk2} \right), Y_E^{ijk2} = H_{K_{9N}^{ijk}}^{K_{2E}^{ijk}} \left(Y_N^{ijk9} \right), Y_C^{ijk8} = H_{K_{9N}^{ijk}}^{K_{8C}^{ijk}} \left(Y_N^{ijk9} \right), Y_N^{ijk9} = H_{K_{8C}^{ijk}}^{K_{9N}^{ijk}} \left(Y_C^{ijk8} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_B^{ijk7} &= H_{K_{8C}^{ijk}}^{K_{7B}^{ijk}}(Y_C^{ijk8}), Y_C^{ijk8} = H_{K_{7B}^{ijk}}^{K_{8C}^{ijk}}(Y_B^{ijk7}), Y_G^{ijk6} = H_{K_{7B}^{ijk}}^{K_{6G}^{ijk}}(Y_B^{ijk7}), Y_B^{ijk7} = H_{K_{6G}^{ijk}}^{K_{7B}^{ijk}}(Y_G^{ijk6}), \\
 Y_G^{ijk6} &= H_{K_{2E}^{ijk}}^{K_{6G}^{ijk}}(Y_E^{ijk2}), Y_E^{ijk2} = H_{K_{6G}^{ijk}}^{K_{2E}^{ijk}}(Y_G^{ijk6}), Y_E^{ijk2} = H_{K_{2E}^{ijk}}^{K_{6G}^{ijk}}(Y_E^{ijk2}), \\
 Y_{R^V}^{ijk1} &= H_{K_{2E}^{ijk}}^{K_{1R^V}^{ijk}}(Y_E^{ijk2}), Y_S^{ijk3} = H_{K_{1R^V}^{ijk}}^{K_{3S}^{ijk}}(Y_{R^V}^{ijk1}), Y_{R^V}^{ijk1} = H_{K_{3S}^{ijk}}^{K_{1R^V}^{ijk}}(Y_S^{ijk3}), \\
 Y_E^{ijk1} &= H_{K_{3S}^{ijk}, K_{1R^V}^{ijk}}^{K_{1E}^{ijk}}(Y_S^{ijk3} \cup Y_{R^V}^{ijk1}), Y_G^{ijk6} = H_{K_{2E}^{ijk}, K_{1R^V}^{ijk}}^{K_{6G}^{ijk}}(Y_E^{ijk2}, Y_{R^V}^{ijk1}), \\
 Y_M^{ijk4} \cup Y_{R^V}^{ijk1} &= H_{K_{6G}^{ijk}}^{K_{4M}^{ijk} \cup K_{1R^V}^{ijk}}(Y_G^{ijk6}), Y_G^{ijk6} = H_{K_{3S}^{ijk} \cup K_{1R^V}^{ijk}}^{K_{6G}^{ijk}}(Y_S^{ijk3} \cup Y_{R^V}^{ijk1}), \\
 Y_S^{ijk3} &= H_{K_{6G}^{ijk}}^{K_{3S}^{ijk3}}(Y_G^{ijk6}), Y_G^{ijk6} = H_{K_{3S}^{ijk6}}^{K_{6G}^{ijk}}(Y_S^{ijk3}), Y_G^{ijk6} = H_{K_{3S}^{ijk}, K_{4M}^{ijk}, K_{1R^V}^{ijk}}^{K_{6G}^{ijk}}(Y_S^{ijk3}, Y_M^{ijk4}, Y_{R^V}^{ijk1}), \\
 Y_P^{ijk5} &= H_{K_{6G}^{ijk}}^{K_{5P}^{ijk}}(Y_G^{ijk6}), Y_G^{ijk6} = H_{K_{5P}^{ijk6}}^{K_{6G}^{ijk}}(Y_P^{ijk5}), Y_G^{ijk6} = H_{K_{5P}^{ijk}, K_{4M}^{ijk}, K_{1R^V}^{ijk}}^{K_{6G}^{ijk}}(Y_P^{ijk5}, Y_M^{ijk4}, Y_{R^V}^{ijk1}), \\
 Y_B^{ijk7} &= H_{K_{6G}^{ijk}, K_{4M}^{ijk}, K_{1R^V}^{ijk}}^{K_{7B}^{ijk}}(Y_G^{ijk6}, Y_M^{ijk4}, Y_{R^V}^{ijk1}), Y_C^{ijk8} = H_{K_{7B}^{ijk}}^{K_{8C}^{ijk}}(Y_B^{ijk7}), Y_N^{ijk9} = H_{K_{8C}^{ijk}}^{K_{9N}^{ijk}}(Y_C^{ijk8}).
 \end{aligned}$$

На основании этого общего мультиагентного нейрокогнитивного метода для решения поставленной задачи были разработаны два специальных метода идентификации проблем и онтологизации решений – *эмпирический* и *социоонтологический*.

В качестве проблем рассматривались любые обнаруженные роботом-ритейлером в процессе построения онтологий процессов в рабочей среде гипермаркета отклонения от эталонного состояния базы знаний Γ_q , порождающие ненулевые значения глобальных функций рассогласования E .

Эмпирический метод основан на самостоятельном мониторинге процессов роботом-ритейлером без участия персонала торгового зала. В этом варианте робот-ритейлер должен был самостоятельно идентифицировать все проблемы и находить их решения. Вычислительные эксперименты проводились для решения задачи обнаружения и устранения пробелов в выкладке товара, образующихся в результате того, что покупатели забирают товары с прилавков и стеллажей. Проблема считалась идентифицированной, если роботу удавалось обнаружить такой пробел для конкретного товара в соотношении с конкретным местом расположения этого товара на стеллаже, зафиксированном в планеграмме торгового зала, хранящейся в базе знаний интеллектуального агента.

Если пара «товар – место» идентифицировалась в списке пробелов впервые, то такое событие учитывалось как дебют проблемы, и робот приступал к ее онтологизации – синтезу метода ее решения. Решение состояло в построении маршрутов движения к месту хранения товара на складе и обратно к данному месту на данном стеллаже.

Второй подход к онтологизации и идентификации проблем состоял в применении диалогового управления при использовании информации, необходимой для решения обнаруженных проблем, получаемой от персонала торгового зала гипермаркета с использованием диалоговой подсистемы для коммуникации на основе подмножества естественного языка, ограниченного феноменологией предметной области процессов рабочей среды торгового зала и склада гипермаркета.

Методы и алгоритмы обучения интеллектуальных агентов освоению и применению элементов естественного языка на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур подробно изложены в [13].

Так как полученные мультиагентные методы идентификации и онтологизации проблем, связанных с нарушением регламента процессов в рабочей области гипермаркета, построены с использованием знаний, полученных от социального окружения – персонала торгового зала, мы использовали для их обозначения термин «социоонтологические».

Результаты вычислительных экспериментов

На рис. 4 приведены результаты выполнения мультиагентного нейрокогнитивного эмпирического метода идентификации проблем. Фактическое нарушение планогаммы (поток проблем) фиксировалось параллельно сотрудниками торгового зала гипермаркета. На графике отражены значения потока проблем и фактического количества проблем, идентифицируемых двумя методами, в течение дневной смены работы гипермаркета. Время в часах отложено по оси абсцисс.

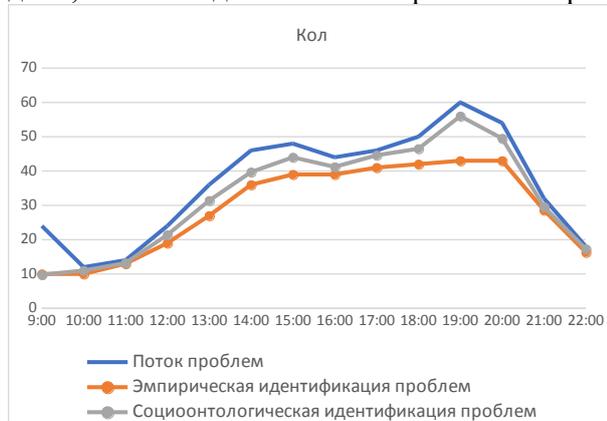


Рис. 4. График интенсивности идентификации роботом-ритейлером проблем с помощью эмпирического и социоонтологического методов

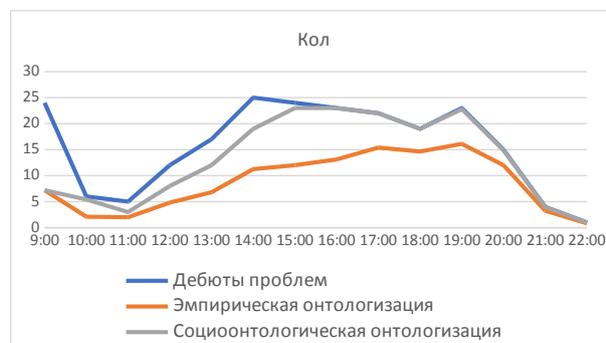


Рис. 5. График интенсивности онтологизации роботом-ритейлером проблем с помощью эмпирического и социоонтологического методов

На рис. 5 приведены результаты выполнения мультиагентного нейрокогнитивного метода онтологизации проблем.

Как следует из приведенных рисунков, социоонтологический метод превосходит эмпирический по эффективности. Такой результат объясняется тем, что скорость онтологизации проблем при его применении возрастает, так как в случае применения социоонтологического метода часть решений интеллектуальный агент получает в готовом виде без необходимости самостоятельно синтезировать их, что обязательно требуется в случае использования эмпирического метода.

Заключение

Таким образом, в результате выполнения данного исследования разработаны основные принципы, методы автономной идентификации и онтологизации нарушений регламента процессов в рабочей области торгового зала гипермаркета на основе синтеза поведения мобильного робота-ритейлера с управляющим интеллектуальным агентом на базе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры.

Разработаны и реализованы эмпирические и социоонтологические нейрокогнитивные методы. Вычислительные эксперименты, проведенные в торговом зале реального гипермаркета, показали преимущество социоонтологического метода в эффективности, проявляющееся в его способности (в отличие от эмпирического метода) улучшать линейный характер зависимости интенсивности результатов идентификации и онтологизации от интенсивности регистрируемого потока проблем.

В заключение необходимо отметить, что перспективы развития бытовых и сельскохозяйственных приложений многоагентной автономной робототехники в нашей стране связаны прежде всего с научно-технической кооперацией, конструктивным обменом идей явно недостаточного пока количества коллективов, ведущих исследования и разработки в этой области [14–19]. Авторы выражают искреннюю признательность профессору Р.В. Мещерякову за многолетние плодотворные усилия по организации такой кооперации практически между всеми ведущими профильными российскими коллективами, значительный личный вклад в развитие и творческий обмен идеями в области «мягких» методов интеллектуального группового управления мобильными роботами, часть из которых составили концептуальную основу настоящей работы, и сердечно поздравляют его с замечательным юбилеем!

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-19-00787).

Литература

1. Нагоев З.В. Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах / З.В. Нагоев. – Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. – 232 с.
2. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход (AIMA-2) / С. Рассел. – Вильямс, 2019. – 1408 с.
3. Мещеряков, Р.В. Постановка задачи гетерогенного группового взаимодействия роботов при решении задач умного сада / Р.В. Мещеряков, А.С. Широков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2024. – Том 16, № 2. – С. 41–49.
4. Ронжин, А.Л. Математические модели и средства многомодального взаимодействия с робототехническими и киберфизическими системами / А.Л. Ронжин, М.М. Бизин, С.В. Соленький // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2016 – № 8(90). – С. 107–111.
5. Duch, W. Cognitive Architectures: Where do we go from here? / W. Duch, R.J. Oentaryo, M. Pasquier // Proc. 2008 conference on Artificial General Intelligence 2008: Proceedings of the First AGI Conference. – 2008. – P. 122–136.
6. Goertzel, B. Artificial General Intelligence: Concept, State of the Art, and Future Prospects / B. Goertzel // Journal of Artificial General Intelligence. – 2014. – Vol. 5, Iss. 1. – P. 1–46.
7. A World Survey of Artificial Brain Projects, Part II: Biologically Inspired Cognitive Architectures / B. Goertzel, R. Lian, I. Arel *et al.* // Neurocomputing. – 2010. – Vol. 74, Iss. 1–3. – P. 30–49.
8. Автономный синтез пространственных онтологий в системе принятия решений мобильного робота на основе самоорганизации мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры / З.В. Нагоев, К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова и др. // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2020 – № 6 (98). – С. 68–79.
9. The Symbol Grounding Problem in the System of General Artificial Intelligence Based on Multi-Agent Neurocognitive Architecture / Z. Nagoev, O. Nagoeva, M. Anchokov *et al.* // Cognitive Systems Research. – 2023. – no. 79. – P. 71–84.
10. Learning Algorithm for an Intelligent Decision Making System Based on Multi-Agent Neurocognitive Architectures / Z. Nagoev, I. Pshenokova, O. Nagoeva, Z. Sundukov // Cognitive Systems Research. – 2021. – Т. 66. – С. 82–88.
11. Нагоев, З.В. Онтонейроморфогенетическое моделирование / Нагоев З.В. // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2013. – № 4(54). – С. 46–56.
12. Нагоев, З.В. Мультиагентные экзистенциальные отображения и функции / З.В. Нагоев // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2013. – № 4(54). – С. 63–71.
13. Нагоев, З.В. Обоснование символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка / З.В. Нагоев, О.В. Нагоева // Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2022. – 150 с.
14. Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в коллаборативной робототехнической системе / Р.Р. Галин, А.А. Широкий, Е.А. Магид и др. // Информатика и автоматизация. – 2021. – № 6 (20). – С. 1224–1253.
15. Мещеряков, Р.В. Интеллектуальные робототехнические системы // Датчики и системы. – 2024. – № 2 (274). – С. 12–17.
16. Мещеряков, Р.В. Постановка задачи гетерогенного группового взаимодействия роботов при решении задач умного сада / Р.В. Мещеряков, А.С. Широков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2024. – Т. 16. № 2. – С. 41–49.
17. Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе / А.А. Захарова, В.П. Кутахов, Р.В. Мещеряков и др. // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – № 3. – С. 3–15.
18. Galin, R. Simple Task Allocation Algorithm in a Collaborative Robotic System. *Frontiers in Robotics and Electromechanics* / R. Galin, R. Meshcheryakov, M. Mamchenko // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2023. – no. 329. – P. 433–447.
19. Evaluation of EEG Data for Zonal Affiliation of Brain Waves by Leads in a Robot Control Task / D. Wolf, Y. Turovsky, A. Iskhakova, R. Meshcheryakov // In: Ronzhin, A., Sadigov, A., Meshcheryakov, R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2023. Lecture Notes in Computer Science*. – 2023. – Vol. 14214. – pp. 103–115.

Поступила в редакцию 2 сентября 2024 г.

Сведения об авторах

Анчехов Мурат Инусович – научный сотрудник лаборатории «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН, г. Нальчик, Российская Федерация, e-mail: murat.antchok@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8977-797X>

Бжихатлов Кантемир Чамалович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН, г. Нальчик, Российская Федерация, e-mail: haosit13@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0924-0193>

Макоева Дана Гисовна – кандидат филологических наук, заведующий лабораторией «Компьютерная лингвистика», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН, г. Нальчик, Российская Федерация, e-mail: makoevadana@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5955-2262>

Нагоев Залимхан Вячеславович – кандидат технических наук, генеральный директор Кабардино-Балкарского научного центра РАН, г. Нальчик, Российская Федерация, e-mail: zaliman@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9549-1823>

Нагоева Ольга Владимировна – научный сотрудник отдела «Мультиагентные системы», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН, г. Нальчик, Российская Федерация, e-mail: nagoeva_o@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2341-7960>

Пшенокова Инна Ауесовна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН, г. Нальчик, Российская Федерация, e-mail: pshenokova_inna@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>

**SOCIO-ONTOLOGICAL MULTI-AGENT NEUROCOGNITIVE METHOD
OF ROBOTIC CONTROL OF PROCESS REGULATIONS
IN THE WORKING AREA OF A RETAIL ENTERPRISE**

***M.I. Anchekov¹, K.Ch. Bzhikhatlov¹, D.G. Makoeva², Z.V. Nagoev¹, O.V. Nagoeva²,
I.A. Pshenokova¹***

¹*Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS, Nalchik, Russian Federation*

²*Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS, Nalchik, Russian Federation*

E-mail: zaliman@mail.ru

Abstract. The paper considers the scientific problem of organizing robotic control of violations of process regulations in the working area of a retail enterprise. It investigates the possibility of using an intelligent agent based on a multi-agent neurocognitive architecture in designing a behavior control system for an autonomous retail robot. It also describes an original socio-ontological method for synthesizing behavior control strategies for autonomous robots as part of a human-machine team when solving problems of automating work processes in a retail enterprise. The paper presents the results of computational experiments and comparisons of empirical and socio-ontological multi-agent neurocognitive methods for identifying and ontologizing violations of the working environment processes of a hypermarket sales area using an autonomous mobile retail robot.

Keywords: *artificial intelligence, robotics, mobile autonomous robot, multi-agent systems, neurocognitive architectures.*

References

1. Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivyykh i iskusstvennykh sistemakh* (Intelligence, or Thinking in living and artificial systems). Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 232 p. (In Russ.).
2. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (AIMA). 2nd ed. Prentice Hall, 2003. 1080 p.
3. Meshcheryakov R. V., Shirokov A. S. Statement of the Problem of Heterogeneous Group Interaction of Robots in Solving Smart Garden Problems. *Bulletin of SUSU. Series "Mathematics. Mechanics. Physics"*, 2024, Vol. 16, no. 2, pp. 41–49. DOI: 10.14529/mmph240204
4. Ronzhin A.L., Bizin M.M., Solenny S.V. Matematicheskie modeli i sredstva mnogomodal'nogo vzaimodeystviya s robototekhnicheskimi i kiberfizicheskimi sistemami (Mathematical Models and Means of Multi-Modal Interaction with Robotic and Cyberphysical Systems). *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT*, 2016, no. 8(90), pp. 107–111. (in Russ.).
5. Duch W., Oentaryo R.J., Pasquier M. Cognitive Architectures: Where do we go from here? *Proc. 2008 conference on Artificial General Intelligence 2008: Proceedings of the First AGI Conference*, 2008, pp. 122–136.
6. Goertzel B. Artificial General Intelligence: Concept, State of the Art, and Future Prospects. *Journal of Artificial General Intelligence*, 2014, Vol. 5, Iss. 1, pp. 1–46. DOI: 10.2478/jagi-2014-0001.
7. Goertzel B., Lian R., Arel I., de Garis H., Chen S. A World Survey of Artificial Brain Projects, Part II: Biologically Inspired Cognitive Architectures. *Neurocomputing*, 2010, Vol. 74, Iss. 1–3, pp. 30–49. DOI: 10.1016/j.neucom.2010.08.012
8. Nagoev Z.V., Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A., Nagoeva O.V., Atalikov B.A., Chechenova N.A., Malyshev D.A., Autonomous Formation of Spatial Ontologies in the Intelligent Decision-Making System of a Mobile Agricultural Robot Based on the Self-Organization of Multi-Agent Neurocognitive Architectures. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2020, no. 6, pp. 68–79. (in Russ.). DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-68-79
9. Nagoev Z., Nagoeva O., Anchokov M., Bzhikhatlov K., Kankulov S., Enes A. The Symbol Grounding Problem in the System of General Artificial Intelligence based on Multi-Agent Neurocognitive Architecture. *Cognitive Systems Research*, 2023, no. 79, pp. 71–84. DOI: 10.1016/j.cogsys.2023.01.002
10. Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z. Learning Algorithm for an Intelligent Decision Making System Based on Multi-Agent Neurocognitive Architectures. *Cognitive Systems Research*, 2021, Vol. 66, pp. 82–88. DOI: 10.1016/j.cogsys.2020.10.015
11. Nagoev Z.V. Ontoneuromorphogenetic Modeling. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*, 2013, no. 4(54), pp. 46–56. (in Russ.).
12. Nagoev Z.V. Multiagent Existential Displays and Functions. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, no. 4(54), pp. 63–71. (in Russ.).
13. Nagoev Z.V., Nagoeva O.V. *Obosnovaniye simvolov i mul'tiagentnyye neyrokognitivnyye modeli semantiki yestestvennogo yazyka* (Symbol Grounding and Multi-Agent Neurocognitive Models of Natural Language Semantics). Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2022. 150 p. (In Russ.).
14. Galin R., Shiroky A., Magid E., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Effective Functioning of a Mixed Heterogeneous Team in a Collaborative Robotic System. *Informatics and Automation*, 2021, Iss. 20, Vol. 6, pp. 1224–1253. DOI: 10.15622/ia.20.6.2
15. Meshcheryakov R.V. Intelligent Robotic Systems. *Sensors and systems*, 2024, no. 2 (274), pp. 12–17. DOI: 10.25728/datsys.2024.2.2
16. Meshcheryakov R.V., Shirokov A.S. Setting the Task of Heterogeneous Group Interaction of Robots in Solving Smart Garden Tasks. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematics. Mechanics. Physics"*, 2024, Vol. 16, no. 2, pp. 41–49. DOI: 10.14529/mmph240204
17. Zakharova A.A., Kutakhov V.P., Meshcheryakov R.V., Podvesovskii A.G., Smolin A.L. Modeling Cargo Transportation Tasks in an Unmanned Air Transportation System. *Aerospace Instrument-Making*, 2023, no. 3, pp. 3–15. (in Russ.).
18. Galin R., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Simple Task Allocation Algorithm in a Collaborative Robotic System. In: Ronzhin, A., Pshikhopov, V. (eds) *Frontiers in Robotics and Electromechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2023, Vol 329. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-19-7685-8_28

19. Wolf D., Turovsky Y., Iskhakova A., Meshcheryakov R. Evaluation of EEG Data for Zonal Affiliation of Brain Waves by Leads in a Robot Control Task. In: Ronzhin, A., Sadigov, A., Meshcheryakov, R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2023. Lecture Notes in Computer Science*, 2023, Vol. 14214, pp. 103–115. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-43111-1_10

Received September 2, 2024

Information about the authors

Anchekov Murat Inusovich is Staff Scientist, Laboratory “Molecular Selection and Biotechnology”, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russian Federation, e-mail: murat.antchok@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8977-797X>.

Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich is Cand. Sc. (Mathematics, Chemistry), Head of the Laboratory “Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems” of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russian Federation, e-mail: haosit13@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0924-0193>.

Makoeva Dana Gisovna is Cand. Sc. (Philological), Head of the Laboratory of Computational Linguistics, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russian Federation, e-mail: makoevadana@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5955-2262>.

Nagoev Zalimkhan Vyacheslavovich is Cand. Sc. (Engineering), General Director of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russian Federation, e-mail: zaliman@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9549-1823>.

Nagoeva Olga Vladimirovna is Researcher of the Department of the Multiagent Systems of the Institute of Computer Science and Regional Management Problems – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russian Federation, e-mail: nagoeva_o@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2341-7960>.

Pshenokova Inna Auesovna is Cand. Sc. (Mathematics, Chemistry), Leading Researcher laboratory “Neurocognitive autonomous intelligent systems”, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russian Federation, e-mail: pshenokova_inna@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>.

МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ ШУМОВ В СИГНАЛЕ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО АЛЬФА-БЕТА-ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Д.М. Волков, А.И. Савельев

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: saveliev@iias.spb.su

Аннотация. Для обеспечения стабилизации полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) мультироторного типа необходимо обрабатывать данные с микромеханических датчиков, установленных на борту, и преобразовывать их в управляющие сигналы. В процессе эксплуатации на БПЛА действует множество внешних и внутренних факторов, что приводит к возникновению шумов в данных типах датчиков. Шумы негативно сказываются на работе системы управления аппаратом. Особенно подвержены шумам сигналы гироскопа, на основе которых рассчитываются угловые скорости и углы наклона аппарата относительно оси ординат. Для решения данной проблемы в работе представлен метод фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика для дифференциальной составляющей пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД). Разработанный метод реализован в виде взаимосвязанной адаптивной системы из двух фильтров и позволяет отфильтровать в исходном сигнале гироскопического датчика высокочастотные электрические шумы, вибрации, вызываемые моторами и резонансными колебаниями рамы БПЛА. В ходе проведенных натурных экспериментов метрика сигнал/шум для обработанных данных достигла максимального значения в 8,40 дБ, что значительно лучше по сравнению с другими научными подходами.

Ключевые слова: фильтрация данных, гироскопический датчик, беспилотные летательные аппараты, альфа-бета-фильтр Калмана.

Введение

Актуальность разработки и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультироторного типа активно растет в последние годы в связи с появлением коммерчески доступных и удобных в использовании аппаратов, а также доказанной эффективностью применения БПЛА как в гражданской, так и в других сферах.

Системы управления БПЛА чаще всего разрабатываются с использованием ПИД-регулятора ввиду его эффективности и простоты реализации. В данном регуляторе наиболее важную функцию в задаче управления БПЛА выполняет дифференциальная составляющая (Д-составляющая), поскольку именно она уменьшает влияние перерегулирования, корректирует положение аппарата при низкоамплитудных (относительно амплитуд необработанного сигнала) скачкообразных отклонениях. Также данная составляющая увеличивает скорость реакции системы с ПИД-регулятором на быстро нарастающие отклонения. Д-составляющая является наиболее чувствительным к шумовым колебаниям элементом ПИД-регулятора, поскольку реагирует на низкоамплитудные всплески сигнала, которые и представляет чаще всего шум. Поэтому входной сигнал для дифференциальной составляющей необходимо подвергать предварительной обработке от шумового загрязнения.

В ряде случаев для осуществления фильтрации сигнала применяют один из усредняющих фильтров, представленных в работах [1–3]. Однако данные фильтры должны иметь достаточно большой порядок для приемлемого качества фильтрации, что ведет к существенной задержке сигнала.

Приемлемым вариантом фильтрации по критерию задержки сигнала мог бы являться фильтр нижних частот [4–8] в последовательной связке с режекторным [9] или полосно-заграждающим фильтром [10]. Однако в задаче фильтрации для дифференциальной составляющей ПИД-

регулятора они не подходят, поскольку подавляют амплитуды колебаний шума в сигнале, но не уменьшают частоты колебаний этих амплитуд.

Наиболее подходящим для обработки сигнала гироскопического датчика для формирования Д-составляющей является альфа-бета-фильтра Калмана [11, 12] благодаря зависимости его коэффициентов альфа и бета от выходного значения фильтра, предварительно обработанного экспоненциальным фильтром. Поэтому далее в основу разработанного метода был выбран именно данный фильтр.

1. Постановка задачи

В качестве технической системы, являющейся объектом исследования, рассматривается система обработки данных (СОД) инерциального датчика в рамках системы управления беспилотным летательным аппаратом (СУ БПЛА), представляющая собой совокупность элементов, оснащенных вычислительными средствами для приёма и обработки информации, объединенных каналом передачи данных, и функционирующая в динамически меняющихся условиях, где присутствуют различного рода шумы.

Структура СОД задана множеством последовательно соединенных узлов $V = \{v_i\} i = 1, 2, \dots, I$, каждый из которых соответствует определенному элементу в СОД. Задан вектор характеристик E_i вычислительных средств для каждого элемента v_i , включающий частоту дискретизации, уровень вносимой элементом задержки сигнала. Обработка информации в СОД происходит в циклическом режиме за время T_u . Узел рассматриваемой системы – гироскопический датчик (v_i подвержен шумам, представленным в виде множества $F_{rf} = \{r, f\}$, каждый элемент которого включает в себя источник шума $\{r\}$ и уровень вносимого искажения в сигнал $\{f\}$. В результате искажения сигнала в СОД происходит снижение эффективности функционирования СУ БПЛА в целом.

Для обеспечения снижения воздействия искажений сигнала на функционирование СОД имеется множество методов фильтрации данных $M_g = \{g\}$, каждый из которых характеризуется типом фильтра $g = 1, 2, \dots, G$ и вектором характеристик Z_g , таких как коэффициент сглаживания, RMSE шума, RMSE полезного сигнала. Применение в СОД методов фильтрации g -го типа требует затрат вычислительных ресурсов C_g . За счет применения методов фильтрации происходит прирост показателя эффективности функционирования СУ БПЛА в целом. Суммарная стоимость (C_Σ) метода фильтрации в СОД составляет:

$$C_\Sigma = \sum_{g=1}^G C_g. \quad (1)$$

Поскольку целью данной работы является устранение шумовых искажений в рамках системы управления летательным аппаратом мультироторного типа, то критерием качества решения данной задачи будет являться коэффициент шума (NF). Как функция от параметров исходных данных он определяется следующим образом:

$$NF = 10 \times \log_{10} \frac{SNR [V, E_i, F_{rf}]}{SNR_{out} [V, E_i, F_{rf}, M_g, Z_g]} i = 1, 2, \dots, I, \quad (2)$$

где SNR и SNR_{out} – это соотношение сигнал (S) / шум (N) на входе и выходе системы фильтрации, которые могут быть представлены как

$$SNR = \frac{S [V, E_i, F_{rf}]}{N [V, E_i, F_{rf}]} i = 1, 2, \dots, I, \quad (3)$$

$$SNR_{out} = \frac{S [V, E_i, F_{rf}, M_g, Z_g]}{N [V, E_i, F_{rf}, M_g, Z_g]} i = 1, 2, \dots, I. \quad (4)$$

Постановка задачи по критерию оптимальности формулируется следующим образом: требуется определить состав комплекса фильтров M_g , обеспечивающий максимальный NF в условиях воздействия внешних факторов F в соответствии с требуемой частотой дискретизации устройства SR и не превышающий допустимую стоимость C_{don} . Математическая постановка задачи по критерию оптимальности выглядит следующим образом:

$$M_g^* = \max_{0 \leq NF \leq +\infty} NF[V, E_i, F, M_g, Z_g] \quad g \in M, i = 1, 2, \dots, I, \quad (5)$$

при ограничениях $C_\Sigma \leq C_{don}$.

Решением поставленной задачи является выбор состава методов фильтрации M_g , обеспечивающего максимальное значения NF в условиях воздействия внешних факторов F . При использовании данного критерия решение является единственным – выбирается наилучший состав комплекса фильтров M_g .

2. Метод фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика при формировании дифференциальной составляющей ПИД-регулятора

Разработанный метод фильтрации шумов при формировании Д-составляющей ПИД-регулятора функционирует по следующей схеме, состоящей из трех частей:

1. Альфа-бета-фильтр Калмана принимает входное значение и приводит его к значению, близкому к 0, поскольку предполагается, что включение полетного контроллера БПЛА производится из состояния покоя. Корень квадратный из среднеквадратичной ошибки (RMSE) шума предварительно рассчитывается на основе замеров амплитуд вибраций корпуса БПЛА, вызванных вращением двигателей, на всем диапазоне скоростей вращения моторов.
2. Затем сигнал после альфа-бета-фильтра Калмана поступает на вход экспоненциального фильтра, который обратно передает отфильтрованное значение как RMSE сигнала.
3. На последнем этапе рассматриваемый фильтр использует полученные значения RMSE сигнала по обратной связи с экспоненциальным фильтром.

Альфа-бета-фильтр предполагает, что система адекватно аппроксимируется моделью, имеющей два внутренних состояния, где первое состояние получается путем интегрирования значения второго состояния во времени. Измеренные выходные значения системы соответствуют наблюдениям за первым состоянием модели плюс возмущения. Это приближение очень низкого порядка подходит для многих простых систем, например механических систем, в которых положение определяется как интеграл скорости от времени. Основываясь на аналогии с механической системой, эти два состояния можно назвать положением x и скоростью v . Предполагая, что скорость остается примерно постоянной в течение небольшого интервала времени ΔT между измерениями, состояние положения проецируется вперед для прогнозирования его значения в следующий момент выборки с использованием следующего уравнения:

$$\hat{x}_k \leftarrow \hat{x}_{k-1} + \Delta T \hat{v}_{k-1}. \quad (6)$$

Поскольку переменная скорости v считается постоянной, ее прогнозируемое значение в следующее время выборки равно текущему значению:

$$\hat{v}_k \leftarrow \hat{v}_{k-1}. \quad (7)$$

Ожидается, что выходное измерение будет отклоняться от прогноза из-за шума и динамических эффектов, не включенных в упрощенную динамическую модель. Эта ошибка прогнозирования (r) также называется остатком или нововведением на основе статистической интерпретации или интерпретации фильтрации Калмана:

$$\hat{r}_k \leftarrow \hat{x}_k - x_k. \quad (8)$$

Альфа-бета-фильтр принимает выбранные альфа- и бета-константы (из которых фильтр получил свое название), использует значение альфа, умноженное на отклонение r , для корректировки оценки положения и использует значение коэффициента бета, умноженное на отклонение r , для корректировки оценки скорости. Дополнительный коэффициент ΔT обычно служит для нормализации величин множителей:

$$\hat{x}_k \leftarrow \hat{x}_k + (\alpha) \hat{r}_k, \quad (9)$$

$$\hat{v}_k \leftarrow \hat{v}_k + \left(\frac{\beta}{[\Delta T]} \right) \hat{r}_k. \quad (10)$$

Параметры альфа-бета-фильтра Калмана можно вычислить из интервала выборки, среднеквадратичного отклонения (RMSE) процесса σ_ω и среднеквадратичного отклонения (RMSE) шума σ_v :

$$\lambda = \frac{\sigma_\omega T^2}{\sigma_v}, \quad (11)$$

$$r = \frac{4 + \lambda - \sqrt{8\lambda + \lambda^2}}{4}, \quad (12)$$

$$\alpha = 1 - r^2, \quad (13)$$

$$\beta = 2(2 - \alpha) - 4\sqrt{1 - \alpha}. \quad (14)$$

Такой выбор параметров фильтра сводит к минимуму среднеквадратическую ошибку.

Альфа-бета-фильтр Калмана хорошо подходит для предсказуемых систем, где заранее известна дисперсия шума и дисперсия чистого сигнала, что позволяет использовать данное решение в рамках системы управления беспилотного летательного аппарата. Поэтому в данной исследовательской работе коэффициенты альфа и бета выражены через среднеквадратичное отклонение шума и чистого сигнала, которые, в свою очередь, изменяются в зависимости от условий полета.

Экспоненциальный фильтр – это авторегрессионный фильтр скользящего среднего первого порядка, определяемый следующим уравнением:

$$y(kh) = \alpha \times y[(k-1)h] + (1-\alpha) \times y(kh). \quad (15)$$

Отфильтрованное значение $y(kh)$ вычисляется суммированием предыдущего значения отфильтрованного сигнала $y[(k-1)h]$ и последнего значения $y(kh)$ измерительного сигнала с весовыми коэффициентами. Коэффициент α лежит в интервале между 0 и 1.

Экспоненциальный фильтр содержит также динамический коэффициент k_{exp} , который изменяется в зависимости от скорости изменения фильтруемой величины. Полный вид экспоненциального фильтра можно представить в виде следующих выражений:

$$\hat{y}(kh) = (y(kh) - \hat{y}[(k-1)h]) \times k_{exp}, \quad (16)$$

$$k_{exp} = \left| k \times (y(kh) - \hat{y}[(k-1)h]) \right|, \quad (17)$$

где k – коэффициент сглаживания, который подбирается экспериментально, исходя из величины приемлемой задержки при средних рабочих скоростях изменения фильтруемой величины.

Экспоненциальный фильтр в данном исследовании используется с адаптивным коэффициентом сглаживания, который зависит от скорости изменения принимаемых значений. При увеличении разности между значениями коэффициент увеличивается, а в обратном случае уменьшается. Такое решение позволяет минимизировать задержку сигнала данного фильтра и улучшает сглаживания высокочастотных шумов.

На рисунке представлен реализованный метод в виде каскада фильтров.



Структурная схема метода адаптивной фильтрации при формировании Д-составляющей ПИД-регулятора

Математика

Представленная на рисунке схема отображает обработку угловых скоростей БпЛА относительно одной из осей XYZ. Вся схема системы управления аппаратом будет иметь вид трех, никак не связанных друг с другом цепей фильтрации для каждой из осей XYZ.

Следует также отметить, что адаптивный альфа-бета-фильтр, представленный в данном исследовании, является новым решением, поскольку в ходе анализа статей не было найдено полностью аналогичного решения, в ходе которого была бы реализована система с обратной связью с ее же выходными значениями.

3. Постановка и анализ экспериментов

Для проверки разработанного метода фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика была проведена серия экспериментов. Управляющая программа в ходе эксперимента включала четыре параллельно работающих потока:

- 1) поток приема данных с передатчика с частотой вызова 1000 Гц;
- 2) главный поток, где реализована фильтрация данных по ранее выбранным алгоритмам и расчет значений ШИМ-сигнала на моторы через математическую функцию ПИД-регулятора. Частота приема данных с микромеханических датчиков 4000 Гц;
- 3) поток вывода данных в последовательный UART-порт с частотой вызова 100 Гц.

Управление квадрокоптером осуществлялось посредством изменения угловых скоростей по осям крена, тангажа и рысканья. Было реализовано три различных сценария:

- 1) квадрокоптер был поднят на высоту 4–5 метров над землей. При помощи команд с пульта управления осуществлял движения по оси угла крена в течение 30 с;
- 2) квадрокоптер был поднят на высоту 4–5 метров над землей. При помощи команд с пульта управления совершал движения по оси угла тангажа в течение 30 с;
- 3) квадрокоптер был поднят на высоту 4–5 метров над землей. При помощи команд с пульта управления совершал вращения по оси угла рысканья в течение 30 с.

Все эксперименты производились на открытой местности в безветренную погоду при отсутствии осадков и других внешних явлений. Температура окружающей среды во время проведения эксперимента составляла 21 °С.

В результате экспериментов были получены сигналы гироскопического датчика по всем трем осям на каждом этапе фильтрации. Эти данные представлены в таблице.

Результаты экспериментов для целевых осей

	Сигнал/Шум (дБ)			Коэффициент Пирсона		
	Крен	Тангаж	Рысканье	Крен	Тангаж	Рысканье
Исходный сигнал	2,34	4,47	7,65	0,65	0,80	0,91
Альфа-бета-фильтр Калмана	3,55	4,53	8,40	0,74	0,80	0,92
Экспоненциальный фильтр	3,35	4,35	8,084	0,73	0,79	0,92

Исходя из представленных в таблице данных, можно сделать вывод, что по двум представленным метрикам наилучших показаний достигают выходные данные со звена альфа-бета-фильтра Калмана. По метрике сигнал/шум наблюдается существенный прирост после прохождения альфа-бета-фильтра. Показатели же коэффициента Пирсона сохраняют свою величину с незначительным снижением для значений сигнала после обработки их экспоненциальным фильтром, что свидетельствует об отсутствии искажений сигнала, вызванных обработкой представленным методом.

Заключение

Из проведенного анализа результатов экспериментов можно сделать вывод, что по всем метрикам альфа-бета-фильтр Калмана обеспечивает наилучшее соотношение сигнал/шум и коэффициент корреляции. А если рассмотреть тот факт, что метрика сигнал/шум имеет значение вплоть до 8,40 дБ по рысканью (т. е. чистый сигнал превосходит все показатели входящих в шум на 8,40

дБ), а в среднем достигает 4 дБ для остальных осей, то можно заключить, что предложенный метод эффективен для фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика по всем осям.

Ухудшение показателей обработки после экспоненциального фильтра объясняется достаточной большой задержкой данного фильтра (20 мс в среднем), которая вносит заметное расхождение между реальными показателями и показателя после обработки фильтром. Однако экспоненциальный фильтр хорошо показывает себя при использовании его для дифференциальной составляющей ПИД-регулятора, поскольку сглаживает амплитуды шумов, делая их более пологими.

Вопросы управления роботами и БПЛА в сложных погодных-климатических условиях и недетерминированной среде тщательно рассматриваются в работах ведущей научной школы профессора Р.В. Мещерякова [13–18]. Авторы считают своим приятным долгом поздравить Романа Валерьевича с юбилеем и выражают признательность за плодотворные дискуссии.

Литература

1. Brownrigg, D.R.K. The Weighted Median Filter / D.R.K. Brownrigg // Communications of the ACM. – 1984. – Vol. 27, no. 8. – pp. 807–818.
2. Moving Average Filter Based Phase-Locked Loops: Performance Analysis and Design Guidelines / S. Golestan, M. Ramezani, J.M. Guerrero *et al.* // IEEE transactions on power electronics. – 2013. – Vol. 29, no. 6. – P. 2750–2763.
3. Greene, N. Creating Raster Omnimax Images From Multiple Perspective Views Using the Elliptical Weighted Average Filter / N. Greene, P.S. Heckbert // IEEE Computer Graphics and Applications. – 1986. – Vol. 6, no. 6. – P. 21–27.
4. Design Strategy for Biquad-Based Continuous-Time Low-Pass Filters / P. Monsurrò, S. Pennisi, G. Scotti, A. Trifiletti // 2011 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD). – IEEE, 2011. – P. 385–388.
5. Matthaei, G.L. Tables of Chebyshev impedance-transforming networks of low-pass filter form / G.L. Matthaei // Proceedings of the IEEE. – 1964. – Vol. 52. – № 8. – P. 939–963.
6. Roberts, J. Use of the Butterworth Low-Pass Filter for Oceanographic Data / J. Roberts, T.D. Roberts // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1978. – Vol. 83, Iss. C11. – P. 5510–5514.
7. Yang J., Wu W. Compact Elliptic-Function Low-Pass Filter Using Defected Ground Structure // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2008. – Т. 18, no. 9. – P. 578–580.
8. Сорокин Г. А. Фильтры нижних частот // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 100–107.
9. Hirano, K. Design of Digital Notch Filters / K. Hirano, S. Nishimura, S. Mitra // IEEE Transactions on Communications. – 1974. – Vol. 22, no. 7. – P. 964–970.
10. Smith, A.P. Agreement Level of Running Temporal Measurements, Kinetics, and Force-Time Curves Calculated from Inertial Measurement Units: PhD thesis / A.P. Smith. – East Tennessee State University, 2021.
11. Penoyer, R. The Alpha-Beta Filter / R. Penoyer // The C Users Journal archive. – 1993. – Vol. 11, Iss. 7. – P. 73–86.
12. Kaba A. Unscented Kalman filter based attitude estimation of a quadrotor. Journal of Aeronautics and Space Technologies. – 2021. – Vol. 14, no. 1. – P. 79–88.
13. Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в коллаборативной робототехнической системе / Р.Р. Галин, А.А. Широкий, Е.А. Магид и др. // Информатика и автоматизация. – 2021. – № 6 (20). – С. 1224–1253.
14. Мещеряков, Р.В. Интеллектуальные робототехнические системы / Р.В. Мещеряков // Датчики и системы. – 2024. – № 2 (274). – С. 12–17.
15. Мещеряков Р.В., Широков А.С. Постановка задачи гетерогенного группового взаимодействия роботов при решении задач умного сада // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 41–49.
16. Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе / А.А. Захарова, В.П. Кутахов, Р.В. Мещеряков и др. // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – № 3. – С. 3–15.

17. Galin R., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Simple Task Allocation Algorithm in a Collaborative Robotic System / R. Galin, R. Meshcheryakov, M. Mamchenko // *Frontiers in Robotics and Electromechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies*. – 2023. – no. 329. – P. 433–447.

18. Evaluation of EEG data for zonal affiliation of brain waves by leads in a robot control task / D. Wolf, Y. Turovsky, A. Iskhakova, R. Meshcheryakov // *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2023. Lecture Notes in Computer Science*. – 2023. – Vol. 14214. – P. 103–115. Springer, Cham.

Поступила в редакцию 3 сентября 2024 г.

Сведения об авторах

Волков Данила Михайлович – программист лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: volkov.d@iias.spb.su.

Савельев Антон Игоревич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1851-2699>, e-mail: saveliev@iias.spb.su.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2024, vol. 16, no. 4, pp. 16–23*

DOI: 10.14529/mmph240402

METHOD OF NOISE FILTERING IN GYROSCOPIC SENSOR SIGNAL BASED ON ADAPTIVE ALPHA-BETA KALMAN FILTER

D.M. Volkov, A.N. Saveliev

*St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg,
Russian Federation*

E-mail: saveliev@iias.spb.su

Abstract. To ensure flight stabilization of a multicopter UAV, it is necessary to process data from micro-mechanical sensors installed on board and convert them into control signals. During operation, the UAV is affected by many external and internal factors, which leads to the occurrence of noise in these types of sensors. Noise has a negative impact on the operation of the device control system. The gyroscope signals, which are used to calculate the angular velocities and tilt angles of the vehicle, are particularly susceptible to noise. To solve this problem, the paper presents a method for cleaning the signal from a gyroscopic sensor for the differential component of the PID controller. The developed method is implemented as an interconnected adaptive system of two filters and allows for cleaning the original signal from the gyroscopic sensor from high-frequency electrical noise, vibrations caused by motors and resonant oscillations of the UAV frame. During the conducted field experiments, the signal/noise metric for the processed data reached a maximum value of 8,40 dB, which is significantly better compared to the 2 dB figure found in other scientific papers.

Keywords: *data filtering, gyroscopic sensor, unmanned aerial vehicles, Kalman alpha-beta filter.*

References

1. Brownrigg D.R.K. The Weighted Median Filter. *Communications of the ACM*, 1984, Vol. 27, Iss. 8, pp. 807–818. DOI: 10.1145/358198.358222
2. Golestan S., Ramezani M., Guerrero J.M., Freijedo F.D., Monfared M. Moving Average Filter Based Phase-Locked Loops: Performance Analysis and Design Guidelines. in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 2750–2763, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2273461.
3. Greene N., Heckbert P.S. Creating Raster Omnimax Images from Multiple Perspective Views Using the Elliptical Weighted Average Filter. in *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1986, Vol. 6, no. 6, pp. 21–27. DOI: 10.1109/MCG.1986.276738.

4. Monsurrò P., Pennisi S., Scotti G., Trifiletti A. Design Strategy for Biquad-Based Continuous-Time Low-Pass Filters. *2011 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, Linköping, Sweden, 2011, pp. 385–388. DOI: 10.1109/ECCTD.2011.6043367.
5. Matthaei G.L. Tables of Chebyshev Impedance–Transforming Networks of Low-Pass Filter Form. *Proc. IEEE*, 1964, Vol. 52, no. 8, pp. 939–963. DOI: 10.1109/PROC.1964.3185.
6. Roberts J., Roberts T.D. Use of the Butterworth Low-Pass Filter for Oceanographic Data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1978, Vol. 83, Iss. C11, pp. 5510–5514. DOI: 10.1029/JC083iC11p05510
7. Yang J., Wu W. Compact Elliptic-Function Low-Pass Filter Using Defected Ground Structure. In *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, Vol. 18, no. 9, pp. 578–580. DOI: 10.1109/LMWC.2008.2002447.
8. Sorokin G. A. Filters of the Lower Frequencies // *Bulletin of South Ural State University. Series “Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics”*, 2015, Vol. 15, no. 1, pp. 100–107.
9. Hirano K., Nishimura S., Mitra S. Design of Digital Notch Filters. In *IEEE Transactions on Communications*, 1974, Vol. 22, no. 7, pp. 964–970, DOI: 10.1109/TCOM.1974.1092311.
10. Smith A.P. *Agreement Level of Running Temporal Measurements, Kinetics, and Force-Time Curves Calculated from Inertial Measurement Units*: PhD thesis. – East Tennessee State University, 2021.
11. Penoyer R. The Alpha-Beta Filter. *The C Users Journal archive*, 1993, Vol. 11, Iss. 7, pp. 73–86.
12. Kaba A. Unscented Kalman Filter Based Attitude Estimation of a Quadrotor. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 2021, Vol. 14, no. 1, pp. 79–88.
13. Galin R., Shiroky A., Magid E., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Effective Functioning of a Mixed Heterogeneous Team in a Collaborative Robotic System. *Informatics and Automation*, 2021, no. 20(6), pp. 1224–1253. DOI: 10.15622/ia.20.6.2
14. Meshcheryakov R.V. Intelligent Robotic Systems. *Sensors and Systems*, 2024, no. 2 (274), P. 12–17. DOI: 10.25728/datsys.2024.2.2
15. Meshcheryakov R.V., Shirokov A.S. Setting the Task of Heterogeneous Group Interaction of Robots in Solving Smart Garden Tasks. *Bulletin of the South Ural State University. Series “Mathematics. Mechanics. Physics”*, 2024, Vol. 16, no. 2, pp. 41–49. DOI: 10.14529/mmph240204
16. Zakharova A.A., Kutakhov V.P., Meshcheryakov R.V., Podvesovskii A.G., Smolin A.L. Modeling Cargo Transportation Tasks in an Unmanned Air Transportation System. *Aerospace Instrument-Making*, 2023, no. 3, pp. 3–15. DOI: 10.25791/aviakosmos.3.2023.1326
17. Galin R., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Simple Task Allocation Algorithm in a Collaborative Robotic System. In: Ronzhin, A., Pshikhopov, V. (eds) *Frontiers in Robotics and Electromechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2023, Vol. 329, Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-19-7685-8_28
18. Wolf D., Turovsky Y., Iskhakova A., Meshcheryakov R. Evaluation of EEG Data for Zonal Affiliation of Brain Waves by Leads in a Robot Control Task. In: Ronzhin A., Sadigov A., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2023. Lecture Notes in Computer Science*, 2023, Vol. 14214. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-43111-1_10

Received September 3, 2024

Information about the authors

Volkov Danila Mikhailovich is Programmer, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: volkov.d@ias.spb.su.

Saveliev Anton Igorevich is Cand. Sc. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: saveliev@ias.spb.su, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1851-2699>.

STOCHASTIC WENTZEL SYSTEM OF FREE FLUID FILTRATION EQUATIONS ON A HEMISPHERE AND ON ITS EDGE

N.S. Goncharov, G.A. Sviridyuk

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

E-mail: goncharovns@susu.ru, sviridyukga@susu.ru

Abstract. Deterministic and stochastic Wentzell systems of the Dzekzer equations describing the evolution of the free surface of a filtering fluid in a hemisphere and at its edge are studied. In the deterministic case, the unambiguous solvability of the initial problem for the Wentzell system in a particular constructed Hilbert space is established. In the case of the stochastic system, the theory of Nelson–Glicklich derivatives is used and a stochastic solution is constructed to quantify the change in the free filtration of the fluid.

Keywords: stochastic Dzekzer equation; system of Wentzell equations; the Nelson–Glicklich derivative.

Introduction

Let $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, $n \geq 2$, be a manifold with an edge Γ . In particular, $\Omega = \{(\theta, \varphi) : \theta \in [0, \frac{\pi}{2}], \varphi \in [0, 2\pi]\}$ be a hemisphere in \mathbb{R}^3 , and $\Gamma = \{\varphi : \varphi \in [0, 2\pi]\}$ be a edge of hemisphere. The system of two Dzekzer equations [1], which describing free fluid filtration is defined on the compact $\Omega \cup \Gamma$

$$(\lambda - \Delta_{\theta, \varphi})u_t = \alpha_0 \Delta_{\theta, \varphi} u - \beta_0 \Delta_{\theta, \varphi}^2 u - \gamma_0 u, u = u(t, \theta, \varphi), (t, \theta, \varphi) \in \mathbb{R}_+ \times \Omega \quad (1)$$

$$(\lambda - \Delta_{\varphi})v_t = \alpha_1 \Delta_{\varphi} v - \beta_1 \Delta_{\varphi}^2 v + \partial_R u - \gamma_1 v, v = v(t, R, \varphi), (t, R, \varphi) \in \mathbb{R}_+ \times \Gamma, \quad (2)$$

where the Laplace–Beltrami operator $\Delta_{\theta, \varphi}$ on the hemisphere and the Laplace–Beltrami operator Δ_{φ} on the edge of the hemisphere have the following form

$$\Delta_{\theta, \varphi} = \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}, \Delta_{\varphi} = \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}, \partial_R = \frac{\partial}{\partial \theta} \Big|_{\theta = \frac{\pi}{2}} \quad (3)$$

Here, the symbol $\nu = \nu(t, \theta, \varphi), (t, \theta, \varphi) \in \mathbb{R}_+ \times \Gamma$, denotes the external normal to $\mathbb{R}_+ \times \Omega$. The parameters $\alpha_0, \alpha_1, \lambda, \beta_0, \beta_1, \gamma_0, \gamma_1 \in \mathbb{R}$ characterize the medium. To this system we add the matching condition

$$\text{tr } u = \nu \text{ на } \mathbb{R}_+ \times \Gamma, \quad (4)$$

and equip it will initial conditions

$$u(0, \theta, \varphi) = u_0(\theta, \varphi), v(0, \varphi) = v_0(\varphi). \quad (5)$$

Let us call the solution of the problem (1)–(5) the deterministic solution of the Wentzell system. If we replace u and v , defined by Ω and Γ respectively, on $\eta = \eta(t)$ and $\kappa = \kappa(t)$ are stochastic processes on the interval $(0, \tau)$, we obtain stochastic Wentzell system, where the derivative of stochastic processes is understand by the Nelson–Gliklikh derivative of the process. It associated with correct definition of “white noise” as one-dimensional Wiener process (see, for example, [2–7]). Let us call the solution of the corresponding problem the stochastic solution of the Wentzell system.

The paper, in addition to the introduction and the list of references, consists of two parts. The first part considers the existence and uniqueness of the deterministic Wentzell system of equations of free filtration of fluid on a hemisphere and at its edge. The second part contains the proof of existence and uniqueness of the stochastic system of Wentzell equations of free fluid filtration on a hemisphere and at its edge.

The deterministic Wentzell system of free fluid filtration equations

If $\theta_k = k(k+1)$ eigenvalues of the Laplace–Beltrami operator $\Delta_{\theta, \varphi}$, then

$$Y_k^m(\varphi, \theta) = \begin{cases} P_k^m(\cos \theta) \cos m\varphi, & m = 0, \dots, k; \\ P_k^{|m|}(\cos \theta) \sin |m|\varphi, & m = -k, \dots, -1, \end{cases}$$

are the corresponding eigenfunctions orthonormalized with respect to the scalar product. Here,

$$P_k(t) = \frac{1}{2^k k!} \frac{d^k}{dt^k} (t^2 - 1)^k$$

is a Legendre polynomial of degree k , and $P_k^{|m|}(t) = (1-t^2)^{|m|/2} \frac{d^{|m|}}{dt^{|m|}} P_k(t)$ is the attached Legendre polynomial. The scalar product is calculated using the following formula

$$\langle Y_{k_1}^{m_1}, Y_{k_2}^{m_2} \rangle = \int_0^{2\pi} \cos m_1 \varphi \cos m_2 \varphi d\varphi \int_{-1}^1 P_{k_1}^{m_1}(t) P_{k_2}^{m_2}(t) dt.$$

Consider the following series

$$u = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=0}^k \exp\left(t \frac{\beta_0 k^4 - \alpha_0 k^2 - \gamma_0}{\lambda + k^2}\right) (a_{m,k} \cos m\varphi + b_{m,k} \sin m\varphi) P_k^m(\cos \theta), \quad (6)$$

where

$$a_{m,k} = \int_0^{2\pi} u_0(\theta, \varphi) \cos m\varphi d\varphi \int_0^{\pi/2} P_k^m(0) \sin \theta d\theta, \quad b_{m,k} = \int_0^{2\pi} u_0(\theta, \varphi) \sin m\varphi d\varphi \int_0^{\pi/2} P_k^m(0) \sin \theta d\theta.$$

It is easy to see that the series constructed above is a formal solution of the equation (1). Moreover, if the series in (6) converge uniformly, then we have a solution to the problem (1), (5), where $\partial_\theta u = 0$. Given this, we can construct a solution to the problem (2), (5)

$$u = \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left(t \frac{\beta_1 k^4 - \alpha_1 k^2 - \gamma_1}{\lambda + k^2}\right) (c_k \cos k\varphi + d_k \sin k\varphi), \quad (7)$$

where

$$c_k = \int_0^{2\pi} v_0(\varphi) \cos k\varphi d\varphi, \quad d_k = \int_0^{2\pi} v_0(\varphi) \sin k\varphi d\varphi.$$

In the case of the matching condition (4) we obtain the following equation

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=0}^k \exp\left(t \frac{\beta_0 k^4 - \alpha_0 k^2 - \gamma_0}{\lambda + k^2}\right) (a_{m,k} \cos m\varphi + b_{m,k} \sin m\varphi) P_k^m(\cos \theta) \Big|_{\theta=\pi/2} \\ & = \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left(t \frac{\beta_1 k^4 - \alpha_1 k^2 - \gamma_1}{\lambda + k^2}\right) (c_k \cos k\varphi + d_k \sin k\varphi). \end{aligned}$$

Considering, that $\beta_0 = \beta_1$, $\alpha_0 = \alpha_1$, $\gamma_0 = \gamma_1$ we obtain equivalent system of equations

$$\sum_{m=0}^k (a_{m,k} \cos m\varphi + b_{m,k} \sin m\varphi) P_k^m(0) = c_k \cos k\varphi + d_k \sin k\varphi, \text{ where } m+n=2k.$$

Substituting the integral coefficients we obtain an equivalent system

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^k & \left(\int_0^{2\pi} u_0(\theta, \varphi) \cos m\varphi d\varphi \int_0^{\pi/2} P_k^m(0) \sin \theta d\theta \cos m\varphi + \int_0^{2\pi} u_0(\theta, \varphi) \sin m\varphi d\varphi \int_0^{\pi/2} P_k^m(0) \sin \theta d\theta \sin m\varphi \right) P_k^m(0) \\ & = \int_0^{2\pi} v_0(\varphi) \cos k\varphi d\varphi \cos k\varphi + \int_0^{2\pi} v_0(\varphi) \sin k\varphi d\varphi \sin k\varphi. \end{aligned}$$

Here the auxiliary integrals are calculated by the formula

$$\int_0^{\pi/2} P_k^m(0) \sin \theta d\theta = P_k^m(0) \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta = P_k^m(0),$$

and system has the following form

$$\sum_{m=0}^k \left(\int_0^{2\pi} u_0(\theta, \varphi) \cos m\varphi d\varphi \cos m\theta + \int_0^{2\pi} u_0(\theta, \varphi) \sin m\varphi d\varphi \sin m\theta \right) (P_k^m(0))^2 = \int_0^{2\pi} v_0(\varphi) \cos k\varphi d\varphi \cos k\theta + \int_0^{2\pi} v_0(\varphi) \sin k\varphi d\varphi \sin k\theta. \tag{8}$$

Thus in the case $\beta_0 = \beta_1, \alpha_0 = \alpha_1, \gamma_0 = \gamma_1$ and the obtained condition (8) the solutions to the problem (1)–(5) will satisfy the matching condition (4).

Lineal closure of the $\text{span}\{P_k^m(\cos \theta) \sin m\varphi, P_k^m(\cos \theta) \cos m\varphi : m, k \in \mathbb{N} \setminus \{1\}, \theta \in [0, \frac{\pi}{2}], \varphi \in [0, 2\pi)\}$ generated by the scalar product

$$\langle \varphi, \psi \rangle = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varphi(\theta, \varphi) \psi(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi,$$

we denote by the symbol $A(\Omega)$. Next, the closure of the $\text{span}\{\sin k\varphi, \cos k\varphi : k \in \mathbb{N}, \varphi \in [0, 2\pi)\}$ by the norm, generated by the scalar product

$$\langle \xi, \psi \rangle = \int_0^{2\pi} \xi(\varphi) \psi(\varphi) d\varphi,$$

we denote by the symbol $A(\Gamma)$.

Thus, the following theorem holds.

Theorem 2.1 For any $u_0 \in A(\Omega)$ and $v_0 \in A(\Gamma)$, and any coefficients $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1, \gamma_0, \gamma_1, \lambda \in \mathbb{R}$, such, that the conditions $\alpha_0 = \alpha_1, \beta_0 = \beta_1, \gamma_0 = \gamma_1, \lambda \neq k^2$ are satisfied, where $k \in \mathbb{N}$, and the system (8) is solvable, then there exists a unique solution $(u, v) \in C^\infty(\mathbb{R}; A(\Omega) + A(\Gamma))$ of problem (1)–(5).

The stochastic Wentzell system of free fluid filtration equations

For simplicity's sake, let $\mathfrak{A} = \{u \in W_2^2(\Omega) + W_2^2(\Gamma) : \partial_R u = 0\}$, $\mathfrak{F} = L_2(\Omega) + L_2(\Gamma)$. Next, following the algorithm above, construct the spaces of random K -values. The random K -values $\eta, \kappa \in U_K L_2$ has the form $\eta = \sum_{i=1}^\infty \lambda_i \eta_i \varphi_i, \kappa = \sum_{k=1}^\infty \lambda_k \kappa_k \psi_k$, where $\{\varphi_k\}$ is the family of eigenfunctions of the Laplace–Beltrami operator $\Delta_{\theta, \varphi} \in L(U_K L_2; F_K L_2)$ orthonormalized in the sense of the scalar product (\cdot, \cdot) of $L_2(\Omega)$; $\{\psi_k\}$ is the family of eigenfunctions of the Laplace–Beltrami operator $\Delta_\varphi \in L(U_K L_2; F_K L_2)$ orthonormalized in the sense of the scalar product (\cdot, \cdot) of $L_2(\Omega)$. Consider the linear stochastic Wentzel system of free fluid filtration equations in a hemisphere and at its edge. In this case (1)–(5) is transformed to the form

$$(\lambda - \Delta_{\theta, \varphi}) \eta_t = \alpha_0 \Delta_{\theta, \varphi} \eta - \beta_0 \Delta_{\theta, \varphi}^2 \eta - \gamma_0 \eta, \eta \in C^\infty(\mathbb{R}_+; U_K L_2), \tag{9}$$

$$(\lambda - \Delta_\varphi) \kappa_t = \alpha_1 \Delta_\varphi \kappa - \beta_1 \Delta_\varphi^2 \kappa + \partial_R \eta - \gamma_1 \kappa, \kappa \in C^\infty(\mathbb{R}_+; U_K L_2) \tag{10}$$

To the system (9), (10) we add the corresponding matching condition (8) and initial condition

$$\eta(0) = \eta_0, \kappa(0) = \kappa_0, \tag{11}$$

The solution of the problem (9)–(11) will be called a stochastic solution. Thus, using the idea inherent in the results obtained earlier (see, for example [8]), the following theorem holds.

Theorem 3.1 For any $\eta_0, \kappa_0 \in U_K L_2(\Omega)$ and any coefficients $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1, \gamma_0, \gamma_1, \lambda \in \mathbb{R}$, such, that the conditions $\alpha_0 = \alpha_1, \beta_0 = \beta_1, \gamma_0 = \gamma_1, \lambda \neq k^2$ are satisfied, where $k \in \mathbb{N}$, and the system (8) is solvable, then there exists a unique solution $\eta \in C^\infty(\mathbb{R}_+; U_K L_2)$ of problems (9)–(11).

The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-21-10056).

References

1. Dzekhtser E.S. Generalization of the Equation of Motion of Ground Waters with Free Surface. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1972, Vol. 202, no. 5, pp. 1031–1033.
2. Favini A., Sviridyuk G.A., Manakova N.A. Linear Sobolev Type Equations with Relatively p-Sectorial Operators in Space of “Noises”. *Abstract and Applied Analysis*, 2015, vol. 2015, no. 697410. DOI: 10.1155/2015/697410
3. Favini A., Sviridyuk G.A., Zamyshlyayeva A.A. One Class of Sobolev Type Equations of Higher Order with Additive “White Noise”. *Communications on Pure and Applied Analysis*, 2016, Vol. 15, no. 1, pp. 185–196. DOI: 10.3934/cpaa.2016.15.185
4. Favini A., Sviridyuk G.A., Sagadeeva M. Linear Sobolev Type Equations with Relatively p-Radial Operators in Space of “Noises”. *Mediterranean Journal of Mathematics*, 2016, Vol. 13, no 6, pp. 4607–4621. DOI: 10.1007/s00009-016-0765-x
5. Favini A., Zagrebina S.A., Sviridyuk G.A. Multipoint Initial-Final Value Problems for Dynamical Sobolev-Type Equations in the Space of Noises. *Electronic Journal of Differential Equations*, 2018, Vol. 2018, no. 128, pp. 1–10.
6. Favini A., Zagrebina S.A., Sviridyuk G.A. The Multipoint Initial-Final Value Condition for the Hoff Equations in Geometrical Graph in Spaces of K-“noises”. *Mediterr. J. Math.*, 2022, Vol. 19, Iss. 2, Article no. 53. DOI: 10.1007/s00009-021-01940-0
7. Gliklikh Yu.E. *Global and Stochastic Analysis with Applications to Mathematical Physics*. Springer, London, Dordrecht, Heidelberg, N.-Y., 2011, 436 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-163-9
8. Goncharov N.S., Zagrebina S.A., Sviridyuk G.A. Non-Uniqueness of Solutions to Boundary Value Problems with Wentzell Condition. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming and Computer Software*, 2021, Vol.14, Iss. 4, pp. 102–105. DOI: 10.14529/mmp210408

Received September 15, 2024

Information about the authors

Goncharov Nikita Sergeevich is Post-graduate Student, Equations of Mathematical Physics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: goncharovns@susu.ru.

Sviridyuk Georgiy Anatol'evich is Professor, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of Mathematical Physics Non-Classical Equations Research Laboratory, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: sviridiukga@susu.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0795-2277>.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Mathematics. Mechanics. Physics”
2024, vol. 16, no. 4, pp. 24–28

УДК 517.9, 519.216.2

DOI: 10.14529/mmph240403

СТОХАСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВЕНТЦЕЛЯ УРАВНЕНИЙ СВОБОДНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ НА ПОЛУСФЕРЕ И НА ЕЕ КРАЕ

Н.С. Гончаров, Г.А. Свиридюк

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация
E-mail: goncharovns@susu.ru, sviridyukga@susu.ru

Аннотация. Исследуются детерминированные и стохастические системы Вентцеля уравнений Дзекцера, описывающие эволюцию свободной поверхности фильтрующейся жидкости на полусфере и на ее краю. В детерминированном случае установлена однозначная разрешимость начальной задачи для системы Вентцеля в конкретном построенном гильбертовом пространстве. В случае стохастической системы используется теория производных Нельсона–Гликлиха и строится стохастическое решение, позволяющее определить количественное изменение свободной фильтрации жидкости.

Ключевые слова: стохастическое уравнение Дзекцера; система уравнений Вентцеля; производная Нельсона–Гликлиха.

Литература

1. Дзекцер, Е.С. Обобщение уравнения движения грунтовых вод со свободной поверхностью / Е.С. Дзекцер // Доклады Академии наук СССР. – 1972. – Т. 202, № 5. – С. 1031–1033.
2. Favini, A. Linear Sobolev Type Equations with Relatively p -Sectorial Operators in Space of “Noises” / A. Favini, G.A. Sviridyuk, N.A. Manakova // Abstract and Applied Analysis. – 2015. – Vol. 2015. – P. 697410.
3. Favini, A. One class of Sobolev Type Equations of Higher Order with Additive “White Noise” / A. Favini, G.A. Sviridyuk, A.A. Zamyshlyayeva // Communications on Pure and Applied Analysis. – 2016. – Т. 15, № 1. – P. 185–196.
4. Favini, A. Linear Sobolev Type Equations with Relatively p -Radial Operators in Space of «Noises» / A. Favini, G.A. Sviridyuk, M. Sagadeeva // Mediterranean Journal of Mathematics. – 2016. – Vol. 13, no. 6. – P. 4607–4621.
5. Favini, A. Multipoint Initial-Final Value Problems for Dynamical Sobolev-Type Equations in the Space of Noises / A. Favini, S.A. Zagrebina, G.A. Sviridyuk // Electronic Journal of Differential Equations. – 2018. – Vol. 2018, no. 128. – P. 1–10.
6. Favini, A. The Multipoint Initial-Final Value Condition for the Hoff Equations in Geometrical Graph in Spaces of K -“noises” / A. Favini, S.A. Zagrebina, G.A. Sviridyuk // Mediterr. J. Math. – 2022. – Vol. 19, Iss. 2. – Article no. 53.
7. Gliklikh, Yu.E. Global and Stochastic Analysis with Applications to Mathematical Physics / Yu.E. Gliklikh. – Springer, London, Dordrecht, Heidelberg, N.-Y. – 2011. – 436 p.
8. Goncharov, N.S. Non-Uniqueness of Solutions to Boundary Value Problems with Wentzell Condition / N.S. Goncharov, S.A. Zagrebina, G.A. Sviridyuk // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming and Computer Software. – 2021. – Vol.14, Iss. 4. – P. 102–105.

Поступила в редакцию 15 сентября 2024 г.

Сведения об авторах

Гончаров Никита Сергеевич – ассистент, кафедра уравнений математической физики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, e-mail: goncharovns@susu.ru.

Свиридюк Георгий Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, научно-исследовательская лаборатория неклассических уравнений математической физики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, e-mail: sviridiukga@susu.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0795-2277>.

АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧИСЕЛ НАЧАЛЬНО-КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ВОЛНОВОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ, ЗАДАННОГО НА ГРАФЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ РЕБРАМИ

С.И. Кадченко, Л.С. Рязанова

Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова,

г. Магнитогорск, Российская Федерация

E-mail: sikadchenko@mail.ru

Аннотация. Разработаны алгоритмы вычисления значений собственных чисел начально-краевых задач для волнового дифференциального уравнения, заданного на графе-звезда с изменяющимися во времени длинами ребер. С помощью замены переменных удалось свести рассматриваемые спектральные задачи к начально-краевым задачам с неподвижными ребрами. При этом были получены формулы, позволяющие находить собственные числа для волнового дифференциального уравнения, заданного на графе-звезда с изменяющимися во времени ребрами с любыми порядковыми номерами. Полученные в работе формулы вычисления собственных чисел позволят разработать алгоритмы решения обратных спектральных задач, заданных на квантовых графах с изменяющимися ребрами.

Ключевые слова: графы; собственные числа и собственные функции; дискретные и самосопряженные операторы; метод регуляризованных следов; метод Галеркина.

Введение

В работе разработаны методы нахождения собственных чисел начально-краевых задач для волнового дифференциального уравнения, заданного на графе-звезда с переменными ребрами. При моделировании многих природных явлений и процессов возникает необходимость нахождения собственных чисел дифференциальных операторов в частных производных. Поэтому есть потребность разработки вычислительно эффективных алгоритмов их нахождения. В статье методика численного решения спектральных задач, заданных на квантовых графах с постоянными ребрами, описанными в статьях [1–4], применена для спектральных задач на квантовых графах с изменяющимися во времени длинами ребер. Построенный метод позволит распространить ранее полученную методику решения обратных спектральных задач на графах с неподвижными ребрами на графы с изменяющимися ребрами [5].

Рассмотрим некоторые необходимые нам в дальнейшем определения и понятия. Пусть задан конечный ориентированный граф-звезда $G = G(V, E)$ имеющий j_0 ребер и $j_0 + 1$ вершин. Через $E = (E_1, E_2, \dots, E_{j_0})$ обозначим множество ребер графа G , а через $V = V(V_i)_{i=1}^{j_0}$ – множество его вершин. Нас будут интересовать два вида графа G : граф G_0 , у которого длины ребер L_j постоянные и равны l_j ; граф G_t , у которого длины ребер изменяются во времени по законам

$$L_j(t) = l_j L(t), \quad l_j \in \mathbb{R}_+, \quad j = \overline{1, j_0}. \quad (1)$$

Здесь $L(t)$ – дважды дифференцированная функция такая, что все ребра E графа G_t всегда остаются положительными. Введем два вида пространства функций: $L^2(G)$ – пространство суммируемых с квадратом вектор-функций заданных на графе G со скалярной произведением

$$(u, v) = \sum_{j=1}^{j_0} \int_0^{l_j} u_j(y_j) v_j(y_j) dy_j, \quad u = (u_1(y_1), u_2(y_2), \dots, u_{j_0}(y_{j_0})), \quad y_j \in (0, l_j), \quad j = \overline{1, j_0};$$

$L^{2,1}(\Gamma)$ – пространство вектор-функций f из $\Gamma = G \times (0, t)$ со скалярным произведением

$$(f, w) = \int_0^t \sum_{j=1}^{j_0} \int_0^{l_j} f_j(x_j, \tau) w_j(x_j, \tau) dx_j d\tau, \quad f = (f_1(x_1, t), f_2(x_2, t), \dots, f_{j_0}(x_{j_0}, t)), \quad x_j \in (0, L_j(t)), \quad j = \overline{1, j_0}.$$

Математика

На графе G_0 рассмотрим прямую спектральную задачу для вектор-оператора $S = (S_1, S_2, \dots, S_{j_0})$

$$S\varphi = -\frac{d^2\varphi}{dy^2}, \quad \varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{j_0}), \quad y = (y_1, y_2, \dots, y_{j_0}), \quad j = \overline{1, j_0}$$

с областью определения $D_s = L^2(G_0)$. Нас будут интересовать собственные числа λ_n и собственные вектор-функции φ_n вектор-оператора S . Используя краевые задачи

$$-\frac{d^2\varphi_j}{dy_j^2} = \lambda\varphi_j, \quad y_j \in (0, l_j), \quad j = \overline{1, j_0}, \quad (2)$$

$$\varphi_1(0) = \varphi_2(0) = \dots = \varphi_{j_0}(0) = 0, \quad (3)$$

$$\varphi_1(l_1) = \varphi_2(l_2) = \dots = \varphi_{j_0}(l_{j_0}), \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{j_0} \frac{d\varphi_j}{dy_j}(l_j) = 0 \quad (5)$$

нетрудно показать, что собственные числа λ_n краевых задач являются корнями трансцендентного уравнения

$$\sum_{j=1}^{j_0} \operatorname{ctg}(\lambda l_j) = 0, \quad (6)$$

а соответствующие компоненты собственных вектор-функций φ_n имеют вид

$$\varphi_{jn} = \frac{B_{jn}}{\sin(\lambda_n l_j)} \cos(\lambda_n y_j), \quad B_{jn} = \sqrt{2 \frac{l_j - \sin(2\lambda_n l_j)/(2\lambda_n)}{\sin^2(\lambda_n l_j)}}, \quad j = \overline{1, j_0}. \quad (7)$$

При этом система вектор-функций $\{\varphi_n\}_{n=1}^{\infty}$ ортонормированная на $L^2(G_0)$. Кроме того, используя теоремы 7, 8, доказанные в статье [6], можно показать, что система функций $\{\varphi_n\}_{n=1}^{\infty}$ является базисом пространства $L^2(G_0)$.

Далее на графе G_0 с ребрами постоянной длины l_j , введем вектор-оператор $M = (M_1, M_2, \dots, M_{j_0})$ [7, 8]

$$M\omega = \frac{\partial^2\omega}{\partial t^2} - \frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}, \quad \omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{j_0}), \quad y = (y_1, y_2, \dots, y_{j_0}), \quad j = \overline{1, j_0} \quad (8)$$

с областью определения $D_M = L^{2,1}(\Gamma)$, где функции $\omega_j(y_j, t) \in L^{2,1}(0, l_j) \times (0, t)$. На ребрах графа G_0 найдем решение следующих начально-краевых задач

$$\frac{\partial^2\omega_j}{\partial t^2} - \frac{\partial^2\omega_j}{\partial y_j^2} = 0, \quad \omega_j = \omega_j(y_j, t), \quad j = \overline{1, j_0}, \quad (9)$$

$$\omega_1(0, t) = \omega_2(0, t) = \dots = \omega_{j_0}(0, t) = 0, \quad (10)$$

$$\omega_1(l_1, t) = \omega_2(l_2, t) = \dots = \omega_{j_0}(l_{j_0}, t), \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^{j_0} \frac{\partial\omega_j}{\partial y_j} \Big|_{y=l_j} = 0, \quad (12)$$

$$\omega_j(y_j, 0) = \zeta(y_j), \quad \frac{\partial\omega_j}{\partial t} \Big|_{t=0} = \xi(y_j). \quad (13)$$

Граничные условия (10) определяют условие Дирихле на крайних вершинах графа G_0 , а (11) и (12) – условия непрерывности и Кирхгофа. Условия (13) являются начальными. Используя метод разделения переменных для (9)–(12), найдем все функции, которые удовлетворяют уравнению (9) и граничным условиям (10)–(12)

$$\omega_{jn}(y_j, t) = [a_n \cos(\lambda_n t) + b_n \sin(\lambda_n t)] \varphi_{jn}(y_j). \quad (14)$$

Составим функциональные ряды

$$\omega_j(y_j, t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(\lambda_n t) + b_n \sin(\lambda_n t)] \varphi_{jn}(y_j), \quad j = \overline{1, j_0}. \quad (15)$$

Коэффициенты a_n и b_n найдем, используя начальные условия (12) и (13)

$$a_n = \sum_{j=1}^{j_0} \int_0^{l_j} \zeta(y_j) \varphi_{jn}(y_j) dy_j, \quad b_n = \frac{1}{\lambda_n} \sum_{j=1}^{j_0} \int_0^{l_j} \xi(y_j) \varphi_{jn}(y_j) dy_j. \quad (16)$$

Таким образом, найдено решение начально-краевой $M \omega = 0$ с начально-краевыми условиями (10)–(13).

Нахождение собственных чисел

В данном разделе опишем методику вычисления приближенных значений собственных чисел для вектор-оператора $F = (F_1, F_2, \dots, F_{j_0})$:

$$F \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}, \quad \psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{j_0}), \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_{j_0}), \quad j = \overline{1, j_0} \quad (17)$$

с областью определения $L^{2,1}(G_t)$. Для того чтобы найти собственные числа μ , рассмотрим начально-краевые задачи, заданные на подвижных ребрах графа G_t :

$$\frac{\partial^2 \psi_j}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \psi_j}{\partial x_j^2} = \mu \psi_j, \quad \psi_j = \psi_j(x_j, t), \quad x_j = (0, L_j(t)), \quad j = \overline{1, j_0}, \quad (18)$$

$$\psi_1(0, t) = \psi_2(0, t) = \dots = \psi_{j_0}(0, t) = 0, \quad (19)$$

$$\psi_1(L_1(t), t) = \psi_2(L_2(t), t) = \dots = \psi_{j_0}(L_{j_0}(t), t), \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^{j_0} \frac{\partial \psi_j}{\partial x_j} \Big|_{x=L_j(t)} = 0, \quad (21)$$

$$\psi_j(x_j, 0) = \zeta(x_j), \quad \frac{\partial \psi_j}{\partial t} \Big|_{t=0} = \xi(x_j). \quad (22)$$

При записи граничных условий (19)–(21) учитывалось, что центр графа G_t фиксирован, а крайние его вершины движутся.

Для того, чтобы найти решение начально-краевых задач (18)–(22), заданных на G_t с подвижными ребрами, мы воспользуемся полученным решением задач (9)–(13), заданных на неподвижных ребрах. Для этого, сделав замену переменных

$$y_j = x_j / L(t), \quad t_1 = t \quad (23)$$

в начально краевых задачах (18)–(22), перейдем к соответствующим задачам для графа G_t с постоянными ребрами [7–9]. В результате преобразований получим следующие начально-краевые задачи на графе-звезда с постоянными ребрами:

$$\frac{\partial^2 \psi_j}{\partial t^2} + \frac{\dot{L}^2(t) y_j^2 - 1}{L^2(t)} \frac{\partial^2 \psi_j}{\partial y_j^2} - 2 \frac{\dot{L}(t)}{L(t)} y_j \frac{\partial^2 \psi_j}{\partial y_j \partial t} + \frac{2\dot{L}^2(t) - L(t)\ddot{L}(t)}{L^2(t)} y_j \frac{\partial \psi_j}{\partial y_j} = \mu \psi_j, \quad \psi_j = \psi_j(y_j, t), \quad 0 < y_j < 1, \quad (24)$$

$$\psi_1(0, t) = \psi_2(0, t) = \dots = \psi_{j_0}(0, t) = 0, \quad (25)$$

$$\psi_1(1, t) = \psi_2(1, t) = \dots = \psi_{j_0}(1, t), \quad (26)$$

$$\sum_{j=1}^{j_0} \frac{\partial \psi_j}{\partial x_j} \Big|_{x=l_j} = 0, \tag{27}$$

$$\psi_j(y_j, 0) = \zeta(y_j), \quad \frac{\partial \psi_j}{\partial t} \Big|_{t=0} = \xi(y_j). \tag{28}$$

Функции $\psi_j(y_j, t)$ для задач (24)–(28) удовлетворяют граничным условиям с постоянными ребрами. Поэтому после замены переменных начально-краевая задача (18)–(22) для графа G_t с изменяющимися ребрами свелась к задаче с постоянными ребрами.

Составим из рассмотренного ранее вектор-функции $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{j_0})$ следующую систему $\{\omega_n\}_{n=1}^\infty$ с компонентами

$$\left\{ \omega_{jn}(y_j, t) = [a_n \cos(\lambda_n t) + b_n \sin(\lambda_n t)] \varphi_{jn}(y_j) \right\}_{j=1}^\infty, \tag{29}$$

которые ортогональны в пространстве $L^{2,1}(G_t)$ за счет функций $\varphi_{jn}(y_j)$. Нормализуем систему функций (29). Для этого вычислим интегралы

$$\begin{aligned} \int_0^t \sum_{j=1}^{j_0} \int_0^{l_j} \omega_{jn}^2(y_j, \tau) dy_j d\tau &= \int_0^t [a_n \cos(\lambda_n \tau) + b_n \sin(\lambda_n \tau)]^2 d\tau \sum_{j=1}^{j_0} \int_0^{l_j} \varphi_{jn}^2(y_j) dy_j = \\ &= \int_0^t [a_n \cos(\lambda_n \tau) + b_n \sin(\lambda_n \tau)]^2 d\tau = [a_n b_n \sin^2(\lambda_n t) + 0,25(a_n^2 - b_n^2) \sin(2\lambda_n t) + 0,5(a_n^2 + b_n^2) \lambda_n t] / \lambda_n = A_n. \end{aligned}$$

Тогда функции $\tilde{\omega}_n = \frac{1}{\sqrt{A_n}} \omega_n$ будут образовывать ортонормированную систему $\{\tilde{\omega}_n\}_{n=1}^\infty$ в пространстве $L^{2,1}(G_t)$.

В работах [1–4] разработана методика вычисления собственных чисел дискретных полуограниченных операторов, позволяющая находить необходимые значения собственных чисел спектральной задачи

$$Uu = \mu u, \quad Gu|_\Gamma = 0 \tag{30}$$

используя теорему.

Теорема. Приближенные собственные значения $\tilde{\mu}_n$ задачи (30) находятся по линейным формулам

$$\tilde{\mu}_n = (Uv_n, v_n) + \tilde{\delta}_n, \quad n \in N, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} |\tilde{\delta}_n| = 0, \tag{31}$$

где $\tilde{\delta}_n = \sum_{k=1}^{n-1} [\tilde{\mu}_k(n-1) - \tilde{\mu}_k(n)]$; $\tilde{\mu}_k(n)$ – n -е приближение по Галеркину к соответствующим значениям μ_k спектральной задачи (30); функции v_k образуют ортонормированные базисы пространств $H_n \subseteq H$, удовлетворяющие граничным условиям (30); U – дискретный полуограниченный дифференциальный оператор, заданный в гильбертовом пространстве H .

Для нахождения формул, по которым можно вычислять собственные значения вектор-оператора F , воспользуемся вышеприведенной теоремой. В результате получим

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_n(t) &= \int_0^t \int_{G_t} F(\tilde{\omega}_n(y, \tau)) \tilde{\omega}_n(y, \tau) dy d\tau = \int_0^t \sum_{j=1}^{j_0} \int_0^{l_j} \left[\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \tilde{\omega}_{jn}(y_j, \tau) + \frac{\dot{L}(\tau) y_j^2 - 1}{L^2(\tau)} \frac{\partial^2}{\partial y_j^2} \tilde{\omega}_{jn}(y_j, \tau) \right. \\ &\quad \left. - 2 \frac{\dot{L}(\tau)}{L(\tau)} y_j \frac{\partial^2 \tilde{\omega}_{jn}(y_j, \tau)}{\partial y_j \partial \tau} + \frac{2\dot{L}^2(\tau) - L(\tau)\ddot{L}(\tau)}{L^2(\tau)} y_j \frac{\partial \tilde{\omega}_{jn}(y_j, \tau)}{\partial y_j} \right] \tilde{\omega}_{jn}(y_j, \tau) dy_j d\tau + \tilde{\delta}_n(t), \quad n \in N. \end{aligned} \tag{32}$$

Используя формулы (32), можно вычислить значения собственных чисел вектор-оператора F , заданного на графе G_t с изменяющимися во времени длинами ребер, в необходимый момент времени и необходимого порядка.

Литература

1. Kadchenko, S.I. Computation of Eigenvalues of Discrete Lower Semibounded Operators / S.I. Kadchenko, G.A. Zakirova // Applied Mathematical Sciences. – 2016. – Vol. 10, no. 7. – P. 323–329.
2. Кадченко, С.И. Вычисление значений собственных функций дискретных полуограниченных операторов методом регуляризованных следов / С.И. Кадченко, С.Н. Какушкин // Вестник Самарского Университета. Естественная серия. – 2012. – № 6(97). – С. 13–21.
3. Кадченко, С.И. Вычисление собственных значений возмущенных дискретных полуограниченных операторов / С.И. Кадченко, И.И. Кинзина // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2006. – Т. 46, № 7. – С. 1265–1273.
4. Алгоритмы вычисления собственных значений дискретных полуограниченных операторов заданных на квантовых графах / С.И. Кадченко, А.В. Ставцова, Л.С. Рязанова, В.В. Дубровский // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 16–25.
5. Кадченко, С.И. Численный метод решения обратных задач, порожденных возмущенными самосопряженными возмущенными операторами, методом регуляризованных следов / С.И. Кадченко // Вестник Самарского университета. Естественная серия. – 2013. – № 6(107). – С. 23–30.
6. Провоторов, В.В. Собственные функции задачи Штурма–Лиувилля на графе-звезде / В.В. Провоторов // Матем. сб. – 2008. – Т. 199, № 10. – pp. 105–126.
7. Keating, J.P. Fluctuation Statistics for Quantum Star Graphs / J.P. Keating // Quantum Graphs and Their Applications. Contemporary Mathematics. – 2006. – Vol. 415. – P. 191–200.
8. Time-Dependent Quantum Graph / D.U. Matrasulov, J.R. Yusupov, K.K. Sabirov, Z.A. Sobirov // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2015. – Том 6, Вып. 2. – С. 173–181.
9. Никифоров, Д.С. Модель квантовых графов с ребрами меняющейся длины: дис...канд. тех. наук / Д.С. Никифоров. – СПб, 2018. – 125 с.

Поступила в редакцию 8 октября 2024 г.

Сведения об авторах

Кадченко Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и информатики, Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: sikadchenko@mail.ru.

Рязанова Любовь Сергеевна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики, Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: ryazanovals23@gmail.com.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2024, vol. 16, no. 4, pp. 29–34

DOI: 10.14529/mmph240404

ALGORITHMS FOR CALCULATING THE EIGENVALUES OF INITIAL-BOUNDARY VALUE PROBLEMS FOR A WAVE DIFFERENTIAL EQUATION SET IN A GRAPH WITH VARYING EDGES

S.I. Kadchenko, L.S. Ryazanova

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: sikadchenko@mail.ru

Abstract. The paper develops algorithms for calculating the eigenvalues of initial-boundary value problems for a wave differential equation set in a star graph with time-varying edge lengths. The change of variables helped to reduce the considered spectral problems to initial-boundary value problems with

fixed edges. The obtained formulas were used to find eigenvalues for a wave differential equation set in a star graph with time-varying edges with any ordinal numbers. The formulas for calculating the eigenvalues will allow developing algorithms for solving inverse spectral problems set in quantum graphs with varying edges.

Keywords: graphs; eigenvalues and eigenfunctions; discrete and self-conjugate operators; regularized trace method; Galerkin method.

References

1. Kadchenko S.I., Zakirova G.A. Computation of Eigenvalues of Discrete Lower Semibounded Operators. *Applied Mathematical Sciences*, 2016, Vol. 10, no. 7, pp. 323–329. DOI: 10.12988/ams.2016.510625
2. Kadchenko S.I., Kakushkin S.N. The Calculating of Meanings of Eigen Functions of Discrete Semibounded from Below Operators via Method of Regularized Traces. *Vestnik SSU*, 2012, no. 6(97), pp. 13–21.
3. Kadchenko S.I., Kinzina I.I. Computation of Eigenvalues of Perturbed Discrete Semibounded Operators. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2006, Vol. 46, Iss. 7, pp. 1200–1206. DOI: 10.1134/S0965542506070116
4. Kadchenko S.I., Stavtceva A.V., Ryazanova L.S., Dubrovskii V.V. Algorithms for the Computation of the Eigenvalues of Discrete Semi-Bounded Operators Defined on Quantum Graphs. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematics. Mechanics. Physics"*, 2023, Vol. 15, no. 1, pp. 6–25. (in Russ.). DOI: 10.14529/mmph230102
5. Kadchenko S.I. Numerical Method for the Solution of Inverse Problems Generated by Perturbations of Self-Adjoint Operators by Method of Regularized Traces. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Estestvenno-Nauchnaya Seriya*, 2013, no. 6(107), pp. 23–30. (in Russ.).
6. Provotorov V.V. Eigenfunctions of the Sturm-Liouville Problem on a Star Graph. *Sbornik: Mathematics*, 2008, Vol. 199, Iss. 10, pp. 1523–1545. DOI: 10.1070/SM2008v199n10ABEH003971
7. Keating J.P. Fluctuation Statistics for Quantum Star Graphs. Quantum graphs and their applications. *Contemporary Mathematics*, 2006, Vol. 415, pp. 191–200. DOI:10.1090/conm/415/07869
8. Matrasulov D.U., Yusupov J.R., Sabirov K.K., Sobirov Z.A. Time-Dependent Quantum Graph. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2015, Vol. 6, Iss. 2, pp. 173–181. DOI: 10.17586/2220-8054-2015-6-2-173-181
9. Nikiforov D.S. *Model' kvantovykh grafov s rebrami menyayushcheyasya dliny: dis....kand. tekhn. nauk* (A Model of Quantum Graphs with Edges of Varying Length: cand. engineering sci. diss.). Saint-Petersburg, 2018, 125 p. (in Russ.).

Received October 8, 2024

Information about the authors

Kadchenko Sergey Ivanovich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Applied Mathematics and Informatics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: sikadchenko@mail.ru.

Ryazanova Lyubov' Sergeevna is Cand. Sc. (Pedagogical), Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Informatics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: ryazanovals23@gmail.com.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В СТЕКЛЯННЫХ ИЗОЛЯТОРАХ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА

А.В. Коржов, В.А. Сурин, М.А. Ческидова, П.В. Лонзингер, В.И. Сафонов, К.Н. Белов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

E-mail: surinva@susu.ru

Аннотация. Представлен алгоритм обнаружения дефектов в стеклянных изоляторах с помощью компьютерного зрения. Изоляторы, являющиеся ключевыми элементами электрических сетей, подвержены различным дефектам, таким как пузыри, сколы и деформации. Подобные повреждения могут значительно снижать срок эксплуатации изоляторов. В традиционных производственных условиях данные дефекты выявляются вручную, что снижает производительность и увеличивает вероятность ошибок из-за человеческого фактора.

Для решения проблемы, связанной с ограничениями ручного контроля, был разработан алгоритм, основанный на применении нейронной сети. Основная задача алгоритма заключается в автоматическом выявлении дефектов, оказывающих существенное влияние на механические и электроизоляционные свойства изделий.

Был собран набор данных для обучения нейронной сети и дополнен сгенерированными изображениями для увеличения выборки расположения и формы рассматриваемых дефектов. В работе подробно описаны шаги предобработки данных, включающие повышение контрастности для увеличения обнаружения дефектов и уменьшение шумов. Для обработки дефектов различной площади и формы, описывается процесс разбиения на фрагменты. Представленное в работе разбиение позволяет обнаруживать дефекты различных размеров по отношению к размеру изолятора.

Ключевые слова: обнаружение дефектов; компьютерное зрение; ОМНМ; обобщенный метод наименьших модулей.

Введение

Изоляторы являются одной из важнейших частей электрических сетей. Любой дефект, расположенный внутри или на поверхности изделия, может повлиять на механические и электроизоляционные качества этого изделия. В настоящее время для определения наличия дефектов, включающих пузыри, сколы, складки, нарушение формы, используется визуальный осмотр человеком. В условиях конвейерного производства такой способ вносит определенные ограничения на производительность линии ввиду большого объема операций, выполняемых персоналом при осмотре заготовки, и температуры заготовки после закалки.

Для увеличения производительности при осмотре обнаруживают и фиксируют только первый дефект, по которому заготовку можно отнести к браку. Соответственно, полной картины дефектов в заготовках в таких условиях получить невозможно. Дополнительно влияет человеческий фактор, к которому можно отнести, например, усталость глаз. Добиться постоянно высокого уровня внимательности сотрудника, осуществляющего проверку заготовок, невозможно.

Автоматизация процесса контроля качества на основе компьютерного зрения обладает рядом преимуществ перед ручной проверкой [1]. Теоретически такой подход позволит увеличить скорость проверки дефектов. Отсутствие в процессе проверки человеческого фактора решает ряд ранее указанных проблем. Все обнаруженные компьютерным зрением дефекты будут фиксироваться, что позволит получать более полную картину о дефектах в заготовках, возникающих во время процесса отливки, формовки и закалки изоляторов.

Задачи обнаружения объектов на изображении в настоящее время наиболее эффективно решаются с помощью нейронных сетей [2]. Стандартный метод действий для детекции объектов

при обучении нейронных сетей заключается в сборе исходных данных и их разметки. Однако рассматриваемые в данной статье объекты являются прозрачными. При получении цифрового изображения прозрачного объекта возникает ряд проблем, которые требуется учитывать.

Особую роль играет освещение, которое, отражаясь от объекта съемки, проходит через объектив цифровой камеры и формирует изображение на светочувствительной матрице. Прозрачные объекты отражают свет не полностью, остальной свет проходит сквозь прозрачный объект. Поэтому снимки прозрачных объектов будут характеризоваться низкой контрастностью. Контрастность характеризует степень отличимости некоторого объекта от фона и является одной из основных характеристик изображений [3]. Чем выше контрастность, тем проще отличить дефект на фоне окружающей его области прозрачного объекта, соответственно, задача обнаружения упрощается. Следовательно, требуется подбирать вариант освещения, при котором контрастность прозрачного объекта и деталей этого объекта на получаемом изображении будет высокой. При этом стоит избегать засвеченных участков изображения (бликов), яркость которых выше предела чувствительности цифровой матрицы при выбранных вручную или автоматически камерой параметров съемки. Блики появляются вследствие отражения поверхностью объекта света от источника прямо в объектив камеры.

Появление бликов можно избежать, правильно выстроив свет при съемке изображения, но другие помехи также могут стать проблемой при последующем анализе изображений. К помехам, которые могут стать препятствием к поиску и идентификации дефектов, можно отнести цифровой шум, низкую контрастность, геометрические искажения и низкое качество изображений. Их исправление в некоторых случаях является необходимостью перед использованием методов и алгоритмов поиска и идентификации дефектов.

Таким образом, наличие шумов может существенно ухудшить качество анализа, а недостаточная контрастность, особенно при работе с прозрачными объектами, усложняет процесс обнаружения дефектов [4]. Одним из способов повышения контрастности изображений является применение методов компьютерной обработки. Тем не менее увеличение контрастности может привести к росту уровня шумов, что создает необходимость в использовании методов шумоподавления [5]. Следовательно, процесс улучшения изображений для обнаружения дефектов требует сбалансированного подхода: с одной стороны, необходимо усилить контраст для более точного выявления дефектов, а с другой стороны, минимизировать возникающие при этом шумы, чтобы избежать ошибок анализа.

Сбор данных и предобработка

Данные представляют собой набор изображений изоляторов с дефектами различного типа. Так как расположение и форма дефектов могут отличаться, то для увеличения набора данных кроме реальных изображений использовались сгенерированные данные [6], а также применялась аугментация с поворотом изображений. Растяжение и сжатие использовать недопустимо, так как геометрия заготовки меняться не должна.

Перед обучением нейронной сети каждое изображение обрабатывалось в несколько этапов для уменьшения шумов и увеличения контрастности (рис. 1). Полученные фотографии преобразовывались из формата RGB в формат HSV, который состоит из тона, насыщенности и яркости

($y_{hsv} = \|y_{ij}\|$, где $(i, j) [y_{i,j} = (h_{ij}, s_{ij}, v_{ij}), h, s, v \dots]$). Преимуществом модели HSV является возможность отдельной работы с каналами яркости и цвета, что позволяет отдельно работать с каждым из них. Канал яркости представляет собой двумерную матрицу, элементами которой являются числа в пределах от 0 до 255.

Существующие методы шумоподавления чаще всего применяются для изображений в градациях серого или RGB-изображений. Однако сигнал, поступающий с цифровых матриц,



Рис. 1. Основной алгоритм обучения нейронной сети с предобработкой изображений

имеет иную структуру и отличается от стандартных форматов хранения изображений в компьютерах. Получаемые изображения на цифровой матрице называются RAW-изображениями. При работе с необработанными изображениями, получаемыми напрямую с матрицы камеры, каждое изображение содержит большее количество бит, выделенных на кодирование цвета. Это позволяет получить больше информации об объекте, что может положительно сказаться на эффективности методов борьбы с шумом и повышения контраста.

Для повышения контрастности изображений использовался метод фильтрации изображений на основе обобщенного метода наименьших модулей (ОМНМ) [6], который рассчитывается по следующей формуле:

$$\hat{y}_{ij} = \arg \min_a \sum_{(l,k) \in U_{ij}} \rho_{\text{ОМНМ}}(|y_{lk} - a|), i = [1:n], j = [1:m], \quad (1)$$

где \hat{y}_{ij} – сглаженные с помощью ОМНМ-фильтра значения яркостей пикселей изображения размером $N \times M$ пикселей; U_{ij} – окрестность сглаживаемой точки y_{ij} ; l и k – координаты пикселя в области U_{ij} ; y_{lk} – фактические значения яркости пикселя; a – искомый сигнал; $\rho_{\text{ОМНМ}}(x) = \arctg(|x|^\alpha / \beta)$, $\alpha > 0$ и $\beta > 0$ – параметры на основе характеристик изображения и перепада, вычисляемые по формулам (2)–(3):

$$\alpha = \begin{cases} 0,7, A = 0, \\ 0,7 \left(\frac{3\sigma - A}{3\sigma} \right) + 1,6 \left(1 - \frac{3\sigma - A}{3\sigma} \right), 0 < A \leq 3\sigma, \\ 1,6, A > 3\sigma, \end{cases} \quad (2)$$

$$\beta = 10k + \frac{\sigma h}{100k}, \quad (3)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение (уровень) шума в выбранной области изображения; A – нижняя граница уровня яркости перепада; $k = 64$ – умножающий коэффициент для максимально допустимой 14-битной глубины яркости цвета. На производствах чаще всего используются 10- или 12-битные матрицы, для них коэффициент k будет равен 4 или 16 соответственно.

Для нормализации гистограммы изображения применялся алгоритм CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) при помощи функции `cv.createCLAHE`, содержащейся в библиотеке OpenCV. Подбор оптимального размера блока для работы алгоритма CLAHE может быть сложной задачей в случае произвольных изображений. Однако для анализа изображений определенных объектов можно зафиксировать параметры съемки, такие как освещение, светочувствительность и выдержка. Поскольку исследуемые объекты являются однотипными, был подобран наиболее подходящий размер блока для алгоритма и применялся ко всем последующим изображениям данного типа с одинаковыми параметрами. В результате применения алгоритма CLAHE контрастность изображения увеличивается, что значительно упрощает дальнейшую обработку (рис. 2).

Собранный набор реальных данных был обработан для повышения контрастности и составил 236 изображений размером 2048×2048 пикселей. В наборе данных имелись изоляторы с дефектами типа скол, пузырь, вкрапление. Также имелось незначительное количество дефектов других типов, но их количество было сильно меньше. В дальнейшем проводилась разметка реальных данных. Все дефекты были помечены как единый класс.

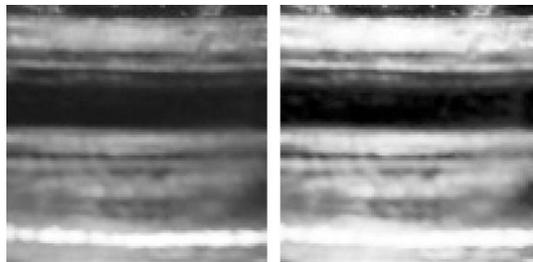


Рис. 2. Сравнение контрастности изображений после применения алгоритма CLAHE

Алгоритм обучения и работы нейронной сети

В результате разметки собранного набора данных были созданы маски, содержащие дефекты. Для проверки структурной целостности объекта и выявления дефектов типа скол, пузырь, вкрапление был разработан нейросетевой алгоритм на основе нейронной сети YOLOv8.

Математика

Традиционный подход при обнаружении объектов в изображении заключается в свертке изображения до оптимального разрешения используемой нейронной сети. При этом при понижении разрешения теряется информация, что не подходит для обнаружения дефектов малых размеров. Предлагаемый алгоритм позволяет избежать потери информации при работе нейронной сети, но при этом значительно увеличивает время обработки одного изображения.

Каждое изображение и соответствующая маска разбиваются на фрагменты следующим образом. Задается окно, вырезающее фрагмент размером 1024×1024 . Данные фрагменты вырезаются с шагом 512 и преобразуются к размеру 64×64 пикселей. Затем размер окна и шага уменьшается в два раза. Данный процесс повторяется до тех пор, пока размер окна не достигнет необходимого размера фрагментов 64×64 пикселей, так как дефекты могут иметь небольшой размер относительно всего объекта (рис. 3).

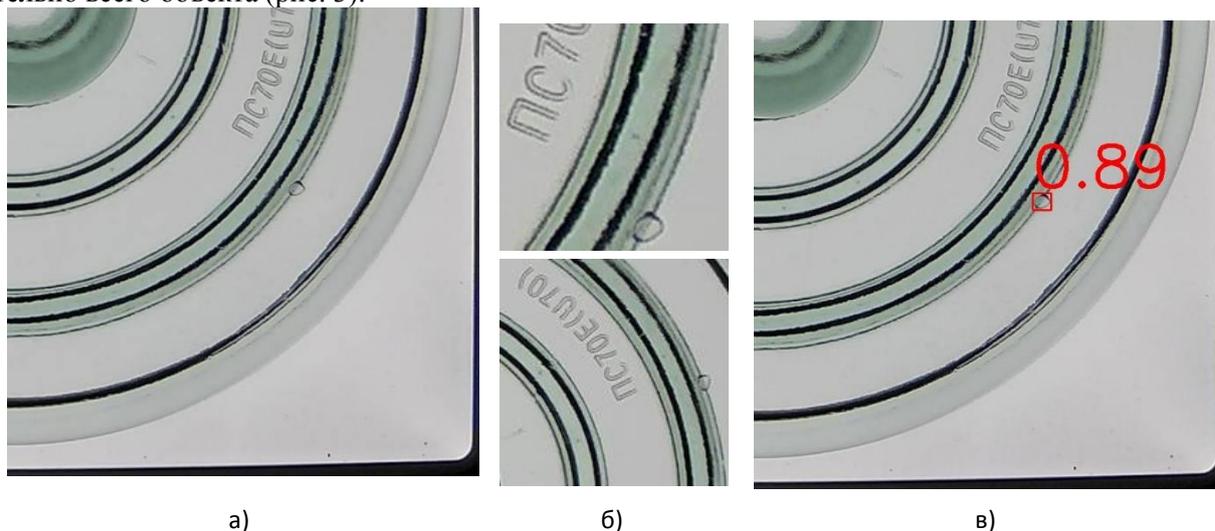


Рис. 3. Процесс разбиения изображений:
а) исходное изображение; б) полученные фрагменты; в) детекция дефекта

На каждом фрагменте маски подсчитывается количество пикселей, содержащих дефект. Если их количество не превышает 70 % от общего количества дефекта, расположенного в этих координатах, то фрагмент оригинального изображения удаляется. На рис. 4 показан пример разбиения, в котором в первый фрагмент не сохранится, так как содержит малую часть определяемого дефекта. В результате каждое изображение разбивается на фрагменты, содержащие от 70 % дефекта, либо фрагменты, не содержащие дефекта вовсе.

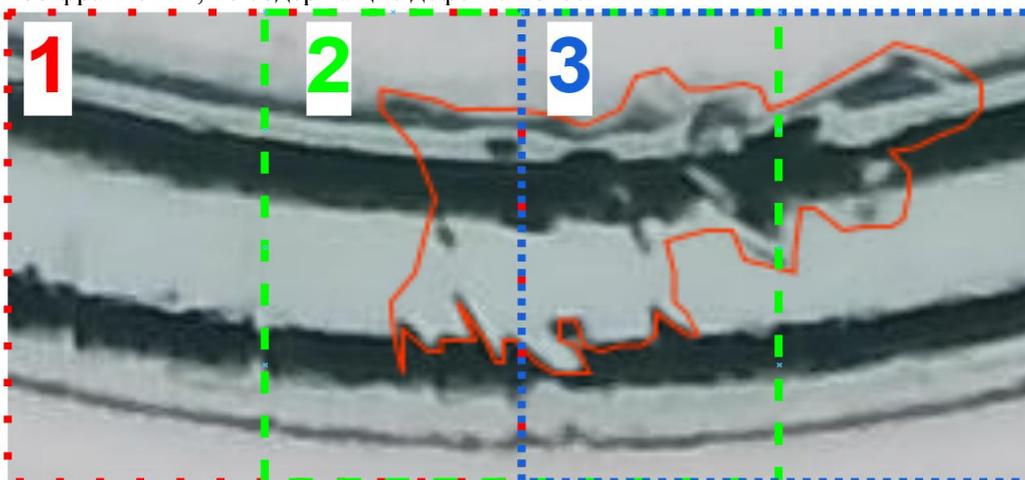


Рис. 4. Пример разбиения на фрагменты

Для увеличения обучающей выборки использовались изображения, сгенерированные по чертежам при помощи программы Blender3D [7]. Было сгенерировано 60 изображений стеклянных изоляторов. Такой подход позволил расширить местоположение и форму рассматриваемых дефектов в собранном наборе данных. Полученные изображения разбивались на обучающую, тес-

товую и валидационную выборки в соотношении 70:20:10 и подавались на вход нейронной сети для обучения. В валидационной выборке смоделированные изображения отсутствуют.

Процесс обнаружения дефектов с помощью обученной нейронной сети также включает разбиение на фрагменты исходного изображения и не требует наличия маски (рис. 5).

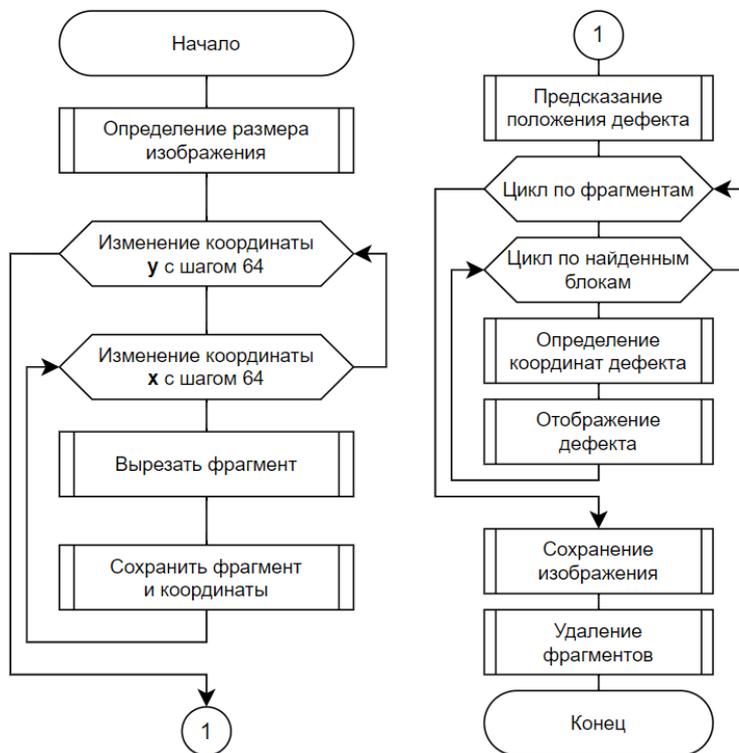


Рис. 5. Алгоритм нахождения дефектов при помощи нейронной сети

Результатом работы нейронной сети становится набор кандидатов на дефекты, каждому из которых соответствует уровень уверенности нейронной сети и координаты в пикселях этого кандидата на изображении. Уверенность о наличии дефекта измеряется в диапазоне от 0 до 1. При уверенности, достигающей некоторого порога, который был выбран равным 0,8, алгоритм считает кандидата за дефект и отображает на изображении. На валидационной выборке при указанном пороге точность обнаружения дефектов составила 96 %.

Разработанный алгоритм позволяет обнаруживать дефекты в стеклянных изоляторах размером от 1,8 мм при исходном разрешении изображения 2048 × 2048 пикселей и физическом диаметре стеклдетали 255 мм, что составляет примерно 8 пикселей/мм. Таким образом, наименьший обнаруженный дефект составил 15 пикселей в диаметре. При увеличении соотношения разрешения к реальному размеру исследуемого объекта могут быть обнаружены дефекты меньшего размера.

Увеличение разрешения при неизменных размерах исследуемого объекта позволит обнаруживать дефекты малого размера, при этом вычислительная сложность алгоритма увеличится пропорционально увеличению количеству пикселей изображения. Скорость вычисления для изображения размером 2048 × 2048 пикселей составила 7 сек на 1 изображение при выполнении алгоритма на CPU с пиковой производительностью 2,15 TFlops. Перевод вычислений на GPU сократит время выполнения.

Заключение

В статье представлен алгоритм поиска дефектов в стеклянных изоляторах на основе нейронной сети. Используются алгоритмы предварительной обработки изображения для повышения контрастности и уменьшения шумов перед подачей его на вход нейронной сети. Предложен вариант разбиения исходного изображения на более мелкие участки, который позволил не терять полезную информацию, присутствующую на изображении исследуемого объекта. Это дало возможность обучить нейронную сеть, которая легла в основу алгоритма обнаружения дефектов.

Обучение происходило на реальных и смоделированных данных. Расширение обучающей выборки за счет синтетических данных дало положительный результат, и в дальнейшем планируется увеличивать количество синтетических данных в обучающей выборке.

Благодаря разбиению на фрагменты разработанный алгоритм позволяет обнаруживать дефекты различной формы и размеров. Минимальный обнаруженный на изображении дефект имеет размер 15 пикселей по длинной стороне. Физический размер обнаруживаемых дефектов зависит от соотношения разрешения и реального размера исследуемого объекта. Дальнейшее развитие алгоритма состоит в разбиении единого класса дефектов на несколько классов, что позволит не только их обнаруживать, но и классифицировать.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований № FENU-2023-0025 (2023025Г3)).

Литература

1. Diers J. A Survey of Methods for Automated Quality Control Based on Images / J. Diers, C. Pigorsch // International Journal of Computer Vision. – 2023. – Vol. 131, no. 10. – С. 2553–2581.
2. Retracted: Object Detection and Recognition using Deep Learning-Based Techniques / P. Sharma, S. Gupta, S. Vyas, M. Shabaz // IET Communications. – 2023. – Vol. 17, Iss.13. – P. 1589–1599
3. Анисимов, Б.В. Распознавание и цифровая обработка изображений / Б.В. Анисимов, В.Д. Курганов, В.К. Злобин. – М.: Высш. шк., 1983. – 295 с.
4. Обработка изображений с помощью OpenCV / Г.Б. Гарсия, О.Д. Суарес, Х.Л.Э. Аранда и др. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 408 с.
5. Блюштейн, Е.А. Применение нерезкого маскирования для повышения резкости изображения в компьютерной томографии / Е.А. Блюштейн, А.О. Мантуров // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 2с (64). – С. 313–318.
6. Сурин, В.А. Математическое моделирование фильтрации контрастных изображений на основе обобщенного метода наименьших модулей: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Сурин. – Челябинск: ЮУрГУ, 2023. – 150 с.
7. Коржов А.В. Получение данных для обучения системы технического зрения по выявлению газовых включений в стеклянной детали изолятора ПС-70Е / А.В. Коржов, П.В. Лонзингер, В.И. Сафонов и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2024. – Т. 24, № 2. – С. 27–36.

Поступила в редакцию 20 сентября 2024 г.

Сведения об авторах

Коржов Антон Вениаминович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, первый проректор – проректор по научной работе, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8504-9668>, e-mail: korzhovav@susu.ru.

Сурин Владимир Анатольевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и программирования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3091-5370>, e-mail: surinva@susu.ru.

Ческидова Мария Александровна – аспирант, преподаватель кафедры прикладной математики и программирования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-9400-9585>, e-mail: cheskidova@susu.ru.

Лонзингер Петр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-0961-926X>, e-mail: lonzingerpv@susu.ru.

Сафонов Валерий Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6452-9286>, e-mail: safonovvi@susu.ru.

Белов Кирилл Николаевич – аспирант, ассистент кафедры оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0003-1915-5061>, e-mail: belovkn@susu.ru.

DOI: 10.14529/mmp240405

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR DETECTING DEFECTS IN GLASS INSULATORS BASED ON COMPUTER VISION USING A NEURAL NETWORK APPROACH

A.V. Korzhov, V.A. Surin, M.A. Cheskidova, P.V. Lonzinger, V.I. Safonov, K.N. Belov
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation
E-mail: surinva@susu.ru

Abstract. The article presents an algorithm for detecting defects in glass insulators using computer vision. Insulators, which are key elements of electrical networks, are subject to various defects, such as bubbles, chips and deformations. Such damage can significantly reduce the service life of insulators. In traditional production conditions, these defects are detected manually, which reduces productivity and increases the likelihood of human factor-based errors.

To solve the problem related to manual control restraints, the authors developed an algorithm based on the use of a neural network. The main task of the algorithm is to automatically identify defects that have a significant impact on the mechanical and electrical insulation properties of products.

The authors collected a data set for training the neural network and supplemented it with generated images to increase the sample of the location and shape of the considered defects. The paper describes in detail the steps of data preprocessing, including augmenting the contrast to increase the detectability of defects and reducing noise. Fragmenting is described to process defects of various sizes and shapes. Such fragmenting allows detecting defects of different sizes relative to the insulator size.

Keywords: defect detection; computer vision; generalized method of least modules; GMLM.

References

1. Diers J., Pigorsch C. A Survey of Methods for Automated Quality Control Based on Images. *Int. J. Comput. Vis.*, 2023, Vol. 131, pp. 2553–2581. DOI: 10.1007/s11263-023-01822-w
2. Sharma P., Gupta S., Vyas S., Shabaz M. Retracted: Object Detection and Recognition using Deep Learning-Based Techniques. *IET Communications*, 2023, Vol. 17, Iss.13, P. 1589–1599. DOI: 10.1049/cmu2.12513
3. Anisimov B.V., Kurganov V.D., Zlobin V.K. *Raspoznavanie i tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* (Image Recognition and Digital Processing). Moscow, Vyssh. shk., 1983, 295 p. (in Russ.).
4. García G.B., Suarez O.D., Aranda J.L.E., Tercero J.S., Gracia I.S., Enano N.V. *Learning Image Processing with OpenCV*. Packt Publishing, 2015, 232 p.
5. Blyushteyn E.A., Manturov A.O. Application of Unsharp Masking to Image Sharpness Increasing in Computerized Tomography. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, Vol. 1, no. 2c (64), pp. 313–318. (in Russ.).
6. Surin, V.A. *Matematicheskoe modelirovanie fil'tratsii kontrastnykh izobrazheniy na osnove obobshchennogo metoda naimen'shikh moduley: dis. ... kand. tekhn. nauk* (Mathematical Modeling of Contrast Image Filtering Based on the Generalized Method of Least Modules: Cand. Engineering Sci. Diss.), Chelyabinsk: SUSU, 2023, 150 p. (in Russ.).
7. Korzhov A., Lonzinger P.V., Safonov V.I., Surin V.A., Cheskidova M.A., Belov K.N. Obtaining Data for Training the Vision System to Detect Gas Inclusions in the Glass Part of the PS-70E Insulator. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2024, Vol. 24, no. 2, pp. 27–36. DOI: 10.14529/power240203.

Received September, 20, 2024

Information about the authors

Korzhov Anton Veniaminovich is Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Power Plants, Networks and Power Supply Systems Department, Vice-Rector for Research, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8504-9668>, e-mail: korzhovav@susu.ru.

Surin Vladimir Anatol'evich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Senior Lecturer, Mathematics and Programming Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3091-5370>, e-mail: surinva@susu.ru.

Cheskidova Mariya Aleksandrovna is Post-graduate Student, Lecturer, Mathematics and Programming Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-9400-9585>, e-mail: cheskidova@susu.ru.

Lonzinger Petr Vladimirovich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Power Plants, Networks and Power Supply Systems Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-0961-926X>, e-mail: lonzingerpv@susu.ru.

Safonov Valeriy Ivanovich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Power Plants, Networks and Power Supply Systems Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6452-9286>, e-mail: safonovvi@susu.ru.

Belov Kirill Nikolaevich is Post-graduate Student, Assistant, Optoinformatics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0003-1915-5061>, e-mail: belovkn@susu.ru.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Е.В. Ларкин¹, А.В. Богомолов², А.Н. Привалов³, Т.А. Акименко¹

¹ Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация

² Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

³ Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация

E-mail: privalov.61@mail.ru

Аннотация. Исследуется вопрос синтеза математического обеспечения иерархического цифрового управления сложным технологическим объектом на основе универсальных контроллеров с гибким программированием. Для преодоления ограничений на быстродействие контроллеров, функционирующих в режиме реального времени, при усложнении законов управления и расширении классов управляемых объектов предложено разделение контроллеров на стратегический, тактический и функционально-логический иерархические уровни. Определены функции и построены алгоритмы обработки данных контроллерами каждого иерархического уровня. Показано, что согласованное функционирование исследуемой системы цифрового управления сводится к обмену данными между контроллерами разных уровней, осуществляемому программно, одинаково для контроллеров всех уровней. Получены зависимости для оценки периода перезапуска управляющих программ, работающих по гамильтонову циклу, а также задержки передачи данных для случая, когда на контроллерах тактического и функционально-логического уровней реализован алгоритм пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора. Показаны особенности управления режимами функционирования контроллеров тактического и функционально-логического уровней за счет реализации на стратегическом уровне нейронной сети.

Ключевые слова: цифровое управление; система управления; иерархические уровни управления; контроллер с гибким программированием; гамильтонов цикл; полумарковский процесс; нейронная сеть.

Одним из ключевых направлений развития современного производства является цифровизация промышленности, в том числе широкое внедрение цифровых систем управления, в качестве аппаратной платформы которых используются универсальные контроллеры с гибким программированием [1–3]. Помимо производства такие контроллеры широко применяются в киберфизических гетерогенных системах управления робототехническими комплексами специального назначения [4–10].

Реализация алгоритмов управления на универсальных контроллерах с гибким программированием позволяет управлять объектами практически любой структуры, не изменяя аппаратной части системы [11, 12]. Однако усложнение законов управления и расширение класса управляемых объектов ограничивается быстродействием контроллеров, функционирующих в режиме реального времени [13–15]. Это приводит к необходимости разделения задач управления по степени влияния на общую цель управления на стратегические, тактические и функционально-логические задачи [16]. В контроллерах с высоким быстродействием такое разделение может быть виртуальным, а контроллеры с ограниченным быстродействием должны быть организованы в иерархическую структуру с аналогичным разделением. Усложнение структуры приводит к удорожанию аппаратной части системы цифрового управления, поэтому аппаратные средства каждого уровня иерархии должны использоваться максимально эффективно, для чего необходимо четко определить круг задач и задать ограничения на реальное время их решения контроллерами каждого типа [17, 18].

Решение таких задач требует специального математического обеспечения иерархического цифрового управления сложным технологическим объектом, что и определило цель исследования.

Структура системы иерархического цифрового управления сложным технологическим объектом

Структура системы иерархического цифрового управления сложным технологическим объектом приведена на рис. 1.

В состав системы (рис. 1) входят: контроллер стратегического уровня (SLC-контроллер), контроллер тактического уровня (TLC-контроллер) и K контроллеров функционально-логического уровня (FLLC $_k$ -контроллеры, $k \in \{1, \dots, K\}$) [19]. Разделение контроллеров по уровням может быть реальным или виртуальным. Например, SLC- и TLC-контроллеры могут быть реализованы на одной физической ЭВМ с виртуальным разделением по уровням, а FLLC $_k$ -контроллеры могут объединяться в группы, каждая из которых реализуется на одном физическом цифровом контроллере.

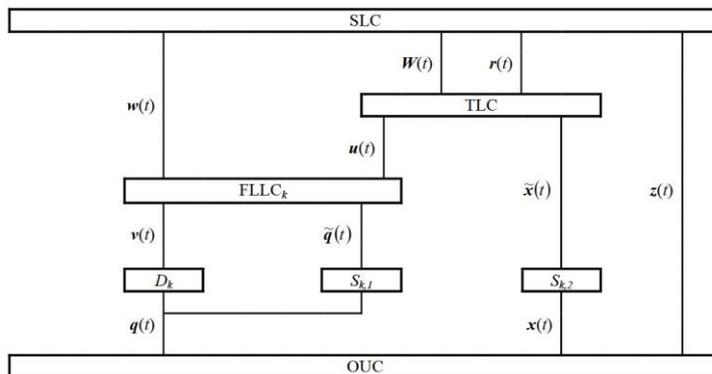


Рис. 1. Структура системы иерархического цифрового управления сложным технологическим объектом

При управлении объектом (OUC) на каждом иерархическом уровне реализуется своя часть интегрального алгоритма управления.

На верхнем, стратегическом уровне формируется цель управления $W(t)$ в виде развивающейся в физическом времени последовательности изменений вектора состояния OUC, $x(t) = \{x_k(t)\}$, которая обеспечивает, например выпуск возможно большего объема продукции в единицу времени, поддержание режима функционирования технологического оборудования, согласованное взаимодействие компонентов робототехнических систем и комплексов специального назначения и т. п. [20–24].

Из глобальной цели $W(t)$ TLC-контроллер формирует вектор $u(t) = \{u_k(t)\}$ текущих желаемых значений вектора $x(t)$ состояний OUC, который передается на FLLC $_k$ -контроллеры. Кроме того, на эти контроллеры с выходов SLC-контроллера могут быть непосредственно переданы значения настроек $\tilde{w}(t)$ параметров регуляторов, необходимые для реализации оптимальных режимов функционирования приводов D_k с сенсорами $S_{l,k}$ в контурах локальных обратных связей.

По вектору желаемых значений состояний $u(t)$ и результатам измерений $\tilde{q}(t) = [\tilde{q}_1(t) = \{q_k(t)\}]$ [25, 26] с помощью сенсоров $S_{l,k}$ физических перемещений $q(t) = \{q_k(t)\}$ приводов D_k формируются воздействия на объект управления, которые приводят к изменению его состояния $x(t)$. Результаты измерения в виде вектора $x(t) = \{x_k(t)\}$ возвращаются на уровень TLC, обеспечивая обратную связь по регулируемым параметрам технологической установки. Кроме того, вектор $[u(t), \tilde{x}(t)] = [u_1(t)]$, формируемый как объединение векторов $u(t)$ и $\tilde{x}(t)$, возвращается в SLC для определения цели управления $w(t)$ на следующем шаге функционирования системы.

Также на уровень SLC передаются элементы векторов $z(t) = \{z_k(t)\}$ и $r(t) = \{r_k(t)\}$. Элементы вектора $z(t)$ напрямую не используются в процессе управления, но дают дополнительную информацию о состоянии объекта, например, о температуре, давлении и влажности в приобъектной зоне, о срабатывании конечных выключателей, аварийных клапанов и т. п. Элементы вектора $r(t)$ представляют собой логические переменные, которые несут информацию о результатах отработки системы предыдущего шага управления. Совместно элементы векторов $\tilde{x}(t)$, $u(t)$, $z(t)$, $r(t)$ образуют пространство принятия решений в системе управления объектом OUC.

Математическое обеспечение алгоритмов, реализованных в контроллерах

SLC-, TLC- и FLLC $_k$ -контроллеры работают по типовому циклическому алгоритму общего вида, показанному на рис. 2, a , состоящему из неисполнимых операторов $a_{0(a)}$ «Начало» и $a_{J(a)+1}$ «Конец» и исполняемых операторов $a_{j(a)}$, $j \in \{1, \dots, J\}$. Циклическим алгоритм делает обратная связь $[a_{J(a)+1}, a_{j(a)}]$, показанная на рис. 2 пунктирной стрелкой.

Исполнимые операторы реализуют:

в алгоритме SLC-контроллера – функции ввода данных векторов $\tilde{x}(t)$, $u(t)$, $z(t)$, $r(t)$, расчет элементов вектора $w(t)$ и передачу рассчитанных значений в TLC, расчет элементов вектора настроек $\tilde{w}(t)$ параметров регуляторов и передачу рассчитанных значений в FLLC_k-контроллеры;

в алгоритме TLC-контроллера – функции: ввода векторов $\tilde{x}(t)$ и $w(t)$, расчета и вывода в FLLC_k-контроллеры элементов $u(t)$, расчета и возврата в SLC-контроллер элементов вектора $r(t)$;

в алгоритме каждого FLLC_k-контроллера – функции ввода значений u_k и \tilde{q}_k , расчета и вывода значения i_k .

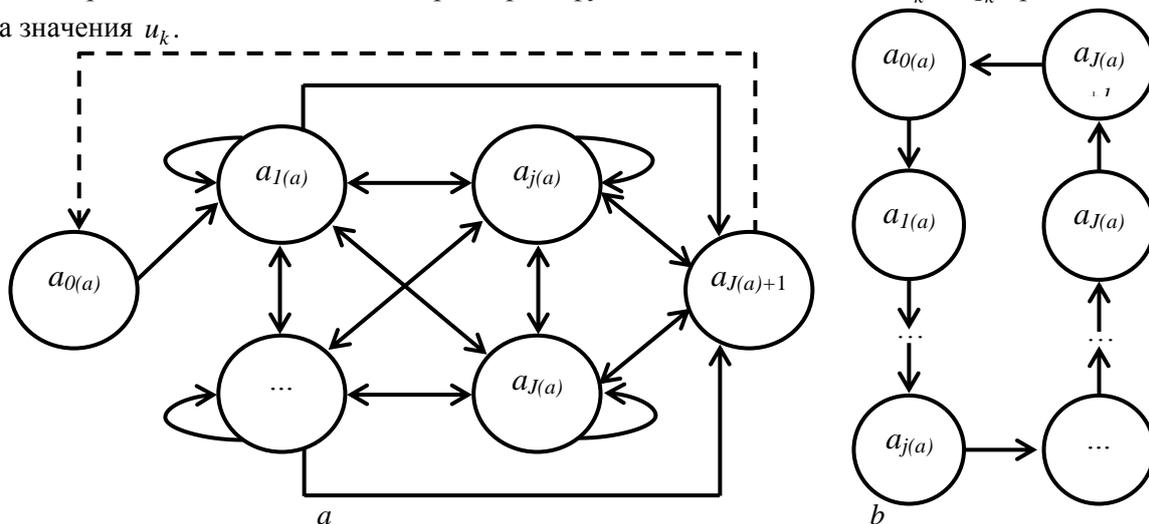


Рис. 2. Структура типового алгоритма контроллеров всех уровней:
а – общего вида; б – линейно-циклического вида

Вследствие того, что SLC-, TLC- и FLLC_k-контроллеры интерпретируют свои алгоритмы в реальном физическом времени t последовательно, оператор за оператором, между обращениями к внешним по отношению к рассматриваемому контроллеру устройствам естественным образом образуются временные интервалы (задержки) [27–29]. Наличие интервалов времени между транзакциями, генерируемыми каждым контроллером, должно учитываться при проектировании программного обеспечения контроллеров системы. Универсальным подходом к оцениванию временных интервалов является построение полумарковской модели типового алгоритма [30–32]:

$$\mu = \{A, h(t)\},$$

где $A = \{a_{0(a)}, a_{1(a)}, \dots, a_{j(a)}, a_{J(a)+1}\}$ – множество состояний, совпадающее с множеством исполнимых и неисполнимых операторов; $h(t) = [h_{j(a),n(a)}(t)] = p \otimes f(t)$ – полумарковская матрица, описывающая временные и стохастические свойства алгоритма; $p = [p_{j(a),n(a)}]$ – стохастическая матрица; $f(t) = [f_{j(a),n(a)}(t)]$ – матрица плотностей распределения времени пребывания процесса в состояниях множества A до переключения в сопряженные состояния, причем размерности всех матриц $[J(a)+2] \times [J(a)+2]$.

Полумарковская модель правильно синтезированного алгоритма обладает следующими свойствами:

для каждого состояния $a_{j(a)} \in A$ существует хотя бы один путь $a_{0(a)} \rightarrow a_{j(a)}$ и хотя бы один путь $a_{j(a)} \rightarrow a_{J(a)+1}$, то есть полумарковский процесс при замкнутой обратной связи является возвратным;

вероятности переключения между состояниями $a_{j(a)}$ удовлетворяют условиям

$$\sum_{n(a)=0(a)}^{J(a)} p_{j(a),n(a)} = \begin{cases} 1, & j(a) \neq J(a) + 1, \\ \text{or } j(a) = J(a) + 1, & \text{feedback is closed;} \\ 0, & j(a) = J(a) + 1, \text{ feedback is open;} \end{cases}$$

на время пребывания в состояниях полумарковского процесса накладываются ограничения

$$0 < T_{j(a),n(a)\min} \leq \arg f_{j(a),n(a)}(t) \leq T_{j(a),n(a)\max} < \infty, \int_0^{\infty} f_{j(a),n(a)}(t) dt = 1;$$

в модели алгоритма с замкнутой обратной связью $[J(a)+1]$ -я строка полумарковской матрицы $h(t)$ имеет вид $[f_{J(a)+1,0(a)}(t), \dots, 0, \dots, 0]$, где $f_{J(a)+1,0(a)}(t)$ – плотность распределения времени работы операционной системы контроллера по перезапуску исследуемого алгоритма.

Полумарковский процесс является возвратным, плотности распределения времени пребывания в его состояниях имеют область определения, локализованную в положительной полуплоскости, следовательно, процесс является эргодическим [30–32]. Плотность распределения времени возврата в состояние $a_{0(a)}$ полумарковского процесса μ и среднее время периода равны соответственно

$$f_c(t) = I_{0(a)}^R L^{-1} \left[\sum_{\xi=1}^{\infty} \{L[h'(t)]\}^{\xi} \right] I_{J(a)+1}^C * f_{J(a)+1,0(a)}(t); T_c = \int_0^{\infty} t f_c(t) dt,$$

где $f_c(t)$ – плотность распределения времени от начала текущего цикла до начала следующего цикла работы программы; $L[...], L[...]$ соответственно прямое и обратное преобразование Лапласа; $I_{0(a)}^R$ – $[J(a)+2]$ -элементный вектор-строка, нулевой элемент которого равен единице, а остальные элементы равны нулю; $I_{J(a)+1}^C$ – $[J(a)+2]$ -элементный вектор-столбец, последний, $[J(a)+1]$ -й элемент которого равен единице, а остальные элементы равны нулю; $h'(t)$ – полумарковский процесс, описывающий алгоритм с разомкнутой обратной связью, у которого $[J(a)+1]$ -я строка имеет вид $[0, \dots, 0]$; * – обозначение операции свертки.

На структуру исследуемого алгоритма может быть дополнительно наложено следующее ограничение: в течение одного цикла каждый канал, связывающий один контроллер с другими контроллерами и периферийным оборудованием, опрашивается по одному разу, а, следовательно, исполнимые операторы $a_{j(a)}$ образуют гамильтонов цикл на графе (см. рис. 2, а).

Схема линейно-циклического алгоритма, представляющего один из возможных гамильтоновых циклов, приведена на рис. 2, б. Для полумарковского процесса с гамильтоновым циклом

$$f_c(t) = f_{0(a)}(t) * f_{1(a)}(t) * \dots * f_{j(a)}(t) * \dots * f_{J(a)}(t) * f_{J(a)+1}(t); T_c = \sum_{j(a)=0(a)}^{J(a)+1} T_{j(a)},$$

где $f_{j(a)}(t)$ и $T_{j(a)}$ – плотность распределения и математическое ожидание времени пребывания полумарковского процесса в состоянии $a_{j(a)}$ гамильтонова цикла до его переключения в следующее состояние.

Математическое обеспечение обработки данных в FLLC_k-контроллере

Реализация полумарковской модели обработки данных на нижнем (функционально-логическом) уровне иерархии в системах с механизмами, в которых присутствует сухое трение, и естественное ограничение на скорость перемещения терминального элемента (руля, задвижки, клапана и т. п.), а также инерционность сенсора $S_{k,1}$, дает следующую систему дифференциальных уравнений третьего порядка в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{dq_{k,1}(t)}{dt} = q_{k,2}(t); \\ \frac{dq_{k,2}(t)}{dt} = -\alpha_{k,1} \cdot \bar{q}_{k,2} - \alpha_{k,2} \cdot \operatorname{sgn}[\bar{q}_{k,2}(t)] + \alpha_{k,3} v_k(t), \\ \frac{d\tilde{q}_k(t)}{dt} = -\alpha_{k,4} \tilde{q}_k(t) + \bar{q}_{k,1}(t), \end{cases}$$

где $q_{k,1}(t) = q_k(t)$ – физическое положение терминального элемента; \tilde{q}_k – значение положения, измеренное сенсором $S_{k,1}$; $\bar{q}_{k,2}$ – скорость перемещения терминального элемента с учетом ограничения; $\alpha_{k,2} \cdot \operatorname{sgn}[\bar{q}_{k,2}(t)]$ – сила сухого трения; $\alpha_{k,1} \div \alpha_{k,4}$ – коэффициенты, определяющие динамику и точность работы механизма исполнительного устройства и сенсора.

Величины $\bar{q}_{k,2}$ и $q_{k,2}$ связаны соотношениями $\bar{q}_{k,2} = q_{k,2}$ при $q_{k,2\min} \leq q_{k,2} \leq q_{k,2\max}$; $\bar{q}_{k,2} = q_{k,2\min}$ при $q_{k,2} \leq q_{k,2\min}$; $\bar{q}_{k,2} = q_{k,2\max}$ при $q_{k,2} \geq q_{k,2\max}$.

Наиболее часто на практике при обработке данных в FLLC_k-контроллере применяется алгоритм пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора [33, 34], который имеет вид

$$\begin{cases} v_{c,k}(t) = \alpha_{\text{FL},P,k}(w_{P,k}) \cdot \varepsilon_{\text{FL},k}(t) + \alpha_{\text{FL},D,k}(w_{D,k}) \times \frac{d\varepsilon_{\text{FL},k}(t)}{dt} + \alpha_{\text{FL},I,k}(w_{I,k}) \cdot \int_0^t \varepsilon_{\text{FL},k}(\tau) d\tau; \\ \varepsilon_{\text{FL},k}(t) = u_k(t) - \tilde{q}_k(t); \end{cases}$$

где $\varepsilon_{\text{FL},k}(t)$ – ошибка в установлении заданного положения $\tilde{q}_k(t)$ терминального элемента; $\alpha_{\text{FL},P,k}(w_{P,k})$, $\alpha_{\text{FL},D,k}(w_{D,k})$, $\alpha_{\text{FL},I,k}(w_{I,k})$ – коэффициенты при пропорциональной, интегральной, дифференциальной составляющих соответственно, определяющие качество переходных процессов на FLLC_k-уровне; $w_{c,k} = [w_{P,k}, w_{D,k}, w_{I,k}]$ – вектор данных, вводимых в FLLC_k-контроллеры с SLC-контроллера для установления оптимальных режимов управления ОУС.

Каждый FLLC_k-контроллер является цифровым, поэтому производная и интеграл в алгоритме ПИД-регулятора определяются соответственно по формулам конечной разности и конечной суммы [35, 36], т. е.

$$\frac{d\varepsilon_{\text{FL},k}(t)}{dt} \cong \varepsilon_{\text{FL},k}(n) - \varepsilon_{\text{FL},k}(n-1); \int_0^t \varepsilon_{\text{FL},k}(\tau) d\tau \cong \sum_{i=0}^n \varepsilon_{\text{FL},k}(i),$$

где n – дискретное время, связанное с реальным физическим временем соотношением $t = T_{c,\text{FL},k} n$; $T_{c,\text{FL},k}$ – период опроса FLLC_k-контроллеров.

Для вычисления производной каждый FLLC_k-контроллер должен осуществить две транзакции с TLC-контроллером и две транзакции с сенсором $S_{I,k}$. Вследствие дополнительных ограничений, которые накладываются на алгоритмы обработки данных по гамильтонову циклу, на это необходимо затратить $2T_{c,\text{TLC},k}$ единицы физического времени. Поэтому управляющее воздействие на выходе FLLC_k-контроллера появляется с дополнительной задержкой по времени относительно момента поступления данных $u_k(t)$ и $\tilde{q}_k(t)$, т. е.

$$v_k(t) = v_{c,k}(t - 2T_{c,\text{FL},k}).$$

Накопление конечной суммы происходит в течение всех периодов работы контроллера и не оказывает существенного влияния на время чистого запаздывания в контуре обратной связи.

Математическое обеспечение обработки данных в TLC-контроллере

Объект управления, в котором TLC-контроллер обеспечивает заданный режим функционирования, в общем случае описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\varphi_k \left[t, \mathbf{x}(t), \dots, \frac{d^{m(x)} \mathbf{x}(t)}{dt^{m(x)}}, \dots, \frac{d^{M(x)} \mathbf{x}(t)}{dt^{M(x)}}, \mathbf{q}(t), \dots, \frac{d^{m(q)} \mathbf{q}(t)}{dt^{m(q)}}, \dots, \frac{d^{M(q)} \mathbf{q}(t)}{dt^{M(q)}} \right] = 0, \quad 1 \leq k \leq K,$$

где $\mathbf{q}(t)$ – вектор воздействий, формируемый на уровне FLLC_k-контроллеров; $\mathbf{x}(t)$ – вектор параметров состояния ОУС, измеряемых сенсорами $S_{k,2}$ и вводимых в TLC-контроллер.

С целью унификации программного обеспечения при расчете элементов вектора $\mathbf{u}(t)$ применяется алгоритм ПИД-регулятора, который при отсутствии алгоритмически создаваемых перекрестных связей между каналами управления имеет вид

$$\begin{cases} u_k(t) = \alpha_{\text{TLC,P},k} \cdot \varepsilon_{\text{TLC},k}(t) + \alpha_{\text{TLC,D},k} \frac{d\varepsilon_{\text{TLC},k}(t)}{dt} + \alpha_{\text{TLC,I},k} \cdot \int_0^t \varepsilon_{\text{TLC},k}(\tau) d\tau; \\ \varepsilon_{\text{TLC},k}(t) = W_k(t) - x_k(t), \quad 1 \leq k \leq K, \end{cases}$$

где $\varepsilon_{\text{TLC},k}(t)$ – текущая ошибка установления заданного значения $x_k(t)$; $\alpha_{\text{TLC,P},k}$, $\alpha_{\text{TLC,D},k}$, $\alpha_{\text{TLC,I},k}$ – коэффициенты передачи ПИД-регулятора по пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющим; $W_k(t)$ – цель управления, определяемая на стратегическом уровне как желаемое значение регулируемого параметра $x_k(t)$.

Производная и интеграл в алгоритме ПИД-регулятора также рассчитываются по формулам конечной разности и конечной суммы, поэтому между сигналами $\mathbf{x}(t)$ и $\mathbf{u}(t)$ возникает задержка по времени, равная $2T_{c,\text{TLC},k}$. Эта задержка может быть отнесена к сенсорам $S_{2,k}$, поскольку перекрестные связи между каналами на уровне алгоритма функционирования TLC-контроллера отсутствуют. С учетом задержек по времени модель преобразования сигналов $\mathbf{x}(t)$ сенсорами принимает вид

$$\alpha_{S,k,1} \frac{d\tilde{x}_k(t - 2T_{c,\text{TLC},k})}{dt} + \tilde{x}_k(t - 2T_{c,\text{TLC},k}) = \alpha_{S,k,2} x_k(t),$$

где $\alpha_{S,k,1}$ и $\alpha_{S,k,2}$ – параметры, определяющие быстродействие и коэффициент передачи $S_{1,k}$ и $S_{2,k}$ соответственно.

Кроме интервала $2T_{c,\text{TLC},k}$ при работе TLC-контроллера возникает такое явление, как перекос данных. Без нарушения общности можно считать, что внутри гамильтонова цикла первой транзакцией является ввод элемента $\tilde{x}_1(t)$, после чего в порядке, определенном алгоритмом, вводятся оставшиеся элементы указанного вектора и выводятся элементы вектора $\mathbf{v}(t)$. Задержки по времени между началом ввода \tilde{x}_1 и началами ввода $\tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k, \dots, x_K$ порождают перекос данных $T_{\text{in},1} = 0, T_{\text{in},2}, \dots, T_{\text{in},k}, \dots, T_{\text{in},K}$ при вводе. Задержки по времени $T_{\text{out},1} = 0, T_{\text{out},2}, \dots, T_{\text{out},k}, \dots, T_{\text{out},K}$ между началом вывода элемента v_1 вектора $\mathbf{v}(t)$ и началами выводов элементов $v_2, \dots, v_k, \dots, v_K$ порождают перекос данных при выводе $\mathbf{v}(t)$. Временной интервал $T_{\text{del},k,l}$, алгоритмически формируемый между вводом x_k и выводом v_l , дает часть времени чистого запаздывания формирования l -го элемента вектора управления относительно k -го элемента вектора состояния. Полное время чистого запаздывания определяется порядком следования операторов в гамильтоновом цикле.

Вектор $\mathbf{r}(t) = \{r_k(t)\}$ формируется как вектор подтверждения исполнения команды $\mathbf{W}(t)$. Элементы этого вектора обнуляются после передачи в SLC-контроллер и устанавливаются в единицу, если к началу следующей транзакции величина ошибки $\varepsilon_{\text{TLC},k}(t) = W_k(t) - x_k(t)$ выполнения команды не превышает заданного порога, то есть

$$r_k = 1, \text{ when } \varepsilon_{\text{TLC},k}(t) < \bar{\varepsilon}_{\text{TLC},k},$$

где $\bar{\varepsilon}_{\text{TLC},k}$ – пороговое значение сигнала ошибки по k -му регулируемому параметру ОУС, $x_k(t)$.

Записанные выражения представляют собой полную модель функционирования TLC-контроллера в составе иерархической системы управления.

Математическое обеспечение обработки данных в SLC-контроллере

В SLC-контроллере (на стратегическом иерархическом уровне) реализуются алгоритмы, обеспечивающие эффективные режимы работы оборудования. Одна из возможных реализаций подобного алгоритма – это нейронная сеть, которая используется для настройки параметров управления FLLC_k-контроллеров [3]. Настройка осуществляется по результатам наблюдения состояния OUC, TLC, D_k. Для принятия решения о настройке параметры, описывающие указанные блоки иерархической системы, в виде векторов $u(t)$, $x(t)$, $r(t)$ передаются с соответствующих уровней в SLC. Дополнительно к перечисленным на этот уровень передаются данные о нерегулируемых параметрах OUC, обозначенные на рис. 1 как вектор $z(t)$. Все переданные данные образуют параметрическое пространство $y = u \cup x \cup r \cup z = [y_{1(y)}, \dots, y_{j(y)}, \dots, y_{J(y)}]$ принятия решения. Решение заключается в установлении значений элементов векторов $W(t)$ и $w(t)$, передаваемых на уровни TLC- и FLLC_k-контроллеров соответственно. Вектор $W(t) = [W_1(t), \dots, W_k(t), \dots, W_K(t)]$ определяет текущий кластер желаемых значений состояния OUC. Вектор $w(t)$ определяет векторы $w_k(t) = [w_{P,k}, \dots, w_{D,k}, \dots, w_{In,k}]$ настроек $[\alpha_{FL,P,k}(w_{P,k}), \dots, \alpha_{FL,D,k}(w_{D,k}), \dots, \alpha_{FL,In,k}(w_{In,k})]$ параметров ПИД-регуляторов.

Для выбора векторов $W(t)$ и $w(t)$ в нейронную сеть уровня SLC-контроллеров включаются нейроны, формирующие в пространстве параметров y систему из $J(c)$ гиперплоскостей:

$$\sum_{j(y)=1(y)}^{J(y)} b_{j(c),j(y)} y_{j(y)} = c_{j(c)}, 1(c) \leq j(c) \leq J(c),$$

где $b_{j(c),j(y)}$ и $c_{j(c)}$ – параметры $j(c)$ -го нейрона, задаваемые при настройке нейронной сети.

При подстановке в систему уравнений $J(c)$ гиперплоскостей вектора $y_t = y(t) = [y_{1(y),t}, \dots, y_{j(y),t}, \dots, y_{J(y),t}]$ текущих оценок параметров формируются значения $c_{j(c),t}$ правых частей линейных уравнений $J(c)$ гиперплоскостей.

$$\sum_{j(y)=1(y)}^{J(y)} b_{j(c),j(y)} y_{j(y),t} = c_{j(c),t}, 1(c) \leq j(c) \leq J(c);$$

В том случае если $c_{j(c),t} - c_{j(c)} > 0$, то точка, определяющая состояние иерархической системы управления, находится над плоскостью $J(c)$ гиперплоскостей; если $c_{j(c),t} - c_{j(c)} < 0$, то под плоскостью, а если $c_{j(c),t} - c_{j(c)} = 0$, то принадлежит плоскости. Поэтому в нейронную сеть вводится преобразование вектора y_t в вектор $\sigma = [\sigma_{1(c)}, \dots, \sigma_{j(c)}, \dots, \sigma_{J(c)}]$ логических переменных следующим образом:

$$\sigma_{j(c)} = \begin{cases} 1, & \text{when } c_{j(c),t} - c_{j(c)} > 0; \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

где 0, 1 – логический ноль и единица соответственно.

Дизъюнктивные нормальные формы, построенные из элементов вектора σ , позволяют разбить пространство y на Ξ областей $D_1, \dots, D_\xi, \dots, D_\Xi$, каждой из которых ставится в соответствие ξ -е значения векторов ${}^\xi W(t)$ и ${}^\xi w(t)$, которые дают оптимальные настройки системы управления в этом конкретном режиме эксплуатации OUC. Дизъюнктивные нормальные формы имеют вид:

$$\tilde{D}_\xi = \bigvee_v \left[\bigwedge_{j(c)=1(c)}^{J(c)} \lambda_{\xi,v,j(c)}(\sigma_{j(c)}) \right], 1 \leq \xi \leq \Xi,$$

где \tilde{D}_ξ – дизъюнктивная нормальная форма, описывающая область D_ξ ; $\bigwedge_{j(c)=1(c)}^{J(c)} \lambda_{\xi, v, j(c)}(\sigma_{j(c)})$ – v -я конституента единицы ξ -й нормальной формы; $\lambda_{\xi, v, j(c)}(\sigma_{j(c)})$ – логическая функция переменной $\sigma_{j(c)}$ при ее вхождении в v -ю конституенту ξ -й нормальной формы.

Для нормальной работы нейронной сети на дизъюнктивные нормальные формы, описывающие области \tilde{D}_ξ , накладывается ограничение:

$$\tilde{D}_\xi \cap \tilde{D}_\zeta = \emptyset, \text{ если } \xi \neq \zeta.$$

Поэтому при принятии управленческого решения из всех областей, на которые разбивается пространство параметров, выбирается та единственная область D_ξ , для которой $\tilde{D}_\xi = 1$.

Настройка нейронной сети сводится к вариации параметров $b_{j(c), j(y)}$ и $c_{j(c)}$, определяющих расположение $J(c)$ гиперплоскостей в пространстве параметров y , и выбору таких значений векторов $W(t)$ и $w(t)$, которые обеспечивают оптимальный режим функционирования ОУС в этом состоянии.

Заключение

Таким образом, в результате исследования сформированы требования к структуре иерархической системы управления сложными многоконтурными объектами. Для контроллеров каждого уровня предложены типовые алгоритмы реализации их функций и определены характеристики контроллеров как физических приборов, выполняющих эти функции. Показано, что реализация оптимальных режимов эксплуатации объекта управления возможна за счет реализации на верхнем иерархическом уровне нейронной сети. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на представление контроллера с иерархической структурой как системы массового обслуживания, каждый элемент которой является одновременно и обслуживаемым прибором, и генератором потока запросов на обслуживание, что позволит оптимизировать информационные потоки внутри системы иерархического цифрового управления сложным технологическим объектом.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 24-29-20256.

Литература

1. Löfving, M. Manufacturing Strategy Formulation, Leadership Style and Organizational Culture in Small and Medium-Sized Enterprises / M. Löfving, K. Säfsten; M. Winroth // International Journal of Manufacturing Technology and Management. – 2016. – Vol. 30, no. 5. – P. 306–325.
2. Composite Error Learning Robot Control using Discontinuous Lyapunov Analysis / Y. Pan, K. Guo, A. Bobtsov, Ch. Yang, H. Yu // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2024. – Vol. 69, Iss. 3. – P. 1705–1712.
3. Ле, В.Н. Обзор интеллектуальных систем управления и робототехнических задач в производстве аквакультуры / В.Н. Ле, А.Л. Ронжин // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 1-1 (63). – С. 171–180.
4. Meshcheryakov, R. Control of hyperlinked cyber-physical systems / R. Meshcheryakov // Proc. 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Т. 154. – С. 27–33.
5. Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в коллаборативной робототехнической системе / Галин Р.Р., Широкий А.А., Магид Е.А. и др. // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20, № 6. – С. 1224–1253.
6. Мещеряков, Р.В. Интеллектуальные робототехнические системы / Р.В. Мещеряков // Датчики и системы. – 2024. – № 2. – С. 12–17.
7. Мещеряков, Р.В. Постановка задачи гетерогенного группового взаимодействия роботов при решении задач умного сада / Р.В. Мещеряков, А.С. Широков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 41–49.

8. Осипов, О.Ю. Проектирование цифровых моделей элементов электромашиной части электромехатронных модулей робототехнических систем / О.Ю. Осипов, Р.В. Мещеряков, М.Г. Шепеленко // Экстремальная робототехника. – 2017. – № 1. – С. 160–164.
9. A Probabilistic Approach to Estimating Allowed SNR Values for Automotive LiDARs in “Smart Cities” under Various External Influences / R. Meshcheryakov, A. Iskhakov, M. Mamchenko *et al.* // Sensors. – 2022. – Vol. 22, no. 2, – P. 609. DOI: 10.3390/s22020609
10. Постановка задачи реализации модели беспилотной авиационной транспортной системы с использованием технологий искусственного интеллекта / А.Л. Смолин, В.П. Кутахов, А.А. Захарова и др. // Искусственный интеллект. Теория и практика. – 2023. – № 1 (1). – С. 41–45.
11. Landau, I.D. Digital Control Systems, Design, Identification and Implementation / I.D. Landau, G. Zito. – Springer, 2006. – 484 p.
12. Aström, J. Computer Controlled Systems: Theory and Design / J. Aström, B. Wittenmark. – Tsinghua University Press, Prentice Hall, 1996. – 557 p.
13. Ivutin A.N., Larkin E.V. Estimation of Latency in Embedded Real-Time Systems // 3-rd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO-2014). Budva, Montenegro, 2014, P. 236–239.
14. Kilian C.T. Modern Control Technology: Components and systems / C.T. Kilian. – Thompson Delmar Learning. – 2000. – 644 p.
15. Ларкин, Е.В. Моделирование надежности бортового оборудования мобильного робота / Е.В. Ларкин, Т.А. Акименко, А.В. Богомолов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2021. – Т. 21, Вып. 3. – С. 390–399.
16. Babishin V., Taghipour S. Optimal maintenance policy for multicomponent systems with periodic and opportunistic inspections and preventive replacements // Applied Mathematical Modelling. – 2016. – Vol. 40, Iss. 23-24. – Pp. 10480–10505.
17. Digital Control of Continuous Production with Dry Friction at Actuators / E. Larkin, A. Privalov, A. Bogomolov, T. Akimenko // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 232. – P. 427–436.
18. Сенсорные сети контроля состояния авиационной техники при испытаниях и эксплуатации / Е.С. Солдатов, А.В. Богомолов, Е.В. Ларкин, А.С. Солдатов // Авиакосмическое приборостроение. – 2024. – № 2. – С. 61–68.
19. Структура иерархической системы цифрового управления сложным технологическим объектом / Е.В. Ларкин, А.В. Богомолов, А.Н. Привалов, Т.А. Акименко // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 6. – С. 63–66.
20. Восстановление динамически искаженного сигнала на основе теории оптимальных динамических измерений / А.Л. Шестаков, А.А. Замышляева, Н.А. Манакова и др. // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 12. – С. 125–137.
21. Ermolov, I.L. Models for Decision Making Support Systems in Robotics / I.L. Ermolov, S.S. Graskin, S.P. Khripunov // Studies in Systems, Decision and Control. – 2021. – Vol. 352. – P. 145–149.
22. Развитие теории оптимальных динамических измерений / Е.В. Бычков, С.А. Загребина, А.А. Замышляева и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 19–33.
23. Bazhenov, E.I. Software for the Mobile Robot Spatial Orientation System / E.I. Bazhenov, S.A. Mokrushin, S.I. Okhar'kin // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 64–69.
24. Алгоритм численного нахождения оптимального измерения, искаженного инерционностью, резонансами и деградацией измерительного устройства / А.Л. Шестаков, С.А. Загребина, Н.А. Манакова и др. // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 1. – С. 55–67.
25. Meyer-Baese, U. Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays / U. Meyer-Baese. – Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2004. – 527 p.
26. Yeh, Y.-C. Improving the Sampling Resolution of Periodic Signals by using Controlled Sampling Interval Method / Y.-C. Yeh, Y. Chu, C.W. Chiou // Computers & Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 40, no. 4. – P. 1064–1071.

27. Discrete Model of Paired Relay-Race / E.V. Larkin, A.V. Bogomolov, A.N. Privalov, N.N. Dobrovolsky // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 72–84.
28. Ларкин, Е.В. Дискретный подход к моделированию синхронизированных эстафет / Е.В. Ларкин, А.Н. Привалов, А.В. Богомолов // Научно-техническая информация (НТИ). сер. 2. Информационные процессы и системы. – 2020. – № 2. – С. 17–26.
29. Relay Races along a Pair of Selectable Routes / E.V. Larkin, A.V. Bogomolov, A.N. Privalov, N.N. Dobrovolsky // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2018. – Vol. 11, no. 1. – P. 15–26.
30. Bielecki, T.R. Conditional Markov Chains: Properties, Construction and Structured Dependence / T.R. Bielecki, J. Jakubowski, M. Niewęłowski // Stochastic Processes and their Applications. – 2017. – Vol. 127, no. 4. – P. 1125–1170.
31. Markov Chains: Models, Algorithms and Applications / W.K. Ching, X. Huang, M.K. Ng, T.K. Siu // International Series in Operations Research & Management Science. – Vol. 189. – Springer Science + Business Media NY, 2013. – 243 p.
32. Janssen, J. Applied Semi-Markov Processes / J. Janssen, R. Manca. – Springer US, 2006. – 310 p.
33. Ang, K.H. PID Control System Analysis, Design and Technology / K.H. Ang, G. Chong, Y. Li // IEEE Transactions of control systems technology. – 2005. Vol. 13, no. 4. – P. 559–576.
34. O’Dwier, A. PID Compensation of Time Delay Processes 1999–2002: a Survey / A. O’Dwier // Proc. 2003 American Control Conference. USA, Denver, Colorado. – 2003. – P. 1494–1499.
35. Pavlov, A.V. About the Equality of the Transform of Laplace to the Transform of Fourier / A.V. Pavlov // Пробл. анал. Issues Anal. – 2016. – Т. 5(23), № 1. – P. 21–30.
36. Li, J. Three Effective Inverse Laplace Transform Algorithms for Computing Time-Domain Electromagnetic Responses / J. Li, C.G. Farquharson, X. Hu // Geophysics. – 2015. – Vol. 81, Iss. 2. – P. 75–90.

Поступила в редакцию 3 сентября 2024 г.

Сведения об авторах

Ларкин Евгений Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор-консультант, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: elarkin@mail.ru.

Богомолов Алексей Валерьевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: a.v.bogomolov@gmail.com.

Привалов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, директор института передовых информационных технологий, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: privalov.61@mail.ru.

Акименко Татьяна Алексеевна – кандидат технических наук, доцент, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: tantan72@mail.ru.

MATHEMATICAL SUPPORT FOR HIERARCHICAL DIGITAL CONTROL OF A COMPLEX TECHNOLOGICAL OBJECT

E.V. Larkin¹, A.V. Bogomolov², A.N. Privalov³, T.A. Akimenko¹

¹ Tula State University, Tula, Russian Federation

² Federal Research Center "Informatics and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³ Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy, Tula, Russian Federation

E-mail: privalov.61@mail.ru

Abstract. The paper investigates the synthesis of mathematical support for hierarchical digital control of a complex technological object based on universal controllers with flexible programming. In order to overcome the limitations on the performance of controllers operating in real time, with the complexity of control laws and the expansion of the classes of controlled objects, controllers can be divided into strategic, tactical and functional-logical hierarchical levels. The authors define the functions and construct the algorithms for processing data by the controllers of each hierarchical level. The coordinated functioning of the digital control system under study is reduced to the exchange of data between controllers of different levels, carried out programmatically, equally for controllers of all levels. The authors obtain the dependencies for calculating the estimate of the restart period of control programs operating on the Hamiltonian cycle, and the data transmission delay for the case when the proportional-integral-differentiative regulator algorithm is implemented on the controllers of the tactical and functional-logical levels. The paper highlights the features of controlling the operating modes of the controllers of the tactical and functional-logical levels due to the implementation of a neural network at the strategic level.

Keywords: digital control; control system; hierarchical control levels; controller with flexible programming; Hamiltonian cycle; semi-Markov process; neural network.

References

1. Löfving M., Säfsten K., Winroth M. Manufacturing Strategy Formulation, Leadership Style and Organizational Culture in Small and Medium-Sized Enterprises. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2016, Vol. 30, no. 5, pp. 306–325. DOI: 10.1504/IJMTM.2016.078918
2. Pan Y., Guo K., Bobtsov A., Yang Ch., Yu H. Composite Error Learning Robot Control using Discontinuous Lyapunov Analysis. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2024. Vol. 69, Iss. 3, pp. 1705–1712. DOI: 10.1109/tac.2023.3326749
3. Le V.N., Ronzhin A.L. Review of Intelligent Control Systems and Robotic Tasks in Aquaculture Production. *Marine intelligent technologies*, 2024, no. 1-1 (63), pp. 171–180. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.021 (in Russ.).
4. Meshcheryakov R. Control of Hyperlinked Cyber-Physical Systems. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) Proc. 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies, 2020, Vol. 154. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-13-9267-2_3
5. Galin R.R., Shirokiy A.A., Magid E.A., Meshcheryakov R.V., Mamchenko M.V. Effective Functioning of a Mixed Heterogeneous Team in a Collaborative Robotic System. *Computer Science and Automation*, 2021, Vol. 20, no. 6, pp. 1224–1253. DOI: 10.15622/ia.20.6.2 (in Russ.).
6. Meshcheryakov R.V. Intelligent Robotic Systems. *Sensors and Systems*, 2024, no. 2, pp. 12–17. (in Russ.). DOI: 10.25728/datsys.2024.2.2
7. Meshcheryakov R.V., Shirokov A.S. Statement of the problem of heterogeneous group interaction of robots in solving smart garden problems. *Bulletin of the South Ural State University. Series*

“*Mathematics. Mechanics. Physics*”, 2024, Vol. 16, no. 2, pp. 41–49. (in Russ.). DOI: 10.14529/mmp240204

8. Osipov O.Yu., Meshcheryakov R.V., Shepelenko M.G. Design of Digital Models of Elements of the Electric Machine Part of Electromechatronic Modules of Robotic Systems. *Extreme Robotics*, 2017, no. 1, pp. 160–164. (in Russ.).

9. Meshcheryakov R., Iskhakov A., Mamchenko M., Romanova M., Uvaysov S., Amirgaliyev Y., Gromaszek K. A Probabilistic Approach to Estimating Allowed SNR Values for Automotive LiDARs in “Smart Cities” under Various External Influences. *Sensors*, 2022, Vol. 22, no. 2, pp. 609. (in Russ.). DOI: 10.3390/s22020609

10. Smolin A.L., Kutakhov V.P., Zakharova A.A., Meshcheryakov R.V., Klimakov V.S. Formulation of the Problem of Implementing an Unmanned Aircraft Transport System Model using Artificial Intelligence Technologies. *Artificial Intelligence. Theory and Practice*, 2023, no. 1(1), pp. 41–45. (in Russ.).

11. Landau I.D., Zito G. *Digital Control Systems, Design, Identification and Implementation*. Springer, 2006, 484 p. DOI: 10.1007/978-1-84628-056-6

12. Åström J., Wittenmark B. *Computer Controlled Systems: Theory and Design*. Tsinghua University Press. Prentice Hall, 1996, 557 p.

13. Ivutin A., Larkin E. Estimation of Latency in Embedded Real-Time Systems, 2014 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, 2014, pp. 236–239. DOI: 10.1109/MECO.2014.6862704.

14. Kilian C.T. *Modern Control Technology: Components and Systems*. Thompson Delmar Learning, 2000, 644 p.

15. Larkin E.V., Akimenko T.A., Bogomolov A.V. Modeling the Reliability of the Onboard Equipment of a Mobile Robot. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2021, Vol. 21, no. 3, pp. 390–399. DOI: 10.18500/1816-9791-2021-21-3-390-399

16. Babishin V., Taghipour S. Optimal Maintenance Policy for Multicomponent Systems with Periodic and Opportunistic Inspections and Preventive Replacements. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, Vol. 40, Iss. 23-24, pp. 10480–10505. (in Russ.). DOI: 10.1016/j.apm.2016.07.019

17. Larkin E., Privalov A., Bogomolov A., Akimenko T. Digital Control of Continuous Production with Dry Friction at Actuators. In: Ronzhin, A., Shishlakov, V. (eds) *Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, Vol. 232. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_37

18. Soldatov E.S., Bogomolov A.V., Larkin E.V., Soldatov A.S. Sensor Networks for Monitoring the Condition of Aviation Equipment during Testing and Operation. *Aerospace Instrumentation*, 2024, no. 2, pp. 61–68. (in Russ.). DOI: 10.25791/aviakosmos.2.2024.1395

19. Larkin E.V., Bogomolov A.V., Privalov A.N., Akimenko T.A. Structure of a Hierarchical Digital Control System for a Complex Technological Object. *Mathematical Methods in Technology and Engineering*, 2024, no. 6, pp. 63–66. (in Russ.).

20. Shestakov A.L., Zamyshlyayeva A.A., Manakova N.A., Sviridyuk G.A., Keller A.V. Reconstruction of a Dynamically Distorted Signal Based on the Theory of Optimal Dynamic Measurements. *Automation and Remote Control*, 2021, Vol. 82, no. 12, pp. 2143–2154. DOI: 10.1134/S0005117921120067

21. Ermolov I.L., Graskin S.S., Khripunov S.P. Models for Decision Making Support Systems in Robotics. In: Gorodetskiy, A.E., Tarasova, I.L. (eds) *Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, Vol. 352. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-68172-2_12

22. Bychkov E.V., Zagrebina S.A., Zamyshlyayeva A.A., Keller A.V., Manakova N.A., Sagadeeva M.A., Sviridyuk G.A. Development of the Theory of Optimal Dynamic Measurements. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modeling and Programming*, 2022, Vol. 15, no. 3, pp. 19–33. (in Russ.). DOI: 10.14529/mmp220302

23. Bazhenov E.I., Mokrushin S.A., Okhapkin S.I. Software for the Mobile Robot Spatial Orientation System. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2021, Vol. 14, no. 2, pp. 64–69. DOI: 10.14529/mmp210206

24. Shestakov A.L., Zagrebina S.A., Manakova N.A., Sagadeeva M.A., Sviridyuk G.A. Numerical Optimal Measurement Algorithm under Distortions Caused by Inertia, Resonances, and Sensor Degrada-

Automation and Remote Control, 2021, Vol. 82, no. 1, pp. 41–50.
DOI: 10.1134/S0005117921010021

25. Meyer-Baese U. Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2004, 527 p. DOI: 10.1007/978-3-662-06728-4

26. Yeh Y.-C., Chu Y., Chiou C.W. Improving the Sampling Resolution of Periodic Signals by using Controlled Sampling Interval Method. *Computers & Electrical Engineering*, 2014. Vol. 40, no. 4, pp. 1064–1071. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2013.12.002

27. Larkin E.V., Bogomolov A.V., Privalov A.N., Dobrovolsky N.N. Discrete Model of Paired Relay-Race. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2018. Vol. 11, no. 3, pp. 72–84. (in Russ.). DOI: 10.14529/mmp180306

28. Larkin E.V., Privalov A.N., Bogomolov A.V. Diskretnyy podkhod k modelirovaniyu sinkhronizirovannykh estafet (Discrete Approach to Modeling Synchronized Relay Races). *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya (NTI). ser. 2. Informatsionnye protsessy i sistemy* (Scientific and Technical Information. Series 2: Information Processes and Systems), 2020, no. 2, pp. 17–26. (in Russ.). DOI: 10.36535/0548-0027-2020-02-3

29. Larkin E.V., Bogomolov A.V., Privalov A.N., Dobrovolsky N.N. Relay Races along a Pair of Selectable Routes. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2018, Vol. 11, no. 1, pp. 15–26. (in Russ.). DOI: 10.14529/mmp180102

30. Bielecki T.R., Jakubowski J., Niewęłowski M. Conditional Markov chains: Properties, Construction and Structured Dependence. *Stochastic Processes and their Applications*, 2017, Vol. 127, no. 4, pp. 1125–1170. DOI: 10.1016/j.spa.2016.07.010

31. Ching W.K., Huang X., Ng M.K., Siu T.K. Markov Chains: Models, Algorithms and Applications. *International Series in Operations Research & Management Science*, Vol. 189, Springer Science + Business Media NY, 2013, 243 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-6312-2

32. Janssen J., Manca R. Applied Semi-Markov Processes. Springer US, 2006, 310 p. DOI: 10.1007/0-387-29548-8

33. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID Control System Analysis, Design and Technology. *IEEE Transactions of control systems technology*, 2005, Vol. 13, no. 4, pp. 559–576. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331

34. O'Dwyer A. PID Compensation of Time Delayed Processes 1998-2002: a Survey. Proc. 2003 American Control Conference, 2003, Denver, CO, USA, 2003, pp. 1494–1499. DOI: 10.1109/ACC.2003.1239802.

35. Pavlov A.V. About the Equality of the Transform of Laplace to the Transform of Fourier. *Probl. Anal. Issues Anal.*, 2016, Vol. 5(23), no. 1, pp. 21–30. (in Russ.). DOI: 10.15393/j3.art.2016.3110

36. Li J., Farquharson C.G., Hu X. Three Effective Inverse Laplace Transform Algorithms for Computing Time-Domain Electromagnetic Responses. *Geophysics*, 2015, Vol. 81, no. 2, pp. 75–90. (in Russ.). DOI: 10.1190/geo2015-0174.1

Received September 3, 2024

Information about the authors

Larkin Evgeny Vasilyevich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, Professor-Consultant of Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: elarkin@mail.ru.

Bogomolov Aleksey Valerievich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, Leading Researcher of the Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: a.v.bogomolov@gmail.com.

Privalov Aleksandr Nikolaevich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Advanced Information Technologies of Tolstoy Tula State Pedagogical University, Tula, Russian Federation, e-mail: privalov.61@mail.ru.

Akimenko Tatyana Alekseevna is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: tantan72@mail.ru.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СО СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

В.А. Одинаев¹, И.И. Шигапов², В.А. Долгов¹, К.Г. Саськов¹

¹ Инжиниринговая компания «Неотек Марин», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Главное командование Военно-Морского Флота, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: odinaev@neotech-marine.ru

Аннотация. Решение задачи технического диагностирования состояния энергетических установок на борту надводных кораблей и неатомных подводных лодок требует применения переносных диагностических комплексов, ключевым элементом которых является математическая модель дизель-генератора. Комплексная математическая модель дизель-генератора представляется как результат объединения математических моделей дизеля и синхронного генератора. Функционирование дизеля моделируется на основе агрегированной базовой математической модели корабельного двигателя внутреннего сгорания, реализованной на примере дизель-генераторной установки неатомной подводной лодки. Математическая модель синхронного генератора реализуется системой дифференциальных уравнений с учетом конструктивных особенностей отдельно взятого генератора, позволяет рассчитывать оценки эталонных характеристик исправных дизель-генераторов в заданных внешних условиях и режимах работы и моделировать характерные неисправности. Применение разработанной математической модели обеспечивает возможность получить количественную оценку и провести категорирование технического состояния дизель-генератора на основе анализа отклонений фактических значений диагностических параметров от эталонных, приведенных к текущим параметрам режима и внешних условий эксплуатации, а также выполнить моделирование возможных неисправностей объекта диагностирования для прогнозирования технического состояния и рисков отклонения от режима нормального функционирования. Результаты моделирования являются основой для автоматизированного формирования рекомендаций по эксплуатации, проведению технического обслуживания и ремонту дизель-генераторов, эксплуатируемых в составе энергетических установок надводных кораблей и неатомных подводных лодок.

Ключевые слова: судовое энергетическое оборудование; синхронный генератор; математическая модель генератора; дизель-генератор; цифровой диагностический комплекс.

Введение

Эксплуатация надводных кораблей и неатомных подводных лодок в современных условиях сопряжена с необходимостью нивелирования противоречия между максимально полным использованием имеющихся в наличии кораблей и необходимостью сбережения имеющегося ресурса технических средств [1–3]. В этих условиях процедуры технического диагностирования становятся необходимым условием обеспечения надежной эксплуатации энергетической установки корабля [4, 5].

Техническое диагностирование дизель-генераторной установки позволяет определять оптимальные сроки технического обслуживания и ремонта в соответствии с объективным фактическим состоянием технических средств и учетом директивных ограничений, которые определяются нормами эксплуатации и ремонта оборудования [6, 7]. Встроенные средства контроля технического состояния энергетического оборудования в большей степени ориентированы на предупреждение аварийных ситуаций, а не на диагностирование состояния объектов [8]. Поэтому для углубленного технического диагностирования на борту надводных кораблей и неатомных подводных лодок целесообразно использовать переносные диагностические комплексы, реализующие современные методологические подходы, основанные на применении цифровых технологий. Переносной диагностический комплекс должен включать необходимые измерительные приборы, датчики и программное обеспечение сбора и обработки информации [9, 10]. Но ключевым его

элементом должна быть математическая модель дизель-генератора, учитывающая условия его эксплуатации, техническое состояние и влияние внешних условий.

Целью исследования являлась разработка математической модели дизель-генератора переменного тока со статической нагрузкой неатомной подводной лодки типа 28ДГ, состоящего из корабельного дизеля 8ЧН26/26 и генератора СБГД-1000. Отличительная особенность этого дизель-генератора состоит в том, что, выступая на корабле в качестве источника постоянного тока, генератор одновременно является синхронной электрической машиной, которая работает на выпрямитель.

Математическая модель дизель-генератора

Имитация функционирования приводного дизеля 8ЧН26/26 из состава дизель-генераторной установки осуществляется на основе агрегированной базовой математической модели функционирования корабельного двигателя внутреннего сгорания (БММ), разработанной коллективом научной школы профессора П.М. Гацака [11, 12]. В основе модели лежит аналитическое описание влияния на параметры функционирования корабельных дизелей не только факторов режима (сочетание частоты вращения коленчатого вала и эффективной мощности), но и параметров внешних условий (барометрическое давление, температура и относительная влажность атмосферного воздуха, температура забортной воды), технического состояния и регулировки отдельных элементов, влияющих на воздухообмен, газообмен, индикаторные процессы, механические потери и др. Такая математическая модель успешно применяется в научных исследованиях [12].

Основной особенностью БММ функционирования двух- и четырехтактных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с различными схемами воздухообмена на установившихся и неустановившихся режимах является ее целевая функция – поиск точки совместной работы всех агрегатов дизеля, т. е. нахождение такого количества воздуха, прошедшего через газоздушный тракт дизеля, которое удовлетворяет всем заданным условиям (параметров режима, внешних (атмосферных) условий, технического состояния и регулировки). В качестве критерия сходимости таких итерационных расчетов с заданной точностью $\varepsilon_{ГВ}$ принято условие [11]:

$$\left| \frac{G_{V0} - G_{ВЫХ}}{G_{ВЫХ}} \right| \leq \varepsilon_{ГВ},$$

где $G_{ВЫХ} = G_{ГЦ} + G_{УТ}^{\Sigma} - G_{Т}$.

Агрегированная БММ состоит из совокупности автономных математических моделей (АММ) агрегатов дизеля, представляющих собой совокупность алгебраических, трансцендентных, регрессионных уравнений и различных функциональных ограничений. Существующие между автономными моделями отдельных агрегатов прямые и обратные функциональные связи реализуются в основной управляющей модели.

В автономных математических моделях агрегатов используются известные уравнения из теории ДВС, а также зависимости, описывающие индикаторные процессы, газообмен, составляющие механических потерь, показатели агрегатов турбонаддува и т. д., полученные за последние десятилетия [11–16]. Схема автономной математической модели агрегата ДВС представлена на рис. 1.

Основная задача частной математической модели «Отдельный цилиндр ДВС» сводится к вычислению численных значений основных и дополнительных переменных, которые соответствуют реальному объекту при поддержании постоянными идентичных входных (основных и дополнительных) характеристик. К основным характеристикам относятся параметры газа на выходе из цилиндров дизеля (давления, температуры $T_{ци}$, газовой постоянной $R_{ци}$ и массового расхода $G_{ГЦ}$).

Одним из самых сложных трансцендентных уравнений частной математической модели «Отдельный цилиндр ДВС» является выражение для определения среднемассовой температуры газоздушной смеси на выходе цилиндра [11]:

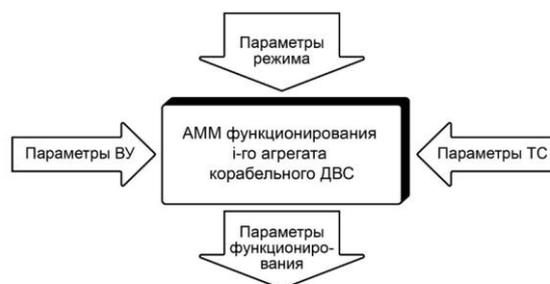


Рис. 1. Схема автономной математической модели агрегата ДВС (АММ – совокупность автономных математических моделей, ВУ – внешние условия, ТС – техническое состояние)

$$T_{ГЦ} = L_0 \cdot \alpha_{\Sigma c} \cdot G_T \cdot 0,24 \cdot (T_{кц} - 273) - G_{YT}^{\Sigma} \cdot 0,24 \cdot (T_{Гcp}^{YT} - 273) + 0,445 \cdot G_{к} \cdot (T_{кц} - 273) + \frac{Hu \cdot G_T \cdot (1 - \eta_i - \xi_{cm} - c_{63} \cdot N_{нх} \cdot \eta_i / N_i - \psi_{HG} - q_p)}{0,228 + 1,64 \cdot 10^{-2} + \left(\frac{2,625 \cdot 10^{-5} + 6 \cdot 10^{-6}}{\alpha_{\Sigma c}} \right) \cdot T_{ГЦ}} \cdot \frac{1}{\left(4,18 \cdot \frac{1 - 0,18}{\alpha_{\Sigma c}} \right)^{\frac{R_{ГЦ}}{29,3} - 1}} + 273.$$

Газовая постоянная $R_{ГЦ}$ на выходе из цилиндра определяется с помощью известного выражения [11], а массовый расход газа через поршневую часть двигателя определяется как

$$G_{ГЦ} = G_{вц} + G_T,$$

где $G_{вц}$ – массовый расход воздуха после выпадения конденсата в воздухоохладителе, кг/ч. Из дополнительных выходных переменных оценка часового расхода топлива G_T кг/ч может быть определена по формуле [4]:

$$G_T = 632,3 \cdot \frac{N_e}{Hu \cdot \eta_e},$$

где η_e – эффективный КПД двигателя вычисляется как произведение механического КПД η_m и индикаторного КПД η_i , т. е. $\eta_e = \eta_m \cdot \eta_i$, при этом, механический КПД определяется как $\eta_m = N_e / N_i$, а индикаторный КПД – с помощью произведения относительных сомножителей, полученных в результате натурных и расчетно-экспериментальных исследований [5, 11, 12, 17–19]:

$$\eta_i = \eta_{i\sigma} \cdot \bar{\eta}_i^{mc} \cdot \bar{\eta}_{i\alpha} \cdot \bar{\eta}_{i\lambda} \cdot \bar{\eta}_{i\varepsilon} \cdot \bar{\eta}_{i\zeta_{cm}} \cdot \bar{\eta}_{i\eta_0} \cdot \bar{\eta}_{i\eta} \cdot \bar{\eta}_{iG_k} - \Delta\eta_i.$$

В свою очередь индикаторная мощность двигателя N_i , кВт, определяется по формуле

$$N_i = N_e + N_{mp\sigma} - N_{нх} - \Delta N_{mk}.$$

Принципиальным моментом БММ является ее инвариантность к типу главной энергетической установки или к проекту корабля. Универсальность БММ обеспечивается возможностью ее настройки применительно к заданной версии или типу двигателя и проверяется сравнением расчетов на БММ функционирования ДВС с соответствующими результатами стендовых заводских или корабельных испытаний.

Версии агрегированной БММ для приводного дизеля 8ЧН26/26 позволяют адекватно моделировать рабочие процессы в «осредненной» поршневой части, «развернутой» по отдельным блокам и цилиндрам, а также учитывают особенности схем воздухообеспечения, газоотвода и др. Эти требования выполняются уже на этапе формирования структуры версии БММ функционирования среднеоборотных ДВС размерности 26/26.

Топологическая структурная схема математической модели функционирования корабельного ДВС с осреднённой поршневой частью, приведенная на рис. 2, состоит из шести моделей-модулей: впускного устройства VPU 1; компрессора COMPR 2; воздухоохладителя CLV 3; осредненной поршневой части двигателя CLND 4 с включенным в него механизмом изменения угла опережения подачи топлива; осредненного выпускного коллектора VIPK 5; газовой турбины TURB 6. Каждый модуль имеет четыре типа переменных (два типа входных и два типа выходных переменных). Схема математической модели i -го модуля дизеля аналогична представленной на рис. 2, то есть $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ – входные и выходные параметры воздуха (газа); $Z_{11} \dots Z_{13}, Z_{21} \dots Z_{27}, Z_{31} \dots Z_{36}, Z_{41} \dots Z_{437}, Z_{51} \dots Z_{59}, Z_{61} \dots Z_{68}$ – дополнительные входные переменные, характеризующие параметры нагрузки, технического состояния, конструктивные данные, внешние условия; $P_{21} \dots P_{27}, P_{31}, P_{41} \dots P_{450}, P_{61} \dots P_{64}$ – дополнительные выходные переменные, характеризующие параметры

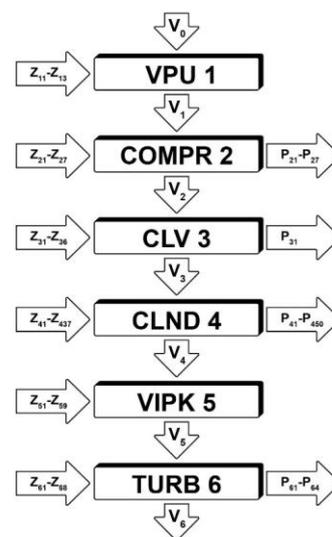


Рис. 2. Структурная схема математической модели функционирования корабельного ДВС с осреднённой поршневой частью

рабочего процесса каждого агрегата. Некоторые выходные параметры функционирования ДВС являются диагностическими параметрами. Для определения выходных параметров используются соответствующие математические зависимости из исходной математической модели функционирования корабельного ДВС.

Структурная схема (см. рис. 2) в полном объеме обеспечивает решение параметрического диагностирования газовоздушного тракта (ГВТ) дизеля 8ЧН26/26 в составе дизель-генераторной установки ДГУ-28ДГ, но накладывает ограничение на её применение для моделирования рабочих процессов с дифференциацией по блокам и отдельным цилиндрам двигателя.

Для обеспечения задачи углубленного диагностирования блоков и цилиндров дизеля используется математическая модель функционирования корабельного ДВС 8ЧН26/26 с дифференциацией рабочих процессов по i -му блоку и j -му цилиндру.

Топологическая структурная схема математической модели приведена на рис. 3. Моделирование многоцилиндровой поршневой части производится в результате многократного обращения к математической модели отдельного i -го цилиндра, включения прямых и обратных связей между математическими моделями других агрегатов ДВС, а также определения точки совместной работы всех агрегатов ДВС по массовому расходу воздуха.

В представленной на рис. 3 топологической структурной схеме: A1...A4, B1...B4 – модели отдельного цилиндра в i -м блоке главного двигателя; V3A, V3B, V4A, V4B – входные и выходные параметры воздуха (газа) осредненной по i -му блоку поршневой части двигателя; V3A1...V3A4, V3B1...V3B4 – параметры воздуха на входе в каждый цилиндр i -го блока; V4A1...V4A4, V4B1...V4B4 – параметры газа на выходе из каждого цилиндра i -го блока; Z3A1...Z3A4, Z3B1...Z3B4 – дополнительные входные переменные для каждого цилиндра, характеризующие параметры нагрузки, технического состояния, конструктивные данные, внешние условия; P3A1...P3A4, P3B1...P3B4 – дополнительные выходные переменные, характеризующие параметры рабочего процесса в каждом цилиндре.

Математическая модель синхронного генератора

Генератор представляет собой шестифазную синхронную машину с бесконтактным возбуждением. На статоре размещены две трехфазные обмотки, соединенные по схеме «звезда», которые сдвинуты относительно друг друга на 30° , с изолированной нейтралью. Выходы каждой обмотки подключены к трехфазному выпрямителю по схеме Ларионова (рис. 4).

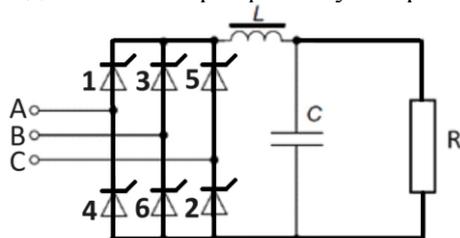


Рис. 4. Выпрямитель, подключенный к клеммам А, В, С трёхфазной обмотки статора (А, В, С – клеммы трёхфазной обмотки статора, R – нагрузка, LC – сглаживающий фильтр на выходе выпрямителя, L – индуктивность, C – ёмкость)

При математическом моделировании приняты следующие допущения ввиду незначительности их влияния на моделируемые процессы: потери в стали (явления гистерезиса и вихревые токи) не

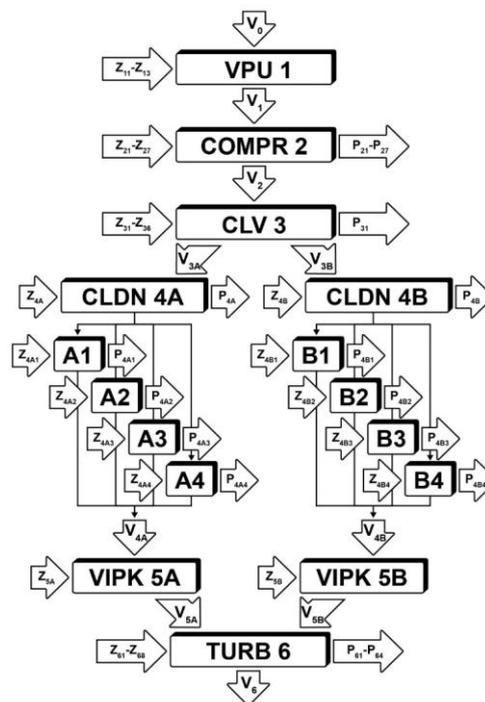


Рис. 3. Топологическая структурная схема математической модели корабельного ДВС с дифференциацией рабочих процессов по блокам и цилиндрам применительно к дизелю 8ЧН26/26

Математика

учитываются; насыщение магнитопровода не учитывается; считается, что воздушный зазор между телом ротора и статором неизменный, как и магнитная проводимость; высшие пространственные гармоники магнитного поля не учитываются, то есть распределение магнитного поля каждой из обмоток вдоль окружности ротора и статора принято синусоидальным; статор имеет симметричные трехфазные обмотки.

Математическая модель генератора реализуется системой дифференциальных уравнений [20, 21] с учетом влияния взаимной индуктивности между обмотками. Уравнения потокосцеплений для первой обмотки статора (первой «звезды») имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\psi_{a1} &= L_{a1}I_{a1} + m_{a1b1}i_{b1} + m_{a1c1}i_{c1} + m_{a1a2}i_{a2} + m_{a1b2}i_{b2} + m_{a1c2}i_{c2} + m_{a1fd}i_{fd}, \\ \psi_{b1} &= L_{b1}I_{b1} + m_{b1a1}i_{a1} + m_{b1c1}i_{c1} + m_{b1a2}i_{a2} + m_{b1b2}i_{b2} + m_{b1c2}i_{c2} + m_{b1fd}i_{fd}, \\ \psi_{c1} &= L_{c1}I_{c1} + m_{c1b1}i_{b1} + m_{c1a1}i_{a1} + m_{c1a2}i_{a2} + m_{c1b2}i_{b2} + m_{c1c2}i_{c2} + m_{c1fd}i_{fd},\end{aligned}$$

где ψ – потокосцепление обмотки; индексы 1, 2 – номер «звезды»; i – ток фазы; L – собственная индуктивность обмотки; m – взаимная индуктивность между обмотками с соответствующими индексами; f – символ обмотки возбуждения; d – символ продольной оси ротора.

Уравнения потокосцеплений ψ_{a2} , ψ_{b2} , ψ_{c2} для второй обмотки статора (второй «звезды») записываются аналогично. Уравнение потокосцепления обмотки возбуждения имеет вид:

$$\psi_{fd} = L_{fd}I_{fd} + m_{fda1}i_{a1} + m_{fdb1}i_{b1} + m_{fdc1}i_{c1} + m_{fda2}i_{a2} + m_{fdb2}i_{b2} + m_{fdc2}i_{c2},$$

а система уравнений синхронного генератора имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\psi_{a1}}{dt} - R_{a1} \cdot I_{a1} &= U_{a1}, & -\frac{d\psi_{a2}}{dt} - R_{a2} \cdot I_{a2} &= U_{a2} \\ -\frac{d\psi_{b1}}{dt} - R_{b1} \cdot I_{b1} &= U_{b1}, & -\frac{d\psi_{b2}}{dt} - R_{b2} \cdot I_{b2} &= U_{b2}, \\ -\frac{d\psi_{c1}}{dt} - R_{c1} \cdot I_{c1} &= U_{c1}, & -\frac{d\psi_{c2}}{dt} - R_{c2} \cdot I_{c2} &= U_{c2}, \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} + I_{rd} \cdot R_{rd} &= 0, & \frac{d\psi_{rq}}{dt} + I_{rq} \cdot R_{rq} &= 0, \\ \frac{d\psi_f}{dt} + I_f \cdot R_f &= U_f, & J \frac{d^2\gamma}{dt^2} &= M_m - M, \end{aligned} \right\},$$

где U – напряжение в фазе обмотки статора; I – ток фазы обмотки статора; R – сопротивление фазы обмотки статора; rd – символ демпферной обмотки ротора, расположенной по его продольной оси d ; rq – символ демпферной обмотки ротора, расположенной по его поперечной оси q ; γ – угол поворота ротора, радиан; $d\gamma/dt$ – синхронная скорость вращения ротора и магнитного поля машины, равная ω_s ; $d^2\gamma/dt^2$ – ускорение ротора; M_m – крутящий (вращающий) момент дизеля; M – электромагнитный момент (момент сопротивления) генератора.

Каждая «звезда» генератора работает непосредственно на мощный выпрямитель, выполненный по схеме Ларионова (см. рис. 4). В процессе математического моделирования вентили выпрямителя представляются в схеме замещения сопротивлениями R_{VD} в прямом и бесконечно большим сопротивлением в обратном направлениях. Звено выпрямителя рассматривается совместно со схемой замещения [21] одной «звезды» синхронного генератора (рис. 5).

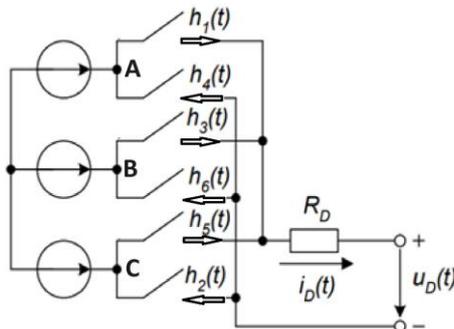


Рис. 5. Звено выпрямителя совместно со схемой замещения одной «звезды» статора: ($h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$, $h_4(t)$, $h_5(t)$, $h_6(t)$ – ключи, эквивалентные состоянию вентиля [0→закрыт, 1→открыт]; $i_D(t)$ – выпрямленный ток; $u_D(t)$ – выпрямленное напряжение; $R_D=2R_{VD}$, стрелки – направление тока, протекающего через каждый вентиль)

Нумерация вентиля соответствует порядку их включения в схеме Ларионова. Открытие вентиля происходит в небольшом промежутке времени, когда на нём действует прямое напряжение.

В этом промежутке подаётся импульс на управляющий электрод S (если это тиристор) или напряжение на открытие затвора G (если это транзистор IGBT). Закрытие вентиля происходит, когда напряжение на нём меняется с прямого на обратное.

Временной график функционирования выпрямителей представлен на рис. 6. Здесь столбцы, помеченные VZ1, относятся к первой «звезде» и к первому выпрямителю, а столбцы, помеченные VZ2 – ко второй «звезде» и ко второму выпрямителю; $l_1(t), l_2(t), l_3(t), l_4(t), l_5(t), l_6(t)$ – промежутки времени, в которые подаются импульсы на открытие вентиля первого выпрямителя; $k_1(t), k_2(t), k_3(t), k_4(t), k_5(t), k_6(t)$ – промежутки времени, в которые подаются импульсы на открытие вентиля второго выпрямителя; $T = 360^\circ$ – период синусоиды напряжения (физически это 10 мс при частоте тока 100 Гц).

В нижней части рис. 6 представлен график выпрямленного напряжения (без учета действия сглаживающего фильтра). Таким образом, в генераторной установке используется двенадцатипульсная система выпрямления переменного тока.

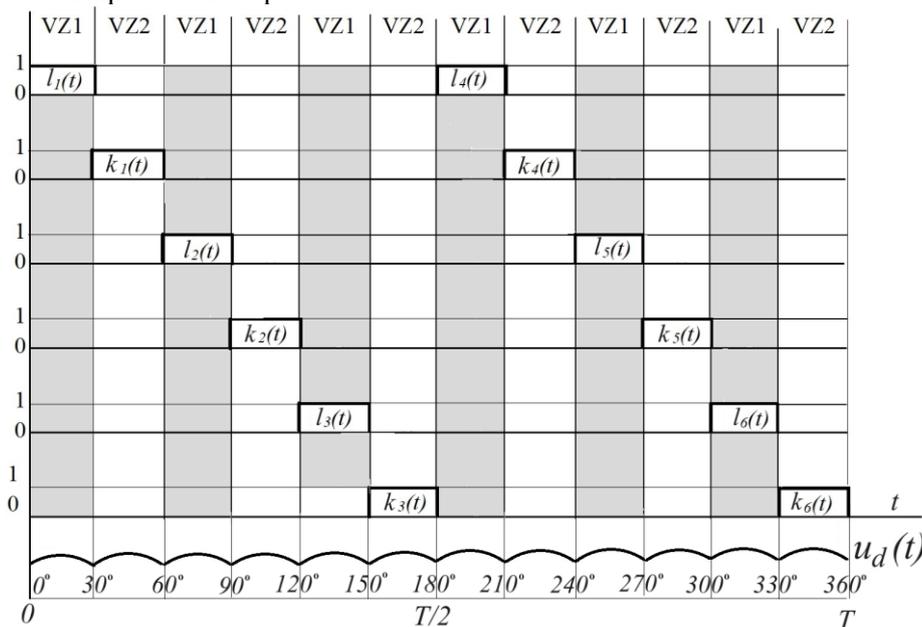


Рис. 6. Промежутки времени, в которые подаются импульсы на открытие вентиляей; выпрямленное напряжение $u_d(t)$ на протяжении одного периода синусоиды $T = 360^\circ$ (10 мс)

Направления тока и замкнутые ключи в течение одного периода синусоиды $T = 360^\circ$ (10 мс)

Фрагмент синусоиды	Направление тока	Замкнутые ключи
От 0° до 30°	От клеммы A_1 к клемме B_1	h_1 и h_6 первого выпрямителя
От 30° до 60°	От клеммы A_2 к клемме B_2	h_1 и h_6 второго выпрямителя
От 60° до 90°	От клеммы A_1 к клемме C_1	h_1 и h_2 первого выпрямителя
От 90° до 120°	От клеммы A_2 к клемме C_2	h_1 и h_2 второго выпрямителя
От 120° до 150°	От клеммы B_1 к клемме C_1	h_3 и h_2 первого выпрямителя
От 150° до 180°	От клеммы B_2 к клемме C_2	h_3 и h_2 второго выпрямителя
От 180° до 210°	От клеммы B_1 к клемме A_1	h_3 и h_4 первого выпрямителя
От 210° до 240°	От клеммы B_2 к клемме A_2	h_3 и h_4 второго выпрямителя
От 240° до 270°	От клеммы C_1 к клемме A_1	h_5 и h_4 первого выпрямителя
От 270° до 300°	От клеммы C_2 к клемме A_2	h_5 и h_4 второго выпрямителя
От 300° до 330°	От клеммы C_1 к клемме B_1	h_5 и h_6 первого выпрямителя
От 330° до 360°	От клеммы C_2 к клемме B_2	h_5 и h_6 второго выпрямителя

При расчётах учитывается, что в каждый момент времени через статическую нагрузку идёт только один ток (см. табл., столбец 2), а численное интегрирование для решения системы уравнений выполняется при замкнутой одной паре ключей (см. табл., столбец 3), остальные ключи разомкнуты.

Анализ кривых напряжения и тока генератора, полученные с использованием осциллографа Fluke 190 во время испытаний постов дистанционного контроля на подводной лодке «Кронштадт», и спектры напряжения и тока генератора, полученные с использованием программного

обеспечения прибора Fluke 190 методом дискретного быстрого преобразования Фурье, позволяет сделать вывод о большом вкладе 5-й, 7-й, 11-й, 13-й и 17-й гармоник в процесс формирования несинусоидального тока и напряжения генератора, включенного на мощный выпрямитель. Это соответствует разработанной математической модели и вполне характерно для систем выпрямления, не имеющих схем пассивной компенсации высших гармоник.

Совокупность собранных диагностических параметров, результатов работы математических моделей оценивания технического состояния и прогнозирования составляет цифровой портрет дизель-генератора (его цифровой двойник на этапе эксплуатации).

Разработанная математическая модель дизель-генератора переменного тока со статической нагрузкой позволяет: на первом этапе (прямая задача диагностирования) – получить количественную оценку и провести категорирование технического состояния дизель-генератора на основе анализа отклонений фактических значений диагностических параметров от «эталонных» (приведенных к текущим параметрам режима и внешних условий), а на втором этапе (обратная задача диагностирования) – получить количественную оценку технического состояния дизель-генератора и его элементов с моделированием возможных неисправностей объекта диагностирования для последующего сравнения с накопленным массивом параметров технического состояния и определения возможных рисков отклонения от режима нормального функционирования.

На этапе диагностики технического состояния дизель-генератора собранные фактические и расчетные параметры технического состояния передаются в диагностическую систему для принятия управленческих решений. Для этого широко применяют беспроводные и цифровые технологии [22–26], а компенсация помех и искажений при регистрации и передаче характеристик состояния дизель-генераторов обеспечивается за счет применения методов теории оптимальных динамических измерений [27, 28].

Заключение

Разработанная математическая модель дизель-генератора переменного тока со статической нагрузкой является основой единой цифровой платформы функционирования переносных диагностических комплексов информационной поддержки жизненного цикла энергетических установок, эксплуатируемых на борту надводных кораблей и неатомных подводных лодок. Ее применение позволяет рационально планировать техническое обслуживание корабельных энергетических установок по фактическому состоянию. Кроме этого, предложенная математическая модель эффективно применяется в составе компьютерных учебных комплексов профессиональной подготовки экипажей надводных кораблей и неатомных подводных лодок.

Литература

1. Батрак, Д.В. Система электродвижения для высокоскоростных судов / Д.В. Батрак, Д.В. Никущенко, А.П. Сеньков // *Электротехника*. – 2022. – № 11. – С. 59–64.
2. Горшков, В.Ф. Проблемы энергетики надводных кораблей Военно-Морского Флота / В.Ф. Горшков, М.Б. Белов, Е.В. Цыбульский // *Морской сборник*. – 2022. – № 2 (2099). – С. 35–41.
3. Казанов, С.А. О проблемах выработки электроэнергии в системах электродвижения кораблей и судов / С.А. Казанов // *Труды Крыловского государственного научного центра*. – 2021. – № 3 (397). – С. 83–91.
4. Одинаев, В.А. Математическая модель пространства состояний корабельной электроэнергетической системы. Принятие оперативных решений / В.А. Одинаев // *Судостроение*. – 2003. – № 5 (750). – С. 42–44.
5. Печковский, П.Г. Обоснование инновационных технических решений в области корабельной энергетики перспективных многоцелевых кораблей / П.Г. Печковский // *Вопросы оборонной техники*. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2021. – № 7-8 (157-158). – С. 136–143.
6. Цифровые двойники в теории и практике авиационной электроэнергетики / С.П. Халютин, И.Е. Старостин, А.О. Давидов и др. // *Электричество*. – 2022. – № 10. – С. 4–13.
7. Шарашкин, С.В. Применимость различных типов электрических машин при построении систем электродвижения судов / С.В. Шарашкин // *Судостроение*. – 2022. – № 6 (865). – С. 33–35.

8. Шелудько, В.Н. Основные направления развития судовой электротехники / В.Н. Шелудько, Ю.В. Сентябрев, А.В. Григорьев // Электротехника. – 2021. – № 3. – С. 2–8.

9. Сенсорные сети контроля состояния авиационной техники при испытаниях и эксплуатации / Е.С. Солдатов, А.В. Богомолов, Е.В. Ларкин, А.С. Солдатов // Авиакосмическое приборостроение. – 2024. – № 2. – С. 61–68.

10. Булатов, Ю.Н. Киберфизические системы электроснабжения: моделирование, управление, идентификация / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов. – Иркутск: ИНТУ, 2022. – 158 с.

11. Современные бортовые переносные аппаратно-программные комплексы информационной поддержки, обучения и тренажа личного состава корабельных специалистов электромеханического профиля / П.М. Гацак, Ю.В. Пыльнев, С.И. Золотарёв, В.А. Долгов. – СПб.: ВМПИ, 2024. – 140 с.

12. Золотарев, С.И. Методика создания программно-аппаратных комплексов информационной поддержки эксплуатации энергетической установки и специальной (электромеханической) подготовки экипажей надводных кораблей и подводных лодок на основе архитектуры цифровой платформы / С.И. Золотарев, И.А. Кирюхин, Ю.В. Пыльнев // Сборник трудов ВМПИ. – СПб.: ВМПИ, 2023. – С. 92–99.

13. Андриюшкевич, С.К. Разработка цифрового двойника энергетической системы на основе онтологической модели / С.К. Андриюшкевич, С.П. Ковалёв, Е.И. Нефедов // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 1. – С. 51–56.

14. Гришанов, С.А. Численные методы определения параметров математических моделей синхронных генераторов / С.А. Гришанов, А.М. Ларин, С.А. Зори // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 33–45.

15. Данеев, А.В. Математическая модель шестифазного магнитоэлектрического генератора с мостовым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой на выходе / А.В. Данеев, Р.А. Данеев, В.Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 21–29.

16. Дядик, А.Н. Цифровой двойник электрохимического генератора / А.Н. Дядик, А.В. Юшков // Морской вестник. – 2023. – № 1 (85). – С. 72–74.

17. Муртазин, Т.Э. Векторное управление гребным асинхронным электроприводом / Т.Э. Муртазин, В.Г. Титов, О.А. Мотина // Интеллектуальная электротехника. – 2021. – № 4 (16). – С. 59–67.

18. Самосейко, В.Ф. Методика проектирования асинхронных гребных электродвигателей с заданным коэффициентом мощности / В.Ф. Самосейко, С.В. Шарашкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2022. – № 4. – С. 82–88.

19. Сеньков, А.П. Перспективы совершенствования единых электроэнергетических систем с цифровым управлением на судах с электродвижением / А.П. Сеньков, Д.В. Никущенко, В.И. Кузнецов // Электротехника. – 2021. – № 5. – С. 41–46.

20. Калинин, И.М. Компьютерная модель асинхронного гребного электропривода с тремя обмотками на статоре / И.М. Калинин // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2021. – № 1 (395). – С. 132–140.

21. Тумаева, Е.В. Математическая модель синхронного электропривода / Е.В. Тумаева. – Казань: КГТУ, 2008. – 93 с.

22. Инерциально-спутниковая навигационная система управления транспортными средствами / В.Г. Макаренко, А.А. Подорожняк, С.В. Рудаков, А.В. Богомолов // Проблемы управления. – 2007. – № 1. – С. 64–71.

23. Soldatov, E.S. Digital Models, Sensor Network and Autonomous Telemetry Modules for Cryogenic Storage Systems / E.S. Soldatov, A.V. Bogomolov // Journal of Computational and Engineering Mathematics. – 2024. – Vol. 11, no 1. – P. 34–48.

24. Макаренко В.Г., Богомолов А.В., Рудаков С.В., Подорожняк А.А. Технология построения инерциально-спутниковой навигационной системы управления транспортными средствами с нейросетевой оптимизацией состава вектора измерений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 1. – С. 39–44.

25. Ларкин, Е.В. Моделирование надежности бортового оборудования мобильного робота / Е.В. Ларкин, Т.А. Акименко, А.В. Богомолов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2021. – Т. 21, Вып. 3. – С. 390–399.

26. Ларкин Е.В., Солдатов Е.С., Богомолов А.В. Математическое обеспечение мониторинга состояния и управления режимами эксплуатации систем хранения криогенных продуктов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика». 2024. – Т. 16, № 1. – С. 23–31.

27. Алгоритм численного нахождения оптимального измерения, искаженного инерционностью, резонансами и деградацией измерительного устройства / А.Л. Шестаков, С.А. Загребина, Н.А. Манакова и др. // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 1. – С. 55–67.

28. Развитие теории оптимальных динамических измерений / Е.В. Бычков, С.А. Загребина, А.А. Замышляева и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 19–33.

Поступила в редакцию 22 июля 2024 г.

Сведения об авторах

Одинаев Владимир Абдурахимович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник АО «Инжиниринговая компания «Неотек Марин», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: odinaev@neotech-marine.ru.

Шигапов Ильяс Ильгизович – кандидат технических наук, начальник управления кораблестроения, Главное командование Военно-Морского Флота, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: pm@mil.ru.

Долгов Владимир Александрович – кандидат технических наук, главный инженер АО «Инжиниринговая компания «Неотек Марин», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: dolgov@neotech-marine.ru.

Саськов Кирилл Григорьевич – заместитель главного инженера АО «Инжиниринговая компания «Неотек Марин», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: kir@neotech-marine.ru.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2024, vol. 16, no. 4, pp. 56–66*

DOI: 10.14529/mmph240407

MATHEMATICAL MODEL OF AN AC DIESEL GENERATOR WITH STATIC LOAD

V.A. Odinaev¹, I.I. Shigapov², V.A. Dolgov¹, K.G. Saskov¹

¹ Engineering company "Neotech Marine", St. Petersburg, Russian Federation

² Main Command of the Navy, St. Petersburg, Russian Federation

E-mail: odinaev@neotech-marine.ru

Abstract. The solution to the problem of technical diagnostics of the state of power plants on board surface ships and non-nuclear submarines requires the use of portable diagnostic systems. Their key element is a mathematical model of a diesel generator. The paper presents a comprehensive mathematical model of a diesel generator as a result of combining mathematical models of a diesel engine and a synchronous generator. The operation of a diesel engine is modeled on the basis of an aggregated basic mathematical model of a marine internal combustion engine, implemented on the example of a diesel generator plant of a non-nuclear submarine. The mathematical model of a synchronous generator is implemented by a system of differential equations taking into account the design features of a single generator. It allows calculating estimates of the reference characteristics of serviceable diesel generators in specified external conditions and operating modes and simulating typical faults. The use of the developed mathematical model makes it possible to obtain a quantitative estimate and categorize the technical condition of a diesel generator based on the analysis of deviations of actual values of diagnostic parameters from the reference values, reduced to the current parameters of the mode and external operating conditions. It also helps simulate possible faults of the diagnostic object to predict the technical condition and risks of deviation from the normal operating mode. The modeling results are the basis for the

automated formation of recommendations for the operation, maintenance and repair of diesel generators used in power plants of surface ships and non-nuclear submarines.

Keywords: marine power equipment; synchronous generator; mathematical model of the generator; diesel generator; digital diagnostic complex.

References

1. Batrak, D.V., Nikushchenko, D.V. Senkov, A.P. An Electric-Propulsion System for High-Speed Vessels. *Russ. Electr. Engin.*, 2022, Iss. 93, pp. 739–742. DOI: 10.3103/S1068371222110025
2. Gorshkov V., Belov M., Tsybul'sky Ye. Problems of Power Engineering of Navy Surface Ships. *Morskoy sbornik* (Marine collection), 2022, no. 2 (2099), pp. 35–41. (in Russ.).
3. Kazanov S.A. On Electric Power Generation Issues in Ship Electric Propulsion Systems. *Proceedings of the Krylov State Research Center*, 2021, no. 3 (397), pp. 83–91. (in Russ.). DOI: 10.24937/2542-2324-2021-3-397-83-91
4. Odinaev V.A. State-Space Mathematical Model OF Shipboard Electric Power System. Operative Decision-Making. *Sudostroenie* (Shipbuilding), 2003, no. 5 (750), pp. 42–44. (in Russ.).
5. Pechkovsky P.G. Justification of Innovative Technical Solutions in the Field of Shipboard Power Supply of New Multipurpose Ships. *Issues of defense equipment. Series 16: Technical means of counter-terroring terrorism*. 2021. No. 7-8 (157-158), pp. 136–143. (in Russ.).
6. Khalyutin S.P., Starostin I.E., Davidov A.O., Kharkov V.P., Zhmurov B.V. Digital Twins in the Theory and Practices of Aircraft Electrical Power Systems. *Electricity*, 2022, no. 10, pp. 4–13. (in Russ.). DOI: 10.24160/0013-5380-2022-10-4-13
7. Sharashkin S.V. Suitability of Various Types of Electric Motors for Electric Ship Propulsion Systems. *Sudostroenie* (Shipbuilding), 2022, no. 6 (865), pp. 33–35. (in Russ.).
8. Sheludko V.N., Sentyabrev Y.V., Grigoriev A.V. Electrical Engineering Strategy. *Russian Electrical Engineering*, 2021, Vol. 92, no. 3, pp. 123–128. DOI: 10.3103/S1068371221030111
9. Soldatov E.S., Bogomolov A.V., Larkin E.V., Soldatov A.S. Sensor Networks for Monitoring the Condition of Aircraft During Testing and Operation. *Aerospace Instrument-Making*, 2024, no. 2, pp. 61–68. (in Russ.). DOI: 10.25791/aviakosmos.2.2024.1395
10. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. *Kiberfizicheskie sistemy elektrosnabzheniya: modelirovanie, upravlenie, identifikatsiya* (Cyber-Physical POWER supply Systems: Modeling, Control, Identification). Irkutsk, INTU Publ., 2022, 158 p. (in Russ.).
11. Gatsak P.M., Pylnev Yu.V., Zolotarev S.I., Dolgov V.A. *Sovremennye bortovye perenosnye apparatno-programmnye komplekсы informatsionnoy podderzhki, obucheniya i trenazha lichnogo sostava korabel'nykh spetsialistov elektromekhanicheskogo profilya* (Modern On-Board Portable Hardware and Software Systems for Information Support, Training and Exercise of Personnel of Ship Specialists in the Electromechanical Profile). St. Petersburg, VMPI Publ., 2024, 140 p. (in Russ.).
12. Zolotarev S.I., Kiryukhin I.A., Pylnev Yu.V. Metodika sozdaniya programmno-apparatnykh kompleksov informatsionnoy podderzhki ekspluatatsii energeticheskoy ustanovki i spetsial'noy (elektromekhanicheskoy) podgotovki ekipazhey nadvodnykh korabley i podvodnykh lodok na osnove arkhitektury tsifrovoy platformy (Methodology for Creating Software and Hardware Complexes for Information Support of the Operation of a Power Plant and Special (Electromechanical) Training of Crews of Surface Ships and Submarines Based on the Architecture of a Digital Platform). *Collection of works of VMPI*, St. Petersburg: VMPI Publ., 2023, pp. 92–99. (in Russ.).
13. Andryushkevich S.K., Kovalev S.P., Nefyodov E.I. Ontological Model-Based Development of a Digital Twin for a Power System. *Automation in industry*, 2020, no. 1, pp. 51–56. (in Russ.). DOI: 10.25728/avtprom.2020.01.10
14. Grishanov S.A., Larin A.M., Zori S.A. Numerical Methods for Determining the Parameters of Synchronous Generators Mathematical Models. *Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences*, 2022, no. 1, pp. 33–45. (in Russ.).
15. Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Universal Mathematical Model of the Six-Phase Magnetolectric Generator with Bridge Rectifier and Active-inductive Load at the Output. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* (Modern technologies. Systems analysis. Modeling), 2022, no. 1 (73), pp. 21–29. (in Russ.). DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).21-29

16. Dyadik A.N., Yushkov A.V. Tsifrovoy dvoynik elektrokhimicheskogo generatora (Digital Twin of an Electrochemical Generator). *Morskoy vestnik* (Marine Bulletin), 2023, no. 1 (85), pp. 72–74. (in Russ.). DOI: 10.56192/18123694_2023_1_72
17. Murtazin T.E., Titov V.G., Motina O.A. Vector Control of Asynchronous Electric Drive in Ship Propulsion System. *Intellektual'naya elektrotehnika* (Intelligent Electrical Engineering), 2021, no. 4 (16), pp. 59–67. (in Russ.). DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_59
18. Samoseiko V.F., Sharashkin S.V. Method of Designing Asynchronous Propulsion Motors with Given Power Factor. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies*, 2022, no. 4, pp. 82–88. (in Russ.). DOI: 10.24143/2073-1574-2022-4-82-88
19. Senkov A.P., Nikushchenko D.V., Kuznetsov V.I. Prospects for Improving the Unified Electric Power Systems with Digital Control on Ships with Electric Propulsion. *Elektrotehnika* (Electrical Engineering), 2021, no. 5, pp. 41–46. (in Russ.).
20. Kalinin I.M. Computer-based Model of Asynchronous Electric Propulsion Drive with Three Stator Windings. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* (Proceedings of the Krylov State Research Center), 2021, no. 1 (395), pp. 132–140. (in Russ.). DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-132-140
21. Tumaeva E.V. Matematicheskaya model' sinkhronnogo elektroprivoda (Mathematical Model of a Synchronous Electric Drive). Kazan, KSTU Publ., 2008. 93 p. (in Russ.).
22. Makarenko V.G., Podorozhnyak A.A., Rudakov S.V., Bogomolov A.V. An Inertial-satellite Navigation Control System for Vehicles. *Problemy upravleniya* (Control Problems), 2007, no. 1, pp. 64–71. (in Russ.).
23. Soldatov E.S., Bogomolov A.V. Digital Models, Sensor Network and Autonomous Telemetry Modules for Cryogenic Storage Systems. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2024, Vol. 11, no. 1, pp. 34–48. DOI: 10.14529/jcem240105
24. Makarenko V.G., Bogomolov A.V., Rudakov S.V., Podorozhnyak A.A. Technique of Construction of an Inertia-Satellite Navigational Control System of Vehicles with Neuron Network by Optimization of a Structure of Vector of Gaugings. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* (Mechatronics, automation, control), 2007, no. 1, pp. 39–44. (in Russ.).
25. Larkin E.V., Akimenko T.A., Bogomolov A.V. Modeling the Reliability of the Onboard Equipment of a Mobile Robot. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2021, vol. 21, iss. 3, pp. 390–399. DOI: 10.18500/1816-9791-2021-21-3-390-399
26. Larkin E.V., Soldatov E.S., Bogomolov A.V. Mathematical Support for Monitoring the State and Controlling the Operating Modes of Cryogenic Product Storage Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*. 2024. Vol. 16, no. 1, pp. 23–31. DOI: 10.14529/mmph240103 (in Russ.).
27. Shestakov A.L., Zagrebina S.A., Manakova N.A., Sagadeeva M.A., Sviridyuk G.A. Numerical Optimal Measurement Algorithm Under Distortions Caused by Inertia, Resonances, and Sensor Degradation. *Automation and Remote Control*, 2021, Vol. 82, no. 1, pp. 41–50. DOI: 10.1134/S0005117921010021
28. Bychkov E.V., Zagrebina S.A., Zamyshlyayeva A.A., Keller A.V., Manakova N.A., Sagadeeva M.A., Sviridyuk G.A. Development of the Theory of Optimal Dynamic Measurements. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematical Modeling and Programming"*, 2022, Vol. 15, no. 3, pp. 19–33. (in Russ.). DOI: 10.14529/mmp220302

Received July 22, 2024

About the authors

Odinaev Vladimir Abdurakhimovich is Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Chief Researcher of JSC Engineering Company Neotek Marine, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: odinaev@neotech-marine.ru.

Shigapov Ilyas Ilgizovich is Cand. Sc. (Engineering), Head of the Shipbuilding Department of the Main Command of the Navy, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: pm@mil.ru.

Dolgov Vladimir Aleksandrovich is Cand. Sc. (Engineering), Chief Engineer of JSC Engineering Company Neotek Marine, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: dolgov@neotech-marine.ru.

Saskov Kirill Grigorievich is Deputy Chief Engineer of JSC Engineering Company Neotek Marine, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: kir@neotech-marine.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЧТИ-ПЕРИОДИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРУКТУРЫ ТАЙФУНОВ

А.А. Парамонов¹, А.В. Калач^{1,2}

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

² Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Российская Федерация

E-mail: paramonov_a_a99@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен метод преобразования изображений из прямоугольной системы координат в полярную систему с целью для дальнейшего почти-периодического анализа структуры тайфунов на основе обобщённой сдвиговой функции. Основным методом почти-периодического анализа предполагается разделение данных на высокочастотные колебательные составляющие и низкочастотные тренды на основе теории пропорций, что позволяет выделить почти-периодические характеристики.

Показано, что почти-периодический анализ применим к данным изображений как по радиус-вектору, так и углу в полярной системе координат. Примеры анализа горизонтальных и вертикальных сечений изображения демонстрируют наличие значимых почти-периодов, которые соответствуют определённым пиксельным значениям. Для полярной системы координат был проведён почти-периодический анализ углов, который выявил дополнительные почти-периоды, учитывающие периодичность угловых координат. Расширение углового интервала до 720° и 1080° подтвердило устойчивость результатов почти-периодического анализа, что указывает на достаточность двукратного интервала для качественного анализа.

Таким образом, предложенный метод позволяет более точно и эффективно анализировать данные изображений, выявляя значимые почти-периоды, что открывает новые перспективы для прогнозирования и обработки информации в различных научных и прикладных задачах по анализу данных с упорядоченным аргументом.

Ключевые слова: методы анализа данных; данные с упорядоченным аргументом; тренд; нелинейные колебания; почти-период; анализ изображений; чрезвычайные ситуации; тайфуны; преобразование координат.

Введение

Тропические циклоны (тайфуны) представляют собой одно из самых разрушительных природных явлений, сопровождаемых ураганскими ветрами и огромными океанскими волнами, катастрофическими ливнями и вызванными ими наводнениями, оползнями и селевыми потоками, которые наносят колоссальные разрушения объектам инфраструктуры и уносят тысячи человеческих жизней. Необходимо отметить, что, несмотря на уровень развития современных технологий, точность прогнозирования возникновения тропических циклонов и их эволюции недостаточно высокая и является предметом интенсивных исследований учеными разных стран. В связи с данными фактами прогнозирование тропических циклонов представляет собой важную и актуальную научную задачу, направленную на обеспечение гидрометеорологической безопасности населения и отраслей экономики страны. Современный анализ информации позволяет осуществлять трансформацию исходных наборов данных согласно выдвигаемым суждениям и гипотезам в целях упрощения выявления закономерностей и других сведений. Такими преобразованиями могут быть, например, растяжение или сжатие изображения, Фурье-преобразование, кодирование смысловой нагрузки текста в латентные контекстные векторы или смена системы координат. Среди систем координат широко распространённой является прямоугольная декартова система координат, в которой возможно представить описание данных графического вида (например, фото и видео). Положение пикселя на изображении определяется координатами ширины и высоты, а цвет задаётся либо через яркость чёрно-белого оттенка в случае монохромного изображения, либо в виде комбинации яркостей трех или четырехцветных палитр RGB/CMYK.

Известно, что данные спутникового мониторинга тропических циклонов позволяют значительно расширить объем получаемой информации для подготовки объективного прогноза. Одна-

Математика

ко для анализа изображений, представляющих графический вид сферических объектов, например, таких, как тропические циклоны (тайфуны), необходимо учитывать циркулярный характер данных и применить к исходной информации преобразование в пространство полярных координат, выбрав в качестве центра построения радиус-векторов геометрический центр исследуемого объекта.

Основная часть

Преобразование изображения из прямоугольной системы координат в полярную проводится с применением тригонометрической функции арктангенса и выражения, известного как евклидова норма. Таким образом, система координат, описывающих положение пикселя с применением ширины и высоты, сменяется парой координат, задающих положение на основе длины радиус-вектора и угла отклонения радиус-вектора от нулевой оси согласно выражениям

$$\rho(x, y) = \sqrt{(x_c - x)^2 + (y_c - y)^2}, \quad \theta(x, y) = \arctan \frac{y_c - y}{x_c - x}, \quad (1)$$

где x_c, y_c – декартовы координаты центра преобразования; x, y – преобразуемые декартовы координаты пикселя; ρ, θ – полярные координаты – длина радиус-вектора и угол.

Таким образом, изображение в декартовых координатах можно преобразовать в полярные координаты для дальнейшего анализа. Пример такого преобразования приведён ниже – исходное изображение представлено на рис. 1, а, красной точкой отмечен центр преобразования в полярные координаты, и на рис. 1, б приведено представление изображения в полярных координатах соответственно.

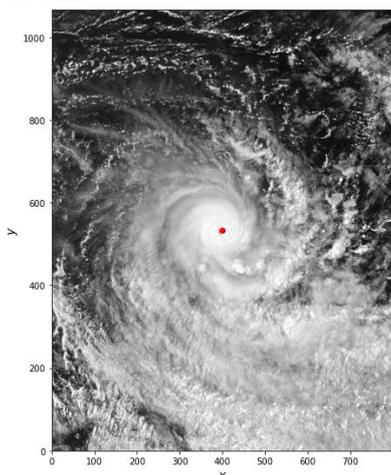


Рис. 1, а. Исходное изображение тропического циклона и центр преобразования данных

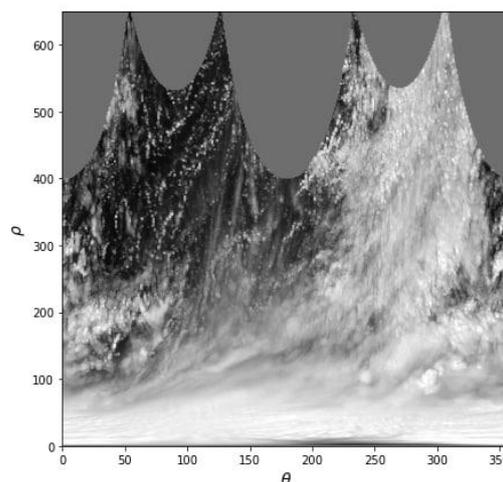


Рис. 1, б. Представление изображения тропического циклона в полярных координатах

Современный набор методов анализа данных имеет длинный список наименований, назначений и принципов работы. Среди прочих можно отдельно выделить методы почти-периодического анализа, в частности – метод, основанный на обобщённой сдвиговой функции [1, 2].

Эффективность метода в различных задачах представлена в ряде работ. Так, в исследовании [1] приведены результаты сравнительного анализа предлагаемого метода с классическим методом Фурье-анализа, основанным на априорных периодических функциях. Следует отметить, что в работе [3] приведены результаты применения почти-периодического анализа на больших данных, представленные эмпирическими значениями замеров атмосферного давления. В экономической области были проведены работы по оценке биржевых [4] и макроэкономических [5] показателей.

Рассматриваемый метод опирается на процедуру разделения высокочастотных колебательных составляющих от низкочастотных трендовых динамик на основе теории пропорций и процесс извлечения почти-периодических характеристик на основе набора данных, лишённых тренда. В качестве независимого метода по разделению трендовой и колебательной составляющих используется метод, основанный на теории пропорций, позволяющий представить данные в координатах:

$$\ln \left(\frac{y_{t-\Delta t} \cdot y_{t+\Delta t}}{y_t^2} \right) \sim t, \quad (2)$$

где y_t – текущее значение; $y_{t-\Delta t}$ – предыдущее значение на расстоянии Δt по аргументу; $y_{t+\Delta t}$ – следующее значение на расстоянии Δt по аргументу.

Полученные в результате разделения колебания затем анализируются на предмет наличия почти-периодов с учётом влияния параметра сдвига Δt :

$$a(\tau, \Delta t) = \frac{1}{n - \tau - 2\Delta t} \cdot \sum_{t=1}^{n-\tau-2\Delta t} \left| \ln \left(\frac{y_{t-\Delta t+\tau} \cdot y_{t+\Delta t-\tau}}{y_{t+\tau}^2} \right) - \ln \left(\frac{y_{t-\Delta t} \cdot y_{t+\Delta t}}{y_t^2} \right) \right|, \quad (3)$$

где n – общее число отсчётов функции $y(t)$; τ – почти-период.

Считая структуры данных подобными временным рядам, почти-периодический анализ можно применить по отношению к данным изображения по горизонтальным или вертикальным срезам в декартовой системе координат так же, как и к срезам по длине радиус-вектора в полярной системе координат. Так, для анализа по горизонтальному сечению изображения (см. рис. 1, а) обобщённая сдвиговая функция имеет следующий срез (см. рис. 2).

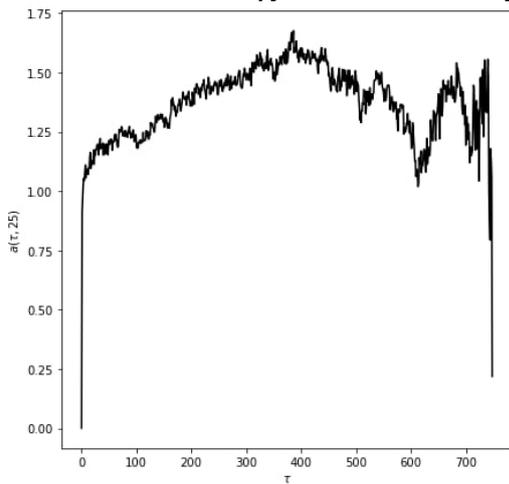


Рис. 2. Срез обобщённой сдвиговой функции горизонтального сечения изображения с рис. 1, а

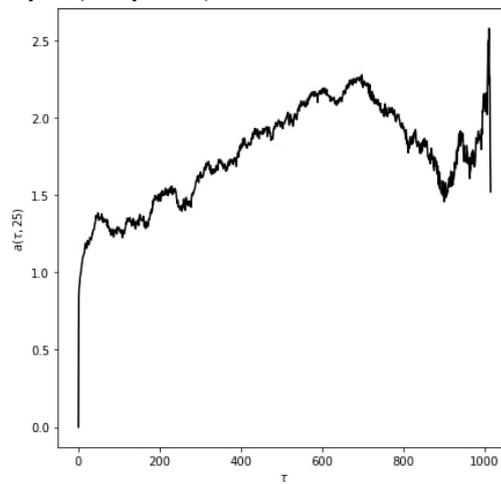


Рис. 3. Срез обобщённой сдвиговой функции вертикального сечения изображения с рис. 1, а

Срез показывает существование почти-периода в локальном минимуме вблизи значения в 600 пикселей. Также есть слабовыраженные локальные минимумы вблизи 100, 350 и 500 пикселей. При этом можно отметить систему малозначимых локальных минимумов в динамике кривой среза – иными словами, есть возможность определить менее значимые почти-периоды в других локальных минимумах, однако их существенность имеет меньший ранг.

Если провести почти-периодический анализ в отношении вертикального сечения изображения, то получится график, представленный на рис. 3.

Данный срез демонстрирует существенный локальный минимум в значении вблизи 900 пикселей, и также менее значимые вблизи 110, 260, 480, 640, 960 пикселей. Также видно, что существуют ещё менее значимые локальные минимумы.

Рассмотрим применение почти-периодического анализа к вертикальному срезу изображения 2, б – соответствующего длине радиус-вектора в полярных координатах (рис. 4).

Срез на рис. 4 демонстрирует более гладкую кривую по отношению к результатам на рис. 2 и 3, что указывает на то, что столбцы преобразованного изображения больше соответствуют классу почти-периодических временных рядов. Также срез демонстрирует существенный локальный минимум вблизи 600 пикселей и менее существенные вблизи 100, 150, 400 пикселей. Значение почти-периода в 600 встречается также и в системе почти-периодов, связанных с горизонтальным сечением декартовых координат изображения, а также близко к величине 640 – одного из существенных почти-периодов вертикального сечения прямоугольной системы координат.

Анализ вышеприведённых сечений единообразен в отношении предположения отношения данных к структуре ряда с упорядоченным аргументом и представляющей собой некоторую последовательность, для которой одной из основных целей анализа является прогнозирование значения вне обозримого диапазона.

Рассмотрим аналогичное исследование в отношении углового (горизонтального) среза исследуемых данных в полярных координатах на интервале значений аргумента $[0^\circ; 359^\circ]$ относительно данных с рис. 2 соответственно (рис. 5).

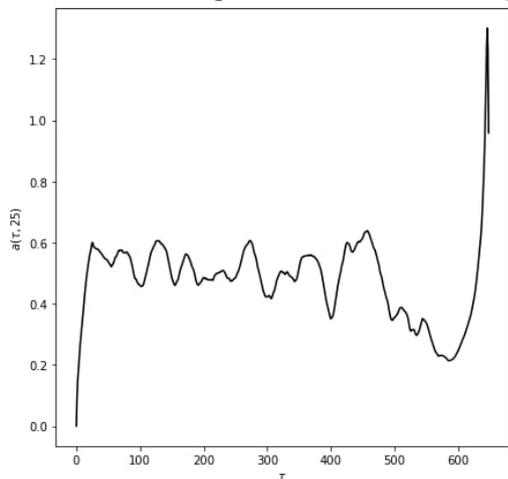


Рис. 4. Срез обобщённой сдвиговой функции вертикального сечения изображения с рис. 2

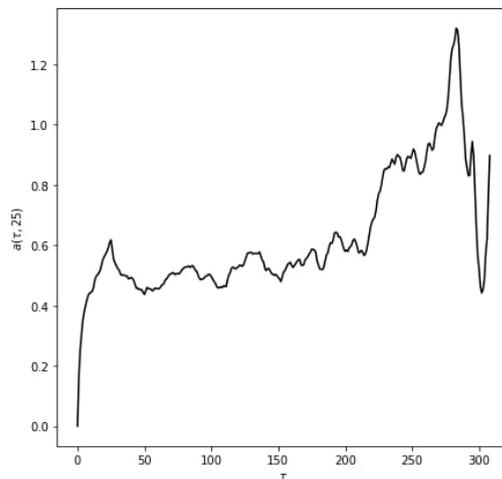


Рис. 5. Срез обобщённой сдвиговой функции горизонтального сечения изображения с рис. 1, б

Однако срезы изображения по угловой составляющей требуют отдельного внимания в отношении применения почти-периодического анализа. Данное суждение основывается на периодичности полярных координат – так, пиксель, находящийся в полярных координатах (ρ, θ) , также находится и в положении $(\rho, \theta + 360)$. Также при существовании углового почти-периода τ_1 должен существовать дополняющий почти-период $\tau_2 = 360 - \tau_1$ согласно периодичности полярных координат.

Сравнение среза с его разворотом согласно тезису о существовании дополняющего периода представлено на рис. 6.

Установлено, что характер существования минимума совпадает, однако локальный минимум почти-периода в 260° не обладает убедительностью ввиду своего недостаточно малого значения. К тому же встаёт вопрос оценки соседнего значения в 240° относительно принадлежности его к классу значений почти-периодов. Если посмотреть на дополняющий почти-период (развернутый срез), то вертикально ниже почти-период находится ровно между ними – в 250° .

Таким образом, возникает проблема несоответствия результатов набора данных естественной природе их описывающей шкалы.

В таком интервале не рассматривается периодическая связь между элементами, расположенными по разные стороны нулевой оси в порядке возрастания угла – так, например, мы не исследуем взаимосвязь между элементами на углах 250° и 13° .

Для решения этой проблемы предлагается рассмотреть расширенный угловой набор данных – исследовать интервал не $[0^\circ; 359^\circ]$, а удвоенный интервал $[0^\circ; 719^\circ]$. В таком случае устанавливается взаимосвязь разделённых нулевой осью элементов, а также рассматриваются большие наборы для оценки дополняющих почти-периодов. Таким образом, новый набор данных примет следующий вид (рис. 7).

В таком случае почти-периодический анализ увеличивает временную нагрузку согласно описанной асимптотической оценке [6].

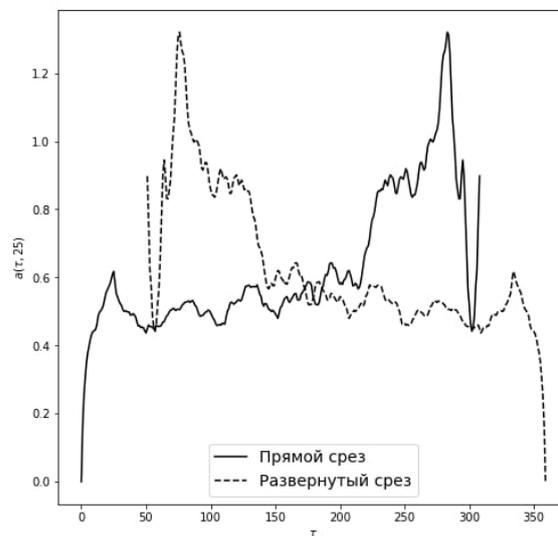


Рис. 6. Сравнение среза обобщённой сдвиговой функции с его отражением относительно 180°

Срез обобщённой сдвиговой функции для горизонтального сечения рис. 7 представлен на рис. 8.

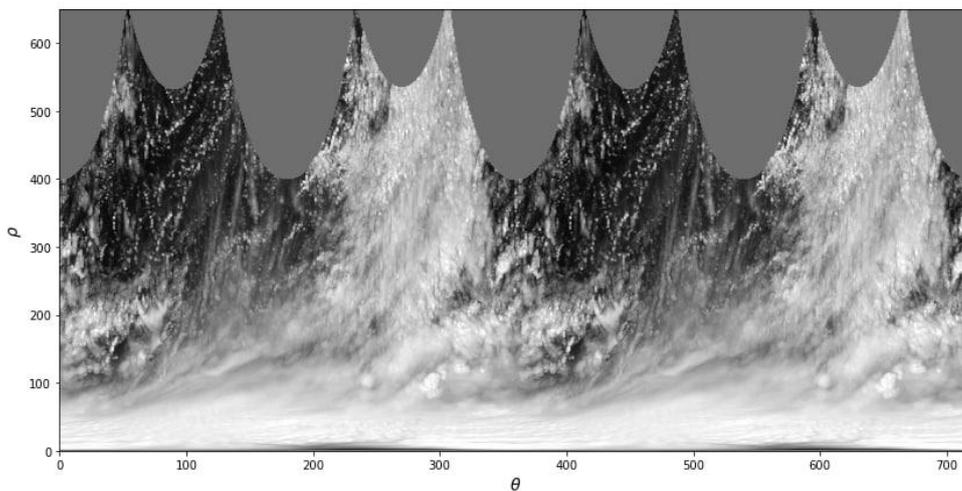


Рис. 7. Представление изображения в полярных координатах для углового интервала $[0^\circ; 719^\circ]$

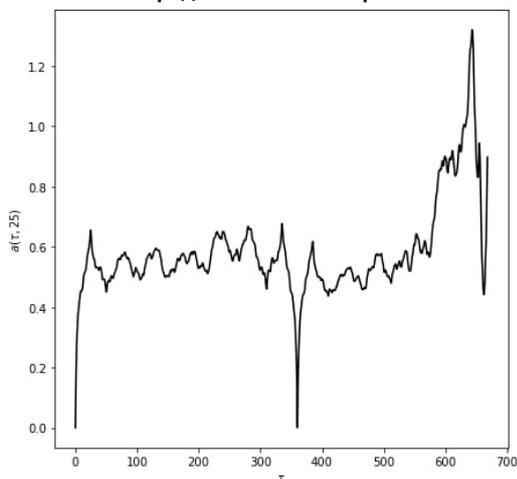


Рис. 8. Срез обобщённой сдвиговой функции горизонтального сечения изображения с рис. 7

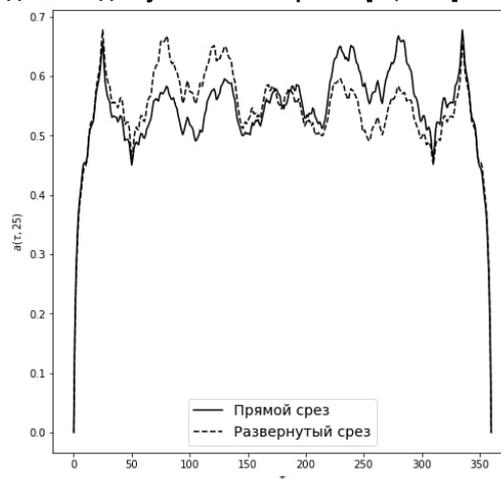


Рис. 9. График среза и разворота среза обобщённой сдвиговой функции на исследуемом интервале данных $[0^\circ; 360^\circ]$

Срез показал существование чистого периода в 360° – значение среза в данном аргументе равно 0. Также видна сильная корреляция внутри интервала $[0^\circ; 360^\circ]$ для прямого значения среза и развёрнутой его последовательности (рис. 9).

Аналогичным образом возможно проверить воспроизведение почти-периодов, превышающих основные, имеющие значение до 180° , на 360° – то есть совпадение локальных минимумов на интервалах среза $[0^\circ; 360^\circ]$ и $[360^\circ; 670^\circ]$ соответственно. Результат проведенной проверки представлен на рис. 10.

Таким образом, установлено, что расширение диапазона угла позволяет качественно уточнить структуру угловых почти-периодов в системе полярных координат представления исходного изображения тропического циклона.

Необходимо отметить, что аналогичным образом возможно оценить эффект наращивания длины интервала – добавление ещё 360° – таким образом, получается 1080° . В таком случае срез обобщённой сдвиговой функции примет вид согласно рис. 11.

Установлено, что исследуемый срез обобщённой сдвиговой функции на интервалах $[0^\circ; 360^\circ]$ и $[360^\circ; 720^\circ]$ имеет практически идентичные значения. Повторение кривой среза на разных интервалах и инверсия этих интервалов носят идентичные характеры и близкие значения. Установлено, что последующее наращивание величины углового интервала качественно не изменило результата, закрепив структуру воспроизведением аналогичной системы почти-периодов на интервале $[360^\circ; 720^\circ]$ градусов. Таким образом, сделан вывод об избыточности трехкратного углового

интервала, но достаточности двукратного интервала при решении задачи выявления структурных особенностей тайфунов в полярных координатах с применением почти-периодического анализа путем обработки и анализе данных с упорядоченным аргументом в сложных условиях динамического изменения параметров тропических циклонов.

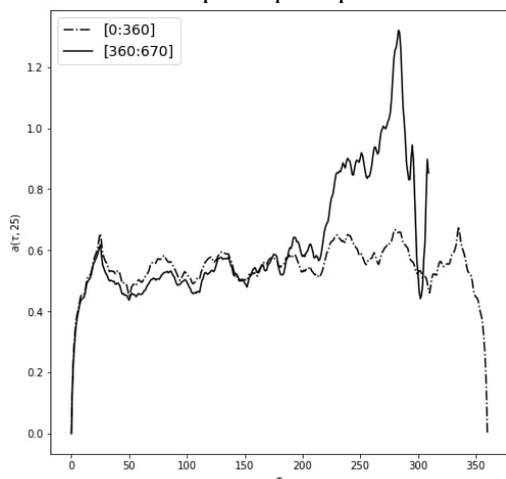


Рис. 10. График периодических интервалов среза обобщенной сдвиговой функции

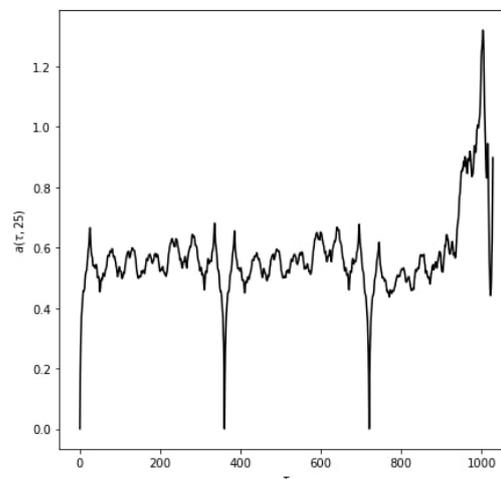


Рис. 11. Срез обобщенной сдвиговой функции углового среза для трехкратного кругового интервала

Следует отметить, что вопросами использования современных вычислительных технологий обработки информации при человеко-машинном взаимодействии в сложных условиях успешно занимаются в научной школе профессора РАН Р.В. Мещерякова. Авторы выражают признательность за предоставленную возможность регулярного общения с Романом Валерьевичем Мещеряковым, поздравляют с юбилеем и желают успехов в научной деятельности.

Заключение

Исследование показало специфику применения почти-периодического анализа в полярной системе координат при обработке изображения тропического циклона. Сравнение срезов обобщенной сдвиговой функции, примененной к данным прямоугольной и полярной систем координат, показывает более гладкие, а как следствие, более естественные результаты во втором случае. Полярные координаты демонстрируют качественные результаты в обработке изображений круглых объектов. Исследование показало, что для получения наиболее точных результатов в значениях угловых почти-периодов необходимо рассмотрение расширенного, удвоенного интервала значения угла, если такое возможно в рамках источника данных. В таком случае увеличивается сила взаимосвязанных элементов, данных в полярных координатах на основе естественной периодичности циклических (или круговых) данных, что позволяет провести полносвязный угловой анализ и сформировать полноценную систему оценочных почти-периодов, которая соответствует представлениям о дополняющих углах.

Полученные результаты могут быть использованы для визуализации данных из метеорологических центров, моделирования динамики развития чрезвычайных ситуаций, обусловленных активностью тропических циклонов, с целью обеспечения мероприятий и проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ.

Литература

1. Левитан, Б.М. Почти-периодические функции / Б.М. Левитан. – М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1953. – 396 с.
2. Модели и методы определения параметров нелинейных процессов / В.И. Кузьмин, А.Б. Самохин, А.Ф. Гадзаов, В.В. Чердынцев. – М.: Московский технологический ун-т (МИРЭА), 2016. – 147 с.
3. Парамонов, А.А. Современные аспекты анализа больших данных с упорядоченным аргументом / А.А. Парамонов, Т.Е. Смоленцева, А.В. Калач // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (4–6 декабря 2023 г.). – Воронеж, 2024. – С. 609–613.

4. Dzerjinsky, R.I. The Changes Dynamics Analysis in the Japanese Stock Exchange Nikkei²²⁵ Index in the Latest Time / R.I. Dzerjinsky, B.A. Krynetsky, N.V. Chernorizova // In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (eds) Data Science and Intelligent Systems. CoMeSySo-2021. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. – V. 231.

5. Парамонов А.А., Кузьмин В.И. Анализ динамики макроэкономических показателей России // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2022. – №11-2. – С. 123–128.

6. Парамонов, А.А. Асимптотический анализ алгоритма поиска почти-периодов в данных с упорядоченным аргументом / А.А. Парамонов, Б.А. Крынецкий // Защита информации. Инсайд. – 2023. – № 4(112). – С. 53–57.

Поступила в редакцию 21 августа 2024 г.

Сведения об авторах

Парамонов Александр Александрович – аспирант, старший преподаватель кафедры прикладной математики, Институт информационных технологий РТУ МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: paramonov_a_a99@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8504-2108>.

Калач Андрей Владимирович – доктор химических наук, профессор, начальник кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну, Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Российская Федерация; Институт информационных технологий РТУ МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: a_kalach@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2024, vol. 16, no. 4, pp. 67–74

DOI: 10.14529/mmph240408

SIMULATION OF EMERGENCIES USING ALMOST PERIODIC ANALYSIS OF IMAGES OF TYPHOON STRUCTURE

A.A. Paramonov¹, A.V. Kalach^{1,2}

¹ Institute of Information Technologies RTU MIREA, Moscow, Russian Federation

² Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation

E-mail: paramonov_a_a99@mail.ru

Abstract. The paper considers the method of transforming images from rectangular coordinate system to polar coordinate system for further near-periodic analysis of typhoon structure based on generalized shear function. The basic method of near-periodic analysis involves dividing the data into high-frequency oscillatory components and low-frequency trends based on the proportion theory, which can identify near-periodic characteristics.

The paper shows that near-periodic analysis is applicable to both radius-vector and angle image data in a polar coordinate system. The practical component of the work is demonstrated by analyzing an image of a tropical cyclone. Experiments performed using horizontal and vertical sections of the image revealed significant near-periods corresponding to certain pixel values, such as 600 pixels in the horizontal section and 900 pixels in the vertical section. An angular analysis was performed for the polar coordinate system, which revealed additional almost-periods that accounted for the periodicity of the angular coordinates. Extending the angular interval to 720 and 1080 degrees confirmed the robustness of the almost-periodic analysis results, indicating that a twofold interval is sufficient for qualitative analysis.

Thus, the proposed method can analyze image data more accurately and efficiently by identifying significant near-periods, which opens new perspectives for prediction and data processing in various scientific and applied problems of data analysis with ordered argument.

Keywords: data analysis methods; ordered argument data; trend; nonlinear fluctuations; near-period; image analysis; emergencies; typhoons; coordinate transformation.

References

1. Levitan, B.M. *Pochti-periodicheskie funktsii* (Almost-Periodic Functions). Moscow, Gos. izd-vo tekhn.-teoret. lit., 1953, 396 p. (in Russ.).
2. Kuzmin V.I., Samokhin A.B., Gadzaov A.F., Cherdynstev V.V. *Models and Methods for Determining the Parameters of Nonlinear Processes*. Moscow Technological University (MIREA), 2016, 147 p. (in Russ.).
3. Paramonov A.A., Smolentseva T.E., Kalach A.V. Sovremennye aspekty analiza bol'shikh dannykh s uporyadochennym argumentom (Modern Aspects of Big Data Analysis with an Ordered Argument). *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki" (4–6 dekabrya 2023 g.)* (Proc. Int. Scientific and Technical Conference "Actual problems of applied Mathematics, Computer Science and Mechanics" (December 4–6, 2023)), pp. 609–613. (in Russ.).
4. Dzerjinsky, R.I., Krynetsky, B.A., Chernorizova, N.V. The Changes Dynamics Analysis in the Japanese Stock Exchange Nikkei²²⁵ Index in the Latest Time. In: Silhavy, R., Silhavy, P., Prokopova, Z. (eds) *Data Science and Intelligent Systems*. CoMeSySo 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol 231. Springer, Cham, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-90321-3_11
5. Paramonov A.A., Kuzmin V.I. Analysis of the Dynamics of Macroeconomic Indicators in Russia. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* (Modern science: current problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences), 2022, no. 11-2, pp. 123–128. DOI 10.37882 / 2223-2966.2022.11-2.24.
6. Paramonov A.A., Krynetsky B.A. Asymptotic Analysis of an Algorithm for Searching for Almost-Periods in Data with an Ordered Argument. *Zashchita informatsii. Insayd* (Information Security. Inside), 2023, no. 4 (112), pp. 53–57. (in Russ.).

Received August 21, 2024

Information about the authors

Paramonov Alexander Alexandrovich is Post-graduate Student, Senior Lecturer, Department of Applied Mathematics, Institute of Information Technologies RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, e-mail: paramonov_a_a99@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8504-2108>.

Kalach Andrey Vladimirovich is Dr. Sc. (Chemical), Professor, Head of the Department of Information Security and Protection of Information Constituting State Secrets, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation; Institute of Information Technologies RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, e-mail: a_kalach@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЫПОЛНЕНИЯ УНИФИЦИРОВАННЫХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ С НЕЧЕТКИМИ ЧИСЛАМИ ПРИ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ

А.В. Спесивцев, Б.В. Соколов

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: sokolov_boris@inbox.ru*

Аннотация. Рассмотрены вопросы нечеткого представления и манипулирования явными и неявными экспертными знаниями. Предложено использовать нечеткие числа, позволяющие осуществлять описание факторов неопределенности. Разработана новая форма задания симметризованных форм представления нечетких чисел, а также расширенные и дополнительные арифметические операции над ними, сохраняющие исходный уровень нечеткости знаний экспертов и упрощающие процесс их формализации при решении прикладных задач.

Ключевые слова: нечеткие числа; расширенные и дополнительные арифметические операции; имитационное моделирование; точность; достоверность; адекватность модели; сложная техническая система.

Введение

В настоящее время происходит широкое распространение процесса цифровизации, который является следующим и более эффективным этапом развития информационных технологий в различных предметных областях (ПрО). Одной из важных функций цифровизации является интеграция данных и информации, представленных в количественной форме и вербальной (неколичественной) информации для решения задач оценивания состояния сложных объектов. Понятие «сложные объекты» (СЛО) обычно ассоциируется как «сложные технические объекты», но в широком смысле оно включает, как в данном исследовании, практически все изучаемые явления, технологии, системы и даже субъектов (людей) как интеллектуальных источников знаний.

В процессе эволюции человеческий мозг приобрел уникальные способности при решении сложных задач распознавания, прогнозирования и принятия решений, которые, в первую очередь, связаны с учетом факторов неопределенности (НЕ-факторов), имеющих объективную (субъективную), внешнюю (внутреннюю) природу. Использование таких природных способностей человека следует рассматривать как объективный способ преодоления проблем сложности, например, в научных исследованиях. Так, в различных областях науки и техники уже созрело понимание того, что сложность управления СЛО можно преодолеть только с помощью равной или большей сложности управляющей системы [1]. При реализации этого принципа существенно возрастают требования к интеллектуализации управленческих систем, что вызывает необходимость более широкого использования явных и неявных экспертных знаний. При этом следует особо подчеркнуть особенность человеческого мозга, в котором база знаний и логический вывод на ее основе не разделяются, как это имеет место в компьютерах, что позволяет эксперту выступать в качестве высокоэффективной «интеллектуальной информационно-диагностической системы» [2]. Это обстоятельство подчеркивает важность и актуальность создания и повсеместного использования технологии формализации явных и неявных экспертных знаний.

Экспертная информация обычно требует особых методов извлечения, представления и формализации для последующего использования на компьютере. В этом отношении весьма перспективен нечетко-возможностный подход (НВП), который позволяет представлять экспертные знания аналитическими моделями для оценки состояния конкретного СЛО [3]. Экспертные знания и опыт, как правило, описываются в лингвистической форме и формируются в процессе «мягких измерений и вычислений» [4], что приводит к широкомасштабной реализации на практике концепции «мягкой оценки» [5] при построении математических моделей управления и оценки состояния СЛО.

Существенным компонентом представления экспертной оценки состояния СЛО является лингвистическая переменная. При отображении любой части вектора состояния СЛО через лингвистическую переменную устанавливается соответствие между лингвистическими и количественными шкалами, как показано на рис. 1. Эту операцию называют «арифметизацией» [3, 6].

Проведем краткое, но значимое объяснение необходимости процесса арифметизации рассматриваемых нечетко-возможностных процессов. В ходе проведения экспертизы часто требуется ранжировать объекты на основе измерения интенсивности проявления оцениваемого конкретного атрибута (параметра) его качества. Это подразумевает измерение в линейной ординальной шкале. Из теории шкал известно, что порядковые (ординальные) шкалы не предусматривают операции сложения (например, порядковые номера телефонов), что делает недопустимым применение общепринятых арифметических и статистических методов [6]. Для преобразования ординальных данных в числовую шкалу обычно используется дополнительная информация о градациях, позволяющая определить соответствие между пунктами шкалы и реальными числами. Самым удобным и наглядным способом арифметизации вербальных экспертных данных является построение лингвистической переменной изучаемого признака, как показано на рис. 1.

В соответствии с работой [3] зададим лингвистическую переменную следующим кортежем:

$$\langle S, T(S), X, M, G \rangle$$

где S – имя лингвистической переменной; $T(S)$ – терм-множество лингвистической переменной S ; X – базисное множество значений лингвистической переменной, при этом $T(S)$ представляет собой семейство нечетких подмножеств X ; M – правила вычисления функции принадлежности; G – синтаксическое правило, порождающее множество всех значений S на $T(S)$.

Геометрический образ лингвистической переменной, принятой в НВП для построения нечетко-возможностной модели (НВМ) [7], приведен на рис. 1.

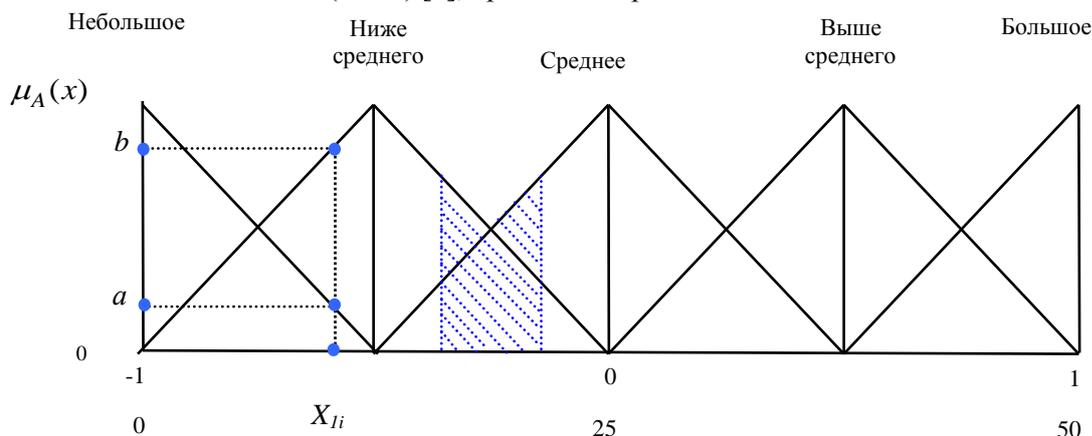


Рис. 1. X_1 – время простоев оборудования в минутах как лингвистическая переменная

На рис. 1 по оси абсцисс расположены три шкалы. На первом уровне располагается шкала лингвистических переменных с модами «небольшое – большое», далее следует шкала в интервале $[-1, +1]$ для задания безразмерных значений признаков; на третьем уровне расположена числовая шкала с оценками значений переменной в натуральных физических единицах от 0 до 50 мин.

Обратим внимание, что лингвистическая переменная включает термы $T(S)$ с модами «небольшое, ..., большое» в форме нечетких чисел. Строго говоря, нечеткое число представляет собой интервал на числовой оси. Например, на рис. 1 терм «ниже среднего» соответствует интервалу $[0-25]$ на числовой шкале, но для удобства восприятия и облегчения дальнейших действий нечеткое число изображают в форме треугольника. Таким образом, треугольные нечеткие числа (LR)-типа удобно представить как тройку параметров $A = (a, \alpha, \beta)$, где a – мода нечеткого числа, α и β – соответственно левая и правая нечеткости (Left, Right), что показано на рис. 2.

Для манипулирования нечеткими числами профессор Лотфи Заде, базируясь на принципе расширения, провел модификацию таких классических арифметических операций, как сложение, вычитание, умножение и деление. В качестве примера реализации принципа расширения можно привести результат сложения двух нечетких чисел. В этом случае происходит интеграция функ-

ций принадлежности каждого слагаемого и формируется новая функция принадлежности, описывающая результат суммирования двух нечетких чисел.

Однако использование нечетких чисел при описании экспертных знаний осложняется рядом недостатков, главным из которых является накопление нечеткости в процессе выполнения расширенных операций [3, 7]. Покажем это на примере сложения–вычитания двух нечетких чисел (LR)-типа $A(a, \alpha, \beta)$ и $B(b, \gamma, \delta)$. Так, согласно общепринятым арифметическим операциям, результат сложения задается следующим выражением:

$$A + B = (a + b, \alpha + \gamma, \beta + \delta),$$

а при вычитании из этой суммы нечеткого числа B получаем результат, описываемый выражением

$$(A + B) - B = (a + b - b, \alpha + \gamma + \delta, \beta + \delta + \gamma) = (a, \alpha + \gamma + \delta, \beta + \delta + \gamma)$$

В геометрическом виде полученные результаты иллюстрируются рис. 2.

Симметризованная параметрическая форма представления нечетких чисел

Результаты выполнения операций над нечеткими числами (LR-типа) зависят от используемых форм их представления [3, 7]. Вместе с тем, операции с двумя нечеткими числами имеют по три модели представления в зависимости от сочетания знаков мод нечетких чисел. Так умножение выглядит следующим образом:

$$A \otimes B = \begin{cases} (a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, a\gamma + b\alpha, a\delta + b\beta)_{LR} & a > 0, b > 0; \\ (a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, b\alpha - a\delta, b\beta - a\gamma)_{LR} & a > 0, b < 0; \\ (a, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (b, \gamma, \delta)_{LR} = (ab, -b\beta - \alpha\delta, -b\alpha - a\gamma)_{LR} & a < 0, b < 0. \end{cases} \quad (1)$$

Использование нечетких числа (LR)-типа в представленном виде арифметических операций определило потребность поиска и создания новых форм их выражений, в т. ч. математических операций различной сложности. Так, была введена симметризованная параметрическая форма задания нечетких чисел (LR)-типа $A = (a, \alpha, \beta)$, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$ двумя показателями:

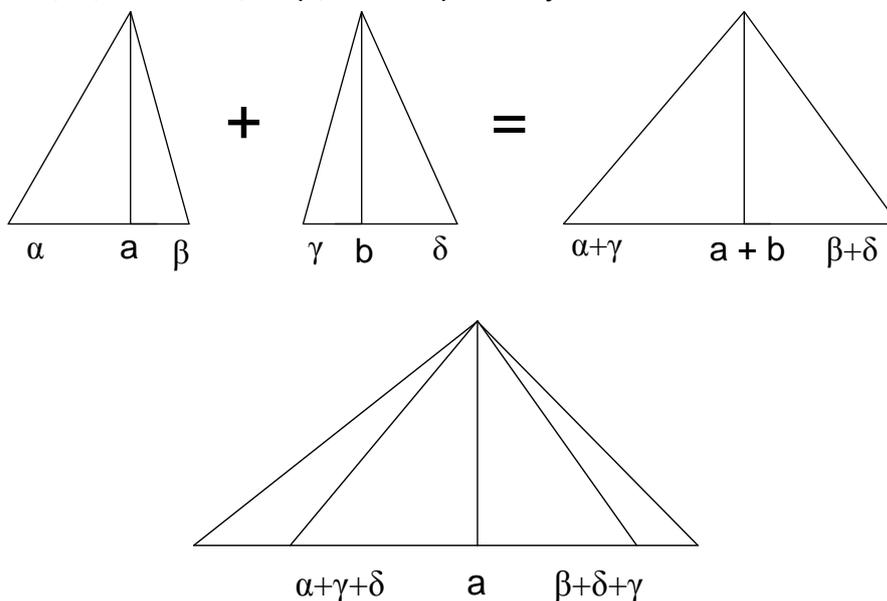


Рис. 2. Геометрическая интерпретация накопления нечеткости результата при сложении–вычитании нечетких чисел (LR)-типа

нечеткости

$$d(A) = \frac{\alpha + \beta}{2} \geq 0 \quad (2)$$

и коэффициента асимметрии

$$\Delta A = \frac{\beta - \alpha}{2}. \quad (3)$$

Выражение (кортеж) (4) в этом случае является симметризованным параметрическим представлением нечеткого числа A (LR)-типа

$$A = (a, d(A), \Delta(A)). \quad (4)$$

На основе вышеизложенного можно показать, как связаны между собой общепринятая и симметризованная параметрические формы представления нечетких чисел:

$$A = (a, \alpha, \beta) \Leftrightarrow A = (a, d(A), \Delta(A)), \quad \alpha = d(A) - \Delta(A), \quad \beta = d(A) + \Delta(A).$$

Доказательство корректности предложенного преобразования:

$$A = (a, \alpha, \beta) = (a, \frac{(\alpha + \beta) - (\beta - \alpha)}{2}, \frac{(\alpha + \beta) + (\beta - \alpha)}{2}) = (a, d(A) - \Delta(A), d(A) + \Delta(A)) = (a, d(A), \Delta(A))$$

Для конструктивного выполнения арифметических операций с нечеткими числами в случае их симметризованного параметрического представления в виде $A = (a, d(A), \Delta(A))$ и $B = (b, d(B), \Delta(B))$ предложены следующие расширенные арифметические операции:

$$\begin{aligned} A \oplus B &= (a + b, d(A) + d(B), \Delta(A) + \Delta(B)) \\ A \ominus B &= (a - b, d(A) + d(B), \Delta(A) - \Delta(B)) \\ A \otimes B &= (ab, |a|d(B) + |b|d(A), a\Delta(B) + b\Delta(A)) \\ A \oslash B &= \left(\frac{a}{b}, \frac{|a|d(B) + |b|d(A)}{b^2}, \frac{b\Delta(A) - a\Delta(B)}{b^2} \right) \\ \frac{1}{B} &= \left(\frac{1}{b}, \frac{d(B)}{b^2}, \frac{-\Delta(B)}{b^2} \right) \text{ при условии } 0 \notin B. \end{aligned} \quad (5)$$

Исследование выражений, приведенных выше, показывает (см формулу (5)), что результаты выполнения предложенных расширенных арифметических операций с нечеткими числами не зависят от знака нечетких чисел. Доказательство корректности остальных арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа, представленных в симметризованной форме, приведено в работе [7].

Введение дополнительных арифметических операций

Анализ вышеизложенного материала показывает, что использование стандартных расширенных арифметических операций искусственно увеличивает нечеткость (см. рис. 2) В то же время экспертная практика утверждает, что уровень исходной нечеткости не может меняться от количества оценок и всегда остается постоянным, по крайней мере в одном исследовании. Поэтому учеными уже давно предпринимались попытки поиска выхода из такой противоречивой ситуации [8, 9], пока не была высказана идея о возможности расширения арсенала арифметических операций путем введения дополнительных арифметических операций [10, 11] для возможности решения нечетких уравнений. Далее прилагательное «расширенные» опустим.

Введем следующую новую дополнительную арифметическую операцию, для которой должно выполняться следующее условие [3, 7]:

$$C = A \underset{\text{доп}}{*} B \rightarrow C * B = A, \quad (6)$$

где $\underset{\text{доп}}{*}$ – обозначение дополнительной операции, противоположной по отношению к операции $*$.

Пусть A, B и C – нечеткие числа (LR)-типа в симметризованной форме. Тогда дополнительные арифметические операции над нечеткими числами (LR)-типа $A = (a, d(A), \Delta(A))$ и $B = (b, d(B), \Delta(B))$ как частный случай (5) с учетом определения (6) примут вид:

$$\begin{aligned} A \oplus_{\text{доп}} B &= (a + b, |d(A) - d(B)|, \Delta(A) + \Delta(B)); \\ A \ominus_{\text{доп}} B &= (a - b, |d(A) - d(B)|, \Delta(A) - \Delta(B)); \\ A \otimes_{\text{доп}} B &= (ab, ||b|d(A) - |a|d(B)|, |a|\Delta(B) + |b|\Delta(A)); \\ A \oslash_{\text{доп}} B &= \left(\frac{a}{b}, \frac{||b|d(A) - |a|d(B)|}{b^2}, \frac{|b|\Delta(A) - |a|\Delta(B)|}{b^2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Проведем сравнение результата примера, приведенного на рис. 2, когда арифметические операции выполнялись по правилам (5) с результатом использования дополнительных операций (6):

$$(A + B) \ominus_{\text{доп}} B = (a + b - b, d(A) + d(B) - d(B), \Delta A + \Delta B - \Delta B) = (a, d(A), \Delta A) = A.$$

На рис 3 приведено графическое описание результатов использования дополнительных арифметических действий с нечеткими числами (LR)-типа.

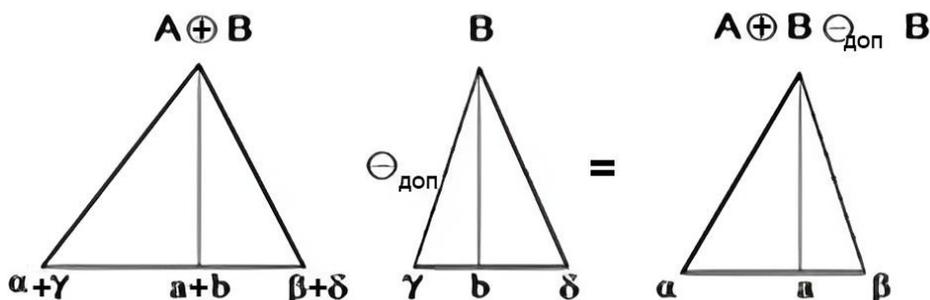


Рис. 3. Геометрическая интерпретация использования дополнительных арифметических действий с нечеткими числами (LR)-типа

Сравнение рис. 2 с рис. 3 демонстрирует преимущество введения дополнительных операций. Новые дополнительные арифметические операции, которые были введены по определению (6), обладают свойствами, применяемыми в процессе обработки опросных матриц, заполненных специалистом.

$$\begin{aligned} A \oplus_{\text{доп}} 0 &= A, \\ A \otimes_{\text{доп}} 1 &= A, \\ A \ominus_{\text{доп}} A &= 0; \\ A \oslash_{\text{доп}} A &= 1, \\ (A \oplus B) \ominus_{\text{доп}} B &= A, \\ (A \otimes B) \oslash_{\text{доп}} B &= A, \\ (A \oplus_{\text{доп}} B) \ominus_{\text{доп}} B &= (-1)A, \\ (A \otimes_{\text{доп}} B) \oslash_{\text{доп}} B &= (-1)A. \end{aligned} \tag{8}$$

На основе формул (6)–(8) можно по-новому подойти к решению нечетких уравнений. Продемонстрируем, какие возможности при решении нечетких уравнений открываются при использовании дополнительных арифметических действий с нечеткими числами (LR)-типа.

Пример решения нечетких уравнений

Принципиально значимым для решения нечетких уравнений является строгое поддержание одинакового уровня нечеткости в обеих его частях. Поэтому ниже будет более детально рассмотрен вопрос о равносильных нечетких уравнениях и аналогичных переходах, т. е. переносах нечетких слагаемых из одной части уравнения на другую [3, 7].

Пусть даны два нечетких выражения $r(\tilde{x})$ и $q(\tilde{x})$ и требуется установить условия их идентичности $r(\tilde{x}) = q(\tilde{x})$. Согласно введённому Л.А. Заде понятию лингвистической переменной и его применению к приближенным решениям [12] идентичность $r(\tilde{x}) = q(\tilde{x})$ свидетельствует о равенстве соответствующих функций принадлежности. На практике это означает [3, 7], что при переносе нечеткой части $r(\tilde{x})$ в правую часть выражения $q(\tilde{x})$ необходимо проводить только по правилам эквивалентных преобразований с использованием дополнительных арифметических операций (7) и их свойств (8).

Рассмотрим уравнение вида

$$A \otimes X \oplus B = C, \quad \text{при } (A \neq 0). \tag{9}$$

Из обеих частей уравнения (9) выполним дополнительное вычитание нечеткого числа B . В результате данной операции и получим равносильное уравнение (\Leftrightarrow – знак равносильности):

$$A \otimes X \oplus B \ominus_{\text{доп}} B = C \ominus_{\text{доп}} B \Leftrightarrow A \otimes X = C \ominus_{\text{доп}} B \tag{10}$$

Нечеткое уравнение (10) после дополнительного вычитания равносильно уравнению (11), так как нечеткое число A не равно четкому нулю.

$$X = (C \ominus_{\text{доп}} B) \oslash_{\text{доп}} A. \quad (11)$$

Можно показать, что уравнение (11) имеет единственный корень – нечеткое число (LR)-типа следующего вида $(C \ominus_{\text{доп}} B) \oslash_{\text{доп}} A$.

Так как уравнение (9) равносильно нечеткому уравнению (11), то и исходное (9) имеет также единственный корень – нечеткое число (LR)-типа.

Решение нечетких уравнений второй степени

Пусть имеется нечеткое уравнение вида

$$A \otimes X^2 \oplus B \otimes X \oplus C = 0, (A \neq 0) \quad (12)$$

Ранее в работах [9–11] было показано, что уравнение в форме (12) не имеет решения, так как не выполняются условия равенства нечеткости в обеих частях данного выражения.

Вместе с тем в указанных работах было показано, что для ряда частных случаев возможны решения нечеткого уравнения (12):

$$A \otimes X^2 = 0 \ominus_{\text{доп}} B \otimes X \oslash_{\text{доп}} C, (A \neq 0); \quad (13)$$

$$A \otimes X^2 \oplus B \otimes X = \ominus_{\text{доп}} C, (A \neq 0); \quad (14)$$

$$A \otimes X^2 \oplus C = \ominus_{\text{доп}} B \otimes X, (A \neq 0). \quad (15)$$

Для примера покажем решение (14) при $X = (x, \Delta X, d(X))$ в симметризованном виде.

С учетом формул (7) уравнение (14) примет вид:

$$A \otimes X^2 \oplus B \otimes X \oplus_{\text{доп}} C = 0, (A \neq 0) \quad (16)$$

Дальнейшее преобразование (14) затруднено из-за выполнения для нечетких чисел закона дистрибутивности в ослабленной форме. Для преодоления указанного недостатка представим (16) системой уравнений для каждого параметра нечеткого числа. Согласно (5), (7) она примет вид:

$$\begin{cases} ax^2 + bx + c = 0 \\ \Delta(X)(2ax + b) + x(x\Delta(A) + \Delta(B)) - \Delta C = 0 \\ d(X)(|2ax| + |b|) + x^2d(A) + |x|d(B) - d(C) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Точное решение параметров нечеткой переменной x получим из системы:

$$\begin{cases} x = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} \\ \Delta(X) = \frac{\Delta(C) - x(x\Delta(A) + \Delta(B))}{2ax + b} \\ d(X) = \frac{d(C) - (x^2d(A) + |x|d(B))}{|2ax| + |b|} \end{cases} \quad (18)$$

при $D \geq 0$.

Другие виды (13)–(15) нечетких квадратных уравнений решаются аналогично.

Обсуждение результатов и возможные направления их практической реализации

Основное содержание данной статьи посвящено разработке нового подхода к заданию нечетких чисел и математическим моделям выполнения унифицированных арифметических операций над ними на основе расширения данных операций. Для эффективного применения предлагаемого подхода и моделей крайне важно учитывать такие свойства нечетких чисел, как выпуклость и нормализованность. Выпуклость гарантирует, что все промежуточные значения между минимальным и максимальным элементами нечеткого числа также принадлежат ему. Нормализованность подразумевает, что наибольшая степень принадлежности равна единице. Эти свойства важны и критичны при вычислении операций и позволяют обеспечить адекватную интерпретацию результатов.

В тексте статьи был употреблен термин «недоопределенность» алгебры нечетких чисел. Рассмотрим практический смысл термина «доопределение» на примере решения конкретной задачи. В исследовании [13] с помощью НВП решалась задача минимизации рисков появления опасных

вибраций при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов (ЗО РКК). Известно, что перед запуском ракет космического назначения согласно инструкциям по эксплуатации проводится штатная операция проверки работоспособности насосных агрегатов по вибрационной скорости, предельное значение которой составляет 11,2 мм/с. При построении на практике нечетко-возможностной модели (НВМ) появления опасных вибраций при эксплуатации насосных агрегатов ЗО РКК [13] опросная матрица эксперта содержала 64 строки из нечетких продукционных правил в семимерном факторном пространстве нечетких лингвистических переменных. Результирующая адекватная полиномиальная модель содержала 15 слагаемых, что по методу наименьших квадратов обуславливало $64 - 15 = 49$ степеней свободы для проверки адекватности сформированной модели. При алгебраическом сложении 64 нечетких чисел знакопеременного ряда значений зависимой переменной было получено среднее арифметическое значение вибрационной скорости 11,25 мм/с. При исходном уровне нечеткости экспертной информации 2 мм/с нечеткий интервал этого среднего в общепринятых арифметических операциях будет $11,25 \pm 2 \cdot 49$ мм/с или от 89 до 110 мм/с, что по своей сути абсурдно, поскольку критическое значение вибрационной скорости по регламенту составляет 11,2 мм/с и «теряется» в таком огромном интервале, не говоря уже о его конечных значениях. В то же время истинное значение допустимой вибрационной скорости в пределах начальной нечеткости экспертных оценок находится в пределах

$$11,25 \pm 2 \text{ мм/с или } 9,25 < 11,25 < 13,25 \text{ мм/с.}$$

В целом в рассматриваемой прикладной задаче удалось корректно «доопределить» логику описания исследуемой предметной области с сохранением исходной степени нечеткости, базируясь на введении оригинальной симметризованной формы представления и дополнительных арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа (в соответствии с разработанным подходом и моделями).

Заключение

Анализ показывает, что практическое применение разработанных математических моделей нечетких арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа целесообразно при решении различных классов задач мониторинга и управления сложными объектами (СЛО) в условиях возмущающих воздействий. В таких случаях широко применяются экспертные системы (ЭС), в которых используют базы знаний, основанные на экспертных оценках, представленных в различном виде. Опираясь на разработанные математические модели и введенные расширения для выполнения арифметических операций с нечеткими числами (LR)-типа можно доработать существующие ЭС и повысить их возможности по эффективному решению различных классов задач синтеза, анализа СЛО, а также интеграции данных, информации и знаний, что значительно повышает точность и надежность принимаемых управленческих решений.

Говоря о перспективах практической реализации разработанного математического аппарата, основанного на введении унифицированных арифметических операций с нечеткими числами при формализации экспертных знаний, хочется отметить работы, выполняемые ведущей научной школой Р.В. Мещерякова и ориентированные на создание и использование полимодальных интеллектуальных интерфейсов в современных и перспективных человеко-машинных системах [14–18]. Авторы выражают признательность за плодотворные дискуссии с д.т.н., профессором РАН Р.В. Мещеряковым по рассматриваемой в статье тематике и считают своим приятным долгом поздравить его с юбилеем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-19-00823, <https://rscf.ru/project/24-19-00823>).

Литература

1. Эшби, У.Р. Введение в кибернетику / У.Р. Эшби; под ред. В.А. Успенского – М.: ИЛ, 1959. – 432 с.
2. Спесивцев, А.В. Эксперт как «интеллектуальная измерительно-диагностическая система» / А.В. Спесивцев, Н.Г. Домшенко // Сб. докладов. XIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM 23–25 июля 2010, Санкт-Петербург. – СПб: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – Т. 2. – С. 28–34.

3. Спесивцев, А.В. Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации / А.В. Спесивцев. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 237 с.
4. Аверкин, А.Н. Мягкие вычисления и измерения / А.Н. Аверкин, С.В. Прокопчина // Интеллектуальные системы (МГУ). – 1997. – Т. 2, Вып. 1–4. – С. 93–114.
5. Tarassov, V.B. General Approaches to the Modelling of Soft Estimates and Beliefs in Strategic Decision Engineering / V.B. Tarassov // Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Artificial Intelligence Systems (ICAIS 2002, Divnomorskoe, Russia, 5–10 September). – Los Alamitos CA: IEEE, 2002. – P. 45–49.
6. Орлов, А.И. Прикладная теория измерений / А.И. Орлов // Прикл. многомерн. стат. анализ. – М., 1978. – С. 68–138.
7. Игнатъев, М.Б. Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний / М.Б. Игнатъев, В.Е. Марлей, В.В. Михайлов, А.В. Спесивцев. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕЕСС, 2018. – 500 с.
8. Mizumoto, M. Some Properties in Fuzzy Sets on Type 2 / M. Mizumoto, K. Tanaka // Information and Control. – 1976. – Vol. 31, Iss. 4. – P. 312–340.
9. Гвоздик, А.А. Решение нечетких уравнений / А.А. Гвоздик // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1984. – № 5. – С. 176–183.
10. Алексеев, А.В. Применение нечеткой математики в задачах принятия решений / А.В. Алексеев // Прикладные задачи анализа решений в организационно-технических системах. – Рига.: Риж. политехн. Ин-т, 1983. – С. 38–42.
11. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьев и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
12. Заде, Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 162 с.
13. Астанков, А.М. Снижение рисков возникновения опасных последствий при эксплуатации насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов / А.М. Астанков, А.В. Спесивцев, А.В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – №1. – С. 6–14.
14. Ходашинский, И.А. Методы нечеткого извлечения знаний в задачах обнаружения вторжений / И.А. Ходашинский, Р.В. Мещеряков, И.В. Горбунов // Вопросы защиты информации. – 2012. – № 1 (96). – С. 45–50.
15. Резанова, З.И. Задачи авторской атрибуции текста в аспекте гендерной принадлежности (к проблеме междисциплинарного взаимодействия лингвистики и информатики) / З.И. Резанова, А.С. Романов, Р.В. Мещеряков // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 370. – С. 24–28.
16. Рахманенко, И.А. Анализ идентификационных признаков в речевых данных с помощью gmm-ubm системы верификации диктора / И.А. Рахманенко, Р.В. Мещеряков // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 3 (52). – С. 32–50.
17. Романов, А.С. Методика проверки однородности текста и выявления плагиата на основе метода опорных векторов и фильтра быстрой корреляции / А.С. Романов, Р.В. Мещеряков, З.И. Резанова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 2 (32). – С. 264–269.
18. Мещеряков, Р.В. Перспективные направления развития человеко-машинных интерфейсов / Р.В. Мещеряков, Я.А. Туровский // Сборник трудов IX Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (ИТНОП-2023). – Белгород, 2023. – С. 23–29.

Поступила в редакцию 2 августа 2024 г.

Сведения об авторах

Спесивцев Александр Васильевич – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: sav2050@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8928-4585>

Соколов Борис Владимирович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: sokolov_boris@inbox.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2295-7570>

DOI: 10.14529/mmph240409

MATHEMATICAL MODELS FOR PERFORMING UNIFIED ARITHMETIC OPERATIONS WITH FUZZY NUMBERS IN THE FORMALIZATION OF EXPERT KNOWLEDGE

A.V. Spesivtsev, B.V. Sokolov

Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Abstract. The paper considers fuzzy representation and manipulation of explicit and implicit expert knowledge. It proposes to use fuzzy numbers that allow describing uncertainty factors. It also presents a new form of specifying symmetrized forms of representation of fuzzy numbers, as well as extended and additional arithmetic operations on them which preserve the original level of fuzzy knowledge of experts and simplify the process of their formalization in solving applied problems.

Keywords: *fuzzy numbers; extended and additional arithmetic operations; simulation modeling; accuracy; reliability; adequacy of the model; complex technical system.*

References

1. Ashby W.R. *An Introduction to Cybernetics*. London, Chapman and Hall, 1956, 304 p.
2. Spesivtsev A.V., Domshenko N.G. Ekspert kak "intellektual'naya izmeritel'no-diagnosticheskaya sistema" (Expert as an "Intelligent Measuring and Diagnostic System"). *Proc. XIII International Conference on Soft Computing and Measurements SCM July 23–25, 2010, St. Petersburg, St. Petersburg: ETU "LETI" Publishing House, 2010, Vol. 2, P. 28–34.* (in Russ.).
3. Spesivtsev A.V. *Upravlenie riskami chrezvychaynykh situatsiy na osnove formalizatsii ekspertnoy informatsii* (Emergency Risk Management Based on Formalization of Expert Information). St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2004, 237 p. (in Russ.).
4. Averkin A.N., Prokopchina S.V. Soft Calculations and Measurements. *Intelligent systems (Moscow State University)*, 1997, Vol. 2, Iss. 1-4, pp. 93–114.
5. Tarassov B. General Approaches to the Modelling of Soft Estimates and Beliefs in Strategic Decision Engineering. *Proc. 2002 IEEE International Conference on Artificial Intelligence Systems (ICAIS 2002)*, Divnomorskoe, Russia, 2002, pp. 45–49. DOI: 10.1109/ICAIS.2002.1048050.
6. Orlov A.I. *Prikladnaya teoriya izmereniy* (Applied Theory of Measurements). *Prikladnyy mnogomernyy statisticheskiy analiz* (Appl. Multivariate Statistical Analysis). Moscow, 1978, pp. 68–138.
7. Ignatiev M.B., Marley V.E., Mikhailov V.V., Spesivtsev A.V. *Modelirovanie slabo formalizovannykh sistem na osnove yavnykh i neyavnykh ekspertnykh znaniy* (Modeling of Weakly Formalized Systems Based on Explicit and Implicit Expert Knowledge). St. Petersburg: POLYTECH-PRESESS Publ., 2018, 500 p.
8. Mizumoto M., Tanaka K. Some Properties in Fuzzy Sets on Type 2. *Information and Control*, 1976, Vol. 31, Iss. 4, pp. 312–340. DOI: 10.1016/S0019-9958(76)80011-3
9. Gvozdik, A. A. Reshenie nechetkikh uravneniy (Solution of Fuzzy Equations). *Izv. USSR Academy of Sciences. Technical Cybernetics*, 1984, no. 5, pp. 176–183. (in Russ.).
10. Alekseev, A.V. Primenenie nechetkoy matematiki v zadachakh prinyatiya resheniy (Application of Fuzzy Mathematics in Decision-Making Problems). *Prikladnye zadachi analiza resheniy v*

organizatsionno-tekhnicheskikh sistemakh (Applied Problems of Decision Analysis in Organizational-Technical Systems), Riga: Riga Polytechnic Institute, 1983, pp. 38–42. (in Russ.).

11. Borisov A.N., Alekseev A.V., Merkur'eva G.V., Slyadz' N.N., Glushkov V.I. *Obrabotka nechetkoy informatsii v sistemakh prinyatiya resheniy* (Processing Fuzzy Information in Decision-Making Systems). Moscow, Radio and Communications Publ., 1989, 304 p. (in Russ.).

12. Zade L.A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* (The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Decision-Making). Moscow, Mir Publ., 1976, 162 p. (in Russ.).

13. Astankov A.M., Spesivtsev A.V., Vagin A.V. Snizhenie riskov vzniknoveniya opasnykh posledstviy pri ekspluatatsii nasosnykh agregatov zapravochnogo oborudovaniya raketno-kosmicheskikh kompleksov (Reducing the Risks of Hazardous Consequences during Operation of Pumping units of Refueling Equipment of Rocket and Space Complexes). *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere* (Problems of Risk Management in the Technosphere), 2016, no. 1, pp. 6–14. (in Russ.).

14. Khodashinsky I.A., Meshcheryakov R.V., Gorbunov I.V. Metody nechetkogo izvlecheniya znaniy v zadachakh obnaruzheniya vtorzheniy (Methods of fuzzy knowledge extraction in intrusion detection problems). *Voprosy zashchity informatsii* (Information Security Issues), 2012, no. 1 (96), pp. 45–50. (in Russ.).

15. Rezanova Z.I., Romanov A.S., Meshcheryakov R.V. Zadachi avtorskoy atributsii teksta v aspekte gendernoy prinadlezhnosti (k probleme mezhdistsiplinarnogo vzaimodeystviya lingvistiki i informatiki) (The Tasks of Author's Text Attribution in Terms of Gender (to the Problem of Interdisciplinary Interaction of Linguistics and Informatics)). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* (Bulletin of Tomsk State University), 2013, no. 370, pp. 24–28. (in Russ.).

16. Rakhmanenko I.A., Meshcheryakov R.V. Analiz identifikatsionnykh priznakov v rechevykh dannykh s pomoshch'yu gmm-ubm sistemy verifikatsii diktora (Analysis of Identification Features in Speech Data using the GMM-UBM Speaker Verification System). *Trudy SPIIRAN* (Proceedings of SPIIRAS), 2017, no. 3 (52), pp. 32–50. (in Russ.).

17. Romanov A.S., Meshcheryakov R.V., Rezanova Z.I. Metodika proverki odnorodnosti teksta i vyyavleniya plagiata na osnove metoda opornykh vektorov i fil'tra bystroy korrelyatsii (Methodology for Checking Text Homogeneity and Detecting Plagiarism Based on the Support Vector Machine and Fast Correlation Filter). *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* (Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics), 2014, no. 2 (32), pp. 264–269. (in Russ.).

18. Meshcheryakov R.V., Turovsky Ya.A. Perspektivnye napravleniya razvitiya cheloveko-mashinnykh interfeysov (Promising Directions of Development of Human-Machine Interfaces). *Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i proizvodstve"* (ITNOP-2023) (Proc. IX International Scientific and Technical Conference "Information Technologies in Science, Education and Production" (ITNOP-2023)). Belgorod, 2023, pp. 23–29. (in Russ.).

Received August 2, 2024

Information about the authors

Spesivtsev Alexander Vasilievich is Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science "St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: sav2050@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8928-4585>

Sokolov Boris Vladimirovich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science "St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: sokolov_boris@inbox.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2295-7570>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ АВТОТРАНСПОРТА В ЗОНЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ПЕРЕСЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ

В.Д. Шепелев¹, А.И. Глушков¹, А.Г. Левашев²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

E-mail: shepelevvd@susu.ru

Аннотация. В современных городах вопросы экологии, связанные с автотранспортом, занимают всё более важное место в системе управления городскими транспортными потоками. Наибольшее количество выхлопных газов транспортные средства выделяют при резком изменении режимов движения, которое характерно для регулируемых перекрестков. Заторные ситуации также чаще формируются на перекрестках, когда большое скопление транспорта формирует неблагоприятный экологический фон. Для получения оперативной информации о параметрах интенсивности транспортных потоков применены нейросетевые алгоритмы распознавания транспортных средств из видеопотоков, полученных со стационарных уличных камер наблюдения на городских перекрестках. Оптимизированный алгоритм работы обученной нейронной сети (YOLOv4) позволяет извлекать и интерпретировать данные о параметрах транспортных потоков в режиме реального времени. В рамках исследования разработаны математические модели, позволившие реализовать мониторинг в режиме реального времени количества и концентрации загрязняющих веществ от автотранспорта в зоне регулируемого пересечения. Расчет количества выделяемых загрязняющих веществ в атмосферу от транспорта реализован с учетом средней скорости, типа транспортного средства и времени простоя в зоне измерения. Предложенная модель с поддержкой данных на основе непрерывного отслеживания и анализа состояния транспортных потоков может служить основой для прогнозирования уровней сложности заторов и оценки экологических рисков.

Ключевые слова: выбросы загрязняющих веществ; транспортный поток; нейронная сеть; машинное обучение; математическая модель; концентрация выбросов; мониторинг экологических рисков.

Введение

Проблема ухудшения качества воздуха уже давно беспокоит общественность современных городов. Существенную долю вреда, несомненно, вносит транспорт, без которого не представляется существование современного общества. Даже изобретение новых видов топлива и использование электроавтомобилей не оказывает быстрого значительного эффекта [1–2]. Так, исследователи на основании данных 929 городов США, используя имитационное моделирование, спрогнозировали сокращение выбросов парниковых газов до 34 % к 2050 году [1]. Темпы роста количества электроавтомобилей в России значительно ниже, чем в США и европейских странах, поэтому более эффективными мерами по снижению экологической нагрузки являются управленческие решения по регулированию дорожного движения. Многочисленные исследования доказали вред, наносимый здоровью людей в виде различных заболеваний, распространенных во всех возрастных группах: сердечно-сосудистые, респираторные, рак. Выбросы от транспорта образуются от полного и неполного сгорания топлива, масла, смазки и состоят из сложных частиц и газов, большинство которых очень токсичны (оксиды углерода, азота и углеводорода, сажа). Частицы от истирания шин, тормозов – PM10 и PM2,5 – также представляют серьезную угрозу здоровью людей [3]. Возникновение ДТП, деформация дорожного полотна и другие причины сопровождаются резким падением пропускной способности и являются частыми причинами заторов, кото-

рые сопровождаются значительным ростом выбросов от автотранспорта [4]. Мониторинг состояния дорожно-транспортных потоков и оценка выбросов в режиме реального времени приобретает все более важное значение с целью обеспечения безопасной и эффективной дорожной среды.

Регулируемые перекрестки, где происходит резкая смена режимов движения (остановка, холостой ход, разгон) транспортных средств (ТС) и формируются заторные ситуации, являются самыми «горячими» точками [5]. Авторы в исследовании [6] изучали влияние интенсивности движения и расстояние между перекрестками на уровень выбросов загрязняющих веществ (ЗВ). Уровень выбросов зависит от множества факторов: от интенсивности движения [7], вероятности возникновения заторов различной глубины [8, 9], метеорологических условий [10], типов транспортных средств и их возраста [11], а также и от сезона года [12].

В исследовании [13] представлено моделирование качества воздуха на основе модели Гаусса и микроскопической модели дорожного движения. Разработка моделей, основанных на распределении Гаусса, часто используется исследователями при моделировании дисперсии вредных веществ из-за возможности выполнения расчетов от большого количества источников [14].

Многие предложенные модели основаны на средних показателях интенсивности движения и средних скоростях движения в определенный промежуток времени, что существенно отражается на полученной оценке количества выбросов. Широкое внедрение камер наружного наблюдения, которые используются в целях контроля соблюдения правил движения, нашло применение и в сфере сбора данных о транспортных потоках [15]. Применение глубокого обучения нейронных сетей позволяет не только собрать данные о количестве ТС, но и получить количественную оценку структуры потока по типам автомобилей.

Многвариантность и непредсказуемость дорожных ситуаций в городской транспортной сети обуславливает необходимость разработки качественных математических моделей расчета количества и концентрации ЗВ от автотранспорта на регулируемых пересечениях. Приоритетным направлением решения этой задачи в настоящее время является применение нейросетевых технологий распознавания, работающих в режиме реального времени, типов ТС с определением скоростей на каждом отрезке их траектории движения. Основой соответствующего математического обеспечения должны выступать официальные методики расчёта, утвержденные Приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ [16].

Разработка нейросетевых алгоритмов обработки видеопотока

С целью сбора данных о параметрах движения транспортных потоков разработана автономная система слежения на основе нейронных сетей. Данная система обеспечивает детектирование местонахождения, траектории, количества и скорости перемещения автотранспорта. Архитектура нейронной сети в нашей работе составлена из модулей обнаружения, отслеживания и вычисления различных показателей.

Для сбора данных использованы уличные системы видеонаблюдения с различной удаленностью от дороги и высотой монтажа. Данные системы оснащены видекамерами с фиксированной частотой кадров, различным разрешением и разрешающей способностью [17].

С целью обнаружения, классификации и отслеживания траектории транспортных средств были протестированы наиболее приспособленные для этих задач нейронные сети: RetinaNet, YOLOv4 и SSD и другие.

Основным достоинством YOLOv4 является ее высокая производительность и скорость работы при сохранении точности детектирования. Этот алгоритм демонстрирует отличные результаты в задачах обнаружения транспортных средств в реальном времени, что критически важно для наших целей мониторинга дорожного движения. Были также рассмотрены новейшие версии YOLO [18], однако их преимущества в точности не перевешивают значительное снижение скорости работы, что является критичным фактором для нашей системы.

На основе требований к производительности аппаратного оборудования для обработки видеопотоков в динамическом режиме наибольшую производительность и точность показала YOLOv4. При тестировании нейронная сеть обеспечила достаточную точность в распознавании и классификации объектов, при этом скорость обработки изображений (608×608) составила 19 кадров в секунду.

Проблема множественного отслеживания объектов была решена с помощью трекера SORT с открытым исходным кодом [19]. Венгерский алгоритм используется для обнаружения и оптимального сопоставления предсказанных объектов. Таким образом, нейронная сеть YOLOv4 и трекер SORT обеспечивают покадровый сбор данных в непрерывном режиме о местоположении объектов, что позволяет рассчитывать их скорость и точное расстояние между ними.

Для обучения нейронной сети была проведена аугментация 57000 обработанных изображений, что позволило увеличить библиотеку исходных данных (DATA SET) до 900 000 единиц. Такой подход позволил достичь высокой точности распознавания и отслеживания траектории и скорости перемещения объектов в пределах 92–96 %. Сбор данных с применением обзорных камер позволил отслеживать траекторию движения и индивидуальные динамические параметры ТС продолжительное время и на больших участках дорожной сети.

Анализ транспортных потоков на примере городского перекрёстка

Анализ результатов мониторинга транспортных потоков позволяет проводить различные аналитические исследования. Рассмотрим динамику суммарной мощности транспортных потоков на указанном городском перекрёстке с преобладающим западно-восточным направлением движения. Результаты анализа за четыре недели августа 2023 года представлены на рис. 1, где отражены средненедельные почасовые потоки транспортных средств в рабочие и выходные дни недели как в западном и восточном направлениях, так и суммарный почасовой поток.

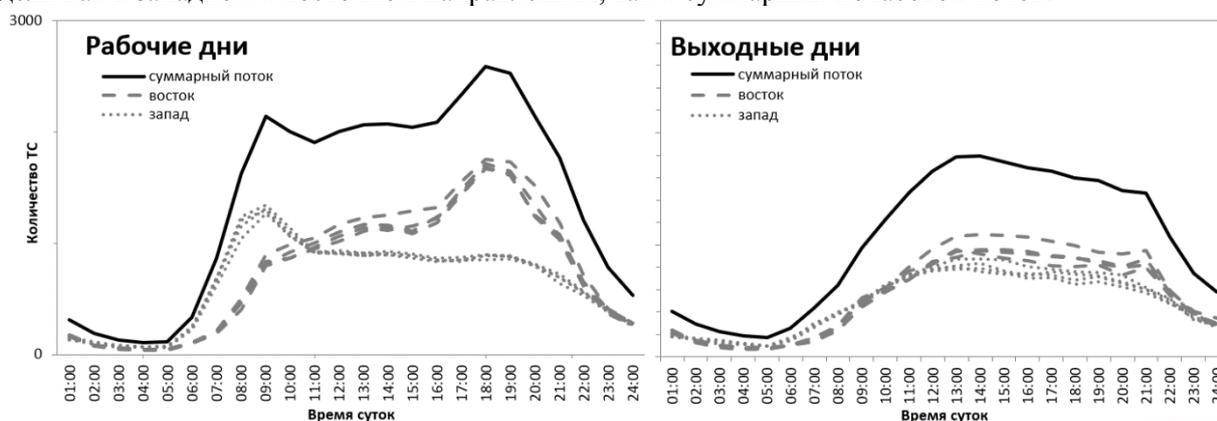


Рис. 1. Средние значения транспортных потоков в течение суток за рабочие дни недели

Здесь просматривается высокая стабильность недельных мощностей транспортных потоков со среднеквадратичным отклонением в пределах 3,5 % (коэффициент вариации). А также существенно то, что нет подобия суточной нагрузки автотранспорта в рабочие и выходные дни, это подтверждается очень слабым коэффициентом корреляции ($r = 0,05$), лежащим за порогом статистической достоверности. Это также подтверждается параметрическими методами оценки различий, дающих оценку уровня статистической значимости ниже 0,01 %.

Модели расчёта количества и концентраций выбросов загрязняющих веществ

1. Математическая модель расчёта количества выбросов

Количество выбросов от транспортных средств определяют динамические параметры транспортных средств и структура их потоков. Международным эталонным решением по оценке выбросов от автотранспорта является европейская модель инвентаризации выбросов автомобильного транспорта (COPERT) и датская оперативная модель загрязнения улиц (OSPM) [20]. Эти модели описывают условия рассеивания на небольшом количестве эмпирических данных, собранных вручную. Очевидно, что корректные данные о количестве и концентрации ЗВ на текущий момент могут быть получены на основе данных, собранных в режиме реального времени.

Для определения количества выбросов от транспортных средств на городских магистралях взяты за основу регламентированные для РФ методы расчёта выбросов загрязняющих веществ (далее – Методы) [16]. В соответствии с описанными в них алгоритмами отдельно нормируются выбросы для различных видов ЗВ как от транспортных средств, стоящих перед запрещающим сигналом светофора $M_{ni,k}$, так и от движущихся с постоянной скоростью $M_{li,k}$. Следует отметить, что стандартизированные расчёты предполагают ряд упрощающих допущений: количество

стоящих автомобилей определяется на момент окончания запрещающего движение сигнала светофора, а для движущихся автомобилей расчёты ведутся по их средней скорости проезда зоны перекрёстка.

В общем случае получения от нейронной сети параметров движения для каждого автомобиля возможен более точный расчёт суммарных выбросов ЗВ. Так, количество выбросов i -го загрязняющего вещества M_i за общепринятый в расчётах интервал времени 20 мин может быть рассчитан по формуле

$$M_i = \sum_1^C \left[\sum_1^k (M_{ni,k} \sum_1^{G_{n,k}} (t_{n,k}) + l \sum_1^k M_{li,k} \sum_1^{G_{l,k}} (1/t_{l,k} \int_0^{t_{l,k}} r_{VI}(t) dt) \right], \quad (1)$$

где C – количество циклов светофора за 20-минутный период времени; $M_{ni,k}$ – удельный выброс i -го загрязняющего вещества автомобилями k -го типа, находящимися в очереди у запрещающего движение сигнала светофора; $G_{n,k}$ – количество автомобилей k -го типа, находящихся в очереди в районе перекрёстка; $t_{n,k}$ – время ожидания в очереди для каждого автомобиля k -го типа; l – длина зоны перекрёстка; $M_{li,k}$ – удельный пробеговый выброс i -го загрязняющего вещества автомобилями k -го типа; $G_{l,k}$ – количество автомобилей k -го типа, проезжающих перекрёсток с произвольной скоростью $VI(t)$; $t_{l,k}$ – время пересечения зоны перекрёстка каждым автомобилем k -го типа; $r_{VI}(t)$ – поправочный коэффициент, определяемый текущей скоростью $VI(t)$ движения автомобиля.

2. Математическая модель расчёта концентраций выбросов

Концептуальный подход моделирования предполагает разбиение площади облака концентраций для перекрёстка на ряд одинаковых квадратов, для каждого из которых будет рассчитываться концентрация ЗВ от всего транспортного потока на перекрёстке в текущую дискрету времени t_k . В пределах одного квадрата концентрацию ЗВ будем считать постоянной.

Итак, согласно регламентирующим Методам, приземная концентрация ЗВ в фиксированной точке местности $C(x_m, y_m)$ при наличии группы источников выбросов определяется как сумма концентраций данного вещества от отдельных источников выброса при заданных направлении и скорости ветра.

Концептуальная модель предполагает представление всей площади проезжей части перекрёстка в виде множества N малых площадных источников C_{Si} , каждый из которых включает в себя все автомобили, находящиеся на данной площади в текущую дискрету расчётного времени t_k . В этом случае концентрация для каждого m -го квадрата сетки $C^{tk}(x_m, y_m)$ облака концентраций ЗВ в течение дискреты t_k имеет следующий вид:

$$C^{tk}(x_m, y_m) = \sum_{i=1}^N C_S^{tk}(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i), \quad (2)$$

где (x_m, y_m) – точка центра m -го квадрата сетки облака концентраций ЗВ; (ξ_i, η_i) – точка центра i -го площадного источника $Si(\xi_i, \eta_i)$ выбросов ЗВ проезжей части перекрёстка.

В формуле (2) отражён концептуальный алгоритм решения задачи – дискретно обновляемый, с периодичностью t_k , мониторинг по m квадратам сетки облака рассеивания концентраций ЗВ от N площадных источников выбросов, составляющих всю проезжую часть перекрёстка.

Рассмотрим логическую цепь построения модели расчёта концентрации $C^{tk}(x_m, y_m)$ при разбиении проезжей части перекрёстка на множество площадных источников.

1-й ШАГ. В общем случае концентрация $C_S(x_m, y_m)$ загрязняющих веществ от источника, выбрасывающего ЗВ в атмосферный воздух с установленной ограниченной поверхностью (вся проезжая часть перекрёстка), занимающего область площадью S_n , рассчитывается согласно Методам по формуле

$$C_S(x_m, y_m) = \frac{1}{S_n} \iint C(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i) d\xi d\eta, \quad (3)$$

где $C(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i)$ – концентрация ЗВ, создаваемая в расчетной точке (x_m, y_m) точечным источником выброса, находящимся в точке (ξ_i, η_i) области S , а интеграл в формуле вычисляется по этой области.

2-й ШАГ. Но так как нейронная сеть позволяет отслеживать траекторию движения каждого автомобиля в области перекрёстка, то в расчётах заменим единый площадной источник ЗВ проезжей части перекрёстка на совокупность линейных источников, соответствующих траектории движения каждого автомобиля. Так, в частном случае одного линейного источника выброса, расположенного на подстилающей поверхности, концентрация ЗВ C_l рассчитывается по следующей формуле:

$$C_l(x_m, y_m, z_m) = \frac{1}{|L|} \int C(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i, z_m) dl, \quad (4)$$

где $|L|$ – длина указанного отрезка, и интеграл вычисляется вдоль этого отрезка; $C(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i, z_m)$ – концентрация ЗВ, создаваемая в расчетной точке (x_m, y_m, z_m) точечным источником выброса, находящимся в точке (ξ, η, z) отрезка L . Подстилающей поверхностью при неизменном вертикальном уровне z_m является приземный слой высотой H не более 2 м, поэтому координату z_m будем в дальнейшем опускать.

3-й ШАГ. Далее в регламентирующих Методах для одного движущегося автомобиля применяется модификация формулы (4) – если линейным источником выброса аппроксимируются выбросы от точечного источника (одного автомобиля) мощности $M(t)$, который за время осреднения перемещается с положительной скоростью $v(t)$, вдоль отрезка L , то концентрация C_l ЗВ вычисляется по формуле

$$C_l(x_m, y_m) = \int C(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i, z_m) dl, \quad (5)$$

где $M(l)$ и $v(l)$ – значения мощности $M(t)$ и скорости $v(t)$, соответствующие тому моменту времени t , когда перемещающийся источник выброса находится в точке $l = (\xi, \eta)$; C' – вычисленная по формулам, приведённым в Методах, концентрация в точке (x_m, y_m) от источника выброса ЗВ единичной мощности, располагающегося в точке (ξ, η) .

Для множества K автомобилей, движущихся по своим траекториям L_k по проезжей части всего перекрёстка, формула (5) добавляется суммой по всему количеству автомобилей:

$$C_S(x_m, y_m) = \sum_{k=1}^K \left(\int \frac{M_k(l_k)}{v_k(l_k)} dl \right) C'(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i). \quad (6)$$

4-й ШАГ. Итак, разбиваем множество линейных источников выбросов, соответствующих всем движущимся по перекрёстку автомобилям, на N площадных источников, каждый из которых в текущую дискрету времени t_k определяет суммарные выбросы ЗВ от всех находящихся на данной площади S_i автомобилей. В этом случае расчёт концентраций ЗВ в m -ом квадрате сетки облака рассеивания в дискрету времени t_k преобразуется к виду:

$$C^{tk}(x_m, y_m) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^K \left(\int \frac{M_k(l_k)}{v_k(l_k)} dl \right) C'(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i) \right). \quad (7)$$

С учётом того, что интеграл вычисляется за дискрету времени t_k , для всех K движущихся за время t_k автомобилей по i -му площадному источнику получаем следующее уравнение для суммарной мощности M_i^{tk} выброса ЗВ от i -го площадного источника:

$$M_i^{tk} = \sum_{k=1}^K \left(\int \frac{M_k(l_k)}{v_k(l_k)} dl \right) = \sum_{k=1}^K (M_{ki} \cdot t_k). \quad (8)$$

В этом случае итоговая формула (7) преобразуется к конечному виду:

$$C^{tk}(x_m, y_m) = \sum_{i=1}^N (M_i^{tk} \cdot C'_i(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i)). \quad (9)$$

Ввиду малого значения t_k можно перейти к среднему значению скоростей V_l . Тогда получаем значительно более простую формулу для расчётов суммарной мощности в дискретном варианте:

$$M_i^{tk} = \sum_1^k \left[(M_{ni,k} \sum_1^{G_{n,k}} t_{n,k}) + (M_{li,k} \sum_1^{G_{l,k}} r_{V_l}(V_l t_{V_l})) \right]. \quad (10)$$

Для практического применения расчётной модели в соответствии с формулой (9) необходимо проявить ещё математическую модель расчёта концентрации C'_i в точке (x_m, y_m) от площадного источника выброса ЗВ единичной мощности, располагающегося в точке (ξ_i, η_i) .

Модель расчёта мощности выбросов ЗВ для одного источника

Все необходимые математические формулы для этой алгоритмической модели по шагам представлены в соответствующих главах регламентирующих Методов и представляют собой набор кусочно-полиномиальных аппроксимаций для проведения быстрых компьютерных расчётов. Основой же получения этих аппроксимаций служат уравнения атмосферной диффузии, а также формулы Гауссовского распределения концентраций C_{xy} (рассмотрены в трудах М.Е. Берлянда) от источника, расположенного в начале координат:

$$C_{xy} = \left(\frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} \right) \cdot \left(\frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \right), \quad (11)$$

где σ_x, σ_y – дисперсии распределения загрязняющих веществ по направлениям x и y , которые при средней скорости ветра u и некоторых коэффициентах вычисляются как

$$\sigma_x = \frac{1}{2} c_i^2 (\tilde{u}t)^{2-n}.$$

Представленные в регламентирующих Методах упрощающие аппроксимации, адаптированные к задаче компьютерного мониторинга выбросов ЗВ, предполагают следующие упорядоченные процедуры для расчёта концентрации ЗВ в произвольной точке от постоянно действующего точечного источника выбросов:

1-й шаг – расчёт максимальной приземной концентрации C_m , опасной скорости ветра U_m расстояния X_m , на котором концентрация имеет максимальное значение C_m ;

2-й шаг – коррекция расчётов при произвольной скорости ветра U :

$$C_{m,U} = r \left(\frac{U}{U_m} \right) C_m; \quad X_{m,U} = p \left(\frac{U}{U_m} \right) X_m;$$

3-й шаг – расчёт концентрации ЗВ вдоль оси X факела выбросов:

$$C_x = s_1 \left(\frac{X}{X_{m,U}} \right) C_{m,U};$$

4-й шаг – расчёт концентрации ЗВ по нормали Y к оси факела X выбросов:

$$C_y = s_2 \left(\frac{Y}{X_{m,U}} \right) C_x.$$

В конечном итоге концентрация в произвольной точке (x_m, y_m) облака рассеивания от источника единичной мощности в точке (ξ_i, η_i) определяется по многошаговой процедуре:

$$C'(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i) = C_m r \left(\frac{U}{U_m} \right) s_1 \left(\frac{X}{X_{m,U}} \right) s_2 \left(\frac{Y}{X_{m,U}} \right). \quad (12)$$

Графические представления для $C'(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i)$ – облака рассеивания концентраций выбросов ЗВ от постоянно действующего источника при отсутствии и наличии ветра – представлены на рис. 2, где максимальная мощность источника выбросов C_m принята единичной.

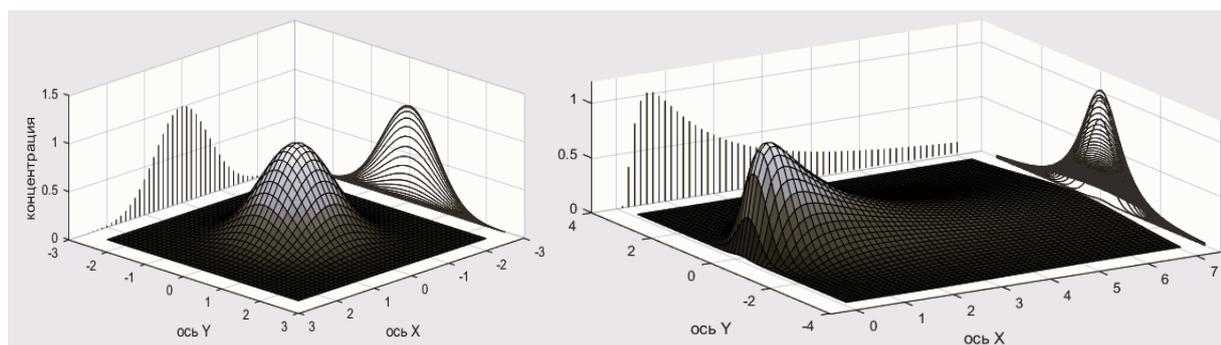


Рис. 2. Облако концентрации выбросов от постоянно действующего единичного источника

Полная модель расчёта концентрации выбросов

В конечном итоге полная математическая модель мониторинга (с периодичностью t_k) облака концентраций ЗВ $C^{tk}(x_m, y_m)$ для городского перекрёстка в каждом квадрате облака рассеивания с центром в точке (x_m, y_m) представляется общей формулой (9), в которой мощность выброса M_i^{tk} определяется по формуле (10), а концентрация $C'(x_m - \xi_i, y_m - \eta_i)$ в произвольной точке облака рассеивания определяется по формуле (12).

При этом вся проезжая часть зоны перекрёстка, попадающая в обзор видеокамеры уличного наблюдения, разбивается на N площадных источников выбросов, а параметры движения транспортного потока и его структура в каждую дискрету времени фиксируются в программной системе, построенной на основе нейросетевых алгоритмов.

Следует отметить, что программная система, построенная на основе изложенных выше математических моделей, уже апробирована и доступна для ознакомления по интернет-адресу AIMS eco – Realtime monitoring (<https://aims.susu.ru/demo>). В ней расчёты облака концентрации различных видов выбросов в приземном слое области городского перекрёстка реализованы с дискретой обновления в 3 с и учитывают силу и направление ветра.

Заключение

Представленные в работе математические модели расчёта количества и концентрации загрязняющих веществ от автотранспорта в зоне регулируемого пересечения позволяют проводить вычисления в режиме реального времени на основе высококачественного мониторинга параметров транспортного потока. Используемая для этих целей обученная нейронная сеть способна с высокой производительностью и точностью определять индивидуальные параметры движения каждого ТС, что является основой вычисления реальных данных о текущем состоянии загрязнения воздуха без использования дорогостоящих датчиков.

Программный комплекс, применяющий данное математическое обеспечение, формирует архив данных экологического мониторинга, который служит базой для различных видов анализа скрытых закономерностей влияния параметров транспортного потока на поле концентраций различных видов загрязняющих веществ.

Следует отметить, что разработанное математическое обеспечение является адаптацией регламентированных для РФ методик и даже их развитием в направлении более точных вычислений и мониторинга экологической ситуации, проводимого в реальном масштабе времени.

На основе корректной и точной информации об экологической ситуации в городских узлах транспортной сети возможно эффективное принятие управленческих решений в целях улучшения качества воздуха, и, как следствие, здоровья всех возрастных групп населения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта 24-21-20086: Конкурс 2024 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (региональный конкурс).

Литература

1. Autonomous Electric Vehicles Can Reduce Carbon Emissions and Air Pollution in Cities / T. Ercan, N.C. Onat, N. Keya *et al.* // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2022. – Vol. 112.
2. Personal Exposure to Particulate Air Pollution during Commuting in European Cities – Recommendations and Policy Implications / A. Karanasiou, M. Viana, X. Querol *et al.* // *Science of The Total Environment*. – 2014. – Vol. 490. – P. 785–797.
3. Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Road Dust from Landfills in Dhaka-Narayanganj, Bangladesh / M. Chakraborty, M.R. Rahat, T.R. Choudhury *et al.* // *Emerging Contaminants*. – 2023. – Vol. 10, Iss. 1. – 100278.
4. MSGNN: A Multi-Structured Graph Neural Network Model for Real-Time Incident Prediction in Large Traffic Networks / T. Tran, D. He, J. Kim, M. Hickman // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2023. – Vol. 156. – 104354.
5. Brussels, N. Rerouting Urban Construction Transport Flows to Avoid Air Pollution Hotspots / N. Brusselaers, C. Macharis, K. Mommens // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023. – Vol. 119. – No. 103747.
6. Urban Emissions hotspots: Quantifying Vehicle Congestion and Air Pollution using Mobile Phone GPS Data / C.K. Gately, L.R. Hutyra, S. Peterson, I.S. Wing // *Environmental Pollution*. – 2017. – Vol. 229. – P. 496–504.
7. Yuan, W. Fuel Use and Emission Rates Reduction Potential for Light-Duty Gasoline Vehicle Eco-Driving / W. Yuan, H.C. Frey, T. Wei // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2022. – Vol. 109. – No. 103394.
8. Басков, В.Н. Категорирование участков улично-дорожной сети по степени риска транспортного затора с учетом скоростных интервалов / В. Н. Басков, А.В. Игнатов // *Мир транспорта и технологических машин*. – 2016. – № 3(54). – С. 53–59.
9. Бояршинов, М. Г. Характеристики транспортного затора на основе данных системы фото-и видеофиксации / М.Г. Бояршинов, А.С. Вавилин // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. – 2023. – № 3. – С. 83–106.
10. Buonanno, G. Influential Parameters on Particle Exposure of Pedestrians in Urban Microenvironments / G. Buonanno, F.C. Fuoco, L. Stabile // *Atmospheric Environment*. – 2011. – Vol. 45, Iss. 7. – P. 1434–1443.
11. Meteorological Mechanism of Regional PM_{2.5} Transport Building a Receptor Region for Heavy Air Pollution over Central China / Y. Bai, T. Zhao, W. Hu *et al.* // *Science of The Total Environment*. – 2022. – Vol. 808. – 151951.
12. Brusselaers, N. The Health Impact of Freight Transport-Related Air Pollution on Vulnerable Population Groups / N. Brusselaers, C. Macharis, K. Mommens // *Environmental Pollution*. – 2023. – Vol. 329, Iss. 4. – 121555
13. Sharma, M. Assessment/Monitoring of Air Pollution and Effect on Human Health in Kota City During SPRING Season – 2020 / M. Sharma, A.K. Mathur // *Materials Today: Proceedings*, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323050903>
14. A Large Eddy Simulation of the Dispersion of Traffic Emissions by Moving Vehicles at an Intersection / H. Woodward, M. Stettler, D. Pavlidis *et al.* // *Atmospheric Environment*. – 2019. – Vol. 215. – no. 116891
15. New Insight into the Urban PM_{2.5} Pollution Island Effect Enabled by the Gaussian Surface Fitting Model: A Case Study in a Mega Urban Agglomeration Region of China / L. Yao, S. Sun, Y. Wang *et al.* // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2022. – Vol. 113. – 102982
16. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27 ноября 2019 г. № 804 «Об утверждении методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха».
17. Traffic Load Estimation from Structural Health Monitoring Sensors using Supervised Learning / A. Burrello, G. Zara, L. Benini *et al.* // *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. – 2022. – Vol. 35. – 100704.

18. Multi-YOLOv8: An Infrared Moving Small Object Detection Model Based on YOLOv8 for Air Vehicle / S. Sun, B. Mo, J. Xu *et al.* // *Neurocomputing*. – 2024. – Vol. 588. – 127685

19. Urban Traffic Flow Analysis Based on Deep Learning Car Detection from CCTV Image Series / M.V. Peppas, D. Bell, T. Komar, W. Xiao // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. – 2018. – Vol. 42, no. 4. – P. 565–572.

20. Berkowicz, R. Traffic Pollution Modelling and Emission Data / R. Berkowicz, M. Winther, M. Ketzel // *Environmental Modelling and Software*. – 2006. – Vol. 21, Iss. 4. – P. 454–460.

Поступила в редакцию 30 июля 2024 г.

Сведения об авторах

Шепелёв Владимир Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, e-mail: shepelevvd@susu.ru.

Глушков Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое и компьютерное моделирование», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, e-mail: glushkovai@susu.ru.

Левашев Алексей Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: alexey.levashev@tl-istu.com.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2024, vol. 16, no. 4, pp. 85–95*

DOI: 10.14529/mmph240410

MATHEMATICAL SUPPORT FOR MONITORING POLLUTANT EMISSIONS FROM VEHICLES IN THE REGULATED INTERSECTION AREA BASED ON NEURAL NETWORK ALGORITHMS

V.D. Shepelev¹, A.I. Glushkov¹, A.G. Levashev²

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

E-mail: shepelevvd@susu.ru

Abstract. In modern cities, environmental issues related to motor transport occupy an increasingly important place in the management system of urban transport flows. Vehicles emit the greatest amount of exhaust gases during sudden changes in traffic modes, which is typical of signalized intersections. Traffic congestion situations also occur more often at intersections, when a large concentration of traffic creates an unfavorable environmental background. To obtain operational information about the parameters of the intensity of traffic flows, the authors used neural network algorithms for recognizing vehicles from video streams received from stationary street surveillance cameras at city intersections. An optimized algorithm for the operation of a trained neural network (YOLOv4) allows for extracting and interpreting data on traffic flow parameters in real time. As part of the study, the developed mathematical models made it possible to implement real-time monitoring of the amount and concentration of pollutants from vehicles in the controlled intersection zone. The calculation of the amount of pollutants released into the atmosphere from transport is carried out taking into account the average speed, type of vehicle and idle time in the measurement area. An appropriate software system can serve as a basis for predicting the difficulty levels and environmental risks of various atypical traffic situations.

Keywords: emissions of pollutants; traffic flow; neural network; machine learning; mathematical model; emissions concentration; monitoring of environmental risks.

References

1. Ercan T., Onat N.C., Keya N., Tatari O., Eluru N., Kucukvar M. Autonomous Electric Vehicles Can Reduce Carbon Emissions and Air Pollution in Cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, Vol. 112. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103472

2. Karanasiou A., Viana M., Querol X., Moreno, T., de Leeuw F. Assessment of Personal Exposure to Particulate Air Pollution during Commuting in European cities – Recommendations and Policy Implications. *Science of The Total Environment*, 2014, Vol. 490, P. 785–797. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.036
3. Chakraborty M., Rahat M. R., Choudhury T. R., Nigar R., Liu G., Habib A. Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Road Dust from Landfills in Dhaka–Narayanganj, Bangladesh. *Emerging Contaminants*, 2023, Vol. 10, Iss. 1, 100278. DOI: 10.1016/j.emcon.2023.100278
4. Tran T., He D., Kim J., Hickman M. MSGNN: A Multi-Structured Graph Neural Network Model for Real-Time Incident Prediction in Large Traffic Networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, Vol. 156, 104354. DOI: 10.1016/j.trc.2023.104354.
5. Brusselaers N., Macharis C., Mommens K. Rerouting urban Construction Transport Flows to Avoid Air Pollution Hotspots. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, Vol. 119, No. 103747. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103747
6. Gately C. K., Hutryra L. R., Peterson S., Wing I.S. Urban Emissions Hotspots: Quantifying Vehicle Congestion and Air Pollution using Mobile Phone GPS Data. *Environmental Pollution*, 2017, Vol. 229, P. 496–504. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.05.091
7. Yuan W., Frey H. C., Wei T. Fuel Use and Emission Rates Reduction Potential for Light-Duty Gasoline Vehicle Eco-Driving. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, Vol. 109, no. 103394. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103394
8. Baskov V.N., Ignatov A.V. Categorizing Sections of the Road Network Risk Congestion Taking into Account Speed Intervals. *World Transport and Technological Machinery*, 2016, no. 3(54), pp. 53–59. (in Russ.).
9. Boyarshinov M.G., Vavilin A.S. Traffic Congestion Characteristics Based on Data of The Photo And Video Recording System. *Intelligence. Innovation. Investment (Intellekt. Innovatsii. Investitsii)*, 2023, no. 3, pp. 83–106. (in Russ.). DOI: 10.25198/2077-7175-2023-3-83
10. Buonanno G., Fuoco F.C., Stabile L. Influential Parameters on Particle Exposure of Pedestrians in Urban Microenvironments. *Atmospheric Environment*, 2011, Vol. 45, Iss. 7, pp. 1434–1443. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.12.015
11. Bai Y., Zhao T., Hu W., Zhou Y., Xiong J., Wang Y., Liu L., Shen L., Kong S., Meng K., Zheng H. Meteorological Mechanism of Regional PM_{2.5} Transport Building a Receptor Region for Heavy air Pollution over Central China. *Science of The Total Environment*, 2022, Vol. 808, 151951. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151951
12. Brusselaers N., Macharis C., Mommens K. The Health Impact of Freight Transport-Related Air Pollution on Vulnerable Population Groups. *Environmental Pollution*, 2023, Vol. 329, Iss. 4, 121555, DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121555
13. Sharma M., Mathur A. K. Assessment/Monitoring of Air Pollution and Effect on Human Health in Kota City During Spring Season – 2020. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.11.020
14. Woodward H., Stettler M., Pavlidis D., Aristodemou E., ApSimon H., Pain C. A Large Eddy Simulation of the Dispersion of Traffic Emissions by Moving Vehicles at an Intersection. *Atmospheric Environment*, 2019, Vol. 215, no. 116891. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.116891
15. Yao L., Sun S., Wang Y., Song C., Xu Y. New Insight into the Urban PM_{2.5} Pollution Island Effect Enabled by the Gaussian Surface Fitting Model: A Case Study in a Mega Urban Agglomeration Region of China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, Vol. 113, 102982. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102982
16. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated November 27, 2019 No. 804 “On Approval of the Methodology for Determining Emissions of Pollutants into the Air from Mobile Sources for Conducting Summary Calculations of Air Pollution.”
17. Burrello A., Zara G., Benini L., Brunelli D., Macii E., Poncino M., Pagliari D.J. Traffic Load Estimation from Structural Health Monitoring Sensors using Supervised Learning. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2022, Vol. 35, 100704. DOI: 10.1016/j.suscom.2022.100704

18. Sun S., Mo B., Xu J., Li D., Zhao J., Han S. Multi-YOLOv8: An Infrared Moving Small Object Detection Model Based on YOLOv8 for air Vehicle. *Neurocomputing*, 2024, Vol. 588, 127685 DOI: 10.1016/j.neucom.2024.127685

19. Peppas, M.V., Bell, D., Komar, T., Xiao, W. Urban Traffic Flow Analysis Based on Deep Learning Car Detection from CCTV Image Series. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2018, Vol. 42, no. 4, pp. 565–572. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-499-2018

20. Berkowicz R., Winther M., Ketzel M. Traffic Pollution Modelling and Emission Data. *Environmental Modelling and Software*, 2006, Vol. 21, Iss. 4, pp. 454–460. DOI: 10.1016/j.envsoft.2004.06.013

Received July 30, 2024

Information about authors

Shepelev Vladimir Dmitrievich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Automotive Transport, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: shepelevvd@susu.ru.

Glushkov Alexander Ivanovich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Mathematical and Computer Modeling, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: glushkovai@susu.ru

Levashev Alexey Georgievich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Operation of Motor Vehicles, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: alexey.levashev@tl-istu.com.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА КРИСТАЛЛА ФТОРИДА ЛИТИЯ В ПРОЦЕССЕ ЕГО УДАРНОГО СЖАТИЯ И ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ

А.В. Красильников¹, Е.И. Несмиянов^{1,2}, Е.С. Шестаковская², А.Г. Попцов¹,
А.Е. Ковалев¹, А.П. Яловец²

¹ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Российская Федерация

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация
E-mail: shestakovskaiaes@susu.ru

Аннотация. Монокристалл фторида лития (LiF) является широко используемым материалом в опытах при интенсивных динамических нагрузках в качестве окна для оптических методик, таких как VISAR или PDV. Он прозрачен и не испытывает фазовых переходов при ударном сжатии до ~200 ГПа. Для интерпретации экспериментальных данных, полученных с использованием такого окна, необходимо вводить поправочный коэффициент. Он связывает видимую массовую скорость, полученную экспериментально, с истинной массовой скоростью. Если для стационарных ударных волн этот коэффициент является постоянным, то для более сложных течений на него оказывает влияние пространственная неоднородность плотности окна. В работе проведены экспериментальные исследования ударно-волновых процессов во фториде лития при ударно-волновом сжатии при нагружении до 90 ГПа. Проведено математическое моделирование экспериментов. Для этого построена математическая модель одномерных упруго-пластических течений среды с использованием модели пластичности Прандтля–Рейса, а также построено уравнение состояния фторида лития. Поправочный коэффициент получен двумя способами: на основе зависимости показателя преломления от плотности и закона сохранения массы на ударной волне и зависимости оптической длины пути лазерного луча от распределения плотности в исследуемом материале.

Ключевые слова: математическое моделирование; показатель преломления; фторид лития; экспериментальные исследования; лазерные методики.

Введение

Для исследования поведения материалов при динамических нагрузках применяются различные оптические методы. Широкое распространение получили метод лазерной интерферометрии [1] и, в частности, методика PDV, в которых используется оптическое окно [2]. Распространение по веществу ударной волны сопровождается увеличением его плотности и температуры, изменением ряда других свойств, в том числе оптических. Следовательно, понимание изменения показателя преломления материалов прозрачных окон при ударной нагрузке имеет решающее значение для правильной интерпретации таких экспериментальных данных [1–4].

Фторид лития часто используется в качестве оптического окна, поскольку остается прозрачным для методик измерений при ударно-волновом нагружении до 200 ГПа. В этом диапазоне напряжений LiF имеет упругоэластический отклик с очень низким (< 0,5 ГПа) упругим предвестником и не демонстрирует никаких известных фазовых превращений. Однако, поскольку зависимость показателя преломления LiF от плотности не соответствует соотношению Гладстона–Дейла, измеренная массовая скорость на контактной границе «образец – окно» не является истинной массовой скоростью и ее необходимо скорректировать [5]. По этой причине измеренную скорость в экспериментах такого типа часто называют кажущейся скоростью.

Существует большое количество работ, посвященных исследованию оптических свойств фторида лития [6–11]. В настоящее время появляются новые экспериментальные данные по ударному сжатию до давлений порядка 210 ГПа [12–16] и данные по адиабатическому сжатию до 900 ГПа [17–19]. Каждая из работ направлена на установление или уточнение зависимости показателя преломления от плотности и зависимости истинной скорости от кажущейся.

Данная работа также вносит вклад в исследование оптических свойств фторида лития и направлена на исследование поправочного коэффициента кристалла фторида лития [100] при ударном сжатии и изоэнтропической разгрузке в широком диапазоне давлений.

1. Определение показателя преломления фторида лития

Кажущаяся массовая скорость определяется экспериментально. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

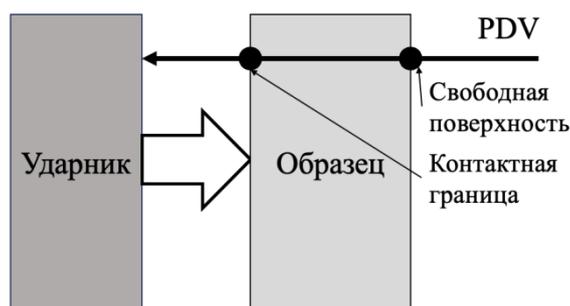


Рис.1. Схема эксперимента

Согласно [3, 20] кажущаяся скорость U_{app} связана с истинной скоростью U_{true} следующим выражением:

$$U_{app} = U_{true} n_s - D(n_s - n_0), \quad (1)$$

где D – скорость ударной волны (УВ), n_s – показатель преломления на фронте УВ, n_0 – показатель преломления при нормальных условиях.

Зависимость между показателем преломления n_s и плотностью ρ может быть описана в виде [6]

$$n_s = n_0 + \frac{dn}{d\rho}(\rho - \rho_0), \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность при нормальных условиях.

Зависимость (2) представляет собой уравнение прямой, где $dn/d\rho$ – тангенс угла наклона. Эта величина дает количественную оценку изменения показателя преломления от плотности. Считается, что $dn/d\rho$ является константой и уникально для каждого вещества. Обозначим $dn/d\rho = k/\rho_0$, где k – некоторый коэффициент. Тогда выражение (2) примет вид

$$n_s = n_0 - k + k \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (3)$$

С учетом закона сохранения массы на ударной волне [1]

$$\rho_0 D = \rho(D - U)$$

выражение (1) примет вид

$$U_{app} = (n_0 - k)U_{true}.$$

Вводя обозначение $a = n_0 - k$, получим связь между кажущейся и истинной скоростью

$$U_{app} = aU_{true}, \quad (4)$$

где a – поправочный коэффициент. Если зависимость $n(\rho)$ удовлетворяет соотношению Гладстона–Дейла, то коэффициент $a = 1$ и кажущаяся скорость является истинной.

На рис. 2 представлены значения показателя преломления в зависимости от плотности, полученные из экспериментов по ударному сжатию фторида лития. С использованием эксперимен-

тальных данных [15] путем интерполяции с помощью метода наименьших квадратов можно определить коэффициенты, входящие в выражение (2):

$$n = 1,3827 + 3,99 \cdot 10^{-2} \cdot (\rho - 2,68) = 1,2758 + 3,99 \cdot 10^{-2} \cdot \rho. \quad (5)$$

Тогда из зависимости (5) можно найти значение поправочного коэффициента

$$a = n_0 - \frac{dn}{d\rho} \rho_0 = 1,3827 - 0,0399 \cdot 2,68 = 1,2758. \quad (6)$$

Полученное значение согласуется с результатами других исследований [5], где поправочный коэффициент был найден как отношение кажущейся и истинной скорости (рис. 3).

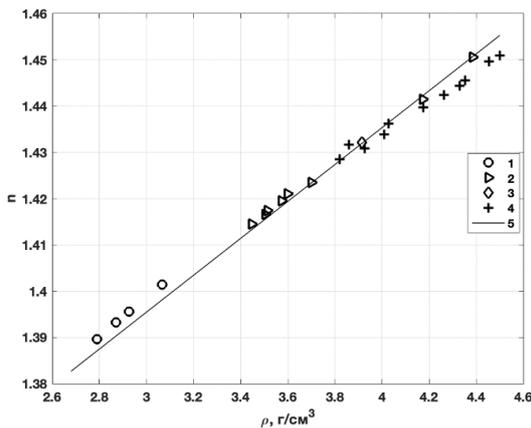


Рис. 2. Зависимость показателя преломления фторида лития от плотности при ударном сжатии. Здесь 1 – [21], 2 – [5], 3 – [22], 4 – [15], 5 – расчет по формуле (5)

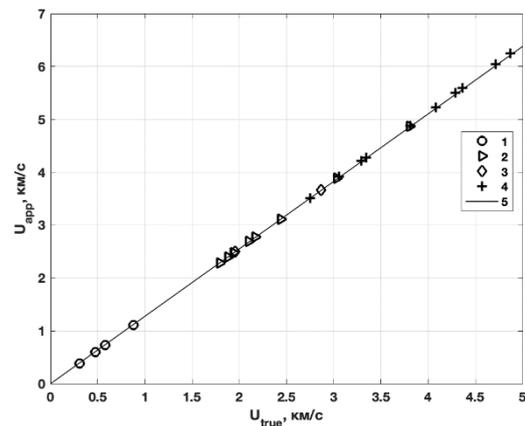


Рис. 3. Зависимость истинной скорости от кажущейся при ударном сжатии. Здесь 1 – [21], 2 – [5], 3 – [22], 4 – [15], 5 – расчет по формуле (4)

Кроме того, кажущуюся скорость можно определить другим способом, поскольку она представляет собой скорость изменения во времени оптической длины исследуемого материала:

$$U_{app} = -\frac{dZ}{dt}. \quad (7)$$

Здесь Z – оптическая длина пути, которая определяется как

$$Z(t) = \int_L n(x,t) dx, \quad (8)$$

где $n(x,t)$ – распределение показателя преломления в веществе, L – длина образца LiF.

При ударно-волновом нагружении в кристалле реализуются распределение плотности $\rho(x,t)$ по пространственной координате и времени, которые можно получить в гидродинамических расчетах. С учетом этого факта и выражения (5) формула (8) для определения оптической длины пути в расчёте примет вид

$$Z(t) = \int_0^L (1,2758 + 3,99 \cdot 10^{-2} \cdot \rho(x,t)) dx. \quad (9)$$

Выражение (7) можно переписать, используя метод конечных разностей. Тогда кажущаяся массовая скорость в численных расчетах будет определяться как

$$U_{app} = -\frac{Z(t+d\tau) - Z(t)}{d\tau}, \quad (10)$$

где $d\tau$ – шаг по времени.

2. Математическая модель

Система уравнений, описывающая одномерные упругопластические течения, в декартовых координатах имеет вид

$$\dot{\rho} = -\rho \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \rho \dot{v} = \frac{\partial}{\partial z} (S_{zz} - P), \quad \rho \dot{E} = (-P + S_{zz}) \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \dot{S}_{zz} = \frac{4\mu}{3} \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (11)$$

где ρ, v – плотность и массовая скорость; μ – модуль сдвига, P, S_{zz} – давление и тензор девиатора напряжений; E – удельная внутренняя энергия.

Система (11) записана с учетом необратимости реальных физических процессов, для чего в уравнениях использованы неравновесные напряжения, которые учитывают конечное время релаксации системы к равновесному состоянию [23, 24]. Для описания пластических течений применяется модель Прандтля–Рейса [25, 26].

Для численного решения предложенной математической модели использовался полуаналитический метод [23], отличительной особенностью которого является то, что только пространственные производные заменяются конечными разностями. В этом случае система уравнений механики сплошной среды (МСС) сводится к системе дифференциальных уравнений, которые допускают приближенное аналитическое решение на некотором временном шаге.

Система уравнений (11) должна быть дополнена соответствующими начальными и граничными условиями, которые берутся из конкретной постановки задачи, и уравнениями состояния веществ. Для описания поведения LiF в данной работе построено малопараметрическое уравнение состояния (УРС) в форме Ми–Грюнайзена

$$P = P_X + \frac{\Gamma(V)}{V}(E - E_X), \quad (12)$$

где E_X и P_X – холодные (упругие) составляющие удельной внутренней энергии и давления, V – удельный объем. Зависимости $E_X(V)$ и $P_X(V)$ возьмем в виде

$$P_X = B_0 \rho_0 c_0^2 \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^n - 1 \right], \quad E_X = - \int_{V_0}^V P_X dV = B_0 c_0^2 \left\{ \frac{1}{n-1} \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{n-1} - 1 \right] - 1 + \frac{V}{V_0} \right\},$$

где B_0, n – коэффициенты УРС, c_0 – продольная составляющая скорости звука, V_0 – удельный объем при нормальных условиях.

Коэффициент Грюнайзена имеет вид [27]

$$\Gamma(V) = \Gamma_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\ln \left(\frac{V_0}{V} \right)}.$$

По экспериментальным данным [28, 29] в данной работе определены коэффициенты уравнения состояния LiF.

На рис. 4 представлена ударная адиабата LiF в координатах $(P-V)$ и $(D-u)$.

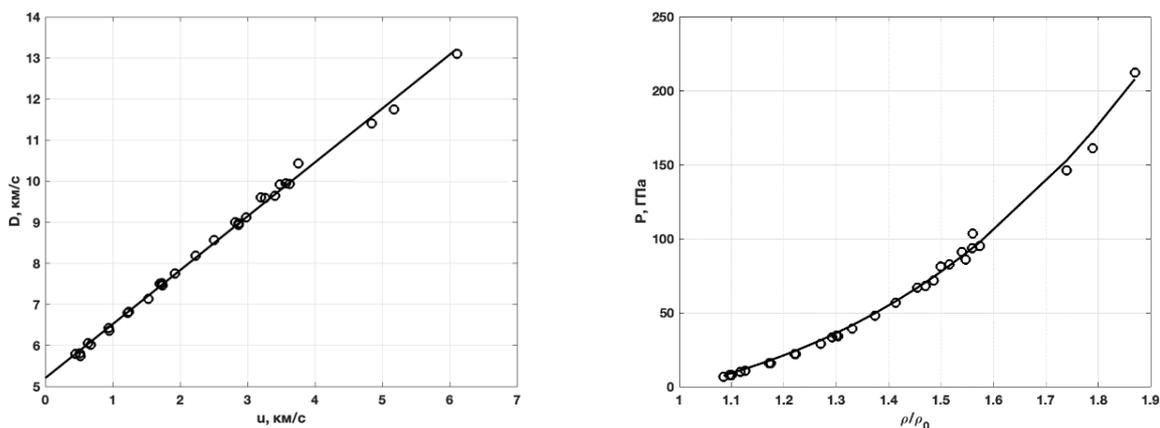


Рис. 4. Ударная адиабата фторида лития. Сплошные линии – расчет по уравнению состояния, построенному в данной работе, точки – эксперимент [28, 29]

Верификация УРС LiF проводилась по экспериментальным данным [13], в которых моделируется удар медного диска по составному диску из LiF. Схема эксперимента представлена на рис. 5. Радиус дисков составляет 30 мм, что при проведении эксперимента исключает влияние боковой разгрузки и позволяет проводить численное моделирование в одномерной постановке. В эксперименте регистрировалась массовая скорость на контактной границе «ударник–образец 1» и на границе «образец 1 – образец 2». Результаты численного моделирования представлены на рис. 6. Для корректировки кажущейся скорости из экспериментов используется выражение (4). Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что построенное УРС LiF

(12) дает правильное описание как ударного сжатия, так и последующей разгрузки в рассматриваемом материале.

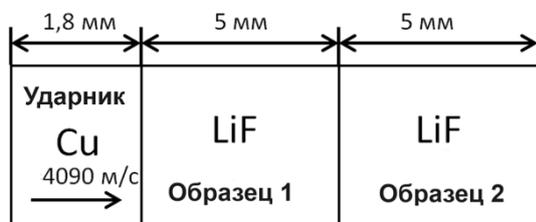


Рис. 5. Схема эксперимента

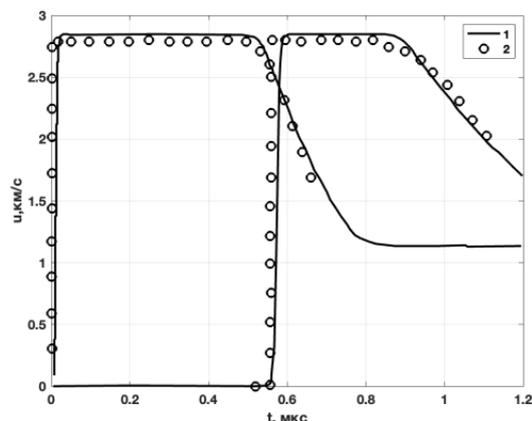


Рис. 6. Профили массовых скоростей: 1 – математическое моделирование, 2 – экспериментальные данные [13]

3. Эксперимент и математическое моделирование. Результаты

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Ударник из нержавеющей стали 12Х18Н10Т разогнанялся продуктами взрыва заряда взрывчатого вещества через воздушный зазор. Толщина ударника выбиралась таким образом, чтобы фронт ударной волны, распространяющийся по образцу после соударения ударника с образцом, достигал свободной поверхности образца раньше, чем волна разрежения от задней поверхности ударника. Постановка экспериментов описана в таблице.

Постановка экспериментов

Материал ударника	Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т			
Опыт №	1	2	3	4
Толщина ударника, мм	4,5	2,5	2	1,6
Скорость ударника, м/с	530	1265	1930	5200
Материал образца	LiF			
Толщина образца, мм	20			

Далее проведено математическое моделирование этих опытов. С использованием формул (4) и (6), найдены временные зависимости кажущейся скорости контактной границы. Дополнительно были получены профили видимой массовой скорости из данных расчётов по формуле (10). Интеграл, входящий в (9), вычислялся методом трапеций. Для вычисления видимой массовой скорости для каждого момента времени использованы значения оптического пути с текущего и предыдущего временного слоя. Сравнение экспериментальных и расчётных данных показано на рис. 7.

Из полученных зависимостей видно, что рассчитанная видимая скорость согласуется с данными, полученными экспериментально, что подтверждает адекватность математической модели и выбранного значения поправочного коэффициента. Расхождения с экспериментальными данными в конце записи могут быть обусловлены приходом боковой волны разгрузки в окне.

Кроме того, значения видимой скорости, полученные двумя способами, отличаются. Поэтому были построены зависимости изменения поправочного коэффициента от времени регистрации для каждой постановки. Поправочные коэффициенты рассчитаны как отношение видимой (расчет по (10)) и истинной (получена напрямую из математического моделирования) массовых скоростей для каждого момента времени регистрации.

Для примера зависимость поправочного коэффициента от времени в постановке, соответствующей опыту № 3, представлена на рис. 8.

Во время прихода волны разрежения на контактную границу «образец–окно» наблюдается изменение поправочного коэффициента. Это может быть связано с тем, что зависимость показателя преломления от плотности при ударном сжатии и разгрузке имеет различный характер. Поэтому при интерпретации экспериментальных данных необходимо дополнительно вводить поправку на изменение оптического пути за волной разрежения. Тем не менее при давлениях $5 \div 90$ ГПа, полученных в опытах № 1–4, изменение поправочного коэффициента не превышает 1 %, что делает фторид лития очень удобным оконным материалом для экспериментов с нестационарными газодинамическими течениями.

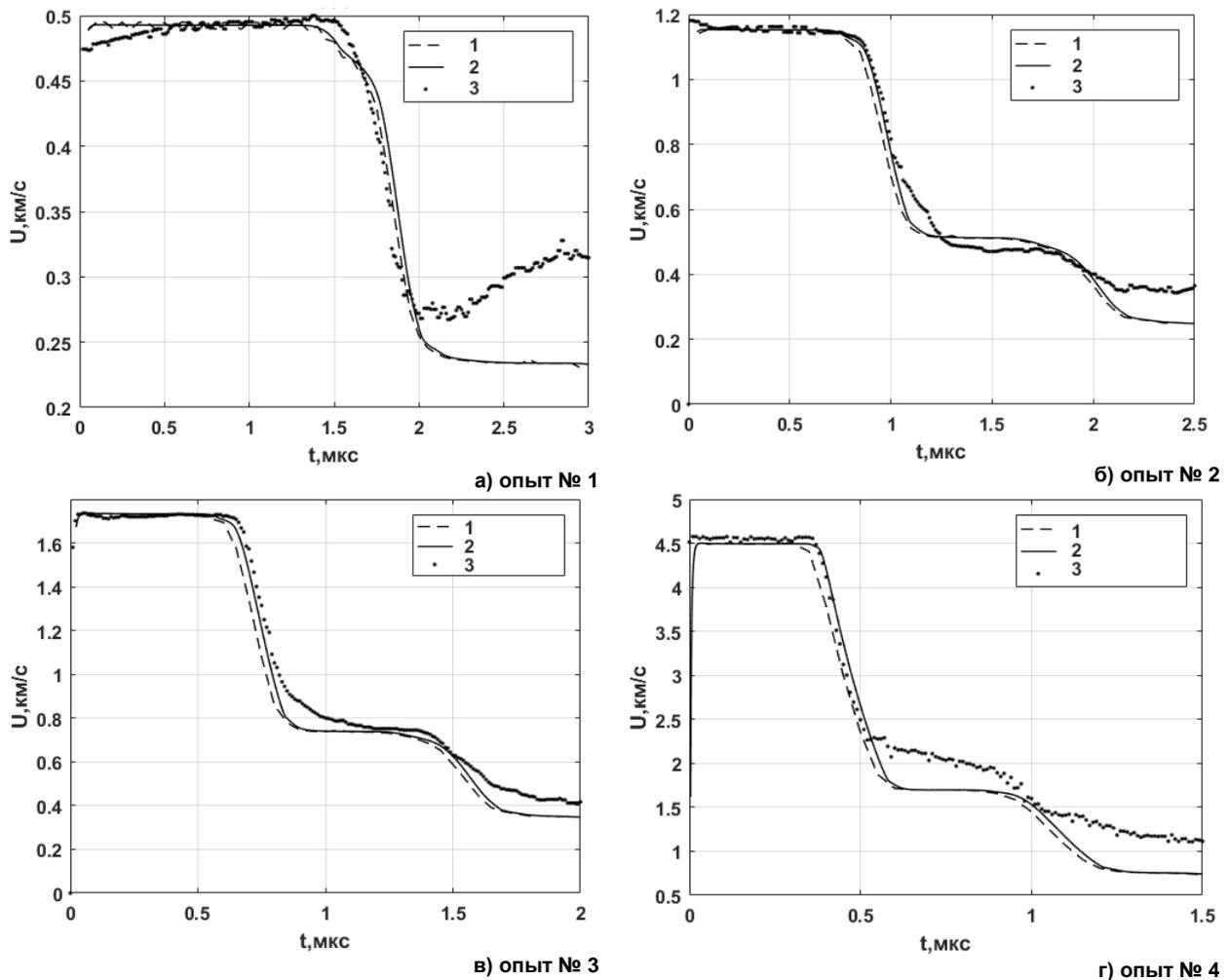


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и расчетных профилей скорости:
1 – расчет по формуле (9), 2 – расчет по формуле (4), 3 – экспериментальные данные

Кроме того, было исследовано влияние изоэнтропической разгрузки на изменение оптического пути. Так, для опыта № 4 на момент времени $t = 0,6$ мкс были рассчитаны распределения плотности $\rho_{\text{№4}}(x)$ и показателя преломления $n_{\text{№4}}(x)$ (рис. 9 а, б, сплошная линия), а также соответствующий им оптический путь $Z_{\text{№4}}$, который был вычислен по формуле

$$Z(t) = \int_0^{x'} (1,2758 + 3,99 \cdot 10^{-2} \cdot \rho(x,t)) dx,$$

где x' – толщина вещества окна на пути лазерного луча.

Из рис. 9 а, б видно, что левая граница образца претерпела изоэнтропическую разгрузку. Также были получены профили $\rho_{\text{модель}}(x)$ и $n_{\text{модель}}(x)$ на этот же момент времени в модельной задаче с ударником бесконечной толщины, имеющим ту же скорость движения. В этом случае давление на границе, реализованное после ударного нагружения, сохранилось (рис. 9 а, б, пунктирная линия). По полученным профилям был определен соответствующий оптический путь

$Z_{\text{модель}}$, а затем взята разность $\delta Z = Z_{\text{модель}} - Z_{\text{№4}}$, которая показывает, насколько уменьшился оптический путь (рис. 9, в).

Для данного опыта изменение оптического пути составило $\delta Z = 0,045$ мм. Это соответствует изменению массовой скорости $\delta U = \delta Z / t = 75$ м/с. Таким образом, изменение поправочного коэффициента $\delta a = \delta U / U = 0,0167$. Здесь U – массовая скорость за фронтом ударной волны.

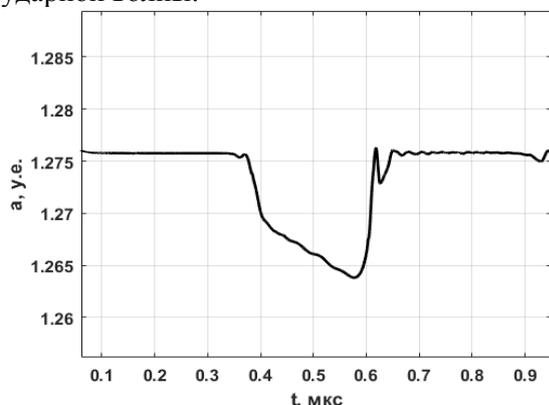


Рис. 8. Поправочный коэффициент, опыт № 4

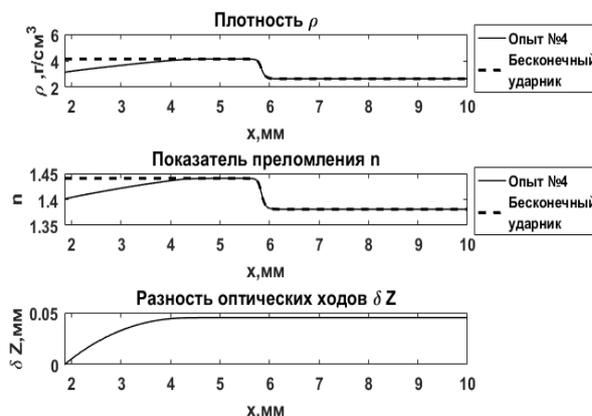


Рис. 9. Распределения по длине образца: а) плотности, б) показателя преломления, в) разность оптического пути

Видно, что изоэнтропическая разгрузка уменьшает оптический путь луча, что приводит к уменьшению поправочного коэффициента, т. е. к нелинейности зависимости $u_{\text{app}}(u_{\text{true}})$, в отличие от работы [3], где также проведен анализ зависимости поправочного коэффициента при ударном нагружении и изоэнтропической разгрузке и авторы делают выводы, что при нагружении до 17 ГПа зависимость линейна.

Заключение

На основе уравнений механики сплошных сред и уравнения состояния в форме Ми–Грюнайзена разработана математическая модель, описывающая проведение кристаллов фторида лития при их ударно-волновом нагружении и изоэнтропической разгрузке.

Расчетные профили были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными с помощью методики PDV с учётом уточненного поправочного коэффициента, вычисленного с использованием формулы для оптического пути в сжатом кристалле. Для фторида лития при ударном сжатии коэффициент составил $a = 1,275$. При изоэнтропической разгрузке поправочный коэффициент принимает значение $a = 1,265$. Таким образом, результаты математического моделирования показали, что требуется дополнительная обработка и анализ экспериментальных данных.

Разработанная математическая модель и полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования поведения кристаллов фторида лития при различных динамических нагрузках, а также может быть апробирована на других оконных материалах, используемых в гидродинамических экспериментах.

Литература

1. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках: монография / Под общ. ред. М.В. Жерноклетова. – 2-е изд., доп. и испр. – Саров: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2005. – 428 с.
2. Экспериментальные методы и средства в физике экстремальных состояний вещества: монография / Под ред. Р.И. Ильяева, А.Л. Михайлова, М.В. Жерноклетова. – М.: РАН, 2021. – 484 с.
3. Velocity Correction and Refractive Index Changes for [100] Lithium Fluoride Optical Windows under Shock Compression, Recompression, and Unloading / B.M. LaLone, O.V. Fat'yanov, J.R. Asay, Y.M. Gupta // J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 103, no. 9. – P. 093505.
4. Wise, L.C. Laser Interferometer Measurements of Refractive Index in Shock-Compressed Materials / L.J. Wise, L.C. Chhabildas // Shock Waves in Condensed Matter, Plenum. – 1986. – P. 441.

5. Determining the Refractive Index of Shocked [100] Lithium Fluoride to the Limit of Transmissibility / P.A. Rigg, M.D. Knudson, R.J. Scharff, R.S. Hixson // *J. Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 116. – P. 033515.
6. Кормер, С.Б. Оптические исследования свойств ударно сжатых конденсированных диэлектриков / С.Б. Кормер // *Успехи физических наук.* – 1968. – Т. 94, № 4. – С. 641–683.
7. Smirnov, N.A. *Ab initio* Calculations of the Thermodynamic Properties of LiF Crystal / N.A. Smirnov // *Physical Review.* – 2011. – Vol. 83. – P. 014109
8. Sun, Z. First-Principles Calculations of the Structural, Electronic, and Optical Properties of LiF up to 300 GPa / Z. Sun, J. Dong, Y. Xia // *Physica B.* – 2011. – Vol. 406 – P. 3660–3665.
9. Effects of the Vacancy Point-Defect on the Refractive Index and Equation of State (EOS) of LiF at High Pressure: A First Principles Investigation / L. He, M.J. Tang, J. Yin *et al.* // *Physica B.* – 2012. – Vol. 407. – P. 694–697.
10. High-Pressure and High-Temperature Physical Properties of LiF Studied by Density Functional Theory Calculations and Molecular Dynamics Simulations / X.-W. Sun, Z.-J. Liu, W.-L. Quan *et al.* // *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* – 2018. – Vol. 116. – P. 209–215.
11. Wang, J. Structural, Elastic, Electronic and Optical Properties of Lithium Halides (LiF, LiCl, LiBr, and LiI): First-Principal Calculations / J. Wang, M. Deng, Y. Chen *et al.* // *Materials Chemistry and Physics.* – 2020. – Vol. 244. – P. 122733.
12. Hayes, D. Unsteady Compression Waves in Interferometer Windows/ D. Hayes // *J. Appl. Phys.* – 2001. – Vol. 89. – P. 6484.
13. Sound Velocity, Equation of State, Temperature and Melting of LiF Single Crystals under Shock Compression / Q. Liu, X. Zhou, X. Zeng, S. N. Luo // *Journal of Applied Physics.* – 2015. – Vol. 117. – P. 045901.
14. Mechanical and Optical Response of [100] Lithium Fluoride to Multi-Megabar Dynamic Pressures / J. Davis, M. Knudson, L. Shulenburg, S. Crockett // *J. Appl. Phys.* – 2016. – Vol. 120. – P. 165901.
15. Refractive Index of [100] Lithium Fluoride under Shock Pressures up to 151 GPa / G. Young, X. Liu, C. Leng *et al.* // *AIP Advances.* – 2018. – Vol. 8. – P. 125310.
16. Furnish, M.D. Time-Resolved Particle Velocity Measurements at Impact Velocities of 10 km/s / M.D. Furnish, L.C. Chhabildas, W.D. Reinhart // *International Journal of Impact Engineering.* – 1999. – Vol. 23. – P. 261–270.
17. Sun, Z. First-Principles Calculations of the Structural, Electronic, and Optical Properties of LiF up to 300 GPa / Z. Sun, J. Dong, Y. Xia // *Physica B.* – 2011. – Vol. 406. – P. 3660–3665.
18. Refractive Index of Lithium Fluoride Ramp Compressed to 800 GPa / D.E. Fratanduono, T.R. Boehly, M.A. Barrios *et al.* // *J. Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 109. – P. 123521.
19. Kirsch, L.E. Refractive Index of Lithium Fluoride to 900 Gigapascal and Implications for Dynamic Equation of State Measurements / L.E. Kirsch, S.J. Ali, D.E. Fratanduono *et al.* // *J. Appl. Phys.* – 2019. – Vol. 125. – P. 175901.
20. Jones, S.C. Refractive Index and Elastic Properties of Z-Cut Quartz Shocked to 60 kbar / S.C. Jones, Y. M. Gupta // *Journal of Applied Physics.* – 2000. – Vol. 88. – P. 5671.
21. Accuracy Limits and Window Corrections for Photon Doppler Velocimetry/ B.J. Jensen, D.B. Holtkamp, P.A. Rigg, D.H. Dolan // *Journal of Applied physics.* – 2007. – Vol. 101, no. 1. – P. 013523.
22. Refractive Index of LiF Single Crystal at High Pressure and Its Window Correction / W.G. Zhao, X. Zhou, J.B. Li, X.L. Zeng // *Chinese Journal of High Pressure Physics.* – 2014. – Vol. 28. – P. 571–576.
23. Яловец, А.П. Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц / А.П. Яловец // *Прикладная механика и техническая физика.* – 1997. – Т. 38, № 1. – С. 151–166.
24. Klinacheva, N.L. Modelling of Shock Wave Experiments on Two-Fold Compression of Polymethyl Methacrylate / N.L. Klinacheva, E.S. Shestakovskaya, A.P. Yalovets // *Journal of Computational and Engineering Mathematics.* – 2022. – Vol. 9, № 2. – P. 26–38.
25. Prandtl, L. Spannungsverteilung in Plastischen Korper / L. Prandtl // *Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft.* – 1924. – P. 43.

26. Рейс, А. Учет упругой деформации в теории пластичности. Теория пластичности / А. Рейс. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1948. – С. 206–222.
27. Бельхеева, Р.К. Модель коэффициента Грюнайзена для широкого диапазона плотностей на примере меди / Р.К. Бельхеева // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 4. – С. 514–519.
28. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ: Научное издание / под ред. Р.Ф. Трунина – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006. – 531 с.
29. Marsh, S.P. LASL Shock Hugoniot Data / S.P. Marsh. – University of California Press, 1980. – 658 p.

Поступила в редакцию 1 октября 2024 г.

Сведения об авторах

Красильников Александр Владимирович – сотрудник ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Российская Федерация.

Несмиянов Елисей Игоревич – магистрант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация; сотрудник ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Российская Федерация.

Шестаковская Елена Сергеевна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой вычислительной механики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, e-mail: shestakovskaiaes@susu.ru

Попцов Александр Германович – сотрудник ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Российская Федерация.

Ковалев Антон Евгеньевич – сотрудник ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Российская Федерация.

Яловец Александр Павлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной механики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2024, vol. 16, no. 4, pp. 96–106*

DOI: 10.14529/mmph240411

STUDYING THE CORRECTION FACTOR OF A LITHIUM FLUORIDE CRYSTAL DURING ITS SHOCK COMPRESSION AND ISOENTROPIC UNLOADING

A.V. Krasilnikov¹, E.I. Nesmiyanov^{1,2}, E.S. Shestakovskaya², A.G. Poptsov¹, A.E. Kovalev¹, A.P. Yalovets²

¹ All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Lithium fluoride (LiF) single crystals are widely used in experiments involving intense dynamic loading as a window for optical methods, such as VISAR or PDV. They are transparent and do not undergo phase transitions under shock compression up to ~200 GPa. To interpret experimental data obtained using such a window, it is necessary to introduce a correction coefficient. This coefficient links the apparent mass velocity obtained experimentally to the true mass velocity. While this coefficient is constant for stationary shock waves, it is affected by the spatial non-uniformity of the window's density for more complex flows. The study highlights the experimental investigations of shock-wave processes in lithium fluoride conducted under shock loading up to 90 GPa. Mathematical modeling of the experiments was also performed. For this purpose, the authors built a mathematical model of one-dimensional elastoplastic flows of the medium using the Prandtl–Reuss plasticity model, and constructed the equation of state for lithium fluoride. The correction coefficient was obtained in two ways: based on the dependence of the refractive index on density and the law of mass conservation on the shock wave, and

based on the dependence of the optical path length of the laser beam on the density distribution in the material under study.

Keywords: mathematical modeling; refractive index; lithium fluoride; experimental studies; laser techniques.

References

1. *Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkah: Monografiya* (Methods for Studying the Properties of Materials under Intense Dynamic Loads: Monograph) / Under the General Editorship of M.V. Zhernokletov, 2nd ed., add. and corr., Sarov: FSUE "RFNC-VNIIEF", 2005, P. 428. (in Russ.)
2. Ilkaev R.I., Mikhailov A.L., Zhernokletov M.V. (Eds.) *Eksperimental'nye metody i sredstva v fizike ekstremal'nykh sostoyanij veshchestva: Monografiya* (Experimental Methods and Means in the Physics of Extreme States of Matter: Monograph). Moscow, RAS, 2021, 484 p. (in Russ.)
3. LaLone B.M., Fat'yanov O.V., Asay J.R., Gupta Y.M. Velocity Correction and Refractive Index Changes for [100] Lithium Fluoride Optical Windows under Shock Compression, Recompression, and Unloading. *J. Appl. Phys.*, 2008, Vol. 103, no. 9, p. 093505. DOI:10.1063/1.2912500
4. Wise L.J., Chhabildas L.C. Laser Interferometer Measurements of Refractive Index in Shock-Compressed Materials. *Shock Waves in Condensed Matter, Plenum*, 1986, 441 p.
5. Rigg P.A., Knudson M.D., Scharff R.J., Hixson R.S. Determining the Refractive Index of Shocked [100] Lithium Fluoride to the Limit of Transmissibility. *J. Appl. Phys.*, 2014, Vol. 116, P. 033515. DOI:10.1063/1.4890714
6. Kormer, S.B. Optical Study of the Characteristics of Shock-Compressed Condensed Dielectrics. *Phys. Usp.*, 1968, Vol. 11, no. 2, pp. 229–254.
7. Smirnov N.A. *Ab initio* Calculations of the Thermodynamic Properties of LiF Crystal. *Physical Review*, 2011, Vol. 83, P. 014109 DOI: 10.1103/PhysRevB.83.014109
8. Sun Z., Dong J., Xia Y. First-Principles Calculations of the Structural, Electronic, and Optical Properties of LiF up to 300 GPa. *Physica B.*, 2011, Vol. 406, P. 3660–3665. DOI:10.1016/j.physb.2011.06.066
9. He L., Tang M.J., Yin J., Zhou X.M., Zhu W.J., Liu F.S., He D.W. Effects of the Vacancy Point-Defect on the Refractive Index and Equation of State (EOS) of LiF at High Pressure: A First Principles Investigation. *Physica B*, 2012, Vol. 407, pp. 694–697. DOI:10.1016/j.physb.2011.11.060
10. Sun X.-W., Liu Z.-J., Quan W.-L., Song T., Khenata R., Omran S.B. High-Pressure and High-Temperature Physical Properties of LiF Studied by Density Functional Theory Calculations and Molecular Dynamics Simulations. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2018, Vol. 116, pp. 209–215. DOI:10.1016/j.jpcs.2018.01.037
11. Wang J., Deng M., Chen Y., Liu X., Ke W., Li D., Dai W., He K. Structural, Elastic, Electronic and Optical Properties of Lithium Halides (LiF, LiCl, LiBr, and LiI): First-Principal Calculations. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, Vol. 244, P. 122733. DOI:10.1016/j.matchemphys.2020.122733
12. Hayes D. Unsteady Compression Waves in Interferometer Windows. *J. Appl. Phys.*, 2001, Vol. 89, P. 6484.
13. Liu Q., Zhou X., Zeng X., Luo S.N. Sound Velocity, Equation of State, Temperature and Melting of LiF Single Crystals under Shock Compression. *J. Appl. Phys.*, 2015, Vol. 117, P. 045901. DOI: 10.1063/1.4906558
14. Davis J., Knudson M., Shulenburg L., Crockett S. Mechanical and Optical Response of [100] Lithium Fluoride to Multi-Megabar Dynamic Pressures. *J. Appl. Phys.*, 2016, Vol. 120, P. 165901. DOI:10.1063/1.4965869
15. Young G., Liu X., Leng C., Yang J., Huang H. Refractive Index of [100] Lithium Fluoride under Shock Pressures up to 151 GPa. *AIP Advances*, 2018, Vol. 8, P. 125310. DOI:10.1063/1.5065543
16. Furnish M.D., Chhabildas L.C., Reinhart W.D. Time-Resolved Particle Velocity Measurements at Impact Velocities of 10 km/s. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, Vol. 23, pp. 261–270.
17. Sun Z., Dong J., Xia Y. First-Principles Calculations of the Structural, Electronic, and Optical Properties of LiF up to 300 GPa. *Physica B*, 2011, Vol. 406, P. 3660–3665. DOI: 10.1016/j.physb.2011.06.066

18. Fratanduono D.E., Boehly T.R., Barrios M.A., Meyerhofer D.D., Eggert J.H., Smith R.F., Hicks D.G., Celliers P.M., Braun D.G., Collins G.W. Refractive Index of Lithium Fluoride Ramp Compressed to 800 GPa. *J. Appl. Phys.*, 2011, Vol. 109, P. 123521. DOI:10.1063/1.3599884
19. Kirsch L.E., Ali S.J., Fratanduono D.E., Kraus R.G., Braun D.G., Fernandez-Panella A., Smith R.F., McNaney J.M., Eggert J.H. Refractive Index of Lithium Fluoride to 900 Gigapascal and Implications for Dynamic Equation of State Measurements. *J. Appl. Phys.*, 2019, Vol. 125, P. 175901. DOI:10.1063/1.5091722
20. Jones S.C., Gupta Y.M. Refractive Index and Elastic Properties of Z-Cut Quartz Shocked to 60 KBar. *J. Appl. Phys.*, 2000, Vol. 88, P. 5671. DOI:10.1063/1.1319329
21. Jensen, B.J., Holtkamp D.B., Rigg P.A., Dolan D.H. Accuracy Limits and Window Corrections for Photon Doppler Velocimetry. *J. Appl. Phys.*, 2007, Vol. 101, no. 1, P. 013523. DOI: 10.1063/1.2407290
22. Zhao W.G., Zhou X., Li J.B., Zeng X.L. Refractive Index of LiF Single Crystal at High Pressure and its Window Correction. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, Vol. 28, pp. 571–576. DOI: 10.11858/gywlxb.2014.05.010
23. Yalovetz A.P. Calculation of Flows of a Medium Induced by High-Power Beams of Charged Particles. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1997. Vol. 38, no. 1, pp. 137–150.
24. Klinacheva N.L., Shestakovskaya E.S., Yalovets A.P. Modeling of Shock Wave Experiments on Two-Fold Compression of Polymethyl Methacrylate. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2022, Vol. 9, no. 2, pp. 26–38. DOI: 10.14529/jcem220203
25. Prandtl L. Spannungsverteilung in Plastischen Korper. *Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft.*, 1924, P. 43.
26. Rejs A. Uchet uprugoj deformacii v teorii plastichnosti. *Teoriya plastichnosti* (Accounting for Elastic Deformation in the Theory of Plasticity. Theory of Plasticity). Moscow, Publishing house of foreign literature, 1948, pp. 206–222. (in Russ.)
27. Belkheeva R.K. Model of the Grüneisen Coefficient for a Wide Range of Densities on the Example of Copper. *High Temperature*, 2022, Vol. 60, Suppl. 1, pp. 26–31.
28. Trunin R.F. (Ed) *Eksperimental'nye dannye po udarno-volnovomu szhatiyu i adiabaticheskomu rasshireniyu kondensirovannyh veshchestv: Nauchnoe izdanie* (Experimental Data on Shock-Wave Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Matter: Scientific Publication). Sarov: FSUE “RFNC–VNIIEF”, 2006, 531 p. (in Russ.)
29. Marsh S.P. *LASL Shock Hugoniot Data*. University of California Press, 1980, 658 p.

Received October 1, 2024

Information about the authors

Krasil'nikov Aleksandr Vladimirovich is employee of All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russian Federation.

Nesmiyanov Elisey Igorevich is Master Student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation; employee of All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russian Federation.

Shestakovskaya Elena Sergeevna is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Department of Computational Mechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. e-mail: shestakovskaiaes@susu.ru

Poptsov Aleksandr Germanovich is employee of All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russian Federation.

Kovalev Anton Evgen'evich is employee of All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russian Federation.

Yalovets Aleksandr Pavlovich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Computational Mechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation.

Персоналии

ВЫДАЮЩИЙСЯ СИБИРЯК-КИБЕРФИЗИК

(к полувековому юбилею
Романа Валерьевича Мещерякова)



Я считаю, что большую часть информации, которой я владею, я получил в ходе поисков какой-либо другой информации.

Франклин П. Адамс

30 октября 2024 года исполнилось 50 лет со дня рождения заведующего лабораторией киберфизических систем Института проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук доктора технических наук, профессора Романа Валерьевича Мещерякова.

Р.В. Мещеряков родился в городе Бийске Алтайского края. В 1997 году он с отличием окончил Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова с присуждением квалификации «инженер» по специальности «Информационно-измерительная техника и технологии». Во время обучения проявил склонность к научной работе, стал лауреатом конкурса Министерства образования России на лучшую студенческую работу по естественным, техническим и гуманитарным дисциплинам, являлся Ползуновским стипендиатом.

Получив высшее образование, он поступил в аспирантуру Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, которую в 2000 году досрочно окончил, защитив диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Управление просодией при синтезе речи по печатному тексту», результаты которой реализованы при создании систем восстановления голосовой функции после удаления гортани, телекоммуникационных и биометрических систем.

В 2002 году Р.В. Мещерякову присвоено учёное звание «доцент» по кафедре комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем. В 2012 году он защитил докторскую диссертацию на специальную тему по специальности «Системный анализ, управление и обработка информации», в 2014 году ему присвоено ученое звание «профессор» по этой же специальности, а в 2016 году присвоено почетное звание «профессор РАН».

Проведенные с его непосредственным участием исследования по созданию комплекта учебных пособий, учебников и монографий по криптографическим, программно-аппаратным, техническим методам и средствам защиты информации, обеспечивающего подготовку специалистов в области информационной безопасности для образовательных учреждений высшего профессионального образования, получили широкое признание и в 2009 году отмечены премией Правительства РФ в области образования.

В Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники Р.В. Мещеряков последовательно занимал должности доцента, профессора, заведующего кафедрой, заместителя директора Института системной интеграции и безопасности, заместителя начальника научного управления, директора регионального учебно-научного центра, проректора по научной работе и инновациям.

В 2018 году Р.В. Мещеряков переехал в г. Москву и работает в ИПУ РАН в должностях главного научного сотрудника лаборатории киберфизических систем, заведующего этой лабора-

Персоналии

торией и директора центра интеллектуальных робототехнических систем. Кроме того, он вел педагогическую деятельность в Рязанском гвардейском высшем воздушно-десантном училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова. Основной акцент его научной деятельности сосредоточен на развитии теоретических основ проектирования, реализации и функционирования киберфизических систем различного назначения.

Р.В. Мещеряков автор (соавтор) более 600 научных и учебно-методических работ, руководитель научной школы по информационным вычислительным многоагентным технологиям управления сложными объектами. Его учениками защищены 4 докторские и 10 кандидатских диссертаций, более 100 выпускных квалификационных работ. Выполненная при его непосредственном участии комплексная межведомственная междисциплинарная работа «Разработка и исследование универсальной интеллектуальной авиационной транспортной системы специального назначения» в 2023 году удостоена третьей премии Всероссийского конкурса по поиску научных, инновационных, производственных групп или коллективов, способных к эффективной реализации перспективных проектов в интересах Вооруженных Сил РФ.

Р.В. Мещеряков ведет большую научно-организационную работу, являясь членом редколлегии журналов «Проблемы управления», «Информатика и автоматизация», «Безопасность информационных технологий», «Речевые технологии», «Искусственный интеллект. Теория и практика», «Моделирование систем и процессов» и других. Он постоянный член организационных и программных комитетов ключевых международных и российских конференций, руководитель общероссийского научного семинара «Проблемы управления автономными робототехническими комплексами».

Р.В. Мещеряков активно работает в советах по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, функционирующих на базе ИПУ РАН и МГТУ им. Н.Э. Баумана, является членом экспертного совета Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России по управлению, компьютерным и информационным наукам, экспертом РАН, экспертом федерального реестра в научно-технической сфере, членом экспертного совета Российского научного фонда по инженерным наукам, членом Российского акустического общества, старшим членом IEEE (RAS, ITSoc), членом Российской ассоциации искусственного интеллекта, членом научного совета РАН по машиностроению, научного совета РАН по робототехнике и мехатронике, членом рабочей группы Фонда перспективных исследований.

За успехи в научной и педагогической работе Р.В. Мещеряков удостоен звания «Почётный работник высшего профессионального образования РФ» (2007), награжден медалями Федерации космонавтики имени К.Э. Циолковского (2012), имени М.Ф. Решетнева (2014) и имени М.В. Келдыша (2014), медалью ФСТЭК России «За укрепление государственной системы защиты информации» II степени (2012), медалью МЧС России «За содружество во имя спасения» (2022), медалью «300 лет Российской академии наук» (2024); почетными грамотами ФСТЭК России (2008, 2014), Минобрнауки России (2013) и МЧС России (2021); неоднократно удостоен премии Томской области в сфере образования и науки (2004, 2007, 2010, 2011, 2018).

Выдающиеся научные достижения Романа Валерьевича, его энциклопедические знания, эрудированность, умение простыми словами объяснить сложные киберфизические процессы завораживают слушателей во время продолжительных лекций и масштабных тостов. Наставническая деятельность в области робототехники, способность предвидеть актуальные коммерциализуемые научные направления позволяют Роману Валерьевичу формировать новые ведущие научные школы, следовать принципам преемственности, формировать новое поколение молодых российских ученых.

Редакционный совет и редакционная коллегия журнала «Вестник Южно-Уральского университета. Серия «Математика. Механика. Физика», коллеги по экспертному совету ВАК при Минобрнауки России по управлению, компьютерным и информационным наукам, ученики и товарищи сердечно поздравляют Романа Валерьевича Мещерякова с юбилеем и желают ему огромного счастья, сохранения гиперэнергичности, крепкого здоровья, новых научных результатов, долгих лет активной плодотворной жизни.

А.Л. Ронжин

ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИИ СТАТЬИ

1. Публикуются оригинальные работы, содержащие существенные научные результаты, не опубликованные в других изданиях, прошедшие этап научной экспертизы и соответствующие требованиям к подготовке рукописей.

2. В редколлегию предоставляется электронная (документ MS Word 2003) версия работы объемом не более 6 страниц, экспертное заключение о возможности опубликования работы в открытой печати, сведения об авторах (Ф.И.О., место работы, звание и должность для всех авторов работы), контактная информация ответственного за подготовку рукописи.

3. Структура статьи: УДК, название (не более 12–15 слов), список авторов, аннотация (150–250 слов), список ключевых слов, текст работы, литература (в порядке цитирования, в скобках, если это возможно, дается ссылка на оригинал переводной книги или статьи из журнала, переводящегося на английский язык). После текста работы следует название, расширенная аннотация (реферат статьи) объемом до 1800 знаков с пробелами, список ключевых слов и сведения об авторах на английском языке.

4. Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее – 23, нижнее – 23, внутри – 22, снаружи – 25 мм. Шрифт – Times New Roman 11 pt, масштаб 100 %, интервал – обычный, без смещения и анимации. Отступ красной строки 0,7 см, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный.

5. Формулы. Стиль математический (цифры, функции и текст – прямой шрифт, переменные – курсив), основной шрифт – Times New Roman 11 pt, показатели степени 71 % и 58 %. Выключенные формулы должны быть выровнены по центру.

6. Рисунки все черно-белые. Желательно предоставить рисунки и в виде отдельных файлов.

7. Адрес редакционной коллегии журнала «Вестник ЮУрГУ» серии «Математика. Механика. Физика»:

Россия 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, Южно-Уральский государственный университет, Институт естественных и точных наук, кафедра математического и компьютерного моделирования, главному редактору профессору Загребиной Софье Александровне. [Prof. Zagrebina Sophiya Aleksandrovna, Mathematical and Computer Modeling Department, SUSU, 76, Lenin prospekt, Chelyabinsk, Russia, 454080].

8. Адрес электронной почты: mmph@susu.ru

9. Полную версию правил подготовки рукописей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала: см. <http://vestnik.susu.ru/mmph>.

10. Журнал распространяется по подписке. Электронная версия: см. www.elibrary.ru, <http://vestnik.susu.ru/mmph>, <http://вестник.юургу.рф/mmph>.

11. Плата с аспирантов за публикацию не взимается.

СВЕДЕНИЯ О ЖУРНАЛЕ

Журнал основан в 2009 году. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-57362 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Главный редактор журнала – д.ф.-м.н., проф. С.А. Загребина.

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 1.1.1. Вещественный, комплексный и функциональный анализ (физико-математические науки); 1.1.2. Дифференциальные уравнения и математическая физика (физико-математические науки); 1.1.6. Вычислительная математика (физико-математические науки); 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (технические и физико-математические науки); 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы (физико-математические науки); 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки); 1.3.6. Оптика (физико-математические науки); 1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки); 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (физико-математические науки).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включен в «Рецензируемые научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования и включенные в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» по следующим отраслям и группам специальностей: 01.01.00 – Математика, 01.02.00 – Механика, 01.04.00 – Физика, 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международных справочных системах по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory», «Zentralblatt MATH», «Russian Science Citation Index on Web of Science».

Подписной индекс 29211 в объединенном каталоге «Пресса России», E29211 в Интернет-каталоге агентства «Книга-Сервис».

Периодичность выхода – 4 номера в год.

Адрес редакции, издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 32.

ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия
«МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА. ФИЗИКА»
Том 16, № 4
2024

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 31.10.2024. Дата выхода в свет 08.11.2024.

Формат 60×84 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 13,02.

Тираж 500 экз. Заказ 313/412. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.