СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 3 (83) **2021**

УДК 681.51(06)
С 409

Учредитель

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Редакционная коллегия

Главный редактор

Лемешко Борис Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Заместители главного редактора

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Шокин Юрий Иванович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

Воевода Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Члены редколлегии

Володин Андрей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доктор философии по статистике Университета Регины, проф., Канада
Воронин Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск
Воропай Николай Иванович, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
Воскобойников Юрий Евгеньевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск
Гайдук Анатолий Романович, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог
Генералов Владимир Михайлович, д-р техн. наук, ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, г. Новосибирск
Григорьев Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург
Гриф Михаил Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Дмитриев Александр Капитонович, д-р физ.-мат. наук, НГТУ, г. Новосибирск
Комаров Андрей Константинович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск
Лисицина Лилия Ивановна, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Наумова Елена Николаевна, д-р техн. наук, проф., Университет Тафтса, США
Носек Ярослав, д-р техн. наук, проф., Технический университет Либерец, Чехия
Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, проф., СПИИРАН, г. Санкт-Петербург
Рубан Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск
Сидоров Денис Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
Уранчимэг Тудевдагва, д-р техн. наук, проф., Хемницкий технический университет, Германия
Фомин Василий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск
Хабаров Валерий Иванович, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск
Ханова Анна Алексеевна, д-р техн. наук, проф., АГТУ, г. Астрахань
Хлебников Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва
Шандаров Станислав Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., ТУСУР, г. Томск

Адрес редакции и издателя: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ
Тел. (383) 346-56-88, тел., факс (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

16+

Индекс: 82962 («РОСПЕЧАТЬ») **УДК 681.51(06)**

© Коллектив авторов, 2021
© Новосибирский государственный технический университет, 2021

СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 3 (83) **2021**

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Баранова Н.В., Мезенцев Ю.А., Павлов П.С. О задаче и алгоритмах согласованного оптимального управления производством и материальными потоками предприятия 7

Булыгин А.О., Кашевник А.М. Анализ современных исследований в области детектирования утомления водителя в кабине транспортного средства 19

Воронин В.В., Морозов А.В. Технология идентификации ключевых особенностей в последовательностях API-вызовов вредоносных программ 37

Гриф М.Г., Элаккия Р., Приходько А.Л., Бакаев М.А., Раджалакшми Е. Распознавание русского и индийского жестовых языков на основе машинного обучения 53

Гужов В.И., Марченко И.О., Трубилина Е.Е., Хайдуков Д.С. Сравнение чисел и анализ переполнения в модулярной арифметике 75

Жбанов И.Л., Жбанова В.Л. Метод шифрования геоизображений на основе реорганизации внутренней структуры цифрового фильтра 87

Зуенко А.А., Македонов Р.А., Олейник Ю.А. Интеллектуальный поиск точных решений задачи планирования открытых горных работ 99

Истратова Е.Е., Достовалов Д.Н. Разработка подсистемы интеллектуального анализа данных для системы электронного документооборота Citeck 115

Четвертакова Е.С., Чимитова Е.В. Проверка значимости случайного эффекта для винеровской деградационной модели 129

Sheet A.F. Optimization of DC motor speed control based on fuzzy logic-PID controller 143

Правила для авторов 154

Корректор *Л.Н. Киншт*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации ПИ № ФС77-76010 от 03 июля 2019 г.
Периодичность издания – 4 номера в год.
Подписано в печать 22.09.2021. Выход в свет 30.09.2021.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 13,65. Печатных листов 9,75. Издательский № 153. Заказ № 677
Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 3 (83) **2021**

УДК 681.51(06)
С 409

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Editorial board

Chief editor

Lemeshko B. Yu., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Vostretsov A. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Shokin Yu. I., D.Sc. (Phys.& Math.), Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A. A., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Volodin A. I., D.Sc. (Phys. & Math.), Doctor of Philosophy in Statistics from the University of Regina, Professor of Statistics University of Regina, Canada
Voronin V. V., D.Sc. (Eng.), Pacific national University, Khabarovsk, RF
Voropay N. I., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Eng.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF
Voskoboinikov Yu. E., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, RF
Gaiduk A. R., D.Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF
Generalov V. M., D.Sc. (Eng.), FBUN GNTS VB «Vektor» Rospotrebnadzora, Novosibirsk, RF
Grigor'ev Yu. D., D.Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF
Grif M. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Dmitriev A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Komarov A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, RF
Kryukov A. V., D.Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Lisitcina L. I., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Naumova E. N., PhD. (Math.), Tufts University, USA
Nosek J., D.Sc. (Eng.), Technical University of Liberec, Czech Republic
Ronzhin A. L., D.Sc. (Eng.), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of sciences, Saint-Petersburg, RF
Ruban A. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF
Sidorov D. N., D.Sc. (Phys. & Math.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF
Uranchimeg T., D.Sc. (Eng.), Technische Universität Chemnitz, Germany
Fomin V. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Khristianovich Institut of theoretical and applied mechanics SB RAS, Novosibirsk, RF
Khabarov V. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF
Khanova A. A., D.Sc. (Eng.), Astrakhan State Technical University, Astrakhan, RF
Khlebnikov M. V., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Control Sciences, Moscow, RF
Shandarov S. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, RF

Editorial Adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
Tel. (383) 346-56-88, Fax (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

УДК 681.51(06)

© Authors, 2021
© Novosibirsk State Technical University, 2021

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 3 (83) **2021**

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Baranova N.V., Mezentsev Yu.A., Pavlov P.S. On the problem and algorithms for coordinated optimal management of production and material flows of an enterprise 7

Bulygin A.O., Kashevnik A.M. Analysis of current research in the field of detecting driver fatigue in the vehicle cab 19

Voronin V.V., Morozov A.V. Technology of key feature identification s in malware API calls sequences 37

Grif M.G., Elakkiya R., Prikhodko A.L., Bakaev M.A., Rajalakshmi E. Recognition of Russian and Indian Sign Languages Based on Machine Learning 53

Guzhov V.I., Marchenko I.O., Trubilina E.E., Khaidukov D.S. Comparison of numbers and analysis of overflow in modular arithmetic 75

Zhbanov I.L., Zhbanova V.L. Method for encryption of cartographic images on the basis of internal reorganization of the digital filter structure 87

Zuenko A.A., Makedonov R.A., Oleynik Y.A. Intelligent search for accurate solutions to the planning open-pit mining 99

Istratova E.E., Dostovalov D.N. Development of a data mining subsystem for the citeck electronic document management system 115

Chetvertakova E.S., Chimitova E.V. Testing significance of random effects for the Wiener degradation model 129

Шит А.Ф. Оптимизация управления скоростью двигателя постоянного тока на основе ПИД-регулятора с нечеткой логикой 143

Rules for authors 154

Editor *L.N. Kinsht*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Publication frequency – 4 numbers a year.
Signed in print September 22, 2021.
Date of publication September 30, 2021. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 13,65. Printed pages 9,75.
Publishing number 153. Order number 677

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 83, № 3, 2021, с. 7–18

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 83, No. 3, 2021, pp. 7–18

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 519.854.3-6 DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-7-18

О задаче и алгоритмах согласованного оптимального управления производством и материальными потоками предприятия*

Н.В. БАРАНОВА[a], Ю.А. МЕЗЕНЦЕВ[b], П.С. ПАВЛОВ[c]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, ассистент

[a] *baranova.nina.vl@gmail.com* [b] *mezencev@corp.nstu.ru*
[c] *pavlov.pavel.sergeevich@gmail.com*

На сегодняшний день в теории и практике управления технологическими и организационными системами нет единого подхода, который бы позволял решать задачи согласованного оптимального управления входными и выходными материальными потоками и производством. Опубликованные работы в этой области часто направлены на решение отдельных задач. При попытках же комплексного решения декларируемая системность либо обозначается только на словах, либо реализуется эвристически склейкой составляющих компонент без обсуждения и анализа эффективности и тем более доказательства.

В настоящей статье на основе более ранних работ авторов развивается аппарат согласованного оптимального управления всеми логически связанными подсистемами. Созданная в этих целях формальная постановка является задачей дискретной оптимизации и учитывает все основные факторы производства и движения материальных потоков. Построен специальный алгоритм приближенного решения, переводящий созданную задачу из разряда NP-трудных в разряд полиномиально разрешимых. Формальная постановка содержит логические условия выбора из множества параметров, включая источники и направления потоков, условия поставок, объемы и динамику производства, определение оптимальных цен на выходе. Таким образом, в ограничениях системно учитываются как производственные составляющие, так и ограничения на ресурсы и логику движения входных и выходных материальных потоков.

В качестве критерия эффективности всех процессов использован максимум чистой прибыли на конец планового периода. Рассмотренная модель и задачи управления исследованы с помощью единого подхода, позволяющего работать с логическими условиями любой сложности и ставить соответствующие формальные оптимизационные задачи. Так-

* *Статья получена 13 февраля 2021 г.*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90048, а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Госзадания (проект № FSUN-2020-0009).

же приведены результаты испытания алгоритма на тестовых данных, приближенных к реальным размерностям.

Ключевые слова: задачи дискретной оптимизации, управление производством, поставками и продажами, смешанное целочисленное программирование, функции скидок, оптимизация цен сбыта, эффективный алгоритм, материальные потоки, оптимальное управление, полуопределенная релаксация

ВВЕДЕНИЕ

В рамках работы разработаны модель и алгоритм поиска оптимальных решений, которые базируются на методах математического программирования. Работы, связанные с этой темой, в большинстве своем описывают разные проблемы: задачи размещения, задачи выбора поставщиков [1], назначения работ, управления запасами, управления цепями поставок, логистикой [2, 3], производством [4].

Формируя структуру ассортимента, нужно задумываться о ее рациональности, учитывать планируемую доходность объемов продаж. Здесь стоит отметить, что как таковой общей методики нахождения оптимального ассортимента производственного предприятия не существует.

Задачи дискретной оптимизации в современном мире находят широкое применение для разнообразных целей производства [5]. Приведем далее некоторые примеры таких целей. В работе [6] авторами применяется управляющая система, которая использует алгоритм имитации отжига, генетический алгоритм и нечеткую логику, чтобы решить задачу оптимизации перемещения материала в логистической сети.

Поиску производственного плана посвящены работы [7, 8], в которых описано решение задачи с учетом удовлетворения спроса.

Большой спектр готовых управленческих решений для производственных процессов предприятия создали исследователи из КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева [9]. Но в этой системе управления в части формирования производственной программы используется сценарное моделирование фактически с неопределенной эффективностью применения.

Продолжительное время задачу поиска поставщиков и установки заказов для них с помощью инструмента многоцелевой оптимизации рассматривает группа ученых, работающих в университете Янгстаун в США [10, 11]. Для этого они используют один из возможных инструментов многокритериального анализа решений – визуальное интерактивное целевое программирование.

В работе [12] авторами также рассматривается задача выбора поставщиков. Среди методов, которые они используют, можно назвать непрерывный общий поиск с чередующимися окрестностями в совокупности с теорией опорных векторов (SVM), а именно математический аппарат наименьших квадратов опорных векторов (LS–SVM).

Еще одна работа, посвященная размещению заказов между поставщиками с учетом условий рентабельности маршрутов для компаний-поставщиков, раскрывает возможности аппарата дискретной оптимизации для описания задачи выбора поставщиков для региональной сети аптек [13]. Рассматривается поиск оптимального решения данной задачи в системе поддержки при-

нятия решений с помощью языка C++, пакета CPLEX и генетического алгоритма.

Таким образом, известные на данный момент подходы к решению такого рода задач чаще всего оставляют желать лучшего. Зачастую существующие способы предлагают последовательное решение логистических задач (складской, транспортной или финансовой), а также выбор поставщиков, качества обслуживания, потребителей с помощью балльного оценивания [14]. Классические модели, такие как транспортная задача (вычисление планов перевозок), задача коммивояжера (поиск маршрутов), задача о назначениях (выбор поставщиков), управление запасами по Уилсону (оптимальное управление уровнем запасов) и т. д., в целом не позволяют эффективно решить исследуемые в этой статье задачи [14, 15]. В актуальных работах, стремящихся к системности, также виден описанный выше подход [15, 16]. Логистические задачи нельзя отнести к задачам с максимальными показателями сложности при сравнении с подобными задачами управления процессами на производственном предприятии дискретного типа [17]. В связи с этим можно сказать, что рассматриваемые модели имеют достаточно низкую сложность детализации, с одной стороны, и высокую экономическую эффективность применения экономико-математических моделей – с другой. Сложность модели выделяет количество целочисленных переменных в создаваемых задачах управления и принадлежность к классу NP. Однако эффективность эта условна и зависит от правильно определенных параметров на входе и выходе подсистемы, а следовательно, от системности подхода к управлению предприятием в целом.

Таким образом, как на практике (на промышленных предприятиях), так и в теории (в научных работах) применяются и рассматриваются в основном узконаправленные подходы к расчету отдельных показателей и планов, связанных с производством, и для каждой конкретной специализации производства. Зачастую это приводит к неэффективности подсистем управления корпоративных информационных систем.

Опираясь на анализ различных источников и собственные разработки, авторы нашли подход к определению и оптимизации состава и интенсивности материальных потоков, ассортиментного ряда, объемов выпуска и цен реализуемой продукции. Этот инструментарий имеет существенную предысторию и опирается на системный подход к оптимизации управления производственным ассортиментом, ценами и материальными потоками [17, 18]. Фактически нами развивается аппарат согласованного системного оптимального управления всеми логически связанными подсистемами предприятия.

1. СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ И ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ

Задача состоит в том, чтобы, с одной стороны, определить объемы поставок в зависимости от скидок и набор поставщиков, а с другой стороны, объемы продаж для каждой потребительской группы. Также нужно найти номенклатуру, динамику и объемы производства, которые бы удовлетворяли системе ограничений на объем склада и на объем оборотного капитала в начале планового периода и одновременно максимизировали целевую функцию

(объем оборотных средств на конец периода или чистый доход). Словосочетание «стратегия продаж» определим как совокупность рассчитываемых мощностей выходных материальных потоков и цен для каждого товара из номенклатуры для каждого ранга потребителей, определяемую в зависимости от спроса для всех временных интервалов планового периода. Совокупность рассчитываемых мощностей входных материальных потоков, вычисляемую для всех временных отрезков заданного временного периода, аналогично будем называть стратегией закупок. И также определим ее для всех производимых продуктов, для каждого из поставщиков – по скидкам от них и ценам. Длительность производственного цикла для рассматриваемого случая полагается много меньшей любого интервала планового периода.

Более подробно отправную базовую содержательную постановку задачи и установки по объекту управления (сбыт и складское хранение, вычисление объемов закупок по всему ассортименту, выбор поставщиков сырья и комплектующих, транспортировка) можно найти в [17–19].

Задача оптимального управления поставками, производством и сбытом неоднородной продукции предприятия будет выглядеть следующим образом:

$$p_{i,l}(x_{v,l}(t)) = \begin{cases} p_{i,l,1}(t), \text{ если } x_{v,l}(t) \le s_{v,l,1}(t), \\ a^0_{i,l}(t) + a^1_{i,l}(t) x_{v,l}(t), \text{ если } x_{v,l}(t) > s_{v,l,1}(t); \end{cases} \tag{1}$$

$$v = \overline{1,V}, \quad l = \overline{1,L}, \quad t = \overline{1,T}.$$

$$\sum_{j=1}^{J} \sum_{i=1}^{I} [1 - \tilde{g}_j(t)] C_{i,j}(t) y_{i,j}(t) + \Delta Q(t) - Q(t) = 0, \quad t = \overline{1,T}; \tag{2}$$

$$Q(t) \ge 0, \quad \Delta Q(t) \ge 0, \quad y_{i,j}(t) \ge 0, \quad i = \overline{1,I}, \quad j = \overline{1,J}, \quad t = \overline{1,T}, \tag{3}$$

$$0 \le x_{v,l}(t) \le s_{v,l,2}(t), \quad v = \overline{1,V}, \quad l = \overline{1,L}, \quad t = \overline{1,T}, \tag{4}$$

$$\sum_{l=1}^{L} x_{v,l}(t) = \sum_{i=1}^{I} A_{v,i}(t) \sum_{j=1}^{J} y_{i,j}(t), \quad v = \overline{1,V}, \quad t = \overline{1,T}; \tag{5}$$

$$\Delta Q(t+1) - \Delta Q(t) - \sum_{i=1}^{I} \sum_{l=1}^{L} x_{i,l}(t) p_{i,l}(x_{i,l}(t)) +$$

$$+ \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} [1 - \tilde{g}_j(t+1)] C_{i,j}(t+1) y_{i,j}(t+1) \le -N(t), \quad t = \overline{1,T}; \tag{6}$$

$$z = \Delta Q(T+1) \to \max. \tag{7}$$

В формулах (1)–(7) использованы следующие обозначения:

j – номер поставщика $(j=\overline{1,J})$, i – номер сырья и комплектующих в ассортименте поставок $(i=\overline{1,I})$, l – индекс типа потребителя $(l=\overline{1,L})$, k – номер интервала шкал объемов скидок $(k=\overline{1,K})$ и спроса $(k=\overline{1,K'})$, v – номер продукта в ассортименте продаж $(v=\overline{1,V})$;

t – номер временного интервала, с дискретностью до которого определено модельное время (далее месяца);

$C_{ij}(t)$ – базовая оптовая цена сырья и комплектующих i у поставщика j в месяце t;

$y_{ij}(t)$ – объем закупок в натуральном выражении сырья и комплектующих i у поставщика j в месяце t;

$g_{jk}(t)$ – скидка у поставщика j в месяце t на интервале k соответствующей шкалы (в процентах);

$h_{jk}(t)$ – значение правой границы интервала k шкалы объемов скидок у поставщика j в месяце t;

$p_{ilk}(t)$ – цена продажи единицы продукта i для потребителя типа l в месяце t на интервале k функции спроса;

$x_{vl}(t)$ – объем продаж в натуральном выражении продукта v потребителю типа l в месяце t;

$s_{vlk}(t)$ – значение правой границы интервала k шкалы функции спроса на товар i у потребителя типа l в месяце t.

$N(t)$ – заработная плата и накладные расходы в месяце t;

$A_{v,i}(t)$ – тензор технологических коэффициентов, элементами которого являются технологические коэффициенты или нормы расхода закупаемого продукта i на производство единицы реализуемого продукта v в месяце t;

$Q(t)$, $\Delta Q(t)$ – размер и остаток оборотного капитала в месяце t.

Выражения (1) задают ограничения на выбор цен сбыта; (5) – условия на способы преобразования входного материального потока Y в производимые товары X, где A – это тензор, состоящий из технологических коэффициентов; (2) – условия на величину поставок в месяце t по всем поставщикам в денежном эквиваленте, в котором учитывается величина скидки; (3) – условия на неотрицательность размера и остатки оборотного капитала и объемов закупок в натуральном выражении; (4) – условия по спросу для всех типов потребителей и по каждой товарной позиции в месяце t; (6) – задает процесс изменения значения чистой прибыли; (7) – целевая функция, которая в данной постановке задает критерий максимизации значения чистой прибыли в последний временной интервал планового периода.

2. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для решения данной задачи был разработан специальный приближенный эффективный алгоритм, на каждой итерациях которого используется алгоритм поиска порождаемой подзадачи полуопределенного программирова-

ния (п. 3), подробное описание которого можно найти в [17]. Приводим его запись.

1. Задаем начальное значение номера шага алгоритма $q := 0$. Используем исходные данные $O_i(1)$, $Q(1)$, $N(t)$, $C_{i,j}(t)$, $g_{j,k}(t)$, $h_{j,k}(t)$, $p_{i,l,k'}(t)$, $s_{i,l,k'}(t)$, $i = \overline{1,I}$, $j = \overline{1,J}$, $t = \overline{1,T}$, $k' = \overline{1,2}$, $k = \overline{1,K}$, $l = \overline{1,L}$.

2. Положим $p_{i,l}(x_{i,l}(t)) := a^0_{i,l}(t) + a^1_{i,l}(t)x_{i,l}(t)$, $i = \overline{1,I}$, $l = \overline{1,L}$, $t = \overline{1,T}$, формируя исходную ослабленную задачу.

3. Находим решение задачи полуопределенного программирования (2)–(7) с дискретными переменными G^q, используя приближенный алгоритм [17, 18] и метод следования центральному пути. Оптимальное решение обозначим Y^q, X^q, z^q $\left(Y^q = \left\|y^q_{i,j}(t)\right\|,\ X^q = \left\|x^q_{i,l}(t)\right\|,\ z^q = z(X^q,\ Y^q)\right)$.

4. Увеличиваем номер шага алгоритма $q := q + 1$.

5. Проверка условий оптимальности. Проверяем выполнение условий (1). Если выполняются все условия

$$p_{i,l}(x^{q-1}_{i,l}(t)) = \begin{cases} p_{i,l,1}(t) \text{ при } x^{q-1}_{i,l}(t) \le s_{i,l,1}(t), \\ a^0_{i,l}(t) + a^1_{i,l}(t)x^{q-1}_{i,l}(t) \text{ при } x^{q-1}_{i,l}(t) > s_{i,l,1}(t), \end{cases}$$

$\forall i = \overline{1,I}$, $l = \overline{1,L}$, $t = \overline{1,T}$, переход к пункту 7, иначе следующий пункт.

6. Если $x^{q-1}_{i,l}(t) \le s_{i,l,1}(t)$ и $p_{i,l}\left(x^{q-1}_{i,l}(t)\right) > p_{i,l,1}(t)$, заменяем стоимостную оценку переменной $x_{i,l}(t)$ фиксированным значением: $p_{i,l}(x_{i,l}(t)) := p_{i,l,1}(t)$.

Если $x^{q-1}_{i,l}(t) > s_{i,l,1}(t)$ и $p_{i,l}\left(x^{q-1}_{i,l}(t)\right) = p_{i,l,1}(t)$, заменяем фиксированную стоимостную оценку переменной $x_{i,l}(t)$ линейной функцией $p_{i,l}(x_{i,l}(t)) := a^0_{i,l}(t) + a^1_{i,l}(t)x_{i,l}(t)$ и дополняем систему ограничений (2)–(6) условием $x_{i,l}(t) \ge s_{i,l,1}(t)$. Проверки и необходимые замены оценок производятся для всех переменных $x_{i,l}(t)$ $\forall i = \overline{1,I}$, $l = \overline{1,L}$, $t = \overline{1,T}$.

7. Находим решение текущей задачи Y^q, X^q $\left(Y^q = \left\|y^q_{i,j}(t)\right\|,\ X^q = \left\|x^q_{i,l}(t)\right\|\right)$ и переходим к пункту 3.

8. На текущем шаге q получено оптимальное решение задачи (1)–(7) Y^*, X^*, z^*. Останов алгоритма.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Традиционно для работы с набором подзадач математического программирования мы использовали специализированный пакет IBM ILOG CPLEX, который создан специально под нужды и особенности решения задач математической оптимизации, в том числе полуопределенного программирования, в состав которого входит реализация барьерного алгоритма.

В качестве среды разработки для программирования алгоритма выбрана JetBrains Rider 2020.2 и язык программирования C#. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio – это комплексный набор инструментов для моделирования и решения задач оптимизации, который имеет возможности взаимодействовать с другими средствами разработки и языками программирования с помощью API. В нашем случае мы работали со сборками (библиотеками) CPLEX в выбранной среде разработки. Результатами работы программы является набор многомерных массивов значений переменных и полученное значение целевой функции.

Результаты расчетов десяти сгенерированных тестовых задач различных размерностей сведены в таблицу. Размерности задач были приближены к реальным на больших предприятиях. Исходные данные для тестов были взяты из открытых источников (оптовые цены сырья и комплектующих и скидки (в процентах) у поставщиков) – из сайтов торговых и производственных фирм, реализующих вычислительную технику и ее комплектующие. В качестве предприятия, для которого производился поиск решения, бралась гипотетическая фирма, у которой есть три типа потребителей: 1) розничные; 2) потребители, имеющие скидку 2 %; 3) потребители, имеющие скидку 5 %.

Конфигурация системы: процессор Intel Core i5 8265U @ 1.60 ГГц, оперативная память DDR4 16 Гб, операционная система Windows 10 Home (version 1903, OS build 18362.1016), Framework: .NET Core 3.1.201.

Результаты экспериментов

Experimental results

No	Cont	Boolean	LineConstr	NonlineConstr	It	Time
1	2218	120	816	6	1	00.25
2	10 208	120	3426	6	5	02.71
3	19 258	120	6426	6	5	03.86
4	37 358	120	12 426	6	5	08.56
5	73 558	120	24 426	6	2	06.46
6	145 958	120	48 426	6	2	09.66
7	182 158	120	60 426	6	2	13.33
8	290 758	120	96 426	6	2	21.4
9	363 158	120	120 426	6	2	30.57
10	580 358	120	192 426	6	2	51.43

В таблице обозначено: No – номер теста, Cont – число непрерывных переменных, Boolean – число булевых переменных, LineConstr – число линейных ограничений, NonlineConstr – число нелинейных ограничений, It – среднее число итераций алгоритма и Time – среднее время решения в секундах.

Из таблицы можно сделать вывод, что оценка быстродействия алгоритма вполне обнадеживает. Вычислительные эксперименты с программной реализацией алгоритма решения формально неразрешимых точными методами задач (1)–(7) в целом показали высокую эффективность алгоритма. Это обусловливает отличные перспективы внедрения разработки, поскольку, как отмечалось выше, поиск оптимальных решений рассматриваемой задачи управления актуален для большей части хозяйствующих субъектов.

ВЫВОДЫ

Исходя из результатов тестирования программной реализации полученного алгоритма мы сделали вывод, что с ее помощью можно получить точное решение задач (1)–(7) произвольной размерности. Результаты, найденные посредством применения программной реализации представленного алгоритма в одном из режимов, ослабляющих ограничения (5) до тривиального совпадения входных и выходных потоков, сравнивались с полученными ранее в работе [19], в которой не было учета производственной составляющей. Результаты вычислений оказались близкими. Во всех прочих случаях релевантность результатов проверялась на уровне содержательного анализа и противоречий выявлено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бутусов О.Б., Дубин М.Е.* Система поддержки принятия решений для выбора поставщика в цепи поставок // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – Т. 4. – № 1 (15). – С. 268–271.

2. *Parunakjan V., Sizova E.* Increase of efficiency of interaction of production and transport in the logistic chains of material traffic of enterprises // Transport Problems. – 2008. – Т. 3 (3). – С. 95–104.

3. *Bosov A., Khalipova N.* Formation of separate optimization models for the analysis of transportation-logistics systems // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – № 3 (3). – С. 11–20.

4. *Kolga M., Smedt V. De, Nerom L. Van.* Planning principles in metallurgy // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 5 (45). – С 78–80.

5. *Arshinsky L., Zhang K.* The application of operations research in logistics // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – 2012. – № 10. – С. 5–12.

6. Using metaheuristic and fuzzy system for the optimization of material pull in a push-pull flow logistics network / A. Mehrsai, H.-R. Karimi, K.-D. Thoben, B. Scholz-Reiter, M. Chadli // Mathematical Problems in Engineering. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–19.

7. *Koriashkina L., Saveliev V., Zhelo A.* On mathematical models of some optimization problems arising in the production of autoclaved aerated concrete // Advanced Engineering Forum. – Trans Tech Publications, 2017. – Vol. 22. – P. 173–181.

8. *Castro P.M., Grossmann I.E., Zhang Q.* Expanding scope and computational challenges in process scheduling // Computers and Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 114. – P. 14–42.

9. *Авхадиев Р.А., Елизарова Н.Ю., Сабитов Ш.Р.* Система оперативного управления производственными процессами предприятия «1С: MES: облачное управление производством» // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. М., 2014. – С. 4909–4914.

10. *Karpak B., Kumcu E., Kasuganti R.R.* Purchasing materials in the supply chain: managing a multi-objective task // European Journal of Purchasing and Supply Management. – 2001. – Vol. 7, N 3. – P. 209–216.

11. *Karpak B., Kasuganti R.R., Kumcu E.* Multi-objective decision-making in supplier selection: an application of visual interactive goal programming // Journal of Applied Business Research. – 1999. – Vol. 15. – P. 57–72.

12. A new enhanced support vector model based on general variable neighborhood search algorithm for supplier performance evaluation: a case study / B. Vahdani, S.M. Mousavi, R. Tavakkoli-Moghaddam, H. Hashemi // International Journal of Computational Intelligence Systems. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 293–311.

13. *Сигаев В.С.* Задача размещения заказов для сети аптек региона и ее приближенное решение // Проблемы информатики. – 2011. – № 1 (9). – С. 11–19.

14. *Просветов Г.И.* Математические методы в логистике. – М.: Изд-во РДЛ, 2006. – 272 с.

15. *Бродецкий Г.Л.* Системный анализ в логистике. Выбор в условиях неопределенности. – М.: Academia, 2010. – 336 с.

16. *Бочкарев А.А.* Планирование и моделирование цепи поставок. – М.: Альфа-Пресс, 2008. – 192 с.

17. *Мезенцев Ю.А.* Математические модели управления подсистемами логистики на предприятиях // Автоматизация и современные технологии. – 2008. – № 8. – С. 46–55.

18. *Baranova N.V., Mezentsev Yu.A.* Research and development of an algorithm for solving the problem of control over the input-output material flows of an industrial company // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 2098: Optimization problems and their applications (OPTA-SCL 2018), Omsk, 2018. – P. 33–44. – Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки.

19. *Мезенцев Ю.А., Павлов П.С.* К программной реализации декомпозиционного алгоритма решения одного класса задач дискретной оптимизации с полуопределенной релаксацией // Информационные технологии. – 2012. – № 2 (186). – С. 54–59.

Баранова Нина Владимировна, ассистент кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – дискретные задачи оптимизации, управление производством. E-mail: baranova.nina.vl@gmail.com

Мезенцев Юрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование операций, методы оптимизации, системный анализ. Имеет более 100 печатных работ и учебных пособий. E-mail: mezencev@corp.nstu.ru

Павлов Павел Сергеевич, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – логистика, оптимизация производства и поставок. E-mail: pavlov.pavel.sergeevich@gmail.com

Baranova Nina V., assistant lecturer, Department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on discrete optimization problems, production management. E-mail: baranova.nina.vl@gmail.com

Mezentsev Yury A., D. Sc. (Eng.), professor, Department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on operations research, optimization methods, and system analysis. He has more than 100 publications and teaching manuals. E-mail: mezencev@corp.nstu.ru

Pavlov Pavel S., senior teacher, Department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on logistics, optimization of production and supply. E-mail: pavlov.pavel.sergeevich@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-7-18

On the problem and algorithms for coordinated optimal management of production and material flows of an enterprise[*]

N.V. BARANOVA[a], *Yu.A. MEZENTSEV*[b], *P.S. PAVLOV*[c]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *baranova.nina.vl@gmail.com* [b] *mezencev@corp.nstu.ru*
[c] *pavlov.pavel.sergeevich@gmail.com*

Abstract

At present, any unified approach that would allow solving the problems of coordinated optimal control of input and output material flows and production has not been implemented in the theory and practice of managing technological and organizational systems. The works published in this area are often aimed at solving specific problems. When attempting a complex solution the declared systemicity is either indicated only in words, or is implemented heuristically by gluing the constituent components without discussing and analyzing the effectiveness and, moreover, proof.

This article, based on the earlier works of the authors, develops an apparatus of coordinated optimal control of all logically related subsystems. A formal setting created for this purpose is a discrete optimization problem and it takes into account all the main factors of production and movement of material flows. A special algorithm for an approximate solution is constructed, which transfers the created problem from the category of NP-hard problems to the category of polynomially solvable ones. The formal setting contains logical conditions for choosing from a variety of parameters, including sources and directions of flows, conditions of supply, volumes and dynamics of production, and determination of optimal prices at the output. Thus, the restrictions systematically take into account both production components and restrictions on resources and the logic of movement of input and output material flows.

A maximum net profit at the end of the planning period was used as a criterion for the effectiveness of all processes. The considered model and control problems are investigated using a unified approach that allows working with logical conditions of any complexity and setting appropriate formal optimization problems. The results of testing the algorithm on test data close to real dimensions are also given.

Keywords: discrete optimization problems, production, supply and sales management, mixed integer programming, discount functions, sales price optimization, efficient algorithm, material flows, optimal control, semi-definite relaxation

REFERENCES

1. Butusov O.B., Dubin M.E. Sistema podderzhki prinyatiya reshenii dlya vybora postavshchika v tsepi postavok [Decision support system for supplier selection in supply chain]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2013, vol. 4, no. 1 (15), pp. 268–271.

[*] *Received 13 February 2021.*

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 19-37-90048. (The reported study was funded by RFBR, project number 19-37-90048) And also with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education within the framework of the State Assignment (project No. FSUN-2020-0009). (The research is supported by Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (project No. FSUN-2020-0009).)

2. Parunakjan V., Sizova E. Increase of efficiency of interaction of production and transport in the logistic chains of material traffic of enterprises. *Transport Problems*, 2008, vol. 3 (3), pp. 95–104.

3. Bosov A., Khalipova N. Formation of separate optimization models for the analysis of transportation-logistics systems. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii = Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, no. 3 (3), pp. 11–20.

4. Kolga M., Smedt V. De, Nerom L. Van. Planning principles in metallurgy. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2013, no. 5 (45), pp. 78–80.

5. Arshinsky L., Zhang K. The application of operations research in logistics. *Informatsionnye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh sistem = Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems*, 2012, no. 10, pp. 5–12.

6. Mehrsai A., Karimi H.-R., Thoben K.-D., Scholz-Reiter B., Chadli M. Using metaheuristic and fuzzy system for the optimization of material pull in a push-pull flow logistics network. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 1–19.

7. Koriashkina L., Saveliev V., Zhelo A. On mathematical models of some optimization problems arising in the production of autoclaved aerated concrete. *Advanced Engineering Forum*. Trans Tech Publications, 2017, vol. 22, pp. 173–181.

8. Castro P.M., Grossmann I.E., Zhang Q. Expanding scope and computational challenges in process scheduling. *Computers and Chemical Engineering*, 2018, vol. 114, pp. 14–42.

9. Avkhadiev R.A., Elizarova N.Yu., Sabitov Sh.R. [System of operational management of production processes of the enterprise "1C: MES: cloud production management"]. *XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [XII All-Russian meeting on management problems VSPU-2014]. Moscow, 2014, pp. 4909–4914. (In Russian).

10. Karpak B., Kumcu E., Kasuganti R.R. Purchasing materials in the supply chain: managing a multi-objective task. *European Journal of Purchasing and Supply Management*, 2001, vol. 7, no. 3, pp. 209–216.

11. Karpak B., Kasuganti R.R., Kumcu E. Multi-objective decision-making in supplier selection: An application of visual interactive goal programming. *Journal of Applied Business Research*, 1999, vol. 15, pp. 57–72.

12. Vahdani B., Mousavi S.M., Tavakkoli-Moghaddam R., Hashemi H. A new enhanced support vector model based on general variable neighborhood search algorithm for supplier performance evaluation: a case study. *International journal of computational intelligence systems*, 2017, vol. 10 (1), pp. 293–311.

13. Sigaev V.S. Zadacha razmeshcheniya zakazov dlya seti aptek regiona i ee priblizhennoe reshenie [Problem of placing orders for a network of regional pharmacies and its approximate solution]. *Problemy informatiki = Problems of Informatics*, 2011, no. 1 (9), pp. 11–19.

14. Prosvetov G.I. *Matematicheskie metody v logistike* [Mathematical methods in logistics]. Moscow, RDL Publ., 2006. 272 p.

15. Brodetskii G.L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vybor v usloviyakh neopredelennosti* [System analysis in logistics. Choice under Uncertainty]. Moscow, Academia Publ., 2010. 336 p.

16. Bochkarev A.A. *Planirovanie i modelirovanie tsepi postavok* [Planning and modeling of the supply chain]. Moscow, Al'fa-Press Publ., 2008. 192 p.

17. Mezentsev Yu.A. Matematicheskie modeli upravleniya podsistemami logistiki na predpriyatiyakh [Mathematical models of the logistic subsys tem management on the enterprises]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii = Automation and modern technologies*, 2008, no. 8, pp. 46–55.

18. Baranova N.V., Mezentsev Yu.A. Research and development of an algorithm for solving the problem of control over the input-output material flows of an industrial company. *CEUR Workshop Proceedings*, 2018, vol. 2098, pp. 33–44.

19. Mezentsev Yu.A., Pavlov P.S. K programmnoi realizatsii dekompozitsionnogo algoritma resheniya odnogo klassa zadach diskretnoi optimizatsii s poluopredelennoi relaksatsiei [On the software implementation of a decomposition algorithm for solving one class of discrete optimization problems with semi-definite relaxation]. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*, 2012, no. 2 (186), pp. 54–59.

Для цитирования:
Баранова Н.В., Мезенцев Ю.А., Павлов Ю.А. О задаче и алгоритмах согласованного оптимального управления производством и материальными потоками предприятия // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 3 (83). – С. 7–18. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-7-18.

For citation:
Baranova N.V., Mezentsev Yu.A., Pavlov P.S. O zadache i algoritmakh soglasovannogo optimal'nogo upravleniya proizvodstvom i material'nymi potokami predpriyatiya [On the problem and algorithms for coordinated optimal management of production and material flows of an enterprise]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 7–18. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-7-18.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 83, № 3, 2021, с. 19–36

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 83, No. 3, 2021, pp. 19–36

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.89 DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-19-36

Анализ современных исследований в области детектирования утомления водителя в кабине транспортного средства*

А.О. БУЛЫГИН[a], А.М. КАШЕВНИК[b]

199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 4-я линия В. О., Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)

[a] *alexandr_bulygin@mail.ru* [b] *alexey.kashevnik@iias.spb.su*

В статье проведен анализ методов детектирования утомления водителей, которые используются в современной литературе. Существует огромное множество методов для оценки функционального состояния человека.

Функциональное состояние – это интегральный комплекс характеристик тех функций и качеств человека, которые прямо или косвенно обусловливают выполнение любой деятельности. От функционального состояния организма зависит физическое и психическое состояние человека, успешность его труда, обучения, творчества.

Оценка динамического поведения водителя в последние годы становится наиболее популярным направлением исследований. Динамическая оценка поведения водителя включает в себя продолжительный мониторинг, позволяющий определять функциональные состояния, в отличие от современных систем мониторинга водителя, которые оценивают такие состояния, как сонливость и ослабленное внимание на непродолжительном (1…10 с) интервале времени. Такие системы позволяют говорить о физиологическом мониторинге, но не нейрофизиологическом, позволяющем осуществлять мониторинг функционального состояния утомления.

Следовательно, имеет смысл отслеживать состояние утомления водителя, а также своевременно предупреждать его во избежание столкновений с другими транспортными средствами.

В статье выполнено исследование и проведен анализ способов получения соответствующих характеристик состояния человека, с помощью которых можно определять степень утомления. В результате изучения были выбраны наиболее часто встречающиеся методы определения функционального состояния водителя. Далее найденные источники были классифицированы по наиболее распространенным методам получения значимых

* *Статья получена 15 матра 2021 г.*

Представленные результаты исследований являются частью научного проекта № 19-29-06099 (2019-2021), финансируемого Российским фондом фундаментальных исследований. Оценка алгоритма была выполнена в рамках бюджетной темы № 0073-2019-0005 (2019–2021).

характеристик функционального состояния водителя. Выполнен сравнительный анализ, демонстрирующий возможности современных систем такого класса.

Ключевые слова: искусственный интеллект, компьютерное зрение, распознавание образов, распознавание лиц, нейронные сети, машинное обучение, глубокое обучение, функциональное состояние

ВВЕДЕНИЕ

Методы анализа утомления водителей в последние годы становятся наиболее популярным направлением исследований. В данном случае исследовались методы динамической оценки утомления водителя. Они включают в себя продолжительный мониторинг, позволяющий определять функциональные состояния.

Функциональное состояние – это интегральный комплекс характеристик тех функций и качеств человека, которые прямо или косвенно обусловливают выполнение любой деятельности. От функционального состояния организма зависит физическое и психическое состояние человека, успешность его труда, обучения, творчества.

Вождение в состоянии утомления является одной из основных причин дорожно-транспортных происшествий. Исследования показывают, что вероятность дорожно-транспортных происшествий, вызванных вождением в состоянии утомления, в пять раз выше, чем при вождении в нормальном состоянии. Ежегодные дорожно-транспортные происшествия, вызванные вождением в состоянии утомления, составляют около 20 % от общего количества аварий и более 40 % – от количества серьезных дорожно-транспортных происшествий [1].

Сонливость – свойство человека, при котором веки опущены ниже их обычного состояния, появляется зевота, глаза открываются медленнее и увеличивается частота моргания [2].

Засыпание – состояние сонливости, характеризующееся снижением уровня сознания, снижением активности мозга, зевотой, понижением чувствительности сенсорных систем, уменьшением частоты сердечных сокращений, снижением секреторной деятельности желез [3].

Сон – нормальное, обратимое, повторяющееся состояние пониженной чувствительности к внешней стимуляции, которое сопровождается сложными и предсказуемыми изменениями в физиологии. Эти изменения включают активность мозга, а также колебания уровня гормонов и расслабление мускулатуры [4].

Усталость – комплекс субъективных переживаний, сопутствующих развитию состояния утомления. Характеризуется слабостью, вялостью, бессилием, ощущением физиологического дискомфорта, нарушением психических процессов, потерей интереса к работе, преобладанием мотивации к прекращению деятельности, негативными эмоциональными реакциями. Усталость может возникать и при длительном выполнении однообразной деятельности. Однако возможна и парадоксальная усталость, не связанная с утомлением, как и отсутствие усталости у объективно утомленного человека [5].

Утомление – временное снижение работоспособности под влиянием длительного воздействия нагрузки. Возникает вследствие истощения внут-

ренних ресурсов индивида и рассогласования в работе всех систем организма. Утомление имеет разнообразные проявления на поведенческом (снижение производительности труда, уменьшение скорости и точности работы), физиологическом (затруднение выработки условных связей, повышение инерционности в динамике нервных процессов), психологическом (снижение чувствительности, нарушение внимания, памяти, интеллектуальных процессов, сдвиги в эмоционально-мотивационной сфере) уровнях. Сопровождается формированием комплекса субъективных переживаний усталости. Специфика проявлений усталости зависит от вида нагрузки, локализации ее воздействия и времени, необходимого для восстановления оптимального уровня работоспособности [6].

Для мониторинга функционального состояния водителя в кабине транспортного средства используются методы компьютерного зрения. Такие методы не являются интрузивными и не создают неудобств водителю во время управления транспортным средством, а также не требуют дополнительного специального оборудования.

Таким образом, отслеживание состояния утомления водителя является важной научно-технической задачей, решение которой позволит предупреждать водителя во избежание столкновений с другими транспортными средствами.

В рамках статьи была поставлена задача провести анализ научных статей о методах анализа утомления водителей.

В настоящей статье были рассмотрены и проанализированы методы распознавания функционального состояния утомления водителя на основе современных технологий видеоаналитики. Из рассмотренных источников были выбраны статьи, содержащие самые часто применяемые на практике методы определения функционального состояния утомления. В дальнейшем источники были систематизированы по способам получения от человека значимых характеристик, необходимых для определения его функционального состояния. На основе данной классификации была составлена табл. 3, наглядно показывающая основные методы, используемые в системах такого класса.

1. СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ УТОМЛЕНИЯ ВОДИТЕЛЯ

В данном разделе рассмотрены современные исследования, ориентированные на мониторинг водителя в кабине транспортного средства, а также на оценку психофизиологических параметров человека.

1.1. ОБЗОРНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТИКЕ МОНИТОРИНГА ВОДИТЕЛЯ

Этот подраздел посвящен анализу обзорных статей по поведению водителя в кабине транспортного средства.

В статье [7] представлен обзор современных достижений в области обнаружения утомления водителя. Биологические сигналы можно разделить на сигналы, получаемые от сердца, мозга, глаз и кожи. Изменения биологических сигналов при электроэнцефалографии (ЭЭГ), электрокардиограмме (ЭКГ), электроокулографии (ЭОГ) и электромиограмме (ЭМГ) являются точ-

ными способами обнаружения утомления. ЭЭГ может быть получена с помощью плоских электродов, прикрепленных к коже головы. Этот метод имеет точность обнаружения утомления 89,7 % [7].

Датчики ЭМГ регистрируют электрический потенциал, генерируемый мышечными клетками через электроды. ЭМГ– это измерение электрического потенциала, создаваемого мышцами на поверхности кожи. Характеристики, полученные из сигнала временной и частотной области ЭМГ, могут быть использованы для прогнозирования мышечного утомления.

ЭОГ – это измерение разности потенциалов сетчатки между задней и передней частями глаза. ЭОГ измеряет движение глаза с помощью электродов, прикрепленных к левой и правой стороне глаза.

Оценить биологические сигналы можно с помощью неинтрузивных электродов для измерения ЭКГ через одежду, электродов для измерения ЭЭГ, прикрепленных к голове, и электродов для измерения ЭОГ, подвешенных к потолку автомобиля, как показано на рис. 1.

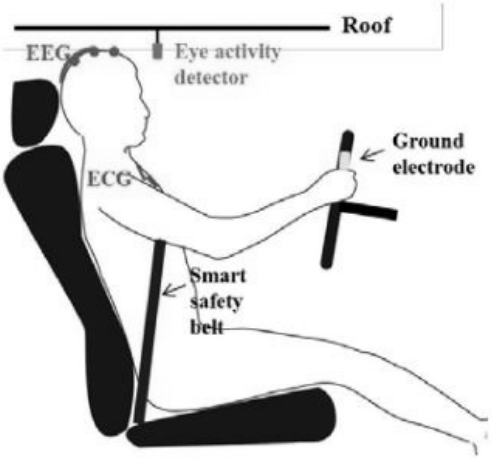


Рис. 1. Размещение электродов для получения ЭЭГ, ЭКГ и ЭОГ [7]

Fig. 1. Electrode placement for acquisition of EEG, ECG and EOG [7]

Биологические признаки являются прямой мерой утомления, однако их применение в обнаружении утомления водителя в реальном времени ограничено из-за интрузивного характера датчиков.

Особенности, проявляющиеся в лице водителя и в движениях головы, являются одними из наиболее очевидных симптомов утомления. Физические особенности включают открытость/закрытость глаз, частоту моргания, продолжительность закрытия глаз, процент времени, в течение которого глаза закрыты (PERCLOS), положение головы, направление взгляда, кивание головой. Системы для обнаружения утомления, основанные на оценке физических характеристик, можно в широком смысле разделить на методы слежения за глазами, ртом и лицом.

В статье [8] описаны методы слежения за основными факторами, влияющими на изменение поведения водителя. Физиологическое состояние – это

состояние тела или телесные функции водителя при вождении автомобиля, такие как стресс, утомление.

Физиологическое состояние можно определить или предсказать, наблюдая за положением тела и действиями водителя. Например, активность глаз, мимика, кивание головы, осанка рассматриваются как жизненно важные признаки восприятия и концентрации водителя. Как и в статье [7], рассматриваются способы получения биологических сигналов от человека, а также кожно-гальваническая реакция (КГР), дыхание и вариабельность сердечного ритма. Для получения этих показателей нужно прикрепить датчики и кабели к телу водителя, что в некоторой степени ограничивает его свободу действий. Несмотря на это, многие физиологические показатели могут быть собраны неинтрузивным образом с помощью современных технологий видеоаналитики.

С помощью этих показателей изучается бдительность водителя, они позволяют обнаруживать движения головы, выражение лица, голосовую активность. Методы обработки изображений для наблюдения за выражением лица водителя достигли довольно высокого уровня сложности, особенно это касается методов глубокого обучения.

В статье [9] автор предлагает классифицировать методы мониторинга функционального состояния утомления водителя на методы, работающие в реальном времени, и методы, работающие не в реальном времени. Методы реального времени, определяют утомление водителя в текущий момент времени, а методы, работающие не в реальном времени, используют некоторые инструменты для анализа обработки поведения водителя из выборок данных, собранных во время вождения.

К системам реального времени относятся системы, использующие алгоритмы компьютерного зрения и определяющие утомление водителя. Недостатком является вычислительная сложность. Системы на основе алгоритмов обработки изображений для определения лиц и глаз используются для определения степени утомление водителя. Они являются неинтрузивными и генерируют предупреждающие сигналы, имеют высокую вычислительную сложность. Искусственные нейронные сети определяют неустойчивое поведение и утомление водителя, имеют высокую точность определения, требуют большого времени обучения. Нечеткие системы определяют поведение и утомление водителя, имеют высокую надежность и точность, настраиваются индивидуально для конкретного водителя, имеют высокую вычислительную сложность. Системы, использующие фильтр Калмана, определяют невнимательность и утомление. К преимуществам относятся точность работы в ночное время, автоматическая инициализация и повторная инициализация, они также являются неинтрузивными. Системы, использующие скрытые марковские модели, определяют статус водителя (безопасный, рискованный, опасный) и утомление; показывают хорошие результаты в идеальных дорожных ситуациях и совместимы с предаварийными системами, основанными на расстоянии между транспортными средствами, такими как системы предупреждения о столкновении; имеют менее точное распознавание событий в сценариях работы на практике.

К методам не реального времени относятся специализированные системы диагностики водителя. Они определяют поведение водителя: умеренное, агрессивное. Записывают информацию и обеспечивает обратную связь с во-

дителем. Такие системы являются интрузивными, и необходимо последующее наблюдение за водителем для поддержания эффекта обратной связи. Системы, использующие методы обработки изображений и видео для определения отвлечения водителя: использование мобильного телефона, проезд на красный сигнал светофора.

В статье [10] представлены системы, работающие с биологической и физиологической информацией водителя. Как и в статье [7], авторы говорят об эффективности использования ЭЭГ, ЭКГ, ЧСС для определения утомления человека. Отличительной особенностью является использование данных о вариабельности сердечного ритма (ВСР).

Частота сердечных сокращений (ЧСС) в минуту снижается у лиц, переходящих из бодрствующего состояния в сонное. Вариабельность сердечного ритма (ВСР) – это изменение временного интервала между двумя последовательными ударами сердца. Как правило, во время умственной нагрузки ЧСС увеличивается, а ВСР уменьшается. Таким образом, ВСР уменьшается при наступлении утомления.

Частота дыхания – это количество выдохов и вдохов за одну минуту. Частота дыхания уменьшается с началом сонливости и до наступления сна [10].

Исследования показывают, что существует связь между амплитудой ЭМГ и мышечной усталостью, поскольку амплитуда сигналов ЭМГ постепенно уменьшается с усталостью. При увеличении мышечной усталости усиливается сонливость.

Электротермическая активность (ЭТА) обеспечивает измерение проводимости кожи, которая изменяется из-за секреции потовых желез. Во время сонливости активизируется деятельность парасимпатической нервной системы, которая уменьшает потоотделение и снижает проводимость кожи. Таким образом, при уменьшении потоотделения сонливость увеличивается.

Температура кожи поддерживается в определенном диапазоне системой терморегуляции человеческого организма. Температура поверхности кожи водителя изменяется в зависимости от уровня сонливости. Температура кожи лба значительно снижается при наступлении сонливости [10].

Для использования вышеперечисленных методов необходимы интрузивные датчики, которые могут доставлять неудобства водителю во время поездки.

1.2. АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ВОДИТЕЛЯ В КАБИНЕ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В этом подразделе рассматриваются статьи о методах определения положения головы, интервала времени, когда глаза закрыты (PERCLOS – Percentage of eye closure), скорости моргания век, направления взгляда, зевоты, частоты дыхания, температуры кожи. Указанные методы чаще всего используются для мониторинга поведения водителя.

Распознавание глаз нужно для наблюдения за поведением водителя, определения сонливости, невнимательности и утомления.

Отличительным параметром PERCLOS является время закрытия век более чем на 80 %. Если в течение одной минуты показатель PERCLOS наблюдается более 28 % времени, то фиксируется состояние дремоты [11].

В статье [11] под сонливостью автор понимает чувство «слипания глаз». Состояние сонливости характеризуется более продолжительным и медленным морганием глаз, может изменяться частота моргания, веки могут опускаться с небольшой амплитудой. Могут случаться состояния краткосрочных «микроснов». Это ситуации, при которых глаза закрыты 3…5 с или больше.

Интервал времени от 0,5 до 0,8 с считается безопасным при моргании водителя. Если водитель «клюет носом», то это также создает опасную ситуацию. Ему трудно удерживать голову в обычном положении.

Осуществляя поиск и слежение за лицом водителя, система выявляет опасные ситуации сонливости, ослабленного внимания и функционального состояния утомления.

На смартфон устанавливается мобильное приложение, которое задействует фронтальную камеру и сенсоры (GPS, акселерометр, гироскоп, магнитометр) для получения изображения и слежения за функциональным состоянием водителя.

В статье [12] представлена гибридная визуальная система для отслеживания состояний сонливости, невнимательности и утомления водителя на основе распознавания глаз.

Работа системы в условиях автомобиля и обработка изображений при дневных и ночных условиях освещенности достигается благодаря индивидуальной настройке двух камер, работающих в видимом и ближнем инфракрасном спектрах соответственно.

Оба варианта обработки организованы в виде каскада специализированных модулей, каждому из которых поступает на вход результат работы предыдущего модуля. Такие связи многих классификаторов характеризуются обычно более высокой точностью. Сначала к изображению применяется морфологический фильтр для удаления пятен и шума с радужной оболочки. На основе предложенной модели глаза выполняется его обнаружение. Сначала определяются зрачки, затем радужная оболочка и области глаз. Второй классификатор определяет открытость глаз на изображении. Данный классификатор основан на декомпозиции HOSVD-тензоров, поэтому он называется HOSVD-классификатором. Данному модулю предшествует евклидово преобразование, роль которого заключается в создании изображения, учитывающего взаимные отношения позиций пикселей. Классификатор HOSVD обучается с использованием изображений с глазами и изображений, на которых отсутствуют глаза. Оба пути обработки используют один и тот же тип классификатора HOSVD, обученного с разными наборами шаблонов. В зависимости от степени открытости глаз и частоты моргания система определяет степень утомления водителя.

В статье [13] разработан алгоритм мониторинга головы и глаз для определения сонливости и утомления водителя. Для распознавания лиц используется алгоритм Виолы–Джонса. Данный алгоритм позволяет обнаруживать объекты на изображениях в реальном времени. В стандартном алгоритме Виолы–Джонса используются прямоугольные признаки Хаара. Простейший прямоугольный признак Хаара можно определить как разность сумм пикселей двух смежных областей внутри прямоугольника, который может занимать различные положения и масштабы на изображении.

При оценке частоты моргания глаз учитываются все три параметра (спонтанность, рефлекторность, произвольность) и на их основе распознаются признаки, определяющие состояние сонливости водителя.

Метод JEER используется для определения области глаз, чтобы следить за частотой моргания. Процедура делится на 2 этапа. Сначала производится поиск глаз и учитывается, что кончик носа располагается между ними. Затем на изображении определяется лоб. Суммируя значения пикселей в областях, где расположены глаза, определяется, могут ли глаза находиться в областях, выбранных на предыдущем шаге. Если сумма значений пикселей в области каждого глаза одинакова, то считается, что алгоритм определил глаза верно.

В статье [14] нечеткая экспертная система классифицирует уровни утомления водителя на низкий, нормальный и высокий. Нечеткая экспертная система – это экспертная система, которая использует нечеткую логику вместо булевой логики. Алгоритм распознавания лиц для всех кадров является вычислительно сложным, поэтому при обнаружении лица в первом кадре далее используется алгоритм слежения за лицом.

Для распознавания лиц использовались признаки Хаара и алгоритм Виолы–Джонса. Алгоритм распознавания лиц был обучен на 3000 изображениях с лицами и на 300 000 изображений без лиц. В данной системе выделяют два типа признаков: признаки, получаемые из области глаз, и признаки, получаемые от головы в целом. К признакам, получаемым из области глаз, относятся значения PERCLOS, изменение расстояния между веками (ELDC) и скорость закрытия глаз (CLOSNO). Признаком, относящимся к области головы, является вращение головы (ROT). Вращение головы является признаком отвлечения внимания. Вращение головы оценивается на основе изменений изображения лица по отношению к шаблону фронтального лица. Голова и лицо водителя были получены из изображения с помощью сопоставления шаблонов и горизонтальной проекции изображения лица. Затем эти признаки (PERCLOS, ELDC, CLOSNO, ROT) поступают на вход нечеткой экспертной системы. Выходом нечеткой экспертной системы является уровень утомления водителя.

Этот метод был протестирован на пяти испытуемых в реальных условиях вождения. Определение усталости выполняется с использованием электроэнцефалограммы (ЭЭГ) как объективной оценки утомления. Метод отслеживания лица является неточным, очень сложным с точки зрения вычислений, и точность значительно снижается при низкой освещенности.

В статье [15] разработана система обнаружения утомления специально для водителей автобусов, использующих купольную камеру, уже установленную в автобусах, для мониторинга поведения за рулем.

Оценивается открытость глаз и применяется метод PERCLOS в качестве метода обнаружения утомления водителя. Детектор «голова–плечо» применяется для определения положения водителя за рулем и определения приблизительного положения головы. Голова и плечи определяются с помощью гистограммы направленных градиентов (HOG), а обнаружение водителя выполняется с помощью метода опорных векторов (SVM). Обнаружение лица и глаз выполняется детектором лица OpenCV и детектором глаз соответственно. Детектор лиц OpenCV надежен для поиска фронтальных лиц, так как он обучен на большом количестве примеров. Детектор глаз

OpenCV хорошо работает для определения местоположения глаз на изображениях фронтальных лиц даже с закрытыми глазами. Открытость глаз рассчитывается с использованием линейной и спектральной регрессии. Используется метод оценки открытости глаз, основанный на полном изображении глаза, чтобы не было необходимости обнаруживать характерные точки и кривые вокруг глаз. Для того чтобы точно определять утомление водителя на основе изображений глаз, открытость глаз измеряется непрерывно. Затем система нечеткой логики определяет утомление водителя на основе обнаруженных характеристик глаз. Авторы провели тестирование на 23 водителях в реальных условиях вождения. Эта система имеет ограниченные вычислительные ресурсы и работает с изображениями лиц и глаз, наблюдаемых под косым углом обзора. Поэтому обнаружение утомления работает для изображений с низким разрешением, и метод предназначен для купольной камеры, установленной в автобусах.

1.3. ОЦЕНКА ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА

В статье [16] говорится о том, что, определяя выражение лица водителя, открытость глаз и рта, вычисляя частоту моргания и частоту зевания, можно определить состояние утомления водителя. Авторы рассматривают алгоритм определения утомления, основанный на анализе выражения лица. Модель положения глаз и рта обучается с помощью многоблочных локальных бинарных шаблонов MB-LBP. Определяются положения глаз и рта на изображении лица водителя, и вычисляется PERCLOS и частота зевоты для описания утомления водителя.

Глаза и рот могут находиться в одном из трех состояний: закрытые, полуоткрытые и полностью открытые. Состояние утомления также делится на три уровня: нормальное, легкое утомление и сильное утомление.

Специальной базы данных об утомлении водителя не существует, поэтому экспериментальные данные в этой статье получены из 400 лабораторий, которые моделировали условия вождения (нормальное состояние, легкое утомление, сильное утомление).

Путем тестирования частоты моргания и зевания от нормального состояния до легкого утомления и сильного утомления при различных условиях освещения анализируются значения PERCLOS, соответствующие различным состояниям утомления. Три порога состояния для PERCLOS глаз (P) и PERCLOS рта (K) показаны в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

PERCLOS-пороги для глаз и рта

PERCLOS-thresholds for the eyes and mouth

Состояние	Низкочастотное	Промежуточное	Высокочастотное
Глаза	$P < 13$ %	13 % $< P <$ 21 %	$P > 21$ %
Рот	$K < 20$ %	20 % $< K <$ 30 %	$K > 30$ %

Авторы исследования получили три состояния частоты моргания глаз и частоты зевания: низкочастотное, промежуточное, высокочастотное (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Таблица внешних признаков утомляемости

Fatigue physical symptoms table

Ситуация	Глаза	Рот	Результат
1	Низкая	Низкая	Нормальное состояние
2	Средняя	Низкая	Незначительное утомление
3	Высокая	Низкая	Сильное утомление
4	Низкая	Средняя	Нормальное состояние
5	Средняя	Средняя	Сильное утомление
6	Высокая	Средняя	Сильное утомление
7	Низкая	Высокая	Незначительное утомление
8	Средняя	Высокая	Сильное утомление
9	Высокая	Высокая	Сильное утомление

В статье [17] используются психофизиологические сигналы и показатели выполнения задач для оценки функционального состояния (ФС) утомления при различных уровнях умственной нагрузки. Три показателя, извлеченные из электрокардиограммы (ЭКГ) и электроэнцефалограммы (ЭЭГ), включая частоту сердечных сокращений (ЧСС), вариабельность сердечного ритма (ВСР) – отношение стандартного отклонения к среднему значению сегмента ЧСС, индексы нагрузки задания (ИНЗ1 и ИНЗ2), выбираются в качестве входных данных предлагаемой модели.

Частота сердечных сокращений (ЧСС) и вариабельность сердечного ритма (ВСР) являются эффективными показателями умственной нагрузки.

Для оценки ФС выбирается индекс нагрузки задачи (ИНЗ). В этом исследовании ЧСС, ВСР и ИНЗ выбраны в качестве входных данных для предлагаемой модели оценки ФС.

Эксперименты проводились на автоматизированной системе управления воздухом кабины (AUTOCAMS). AUTOCAMS имитирует систему жизнеобеспечения космического корабля. Испытуемому необходимо управлять полуавтоматической системой, которая должна регулировать атмосферные условия кабины таким образом, чтобы поддерживать комфортное атмосферное давление.

Первоочередной задачей было управление некоторыми из пяти подсистем, чтобы поддерживать их соответствующие переменные в целевых диапазонах. Количество подсистем, которыми необходимо управлять вручную при каждом условии управления, составляет 1, 2, 3, 4, 5, 4, 3, 2 и 1 соответственно. Таким образом, в ходе эксперимента нагрузка, требуемая для выполнения задания, изменяется.

В конце каждого контрольного состояния производились измерения субъективного состояния тревожности, усилий и утомляемости с помощью экранных визуальных аналоговых шкал NASA Task Load Index (NASA-TLX). Данная аналоговая шкала позволяет оценить умственную нагрузку в течение длительного периода времени.

В статье [18] предлагается модель оценки функционального состояния утомления человека, которая обучается на сигналах ЭКГ, ЭЭГ, вариабельности сердечного ритма (ВСР), полученных с помощью функциональной спектроскопии в ближнем инфракрасном диапазоне (fNIRS).

fNIRS используется для функциональной нейровизуализации. Этот метод обследования доступнее, чем магнитно-резонансная томография (МРТ), и не имеет ограничений по области использования.

Было показано, что утомление можно оценить с помощью физиологической информации, полученной от мозга с помощью электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (fNIRS). Другим показателем, который обычно называют маркером стресса, является вариабельность сердечного ритма (ВСР). Это мера изменений временных интервалов между ударами сердца, контролируемыми автономной нервной системой. Этот показатель использовался для оценки утомления как индивидуально, так и в сочетании с измерениями гальванической реакции кожи, температуры кожи, артериального давления и ЭЭГ.

В статье [19] предложена система мониторинга утомления и сонливости водителя, в которой встроенный датчик ЭКГ, прикрепленный к рулевому колесу, используется для измерения сигналов ЭКГ от водителя. Пара проводящих тканевых электродов обернута вокруг рулевого колеса автомобиля, и оба электрода подключены к встроенному датчику ЭКГ. Предлагаемая система состоит из трех частей: пары проводящих электродов, расположенных на рулевом колесе со встроенным датчиком ЭКГ, беспроводного сенсорного узла и сервера для обработки и мониторинга сигналов. Сигналы ЭКГ, измеренные проводящими электродами, передаются на базовую станцию, которая подключена к серверу.

Анализ изменения сердечного ритма во временной и частотной областях сигналов ЭКГ дает ценную информацию о состоянии водителя, включая состояние нормы, сонливости и утомления. Так, увеличение вариабельности сердечного ритма (ВСР) говорит о наступлении утомления. Одним из существующих неинтрузивных методов измерения ЭКГ-сигнала является измерение индуктивности на кресле водителя. ЭКГ-сигнал может быть измерен с помощью электродов на спинке сиденья водителя. Однако данный метод измерения ЭКГ очень чувствителен к толщине одежды водителя. Для того чтобы преодолеть данные ограничения, пары электродов из проводящей ткани располагают на рулевом колесе для измерения ЭКГ-сигналов.

Этот метод определения утомления не является навязчивым и не доставляет неудобств. Это является важным качеством для человека во время управления автомобилем.

В статье [20] оценивается утомление водителя на основе всплесков альфа-ритмов электроэнцефалографии (ЭЭГ). ЭЭГ была получена от участников эксперимента в монотонной среде вождения.

В ходе эксперимента испытуемый должен был проехать трассу на симуляторе кабины автомобиля в условиях дневного времени (task_0). Базовое время прохождения трассы было получено в нормальном функциональном состоянии. Во втором задании необходимо было сократить время прохождения трассы на 2 % (task_1). Требования третьего задания (task_2) были аналогичны требованиям task_1, но на трассе появлялись другие участники дорожного движения и светофоры, образовывались пробки. Четвертое (task _3) и пятое (task_4) задания были равны task_1 и task_2 соответственно, но в ночное время. При выполнении task_4 добавилось условие, что испытуемый должен был ехать очень осторожно, не превышая скорости 70 (км/ч). В дальнейшем характеристики утомления определялись по данным пиков альфа-ритмов ЭЭГ, определяемых как короткие вспышки в альфа-диапазоне.

Выполнение испытуемыми первых четырех заданий не вызывало заметных всплесков в альфа-ритме, и количество ошибок при вождении было минимальным. При выполнении пятого задания испытуемые начинали совершать гораздо больше ошибок, а в альфа-ритме появлялись всплески, что говорит о наступлении утомления.

На рис. 2 показан пример появления таких всплесков в альфа-ритме ЭЭГ (обведен овалом), возникающих во время монотонного вождения (task_4), в качестве сигнала утомления. Испытуемые после появления таких специфических показателей ЭЭГ съезжали с правильной траектории движения, совершали ошибки при вождении. Основная частота таких пиков ЭЭГ была отмечена у испытуемых над центрально-теменной областью головы.

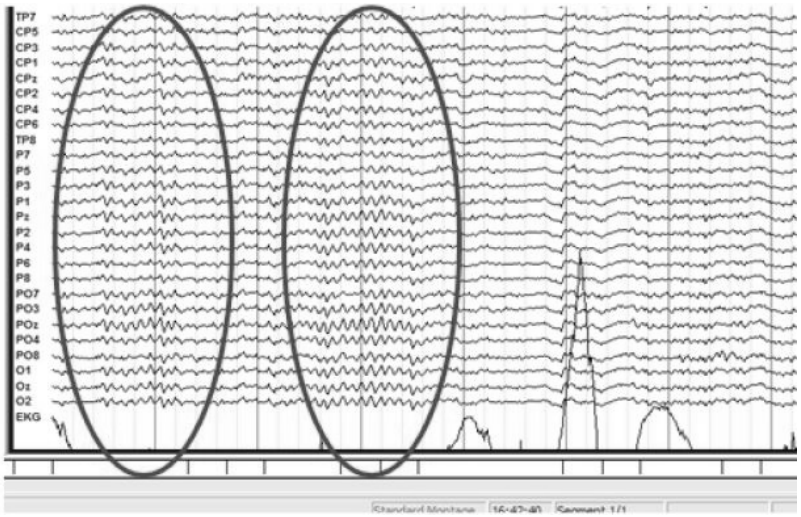


Рис. 2. Всплески альфа-ритма, возникающие при утомлении [20]

Fig. 2. Bursts of alpha rhythm that occur during fatigue [20]

Был сделан вывод, что всплески альфа-диапазона ЭЭГ увеличиваются с утомлением. Результаты показывают, как нейрофизиологические сигналы могут помочь в оценке утомления, а также психического и физического состояния водителя в различных условиях вождения и как они коррелируют с эффективностью вождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К методам, обрабатывающим биологические сигналы, которые могут использоваться в лабораториях и автомобильных симуляторах, относятся такие методы, как электроэнцефалография (ЭЭГ), электрокардиограмма (ЭКГ), вариабельность сердечного ритма (ВСР), частота дыхания, электроокулография (ЭОГ), электромиограмма (ЭМГ), кожно-гальваническая реакция (КГР), электротермическая активность (ЭТА), температура кожи (ТК), аналоговая шкала NASA-TLX, спектроскопия в ближнем инфракрасном диапазоне (fNIRS). Деятельность автономной нервной системы (АНС) изменяется из-за стресса или утомления. ВСР уменьшается при наступлении утомления. Частота дыхания начинает падать с началом сонливости и продолжает падать до наступления сна. Повышенная частота моргания является показателем сонливости. При увеличении мышечной усталости увеличивается сонливость. При уменьшении потоотделения сонливость увеличивается. Температура кожи лба значительно снижается при наступлении сонливости. Появление всплесков в альфа-ритме ЭЭГ свидетельствует о наступлении утомления.

В реальных условиях вождения обнаружение функционального состояния утомления может осуществляться на основе использования современных технологий компьютерного зрения для оценки физических характеристик. Физические особенности – это открытость/закрытость глаз, частота моргания, частота зевания, продолжительность закрытия глаз, процент времени, в течение которого глаза закрыты (PERCLOS), положение головы, направление взгляда, кивание головой, изменение расстояния между веками (ELDC), скорость закрытия глаз (CLOSNO), вращение головы (ROT).

Для определения утомления в автомобиле были разработаны системы, использующие такие методы, как многоблочные локальные бинарные шаблоны MB-LBP, признаки Хаара, алгоритм Виолы–Джонса, метод JEER, нечеткая логика, метод опорных векторов (SVM). В работе представлена таблица соответствия частоты моргания и зевания состоянию утомления со значениями: нормальное состояние, незначительное утомление и сильное утомление.

Сравнение методов анализа утомления водителей по анализируемым данным приведено в табл. 3. В результате сравнения возможностей данных методов оказалось, что более точными являются методы, оценивающие биологические сигналы и использующие интрузивные методы с прикрепляемыми к водителю датчиками. Однако неинтрузивные методы определения функционального состояния утомления на основе анализа изображений не стесняют движения водителя за рулем, при этом позволяя достичь требуемой точности.

Таблица 3

Table 3

Сравнение методов анализа утомления водителей по анализируемым данным

Comparison of methods for analyzing driver fatigue using analyzed data

Проанализированные работы	*Слежение за глазами*	*Определение зевоты*	*Определение положения головы*	*Частота сердечных сокращений*	*Вариабельность сердечного ритма*	*Электрическая активность мозга*	*Частота дыхания*	*Температура тела*	*Электромиограмма (ЭМГ)*	*Кожно-гальваническая реакция (КГР)*	*Спектроскопия в ближнем инфра-красном диапазоне (fNIRS)*	*Детектирование сонливости*	*Детектирование утомления*
[11]	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+
[12]	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	+	+	+
[13]	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+
[14]	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
[15]	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+
[16]	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
[17]	–	–	–	+	+	+	–	–	–	–	–	+	+
[18]	–	–	–	+	+	+	–	–	–	–	–	+	+
[19]	–	–	–	+	+	–	–	–	–	–	–	+	+
[20]	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	+	+

Таким образом можно сделать вывод, что на сегодняшний день не существует системы, охватывающей весь спектр проанализированных параметров. Разработка подобных систем является в настоящее время актуальной и востребованной задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peruzzini M., Tonietti M., Iani C.* Transdisciplinary design approach based on driver's workload monitoring // Journal of Industrial Information Integration. – 2019. – Vol. 15, N 2. – P. 91–102.

2. *Wang F., Wua S., Zhanga W.* Multiple nonlinear features fusion based driving fatigue detection // Biomedical Signal Processing and Control. – 2020. – Vol. 62, N 3. – P. 67–78.

3. *Barot N.* Optimal sleep habits in middle-aged adults // Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology. – 2020. – Vol. 30, N 1. – P. 213–233.

4. *Reynolds C., Coussens S.* Sleep spindles in adolescence: a comparison across sleep restriction and sleep extension // Sleep Medicine. – 2018. – Vol. 50, N 1. – P. 166–174.

5. *Li F., Chen C., Zheng P.* An explorative context-aware machine learning approach to reducing human fatigue risk of traffic control operators // Safety Science. – 2018. – Vol. 125, N 1. – P. 378–391.

6. *Robertson C., Marino F.* Cerebral responses to exercise and the influence of heat stress in human fatigue // Journal of Thermal Biology. – 2017. – Vol. 63, N 1. – P. 10–15.

7. *Sikander G., Anwar S.* Driver fatigue detection systems: a review // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2019. – Vol. 20, N 4. – P. 2339–2351.

8. *Elamrani Z., Mousannif H., Moatassime H.* The application of machine learning techniques for driving behavior analysis: a conceptual framework and a systematic literature review // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2020. – Vol. 87, N 5. – P. 336–352.

9. *Chhabra R., Verma S., Krishna C.* A survey on driver behavior detection techniques for intelligent transportation systems // Proceedings of the 7th International Conference Confluence 2017 on Cloud Computing, Data Science and Engineering. – India, 2017. – P. 36–41.

10. *Khan M., Lee S.* A comprehensive survey of driving monitoring and assistance systems // 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP). – Bangladesh, 2020. – P. 125–159.

11. *Лашков И.Б.* Анализ поведения водителя при управлении транспортным средством с использованием фронтальной камеры смартфона // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 4. – С. 7–17.

12. *Cyganek B., Gruszczynski S.* Hybrid computer vision system for drivers' eye recognition and fatigue monitoring // Neurocomputing. – 2014. – Vol. 126, N 3. – P. 78–94.

13. *Meshram P., Auti N., Agrawal H.* Monitoring driver head postures to control risks of accidents // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 50. – P. 617–622.

14. *Sigari M., Fathy M., Soryani M.* A driver face monitoring system for fatigue and distraction detection // International Journal of Vehicular Technology. – 2016. – Vol. 64, N 1. – P. 946–960.

15. *Mandal B., Li L., Wang G.* Towards detection of bus driver fatigue based on robust visual analysis of eye state // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2017. – Vol. 18, N 3. – P. 545–557.

16. *Liu Z., Peng Y., Hu W.* Driver fatigue detection based on deeply-learned facial expression representation // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2020. – Vol. 71, N 1. – P. 452–461.

17. *Wang R., Zhang J., Zhang Y.* Assessment of human operator functional state using a novel differential evolution optimization based adaptive fuzzy model // Biomedical Signal Processing and Control. – 2015. – Vol. 7, N 2. – P. 490–498.

18. *Hakimi N., Jodeiri A., Mirbagheri M.* Proposing a convolutional neural network for stress assessment by means of derived heart rate from functional near infrared spectroscopy // Computers in Biology and Medicine. – 2020. – Vol. 121, N 1. – P. 618–629.

19. *Jung S., Shin H., Chung W.* Driver fatigue and drowsiness monitoring system with embedded electrocardiogram sensor on steering wheel // IET Intelligent Transport Systems. – 2016. – Vol. 8, N 1. – P. 43–50.

20. *Borghini G.* Assessment of mental fatigue during car driving by using high resolution eeg activity and neurophysiologic indices // Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – San Diego, 2016. – P. 6442–6445.

Алексей Кашевник, старший научный сотрудник лаборатории автоматизированных интегрированных систем Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ФИЦ РАН) (2003) и доцент Международной лаборатории интеллектуальных технологий социально-киберфизических систем Университета ИТМО, Санкт-Петербург (с 2014 г.). Его научные интересы включают интеллектуальные транспортные системы, взаимодействие человека и компьютера, помощь водителю, системы мониторинга водителя, обнаружение отвлекающих факторов, обнаружение сонливости, искусственный интеллект, нейронные сети, компьютерное зрение. Опубликовал более 200 научных работ в рецензируемых международных журналах, трудах международных конференций и книгах. E-mail: alexey.kashevnik@iias.spb.su

Булыгин Александр Олегович, младший научный сотрудник, аспирант Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН). Основное направление научных исследований – глубокое обучение, компьютерное зрение, распознавание образов. E-mail: alexandr_bulygin@mail.ru

Kashevnik Alexey M., senior researcher in the Computer-Aided Integrated Systems Laboratory at St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS) (2003) and associate professor in the International Laboratory on Intelligent Technologies for Socio-Cyberphysical Systems, ITMO University, St. Petersburg (from 2014). His research interests include intelligent transportation systems, human-computer interaction, driver assistant, driver monitoring systems, distraction detection, drowsiness detection, artificial intelligence, neural networks, computer vision. He has published more than 200 research papers in peer-reviewed international journals, proceedings of international conferences, and books. E-mail: alexey.kashevnik@iias.spb.su

Bulygin Alexandr O., junior researcher, postgraduate student, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). His research interests are currently focused on deep learning, computer vision, pattern recognition. E-mail: alexandr_bulygin@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-19-36

Analysis of current research in the field of detecting driver fatigue in the vehicle cab *

A.O. BULYGIN[a], *A.M. KASHEVNIK*[b]

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), 4th line V.I., Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

[a] *alexandr_bulygin@mail.ru* [b] *alexey.kashevnik@iias.spb.su*

Abstract

The article analyzes the methods of detecting driver fatigue which are described in modern literature. There are a great variety of methods for assessing the functional state of a person.

A functional state is an integral set of characteristics of those functions and qualities of a person that directly or indirectly determine the performance of any activity. The physical and mental state of a person, the success of his work, training, creativity depends on the functional state of the organism.

The assessment of dynamic driver behavior has become an increasingly popular area of research in recent years. Dynamic assessment of driver behavior includes continuous monitoring that allows you to determine functional states, in contrast to modern driver monitoring systems, which assess conditions such as drowsiness and impaired attention for a short (1-10 s) time interval. Such systems allow us to talk about physiological, but not neurophysiological monitoring, which allows monitoring the functional state of fatigue.

Therefore, it makes sense to monitor the driver's state of fatigue of, as well as to warn them in a timely manner to avoid collisions with other vehicles.

In the article, a study was carried out and an analysis of the ways to obtain the appropriate characteristics from a person, with the help of which it is possible to determine his functional state of fatigue. As a result of the analysis of the sources, the most common methods for determining the functional state of the driver were selected. Further, the sources found were classified according to the most common methods for obtaining significant characteristics of the

* *Received 15 March 2021.*

The presented research results are part of the scientific project No. 19-29-06099 (2019–2021), funded by the Russian Foundation for Basic Research. The evaluation of the algorithm was carried out within the framework of the budget theme No. 0073-2019-0005 (2019–2021).

functional state of the driver. As a result, a comparative analysis was made, demonstrating the capabilities of modern systems of this class.

Keywords: artificial intelligence, computer vision, pattern recognition, face recognition, neural networks, machine learning, deep learning, functional state

REFERENCES

1. Peruzzini M., Tonietti M., Iani C. Transdisciplinary design approach based on driver's workload monitoring. *Journal of Industrial Information Integration*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 91–102.

2. Wang F., Wua S., Zhanga W. Multiple nonlinear features fusion based driving fatigue detection. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2020, vol. 62, no. 3, pp. 67–78.

3. Barot N. Optimal sleep habits in middle-aged adults. *Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology*, 2020, vol. 30, no. 1, pp. 213–233.

4. Reynolds C., Coussens S. Sleep spindles in adolescence: a comparison across sleep restriction and sleep extension. *Sleep Medicine*, 2018, vol. 50, no. 1, pp. 166–174.

5. Li F., Chen C., Zheng P. An explorative context-aware machine learning approach to reducing human fatigue risk of traffic control operators. *Safety Science*, 2018, vol. 125, no. 1, pp. 378–391.

6. Robertson C., Marino F. Cerebral responses to exercise and the influence of heat stress in human fatigue. *Journal of Thermal Biology*, 2017, vol. 63, no. 1, pp. 10–15.

7. Sikander G., Anwar S. Driver fatigue detection systems: a review. IEEE *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 2339–2351.

8. Elamrani Z., Mousannif H., Moatassime H. The application of machine learning techniques for driving behavior analysis: a conceptual framework and a systematic literature review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, vol. 87, no. 5, pp. 336–352.

9. Chhabra R., Verma S., Krishna C. A survey on driver behavior detection techniques for intelligent transportation systems. *Proceedings of the 7th International Conference Confluence 2017 on Cloud Computing, Data Science and Engineering*, India, 2017, pp. 36–41.

10. Khan M., Lee S. A comprehensive survey of driving monitoring and assistance systems. *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, Bangladesh, 2020, pp. 125–159.

11. Lashkov I.B. Analiz povedeniya voditelya pri upravlenii transportnym sredstvom s ispol'zovaniem frontal'noi kamery smartfona [Driver’s behavior analysis with smartphone front camera]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2017, no. 4, pp. 7–17.

12. Cyganek B., Gruszczynski S. Hybrid computer vision system for drivers' eye recognition and fatigue monitoring. *Neurocomputing*, 2014, vol. 126, no. 3, pp. 78–94.

13. Meshram P., Auti N., Agrawal H. Monitoring driver head postures to control risks of accidents. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 50, pp. 617–622.

14. Sigari M., Fathy M., Soryani M. A driver face monitoring system for fatigue and distraction detection. *International Journal of Vehicular Technology*, 2016, vol. 64, no. 1, pp. 946–960.

15. Mandal B., Li L., Wang G. Towards detection of bus driver fatigue based on robust visual analysis of eye state. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 545–557.

16. Liu Z., Peng Y., Hu W. Driver fatigue detection based on deeply-learned facial expression representation. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2020, vol. 71, no. 1, pp. 452–461.

17. Wang R., Zhang J., Zhang Y. Assessment of human operator functional state using a novel differential evolution optimization based adaptive fuzzy model. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 490–498.

18. Hakimi N., Jodeiri A., Mirbagheri M. Proposing a convolutional neural network for stress assessment by means of derived heart rate from functional near infrared spectroscopy. *Computers in Biology and Medicine*, 2020, vol. 121, no. 1, pp. 618–629.

19. Jung S., Shin H., Chung W. Driver fatigue and drowsiness monitoring system with embedded electrocardiogram sensor on steering wheel. *IET Intelligent Transport Systems*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 43–50.

20. Borghini G. Assessment of mental fatigue during car driving by using high resolution eeg activity and neurophysiologic indices. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, San Diego, 2016, pp. 6442–6445.

Для цитирования:

Булыгин А.О., Кашевник А.М. Анализ современных исследований в области детектирования утомления водителя в кабине транспортного средства // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 3 (83). – С. 19–36. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-19-36.

For citation:

Bulygin A.O., Kashevnik A.M. Analiz sovremennykh issledovanii v oblasti detektirovaniya utomleniya voditelya v kabine transportnogo sredstva [Analysis of current research in the field of detecting driver fatigue in the vehicle cab]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 19–36. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-19-36.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 83, № 3, 2021, с. 37–52

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 83, No. 3, 2021, pp. 37–52

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.852 + 004.492.3 DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-37-52

Технология идентификации ключевых особенностей в последовательностях API-вызовов вредоносных программ*

В.В. ВОРОНИН[a], А.В. МОРОЗОВ[b]

680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, Тихоокеанский государственный университет

[a] *004183vvv@mail.ru* [b] *2014102127@pnu.edu.ru*

Сегодня с компьютерной безопасностью так или иначе сталкивается практически каждый. Для обеспечения контроля угроз безопасности вредоносного программного обеспечения (ПО) используют антивирусные программы.

Обычные способы обнаружения вредоносного ПО уже недостаточно эффективны, в настоящее время для этих целей стали применять нейронные сети и технологию поведенческого анализа. Анализ поведения программ – сложная задача, так как не существует четкой последовательности действий, исполнив которые можно точно идентифицировать программу как вредоносную. Кроме того, такие программы используют меры противодействия подобному обнаружению, например, зашумление последовательности своей работы бессмысленными действиями. Существует также проблема однозначной идентификации класса вредоносного ПО вследствие того, что вредоносные программы могут использовать схожие методы и при этом относиться к разным классам. В таком случае принадлежность вредоносных программ можно фиксировать, используя комплексные методы. В настоящей работе предлагается использовать методы NLP, такие как word embedding, и LDA применительно к задачам анализа последовательностей API вызовов вредоносного ПО с целью установления наличия семантических зависимостей и оценки эффективности применения данных методов.

Полученные результаты свидетельствуют о реальной возможности выделения ключевых особенностей поведения вредоносных программ. Применение этих особенностей в тексте работы для сканирования вредоносного программного обеспечения помогает обнаружить, например, попытки зашумления API-последовательностей, что само по себе может говорить о попытке сокрытия вредоносных целей исполнения программы или дать возможность выполнить классификацию вредоносных программ с использованием взаимозависимых совокупностей отдельных частей последовательности. Применяемая в настоящей работе технология в перспективе позволит существенно улучшить технологию обнаружения и идентификации вредоносных программ.

* *Статья получена 05 февраля 2021 г.*

Ключевые слова: векторное представление слов, обработка естественного языка, API-вызовы, вредоносное ПО, латентное размещение Дирихле, *n*-граммы, тематическое моделирование, кластеризация

ВВЕДЕНИЕ

Обработка API-последовательностей по ряду причин имеет сложный характер. Обработать или даже проанализировать последовательность вручную достаточно сложно, в лучшем случае такая последовательность будет содержать сотни вызовов, а иногда – сотни тысяч. Зачастую последовательность содержат от 2 до 10 тысяч вызовов. Кроме того, самих типов вызовов достаточно много, только часто используемых более 400. В случае когда речь идет о последовательностях API-вызовов вредоносного ПО, часто можно говорить еще и о целенаправленном зашумлении таких последовательностей лишними, не несущими нагрузки вызовами для затруднения их анализа. Проанализировать такие последовательности вручную крайне затруднительно, найти зависимость между тысячами таких последовательностей еще сложнее. Однако для такой задачи хорошо подходит машинное обучение [1].

Применение машинного обучения для анализа API-последовательностей не новая идея, в том или ином виде такая обработка уже применялась, давая хороший результат. Однако при усложнении зашумления и в некоторых других случаях эти методы оказываются неэффективны. Например, обнаружение возможно, а верная классификация оказывается затруднительна. Кроме того, в ходе дальнейшего развития вредоносного ПО эффективность чистого анализа последовательностей будет падать, так как могут меняться механизмы его функционирования.

Конечной целью применения NLP (Natural Language Processing) для обработки API-последовательностей является обнаружение локальных целей и механизмов работы анализируемой программы, а также последующий анализ совокупностей их взаимодействия. Кроме того, такой анализ направлен и на выявление механизмов зашумления или попыток зашумления. Это позволит улучшить работу сканера вредоносного ПО, выявить и предсказать отдельные механизмы функционирования такого ПО и, как следствие, усложнить попытки обхода сканера.

В настоящей статье предлагается оригинальное использование методов NLP для обработки последовательностей API-вызовов вредоносных программ. В технологию обработки этих последовательностей включены семантический анализ [2, 3], векторизация отдельных API-вызовов, поиск и отсев н-грамм, а также методика LDA (Latent Dirichlet Allocation) для тематического моделирования и кластеризации результатов обработки на разных этапах.

Основная задача настоящей работы – обоснование реальной возможности использования методов семантического анализа текста основанных на вложениях для обработки последовательностей API-вызовов на примере решения проблем, обнаруженных в работе [1].

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА API-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

В статье исследуются API-последовательности вредоносных программ, организованные в виде двух наборов данных, которые открыто распространяются в Интернете. Эти наборы данных объединены в один набор большего размера, насчитывающий до обработки более 13 000 образцов. Аналогичные наборы данных были использованы в работе [1].

Набор данных – это собранные при помощи специального программного обеспечения (например, Cuckoo Sandbox) последовательности API-вызовов различных программ, которые представляют собой строки различной длины, хранящие API-вызовы в той последовательности, в которой они были вызваны анализируемой программой. Дополнительно к каждой последовательности имеется обозначение принадлежности программы.

Для эффективной работы алгоритмов обработки текста необходима предварительная обработка текстовых последовательностей [4]. В задаче анализа последовательностей API-вызовов предварительная обработка также необходима.

В качестве предварительной обработки последовательностей API-вызовов были предложены и реализованы следующие два этапа.

1. Из анализируемых последовательностей исключаются многократно повторяющиеся подряд API-вызовы. Такие вызовы не несут дополнительной полезной информации и засоряют обрабатываемую последовательность.

2. После этапа 1 исключаются последовательности менее 500 и более 5000 вызовов.

2. АНАЛИЗ API-ВЫЗОВОВ

Для эффективной обработки последовательностей API-вызовов необходимо выполнять компоновку таких вызовов в группу по определенному признаку. Процесс такой компоновки сложен. Кроме того, возможно выполнить компоновку на основе различных признаков, получив отличные друг от друга варианты группировки. В случае обработки API-вызовов это является проблемой, так как различные варианты группировки могут оказать значительное влияние на точность работы и скорость обучения нейронной сети [1]. Однако ручная группировка по принципу функционирования того или иного вызова исходя из документации для каждого из этих вызовов может на деле быть неэффективной или вообще не отражать сути применения таких вызовов в программах.

Для выявления схожести и последующей группировки предложен другой метод, а именно: предлагается использовать вложения (embeddings) и способ представления семантической близости [5, 6]. Так, каждому слову или в данному случае API-вызову ставится в соответствие вектор, обозначающий его смысловое положение относительно других слов пространства, обозначенного данными вектором. Для вычисления сходства двух векторов используется коэффициент Отиаи (геометрический коэффициент) [7].

Для таких векторов обычно используется большое количество измерений, так как зачастую для описания множества свойств определенного слова может потребоваться много различных характеристик. Однако зачастую

невозможно точно установить необходимое количество измерений для смысловых векторов. Особенно в данном случае, так как область применения используемых методов имеет не совсем обычный характер.

Далее приведены результаты экспериментальных исследований векторов API-вызовов в различных ситуациях.

Оттенком обозначена степень близости значения ячейки к единице, знак плюс внутри ячейки обозначает положительное ее значение, знак минус – отрицательное значение ячейки. Чем ближе ячейки по оттенку и знаку, тем более схожи векторы в отношении этого свойства.

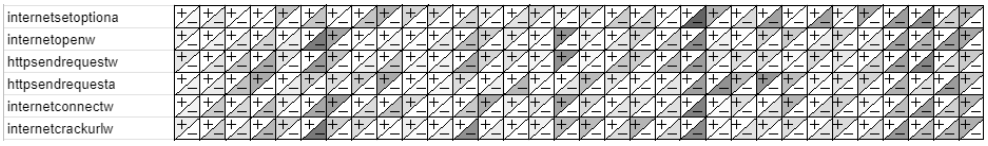


Рис. 1. Векторы API-вызовов для взаимодействия с сетью

Fig. 1. API vectors for interacting with the network

Через некоторые из столбцов для части из вызовов проходит линия из совпадающих по оттенку и знаку ячеек, это означает их близость по этим параметрам, однако точное значение этих параметров неизвестно. Кроме того, правая часть изображения имеет схожий вид, что также означает близость смыслового значения этих вызовов в определенной области.

На рис. 2 изображены API-вызовы, сгруппированные по параметру близости к API-вызову Ntopenkey. Деление происходит на две группы: наиболее близкие и наиболее удаленные по отношению к Ntopenkey.

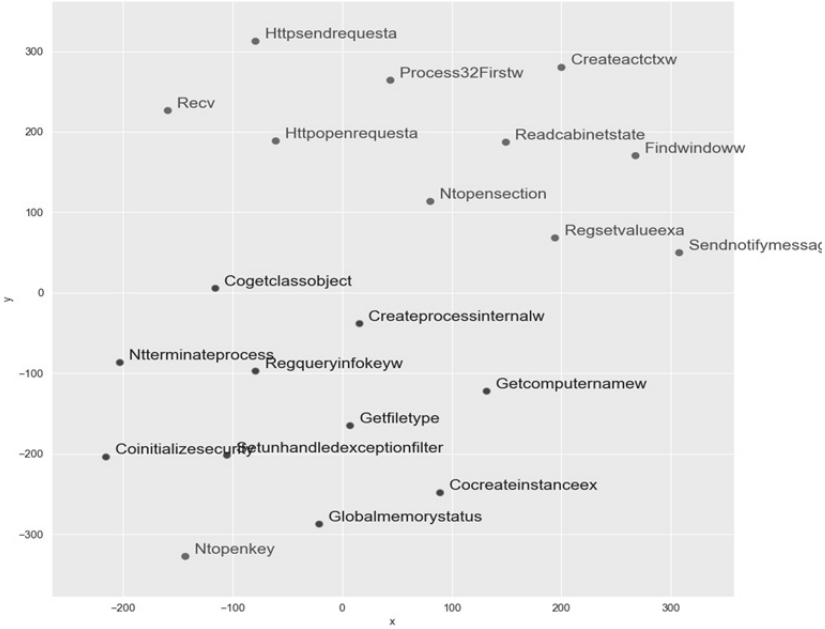


Рис. 2. API-вызовы, сгруппированные относительно Ntopenkey

Fig. 2. API calls grouped relative to Ntopenkey

В [8] авторами получены и проанализированы результаты кластеризации API-вызовов с применением технологии t-SNE, сформированные вокруг группы API-вызовов *ntfreevirtualmemory, findwindowa, shutdown* и *setfileattributesw.*

В настоящей статье для отображения *n*-мерного пространства векторов на двухмерное пространство с целью снижения размерности использован t-SNE – стохастическое вложение соседей с *t*-распределением [9, 10] с параметром perplexity, равным 45.

Кроме крупных групп, близких к определенным вызовам, можно также видеть и меньшие (например, такие как на рис. 3) группы, близость для одной из них также можно наблюдать на рис. 1.

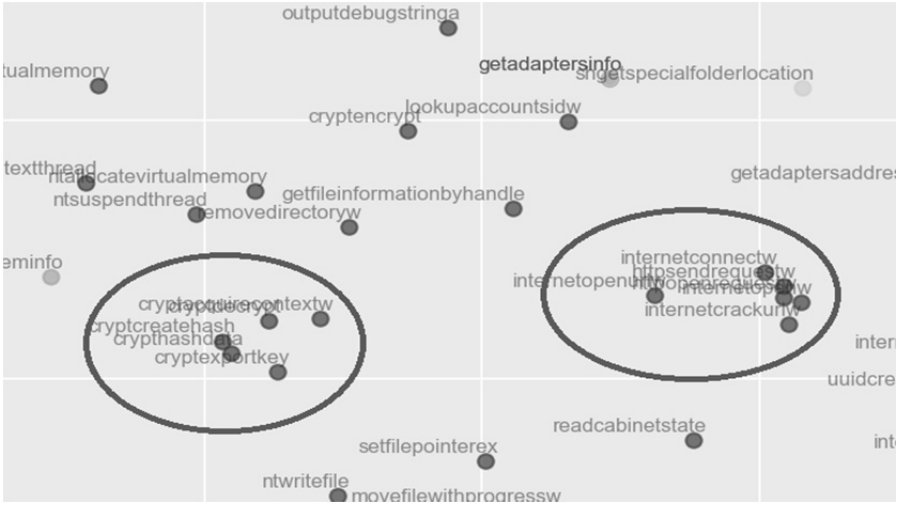


Рис. 3. Кластеры API-вызовов

Fig. 3. API call clusters

Область применения приведенных на рис. 3 API-вызовов достаточно компактна, и это отражено в полученных представлениях, однако в некоторых особых случаях компактно отображаются и слабо связанные по описанию вызовы. Причины такого неожиданного поведения еще предстоит выяснить.

3. ПОИСК УСТОЙЧИВЫХ СОЧЕТАНИЙ API-ВЫЗОВОВ

Помимо важности единичного значения каждого конкретного API-вызова, их совокупности могут нести значительное количество информации о протекающем процессе.

В общем случае при выделении из текста всех возможных значений пар и троек можно получить биграммы, триграммы и далее *n*-граммы соответственно [11]. Однако большая часть таких значений не будет иметь никакого смысла, так как они могут встречаться лишь однажды или случайным образом. В таком случае имеет смысл выделять устойчивые словосочетания, такие словосочетания называются коллокациями [12–14]. Обнаружение таких значений позволит решать сразу две задачи. Во-первых, обнаруживать значения,

относящиеся непосредственно к работе вредоносной нагрузки, и обнаруживать попытки зашумления последовательности в случае, если для такого зашумления API-вызовы слабо рандомизированы или имеют неслучайный характер. Кроме того, возможно обнаружение последовательностей, принадлежащих определенному классу вредоносного ПО с большей вероятностью, чем к другому, или часто встречающихся во вредоносных программах определенного типа.

После выполнения первоначального поиска *n*-грамм, результат которого изображен на рис. 4, было выявлено, что часть обнаруженных *n*-грамм может часто встречаться в последовательностях, однако количество таких последовательностей по отношению к общей выборке достаточно мало. На рис. 4 биграммы показаны на оси ординат, а на оси абсцисс отмечено количество вхождений этих биграмм в API-последовательности.

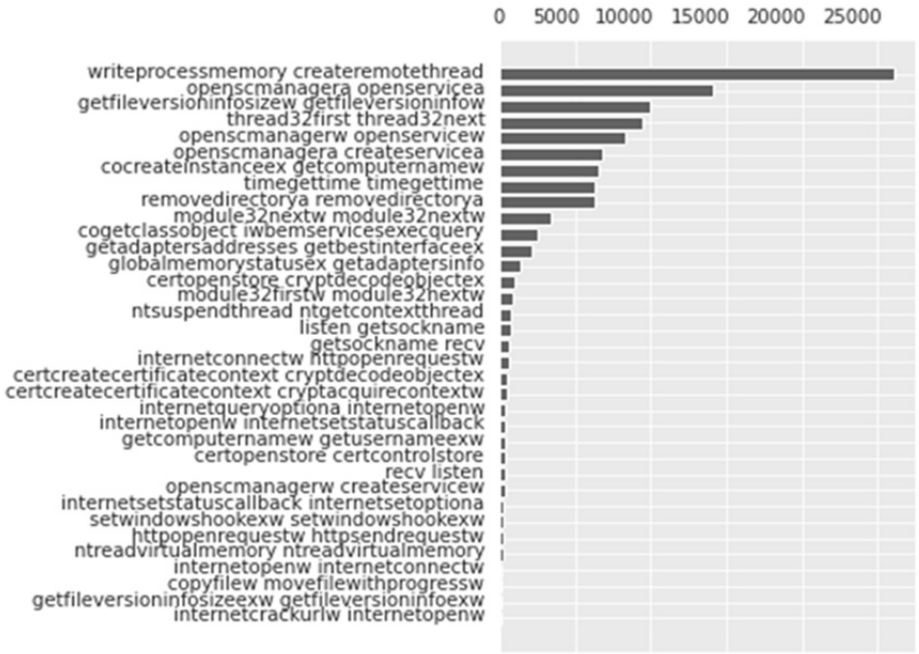


Рис. 4. Биграммы, выделенные из API-последовательностей

Fig. 4. Bigrams extracted from the API sequence

Так, в левой части рис. 5 для диаграммы, соответствующей биграмме *writeprocessmemory createremotethread*, было обнаружено 26 139 вхождений для 333 образцов. Для диаграммы в правой части рис. 5 было обнаружено 12 260 вхождений для 56 образцов. На данной диаграмме отображены: ось *x* в процентах от общего количества образцов данного типа, ось *y* – образцы данного типа. В этих и подобных им случаях такие биграммы представляли собой много раз повторяющуюся последовательность API-вызовов, соответствующих биграмме.

Такое поведение мешает обнаруживать биграммы, соответствующие реальным действиям, и, вероятно, представляет собой попытки зашумления процесса исполнения программы. Поэтому подобные *n*-граммы исключены

из последовательностей, и процесс поиска *n*-грамм был повторен снова, его результаты представлены на рис. 6, где на оси абсцисс показано количество вхождений *n*-грамм в последовательности, а на оси ординат – сама биграмма.

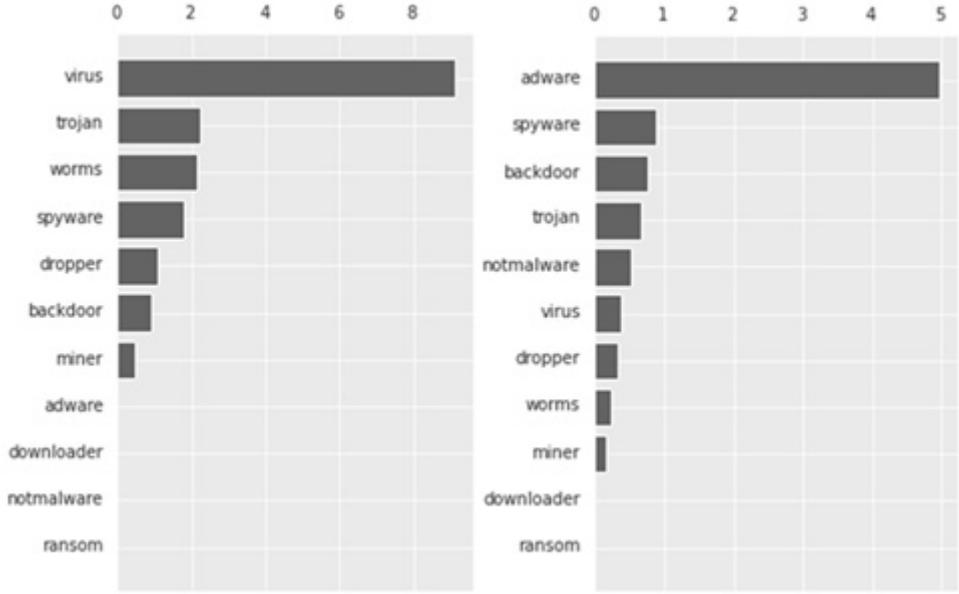


Рис. 5. Распределение биграмм writeprocessmemory createremotethread (слева) и timegettime timegettime (справа) по типам последовательностей

Fig. 5. Distribution of bigrams writeprocessmemory createremotethread (left) and timegettime timegettime (right) by sequence types

Аналогичные действия выполнены для последовательностей из трех и четырех вызовов.

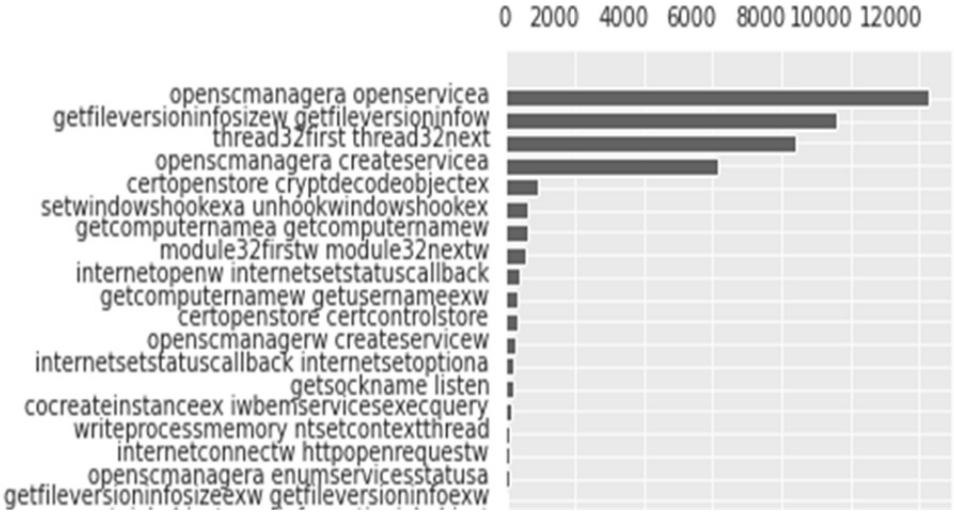


Рис. 6. Выделенные биграммы после очистки данных

Fig. 6. Dedicated bigrams after data clearing

На рис. 7 и 8 приведены частоты вхождения биграмм (ось ординат) в API-последовательностях определенного типа в процентах от общего количества (ось абсцисс).

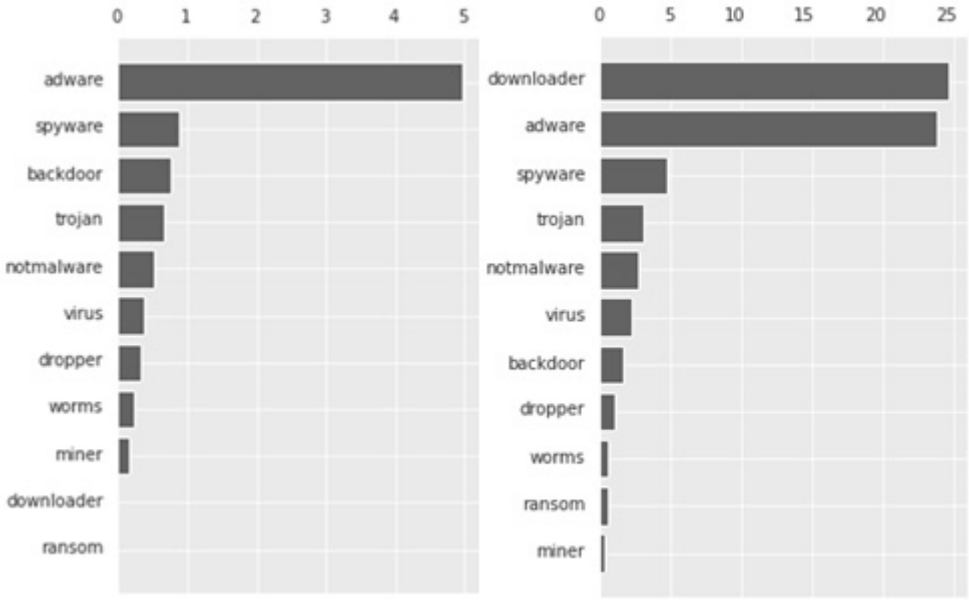


Рис. 7. Частота вхождения биграмм openscmanagera createservicea (слева) и internetopenw internetsetstatuscallback (справа)

Fig. 7. Frequency of occurrence of bigrams openscmanagera createservicea (left) and internetopenw internetsetstatuscallback (right)

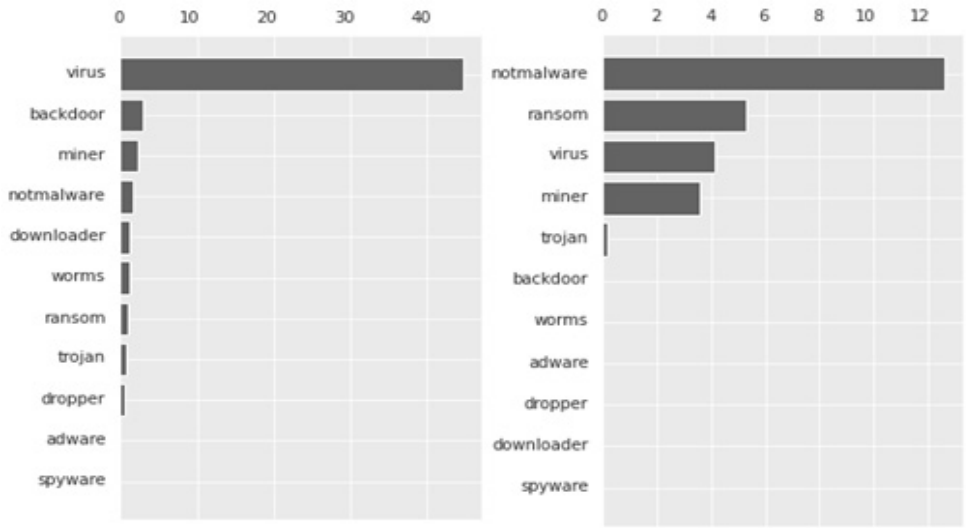


Рис. 8. Частота вхождения биграмм thread32first thread32next (слева) и getcomputernamea getcomputernamew (справа)

Fig. 8. Frequency of occurrence of bigrams thread32first thread32next (left) and getcomputernamea getcomputernamew (right)

Выделенные *n*-граммы включены в исходный текст последовательностей, для этого выполнена замена соответствующих последовательностей на их *n*-граммы.

В дальнейших исследованиях преобразованные совокупности воспринимаются как отдельные фразы, и они не рассматриваются в тексте по отдельности, при этом каждое слово, включенное в *n*-граммы, но находящееся в тексте отдельно от своей *n*-граммы, не будет заменено или удалено.

Далее по технологии проводится повторная кластеризация с учетом полученных *n*-грамм. Результат повторной кластеризации представлен на рис. 9.

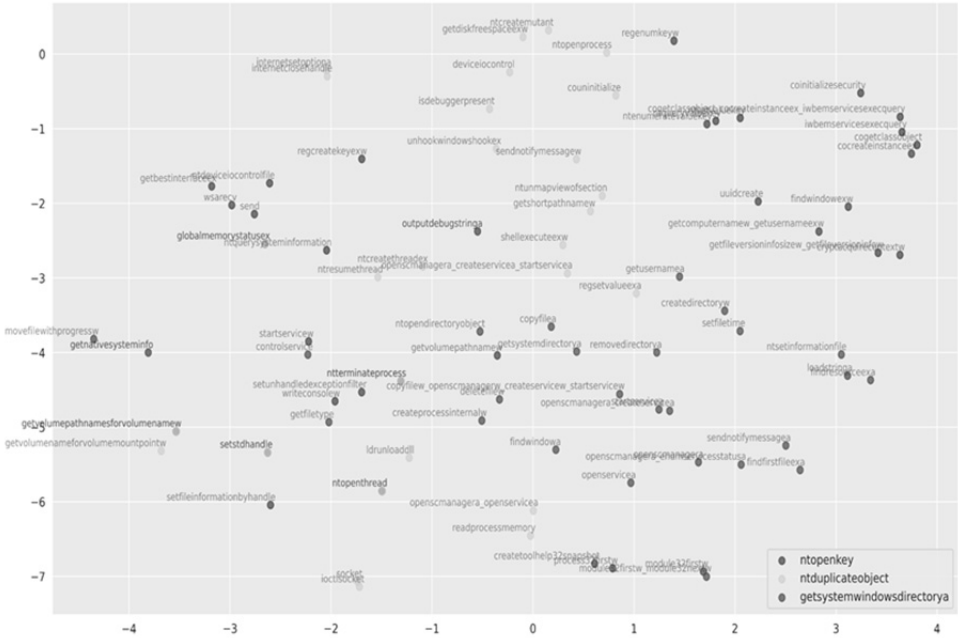


Рис. 9. Кластеризация отдельных API- вызовов с учетом *n*-грамм

Fig. 9. Clustering individual API calls based on *n*-grams

После выделения *n*-грамм в API-последовательностях появилась возможность выделения дополнительных кластеров, содержащих *n*-граммы, и рассмотрения их близости к отдельным API-вызовам. Кроме того, при добавлении API-вызовов оказывается возможным исследовать поведение значимых фрагментов последовательностей в контексте их групп.

4. ТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ API-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Кроме группирования отдельных слов, методы обработки текстов позволяют группировать последовательности и извлекать из них темы [15]. Для обнаружения тем авторы статьи предлагают использовать алгоритм LDA (Latent Dirichlet Allocation) [16, 17].

В результате применения данного алгоритма в тексте API-последовательности обнаруживается заданное количество тем, и каждый документ (последовательность) можно интерпретировать как совокупность этих тем. Кроме того, для каждой темы выделяются ключевые слова этой темы, а также вес каждого слова в теме.

Для определения эффективного количества тем данного набора текстов выполняется циклическое создание моделей, подсчет когерентности для выбранной модели, сохранение модели и последующий выбор количества тем на основе максимального значения когерентности среди проверенных моделей. На рис. 10 приведены значения когерентности для используемого набора данных при проверке значения когерентности в пределах от двух до девяти.

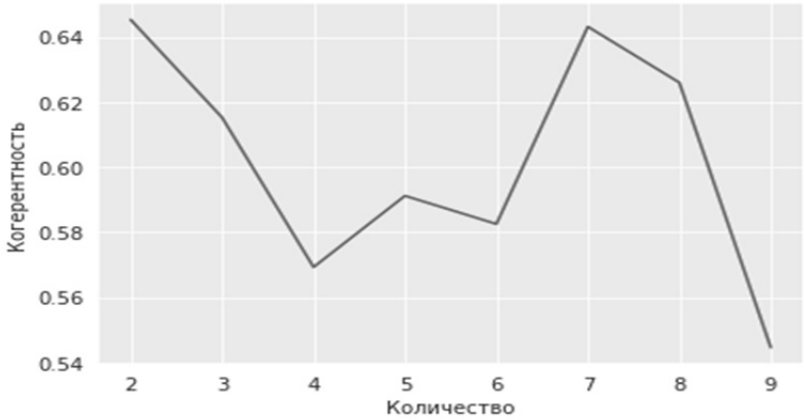


Рис. 10. Когерентность в зависимости от количества тем

Fig. 10. Coherence depending on the number of topics

Полученные результаты проанализированы и представлены на рис. 10. Эффективное количество тем равно семи (ось *x*). Выбор осуществлен на основании максимального значения когерентности (ось *y*).

Ниже для выбранной модели приведены первые 5 слов, каждое из которых представляет собой API-вызов, выделенный из последовательностей и имеющий большее влияние в рамках данной темы. Они расположены в порядке убывания степени значимости слова для этой темы:

1) ntwritefile, ntreadfile, ntfreevirtualmemory, ntallocatevirtualmemory, ldrgetprocedureaddress;

2) getfileattributesw, getsystemmetrics, getcursorpos, getkeystate, loadresource;

3) ntqueryvaluekey, ntopenkeyex, ntquerykey, ntopenkey, ldrgetprocedureaddress, ntreadfile;

4) ntquerydirectoryfile, findfirstfileexw, ntopenmutant, ntdeviceiocontrolfile, getshortpathnamew;

5) getfiletype, ntopenprocess, ntcreatefile, ldrloaddll, ntduplicateobject;

6) findfirstfileexw, regclosekey, getfileattributesw, regopenkeyexw, regqueryvalueexw;

7) regclosekey, regopenkeyexw, regqueryvalueexw, ldrgetprocedureaddress, ldrloaddll.

Каждый API-вызов и его положение относительно других в рамках данной темы имеет важное значение, так как в значительной степени определяет содержание темы.

Однако текст зачастую не имеет однозначной принадлежности к определенной теме, в них может присутствовать несколько тем в том или ином объеме. Пример подобной ситуации приведен в таблице.

Темы для различных образцов

Topics for various samples

Номер образца	Основная тема	Все темы с процентным вкладом
1	6	1 – 44 %; 6 – 52 %; 7 – 3 %
7	7	3 – 1 %; 5 – 5 %; 7 – 93 %
9	4	1 – 7 %; 2 – 16 %; 4 – 69 %; 5 – 4 %; 6 – 2 %

В данном случае в API-последовательности возможно наличие как одной основной группы ключевых слов, которая позволяет определить ее принадлежность (строка 2 таблицы), так и нескольких групп, степень воздействия которых на общую тему последовательности имеет схожий характер (строка 1). Кроме того, возможны случаи, когда последовательность имеет множество тем, каждая из которых влияет на ее глобальное значение (строка 3).

Следующий результат тематического моделирования представлен на рис. 11. Здесь приведено количество образцов (ось *y*), в которых тема под определенным номером (ось *x*) является основной, т. е. имеет больший вклад для данного образца. Общие данные по количеству вхождений определенной темы среди образцов представлены на рис. 12.

Рис. 11. Количество вхождений основной темы в образцах

Fig. 11. Number of occurrences of the main theme in samples

Рис. 12. Количество образцов, содержащих тему

Fig. 12. Number of samples containing a topic

Заключительный результат тематического моделирования представлен на рис. 13. Здесь иллюстрируется кластеризация по полученным темам. Данные образцов, в которых часть тем отсутствует, дополнены до соответствующей размерности.

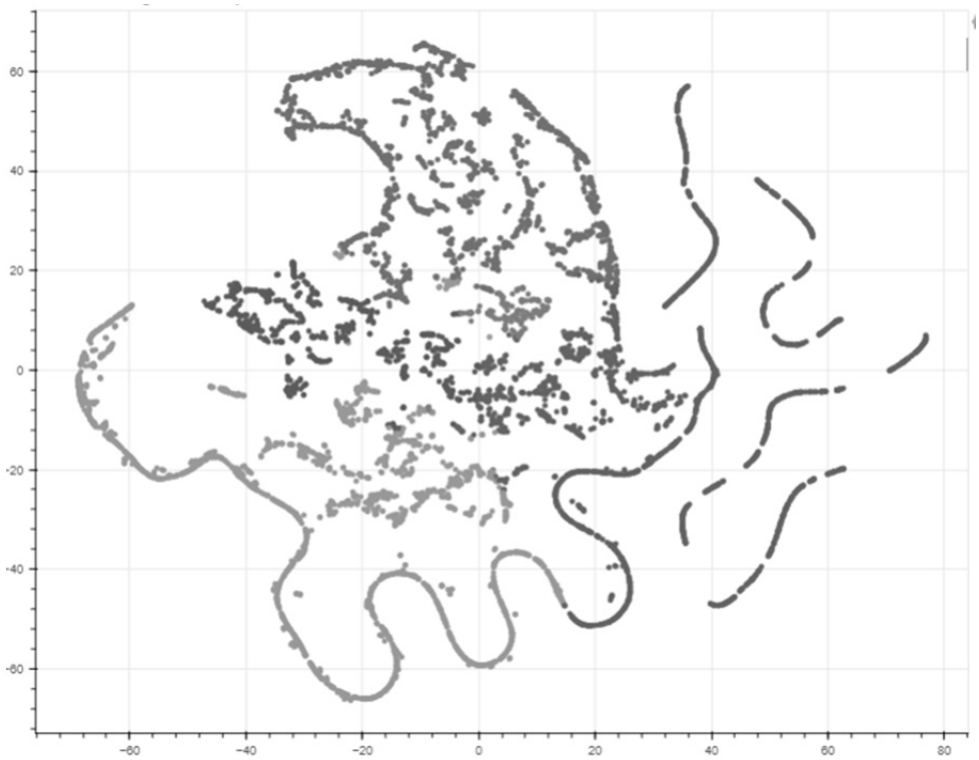


Рис. 13. Кластеризация полученных тем

Fig. 13. Clustering of received topics

В ходе кластеризации по темам сформированы кластеры на основе влияния выделенных тем. Такая обработка необходима и может дать больше информации о полученном результате тематического анализа, чем простое выделение главной темы. Причина этому факту – близость некоторых результатов (например, в строке 1 таблицы, где влияние тем имеет близкое значение). Кластеризация, показанная на рис. 13, говорит о группировании результата выделения тем из образцов. Такие группы формируются исходя из наличия множеств образцов, включающих в себя схожие комбинации выделенных тем. А это может говорить, например, о принадлежности к определенному семейству программ или использовании схожих механизмов работы. Более детальный анализ сгруппированных последовательностей позволит в будущем уточнить информацию о их содержании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные при применении методов NLP к задаче анализа данных API-вызовов, позволяют фиксировать дополнительные данные о семантической связи между различными API-вызовами, а это является основой для дальнейшего совершенствования методов обнаружения вредоносного ПО при помощи нейронных сетей.

В процессе машинных экспериментов установлено, что применение таких методов помогает совершенствовать технологию формирования групп API-вызовов, а также позволяет обнаруживать пересекающиеся классы вредоносного ПО. Последнее, в свою очередь, обеспечивает повышение точности определения типа вредоносноых программ.

Выделенные н-граммы позволяют обнаруживать не только потенциальные совокупности API-вызовов, имеющих весомое значение для исполняемой программы, но и обнаруживать потенциальные попытки зашумления последовательности исполнения.

Тематическое моделирование дает возможность выделять группы ключевых слов для набора данных и обеспечивает возможность фиксировать принадлежность определенной последовательности к такой группе, а также позволяет идентифицировать группы действий.

Кроме того, выявлена необходимость в получении дополнительных данных о последовательности исполнения программ, например, таких как аргументы вызовов, возвращаемые значения, статус исполнения и др. В доступных на данный момент наборах данных такая информация отсутствует. Эта информация помогает идентифицировать связанные между собой части API-последовательностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронин В.В., Морозов А.В.* Методика контроля угроз безопасности вредоносного программного обеспечения // Информатика и системы управления. – 2020. – № 3 (65). – С. 3–13.

2. *Bender E.M.* 100 things you always wanted to know about semantics & pragmatics but were afraid to ask. – Melbourne, 2018. – URL: http://faculty.washington.edu/ebender/papers/Bender-ACL2018-tutorial.pdf (accessed: 30.08.2021).

3. A neural probabilistic language model / Y. Bengio, R. Ducharme, P. Vincent, C. Jauvin // Journal of Machine Learning Research. – 2003. – Vol. 3. – P. 1137–1155.

4. Neural network methods for natural language processing / Y. Goldberg, G. Hirst, Y. Liu, M. Zhang // Computational Linguistics. – 2018. – Vol. 44. – P.193–195.

5. Efficient estimation of word representations in vector space / T. Mikolov, K. Chen, G. Corrado, J. Dean. – arXiv: 1301.3781v3 [cs.CL]. – 2013.

6. *Hinton G., Roweis S.* Stochastic neighbor embedding // Proceedings of the 15th International Conference on Neural Information Processing Systems. – Cambridge, MA: MIT Press, 2002. – P. 857–864.

7. *Alammar J.* The illustrated Word2vec. – 2019. – URL: https://jalammar.github.io/illustrated-word2vec/ (accessed: 30.08.2021).

8. *Воронин В.В., Морозов А.В.* Методы NLP в задачах анализа последовательностей API вызовов // Информационные технологии XXI века. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2021. – С. 100–104.

9. *Maaten L. van der., Hinton G.* Visualizing data using t-SNE // Journal of Machine Learning Research. – 2008. – Vol. 9. – P. 2579–2605.

10. *Wattenberg M., Viégas F., Johnson I.* How to use t-SNE effectively // Distill. – 2016. – DOI: 10.23915/distill.00002.

11. *Sunny Srinidhi*. Understanding word N-grams and N-gram probability in natural language processing. – 2019. – URL: https://towardsdatascience.com/understanding-word-n-grams-and-n-gram-probability-in-natural-language-processing-9d9eef0fa058 (accessed: 30.08.2021).

12. *Bouma G.* Normalized (pointwise) mutual information in collocation extraction // Biennial GSCL Conference. – Tübingen, 2009. – P. 31–40.

13. *Милославский Е.С.* Семантический анализ текста как средство лучшего понимания смысла // Интеллектуальные технологии и средства реабилитации и абилитации людей с ограниченными возможностями (ИТСР-2018): труды III международной конференции. – М., 2018. – С. 255–258.

14. *Боровых К.О., Плотников А.В.* Семантический анализ текстов на примере интернет-запросов // Российский экономический интернет-журнал. – 2018. – № 2. – С. 1–14.

15. *Попов М.Ю.* Компьютерная обработка текста: визуализация семантической структуры и реферирование // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2004. – № 5. – С. 66–70.

16. *Исмагулов Т.С., Канева О.Н.* Методы тематического моделирования текстов на естественном языке // Информационный бюллетень ОМГТУ и ИМ СО РАН в области математики и информатики. – Омск, 2019. – Т. 3, № 1. – С. 108–111.

17. *Захарова А.А., Махныткина О.В.* Кластеризация текстовых документов с учетом семантической информации // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – СПб., 2020. – Т. 3. – С. 90–93.

Воронин Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и системотехника» Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – анализ и синтез концептуальных диагностических моделей различных типов объектов диагностирования. Имеет более 200 печатных работ и учебных пособий. E-mail: 004183vvv@mail.ru

Морозов Алексей Владимирович, магистр по направлению «Информационные системы и технологии», аспирант кафедры «Автоматика и системотехника» Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – контроль угроз безопасности вредоносных программ на основе нейросетевой технологии. Имеет 5 печатных работ. E-mail: 2014102127@pnu.edu.ru

Voronin Vladimir V., Phd (eng), professor of the Department of Automation and Systems Engineering, Pacific National University. His research interests – analysis and synthesis of conceptual diagnostic models of various types of diagnostic objects. He has more than 200 publications and teaching manuals. E-mail: 004183vvv@mail.ru

Morozov Aleksey V., Master in direction of Information systems and technologies, postgraduate student of the Department of Automation and Systems Engineering, Pacific National University. The main direction of scientific research is the control of malware threats based on neural network technology. Has 5 publications. E-mail: 2014102127@pnu.edu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-37-52

Technology of key features identification in malware API calls sequences[*]

V.V. VORONIN[a], *A.V. MOROZOV*[b]

Pacific National University, 136 Tikhookeanskaya Street, Khabarovsk, 680035, Russian Federation

[a] *004183vvv@mail.ru* [b] *2014102127@pnu.edu.ru*

Abstract

Today, almost everyone is faced with computer security problems in one or another way. Antivirus programs are used to control threats to the security of malicious software.

Conventional methods for detecting malware are no longer effective enough; nowadays, neural networks and behavioral analysis technology have begun to be used for these purposes. Analyzing the behavior of programs is a difficult task, since there is no clear sequence of actions to accurately identify a program as malicious. In addition, such programs use measures to resist such detection, for example, noise masking the sequence of their work with meaningless actions. There is also the problem of uniquely identifying the class of malware due to the fact that malware can use similar methods, while being assigned to different classes. In this paper, it is proposed to use NLP methods, such as word embedding, and LDA in relation to the problems of analyzing malware API calls sequences in order to reveal the presence of semantic dependencies and assess the effectiveness of the application of these methods. The results obtained indicate the possibility of identifying the key features of malware behavior, which in the future will significantly improve the technology for detecting and identifying such programs.

Keywords: word embedding, Natural Language Processing, API calls, malware, Latent Dirichlet Allocation, n-grams, topic modeling, vector representation, clustering

REFERENCES

1. Voronin V.V., Morozov A.V. Metodika kontrolya ugroz bezopasnosti vredonosnogo programmnogo obespecheniya [Malicious software security threat control method]. *Informatika i sistemy upravleniya = Information Science and Control Systems*, 2020, no. 3 (65), pp. 3–13.

2. Bender E.M. *100 things you always wanted to know about semantics & pragmatics but were afraid to ask*. Melbourne, 2018. Available at: http://faculty.washington.edu/ebender/papers/Bender-ACL2018-tutorial.pdf (accessed 30.08.2021).

3. Bengio Y., Ducharme R., Vincent P., Jauvin C. A neural probabilistic language model. *Journal of Machine Learning Research*, 2003, vol. 3, pp. 1137–1155.

4. Goldberg Y., Hirst G., Liu Y., Zhang M. Neural network methods for natural language processing. *Computational Linguistics*, 2018, vol. 44, pp. 193–195.

5. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient estimation of word representations in vector space. arXiv: 1301.3781v3 [cs.CL]. 2013.

6. Hinton G., Roweis S. Stochastic neighbor embedding. *Proceedings of the 15th International Conference on Neural Information Processing Systems*. Cambridge, MA, MIT Press, 2002, pp. 857–864.

[*] *Received 05 February 2021.*

7. Alammar J. *The illustrated Word2vec*. 2019. Available at: https://jalammar.github.io/illustrated-word2vec/ (accessed 30.08.2021).

8. Voronin V.V., Morozov A.V. Metody NLP v zadachakh analiza posledovatel'nostei API vyzovov [NLP methods for analysis of API call sequences]. *Informatsionnye tekhnologii XXI veka* [Information technology of the XXI century]. Khabarovsk, Pacific National University Publ., 2021, pp. 100–104.

9. Maaten L. van der., Hinton G. Visualizing data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research*, 2008, vol. 9, pp. 2579–2605.

10. Wattenberg M., Viégas F., Johnson I. How to use t-SNE effectively. *Distill*, 2016. DOI: 10.23915/distill.00002.

11. Sunny Srinidhi. Understanding word N-grams and N-gram probability in natural language processing. 2019. Available at: https://towardsdatascience.com/understanding-word-n-grams-and-n-gram-probability-in-natural-language-processing-9d9eef0fa058 (accessed 30.08.2021).

12. Bouma G. Normalized (pointwise) mutual information in collocation extraction. *Biennial GSCL Conference*, Tübingen, 2009, pp. 31–40.

13. Miloslavskiy E.S. [Semantican analysis of literary text in accordance with better understanding of its meaning]. *Intellektual'nye tekhnologii i sredstva reabilitatsii i abilitatsii lyudei s ogranichennymi vozmozhnostyami (ITSR-2018)* [III International Conference Intelligent technologies and means of rehabilitation of people with disabilities (ITSR-2018)], Moscow, 2018, pp. 255–258. (In Russian).

14. Borovykh K.O., Plotnikov A.V. Semanticheskii analiz tekstov na primere internet-zaprosov [Semantic text analysis on the example of internet queries]. *Rossiiskii ekonomicheskii internet-zhurnal = Russian economic online journal*, 2018, no. 2, pp. 1–14.

15. Popov M.Yu. Komp'yuternaya obrabotka teksta: vizualizatsiya semanticheskoi struktury i referirovanie [Computer text processing: visualization of semantic structure and abstracting]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2004, no. 5, pp. 66–70.

16. Ismagulov T.S., Kaneva O.N. [Methods of thematic modeling texts in natural language]. *Informatsionnyi byulleten' OMGTU i IM SO RAN v oblasti matematiki i informatiki* [Information bulletin of the Omsk scientific and educational center of OmSTU and IM SB RAS in the field of mathematics and informatics]. Omsk, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 108–111. (In Russian).

17. Zakharova A.A., Makhnytkina O.V. Klasterizatsiya tekstovykh dokumentov s uchetom semanticheskoi informatsii [Clustering text documents based on semantic information]. *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO* [Almanac of scientific works of. young scientists of ITMO University]. St. Petersburg, 2020, vol. 3, pp. 90–93.

Для цитирования:

Воронин В.В., Морозов А.В. Технология идентификации ключевых особенностей в последовательностях API-вызовов вредоносных программ // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 3 (83). – С. 37–52. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-37-52.

For citation:

Voronin V.V., Morozov A.V. Tekhnologiya identifikatsii klyuchevykh osobennostei v posledovatel'nostyakh API-vyzovov vredonosnykh programm [Technology of key features identification in malware API calls sequences]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 37–52. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-37-52.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 83, № 3, 2021, с. 53–74

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 83, No. 3, 2021, pp. 53–74

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.93 DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-53-74

Распознавание русского и индийского жестовых языков на основе машинного обучения*

М.Г. ГРИФ[1,a], Р. ЭЛАККИЯ[2,b], А.Л. ПРИХОДЬКО[1,c], М.А. БАКАЕВ[1,d], Е. РАДЖАЛАКШМИ[2,e]

[1] *630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20 Новосибирский государственный технический университет*
[2] *613401, Индия, Танджавур, Тамил Наду, Университет SASTRA, Школа компьютерных технологий*

[a] *grif@corp.nstu* [b] *elakkiya@cse.sastra.edu* [c] *alexeyayay@yandex.ru*
[d] *bakaev@corp.nstu.ru* [e] *rajalakshmi32210@gmail.com*

Рассматриваются подходы к распознаванию жестовых языков глухих на примере русского и индийского жестовых языков. Предлагается структура системы распознавания отдельных жестов на основе выявления пяти его компонент – конфигурации, ориентации, локализации, движения и немануальных маркеров. Приведен анализ используемых методов распознавания отдельных жестов и непрерывной жестовой речи для индийского и русского жестовых языков. Для распознавания отдельных жестов был разработан Датасет РЖЯ, включающий более 35 000 файлов. Были отобраны более тысячи жестов РЖЯ. Каждый жест исполнялся с пятью повторениями и не менее пятью глухими носителями русского жестового языка из Сибири. Для выделения эпентезы для непрерывного РЖЯ были отобраны и записаны на видео 312 предложений с пятью повторениями. Выделялись 5 типов движений: «Нет жеста», «Идет жест», «Начальное движение», «Переходное движение», «Конечное движение». Разметка предложений для выделения видов эпентезы осуществлялось на платформе Supervisely.ly. Была построена архитектура рекуррентной сети (LSTM), реализованная с помощью библиотеки машинного обучения TensorFlow Keras. Точность правильного распознавания эпентезы составила 95 %. Для индийского жестового языка были разработаны наборы данных для распознавания как отдельных жестов, так и непрерывного индийского жестового языка. Отмечается, что работа в этом направлении должна быть продолжена. Для распознавания ручных жестов применялся модуль библиотеки mediapipe holistic. Этот модуль содержит группу предварительно обученных нейросетевых алгоритмов, которые позволяют получить координаты ключевых точек тела, ладоней и лица человека на изображении. На проверочных данных удалось достичь точности 85 %. В дальнейшем необходимо значительно увеличить число размеченных данных. Для распознавания немануальных компонент был составлен ряд правил, которые со-

* *Статья получена 20 февраля 2021 г.*
Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-57-45006.

ответствуют тому или иному движению частей лица. Эти правила включают состояния глаз, век, губ, языка и наклоны головы.

Ключевые слова: глухие, компьютерный сурдоперевод, русский жестовый язык, индийский жестовый язык, распознавание жестов, эпентеза, искусственная нейронная сеть, машинное обучение, наборы обучающих данных

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разработка методов компьютерного перевода национальных жестовых языков глухих в любой стране мира является важной социальной задачей, способствующей поддержке коммуникаций между глухими и слышащими. Актуальность разработки систем компьютерного перевода жестовых языков (от слышащего к глухому и наоборот) состоит как в недостаточном количестве переводчиков жестовых языков, так и в не всегда желательном посредничестве (медицина, личностные отношения и т. п.) при коммуникациях глухих и слышащих граждан [1]. В настоящее время эта задача не может считаться решенной, так как отсутствуют известные варианты машинного перевода жестовых языков, удовлетворяющие требованиям глухих. К основным требованиям глухих относятся безошибочность и качество визуализации перевода (компьютерного персонажа). Проведенные исследования среди глухих позволяют установить требования к безошибочности перевода не ниже 90 % [2] и к качеству визуализации на уровне перевода человека-переводчика. Указанные обстоятельства затрудняют коммуникации между слышащими и глухими гражданами, что является серьезной социально-экономической проблемой. Всё вышесказанное в полной мере относится к русскому (РЖЯ) и индийскому жестовым языкам. Так, например, в настоящее время при переводе русского текста на РЖЯ и наоборот используют как методы машинного обучения, так и связь грамматических систем русского звучащего языка и РЖЯ. Однако достичь необходимого уровня перевода препятствуют следующие обстоятельства:

- неполнота описания грамматической системы РЖЯ;
- отсутствие «плавности» показа жестов аватаром-переводчиком РЖЯ, система управления которого использует систему нотаций языков глухих;
- перевод осуществляется преимущественно на калькирующую жестовую речь, а не на РЖЯ, обладающий выразительными возможностями;
- высокий процент ошибок при переводе многозначных слов и омонимов на жесты РЖЯ (более 20 %);
- отсутствие значительных по объему размеченных корпусов РЖЯ (Датасетов), необходимых для реализации методов машинного перевода на основе машинного обучения;
- отсутствие надежных методов распознавания как отдельных жестов глухих, так и РЖЯ в целом.

Особую сложность представляет собой задача распознавания непрерывной жестовой речи (РЖЯ). Для успешного распознавания недостаточно только выделить отдельные жесты. Необходимо их уверенное выделение с учетом комбинаторных изменений параметров жестов, а также эпентезы.

Подробный анализ основных результатов для мировых жестовых языков содержится в [3, 4]. Так, например, в [3] был проведен анализ 396 научных

статей по тематике распознавания национальных жестовых языков с 2007 по 2017 год, каждая из которых была отнесена к категории одного из 25 жестовых языков и в дальнейшем сравнивалась по шести параметрам (методы сбора данных, статические/динамические жесты, режим записи, одноручные/двуручные жесты, методы и скорость распознавания). Анализ показал, что основные исследования по распознаванию жестовых языков были выполнены на статических, изолированных и одноручных жестах с использованием камеры.

Для распознавания [4] применялись как 2D-видеокамеры, так и браслеты и 3D-устройства (сенсор Kinect). Основные применяемые модели – нейронные сети. Несмотря на то что в отдельных случаях удавалось достичь 90 % точности распознавания, это происходило либо на ограниченном наборе жестов (50…200), либо на статичных. Что касается решения проблемы эпентезы, то применялись методы выделения признаков начала и конца жестов, включая отслеживание лица говорящего. Однако они также сегодня не могут быть признаны универсальными и надежными. Отмечается [4], что в настоящее время отсутствуют полноценные системы распознавания национальных жестовых языков.

Что касается собственно распознавания РЖЯ, то успехи здесь также невелики. Можно отметить работы [5, 6], где для распознавания РЖЯ с помощью сенсора Kinect были применены сверточные нейронные сети. Представляет также интерес разработка Датасета для 3D-моделей человека [7]. Однако нужно отметить, что Датасет был разработан для достаточно узкого диалекта РЖЯ (Санкт-Петербургского) и включал в себя небольшой набор жестов (около 300).

Для распознавания отдельных компонент жестов (конфигурация и ориентация), а также немануальных компонент был применен нейросетевой подход [8, 9]. Однако он применим в большей мере для изучения РЖЯ, а не для его распознавания. Нужно отметить также корпус РЖЯ, разработанный С.И. Бурковой [10], однако и он не может быть применен непосредственно в машинном обучении для решения задачи распознавания РЖЯ.

Таким образом, на данный момент отсутствуют достаточно полные Датасеты РЖЯ, методы распознавания используют неполный набор компонент жеста, а подходы к выделению эпентезы не являются универсальными и надежными.

Цель настоящей работы заключается в дальнейшем развитии методов распознавания русского и индийского жестовых языков на основе машинного обучения. В процессе ее достижения российские и индийские участники совместного гранта РФФИ обменивались идеями, Датасетами, разработанным программным обеспечением.

1. РАЗРАБОТКА ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ ДЛЯ РУССКОГО ЖЕСТОВОГО ЯЗЫКА

Датасет русского жестового языка – это данные, которые необходимы для обучения нейронных сетей. Для анализа жестов и распознавания РЖЯ требуется много специфических данных. В настоящее время универсального Датасета для распознавания РЖЯ не существует. Так же как и для других национальных жестовых языков их недостаточно. Поэтому мы приняли ре-

шение создать собственный размеченный Датасет РЖЯ для машинного обучения. Если для разработки системы распознавания любого жестового языка применять недоработанный, неполный Датасет, то результат будет неудовлетворительным. Датасет, являющийся важнейшим элементом систем искусственного интеллекта и создаваемый с целью разработки моделей машинного обучения, требует приоритетного внимания.

При разработке Датасета выделяются три этапа: сбор жестов, разметка жестов, очистка Датасета.

В лингвистике [10] русского жестового языка используются пять уровней анализа: фонологический, морфологический, лексический, синтаксический и дискурсический. Особое внимание нужно уделять фонологическому анализу, который посвящен уровню элементарных единиц жестового языка. Как правило, в звуковых языках определена «Фонема» в связи с акустической моделью, а в жестовых языках – «Пять компонентов жеста» в связи с наличием кинематической модели руки и тела, а также с визуальной моделью мимики лица. Эта модель находится в жестовом пространстве – области, используемой говорящим для артикуляции. Вертикальная ее граница начинается чуть выше головы и заканчивается у талии, а горизонтальная граница пролегает от одного локтя до другого при свободном расположении рук.

Пять компонент жеста, элементы жестового языка, включают конфигурацию руки, ориентацию руки, локализацию, движение и немануальный компонент (рис. 1).

Рис. 1. Пять компонент жеста

Fig. 1. The five components of a gesture

Конфигурация и ориентация руки. Разные конфигурации руки являются разными формами руки при исполнении жеста. На рис. 2 даны примеры одного жеста «ножницы», где ладонь в жесте находится в разных конфигурациях, «П» и «Л» – буквы дактильного алфавита, но в одной ориентации. Разные ориентации представляют собой положения ладони в пространстве. Ладонь правой или левой руки может быть развернута вверх, вниз, вправо, влево, вверх вправо, вверх влево и в других направлениях.

Локализация. На рис. 1 локализация жеста включает два основных признака – место и сеттинг. Место исполнения – это несколько крупных областей в пределах жестового пространства: голова, лицо, шея, грудь, талия, нейтральное жестовое пространство (жест выполняется без контакта руки с

телом) и пассивная рука. Сеттинг находится внутри этой большой области. Например, место – лицо, сеттинг – правый глаз.

Движение. На рис. 1 жест «велосипед» показан стрелками как круг, который обозначает «характер» движения из признаков типа траектории (по прямой, по зигзагу, по дуге и т. п.). Второй признак – направление (вертикальный, горизонтальный и сагиттальный). Во втором типе «Локальное движение» изменяется конфигурация или ориентация руки. Например, в жесте «ножницы» (рис. 2) имеется изменение – конфигурация ладони «Л» и «П».

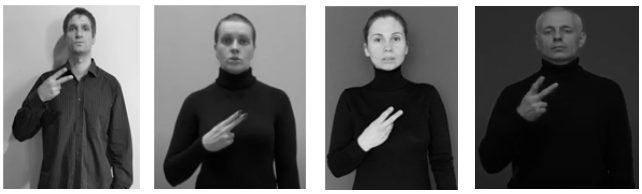


Рис. 2. Вариативность в показе жеста РЖЯ «ножницы»

Fig. 2. Variation in showing the Scissor gesture in RSL

Немануальный компонент. Немануальные компоненты включают четыре артикулятора: корпус тела, голову, плечи и мимику лица. В РЖЯ для многих жестов часто двигаются одновременно голова и корпус, изменяются мимика лица и маусинг. Под маусингом понимают движения губ говорящего на звучащем языке. Однако у говорящего на жестовом языке движения губ и языка не связаны со звучащим языком.

Типы жестов. Можно предложить следующую классификацию жестов [10]: одноручные и двуручные, статичные и динамичные, симметричные и асимметричные, синхронные и поочередные.

Формирование Датасета отдельных жестов РЖЯ. Нами был разработан Датасет РЖЯ, включающий более 35 000 жестов (изображения и видеофайлы, из них более 10 000 видеофайлов). Были отобраны более тысячи жестов РЖЯ из онлайн-словаря и книги-словаря [11, 12]. Каждый жест исполнялся с пятью повторениями и не менее пятью глухими носителями русского жестового языка из Сибири.

Сбор и запись Датасета осуществлялась при выполнении следующих условий (требований):

- на чистом фоне говорящий в жестовом пространстве был одет в черный свитер;
- жесты показывали только носители русского жестового языка (говорящие на РЖЯ);
- не менее пяти повторений жеста каждым носителем РЖЯ;
- не менее 20 повторений каждого жеста различными говорящими на РЖЯ;
- до включения видеозаписи говорящий должен молча стоять в жестовом пространстве, после включения видеозаписи говорящий молчит 2-3 секунды, потом говорит, затем молчит 2-3 секунды до выключения;
- не менее 1000 воспроизводимых видеожестов;
- разрешение изображения не менее 1920×1080, частота не менее 30 кадров в секунду.

Такие действия должны обеспечить полноту и информативность в формируемом Датасете. Однако на практике мы столкнулись с наличием у говорящих мелких фонологических привычек показа жестов, что приводило к несовпадениям со словарем РЖЯ (например, разные конфигурации и ориентации руки, а также сеттинг в области локализации жеста).

Качество разметки данных зависит и от качества работы оператора по разметке жестов для машинного обучения. Разметка жестов проводилась на платформе Supervisely.ly [13]. Выделялась область ладоней и элементов лица. После сбора жестов для удобства хранения применялась система имен видеофайлов, включающая номера жеста, человека и повторения (например, имя файла 43_3_3.mp4 – номер жеста 43, 3-й номер человека в списке информантов и 3-е повторение).

Формирование Датасета для выделения эпентезы в РЖЯ. В [4] приведен обзор работ, связанных с выделением эпентезы в мировых жестовых языках. Под эпентезой понимается движение между соседними жестами [10]. Для успешного распознавания РЖЯ необходимо отделить эпентезу от собственно жестов. Основная идея заключается в выделении признаков начала следующего жеста или паузы в речи. Это может быть состояние покоя говорящего, положения рук, взгляда и т. п. [14]. Применяют также приемы вычленения быстрых и медленных движений в видеопотоке. Если процесс жестовой речи свести к анализу последовательности выявленных компонент (конфигурация – ориентация ладони, локализация, траектории рук и характер движения, немануальные компоненты), то каждое такое событие станет «кандидатом» на начало распознавания следующего жеста. При этом может оказаться, что процесс нового поиска уже начат, хотя не окончен предыдущий. Подобный подход к распознаванию жестовой речи является достаточно трудоемким. Представляется, что его можно модернизировать с введением функции принадлежности (или некоторой вероятности) каждого события к началу нового жеста. В этом случае алгоритм распознавания нового жеста можно запускать только после некоторых, наиболее вероятных событий. Другой подход состоит в выделении всех элементов жестовой речи: собственно жестов, состояния покоя говорящего, комбинаторных изменений жестов и эпентезы. В этом случае необходимо расширить Датасет для распознавания жестов и другими элементами, связанными с комбинаторными изменениями жестов. На данный момент сложно оценить необходимый объем дополнений. С учетом большого числа типов комбинаторных изменений жестов он может оказаться значительным.

Для выделения эпентезы в РЖЯ мы использовали следующие понятия: «начальное движение», «конечное движение» и «промежуточное движение». «начальное» – это подготовительное движение, «конечное» – когда рука возвращается в исходное положение. Считаем, что здесь имеется аналогия терминов из лингвистики звуковых языков, обозначающих фазы артикуляции звука. Здесь, по сути, то же самое:

- экскурсия (подготовка органов к артикуляции);
- выдержка (фаза артикуляции);
- рекурсия (возврат органов артикуляции в исходное положение).

Были отобраны и записаны на видео 312 предложений с пятью повторениями на РЖЯ от двух глухих носителей РЖЯ (160 предложений у женщины и 152 – у мужчины), из которых 142 – уникальные предложения (рис. 3).

129	ваш (04)	дети (81)	упрямый_2	не.выносить	артикуляция_1
130	осень	береза	лист	изменять	оранжевый_2
131	представтель_1	сообщение	премия	прекращать	причина
132	мышь	серый	слон	испуганный	дрожать_1
133	суп	недостаток	соль_1 (58)	перец (45)	
134	нравится	деревня (80)	дышать (14)	воздух	чистый
135	ванная	балкон	нет		
136	зима	февраль	дрожать_2	валенки (114)	теплый
137	желание	выполнить_2	лето	самолет	отпуск
138	смотреть.телевизор	показывать	история	источник	земля (91)
139	литература	книга	запрещать	копировать_2	будет
140	военный_1	воля (06)	воевать	до_1	победа
141	показывать	фильм (68)	тайна	фашизм	страх
142	мой	бизнес (102)	сам	идея	
143					

Рис. 3. Примеры уникальных предложений на РЖЯ

Fig. 3. Examples of unique sentences in RSL

В каждом предложении выделены жесты РЖЯ, описанные ранее (рис. 4).

Рис. 4. Запись предложений на РЖЯ

Fig. 4. Recording sentences using RSL

Разметка предложений для выделения видов эпентезы (начальное, конечное и промежуточное движение) осуществлялась на платформе Supervisely.ly [13] (рис. 5).

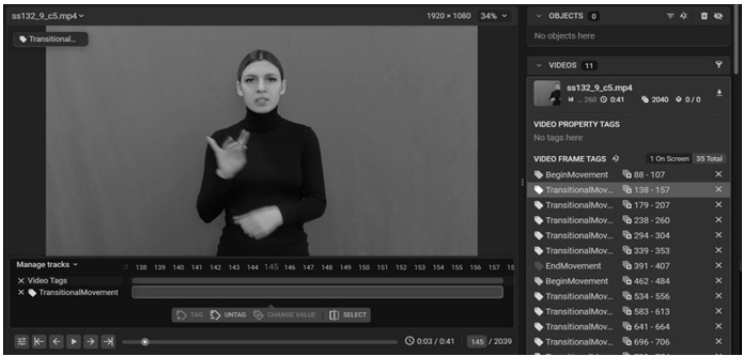


Рис. 5. Инструмент по разметке на платформе Supervise.ly

Fig. 5. Data labeling tool powered by Supervise.ly

Были введены метки для выделенных движений. На рис. 5 отмечены кадры в видеофайле с конкретным типом движения. Результат разметки помещается в json-файлы. Так, например, на рис. 5 справа показаны три типа меток: начальное движение [88:107], переходное [138:157], [179:207],

[238:260], [294:304] и конечное [391:407]. Для удобства были расширены варианты движений: «нет жеста», «идет жест», «начальное движение», «переходное движение», «конечное движение». В результате имеем 5 полных выходных классов на видеофайлах с жестами.

Для обучения нейронной сети нужна дополнительная разметка выделенных движений скелетной моделью. Для этого была использована система MediaPipe Pose [15]. MediaPipe Pose – это решение машинного обучения для точного отслеживания позы тела, позволяющее вывести 33 трехмерных ориентира на всем теле из видеокадров RGB с использованием инструмента BlazePose. После извлечения этих данных создаются numpy-файлы, включающие информацию о координатах ключевых точек тела. На входе подается видео, а на выходе имеем numpy-файл, содержащий в себе массив нормализованных координат для каждой ключевой точки руки. Размерность выходного массива равна $F \times C$, где F – количество фреймов в видео, C – количество анализируемых точек, 33×2 (рис. 6).

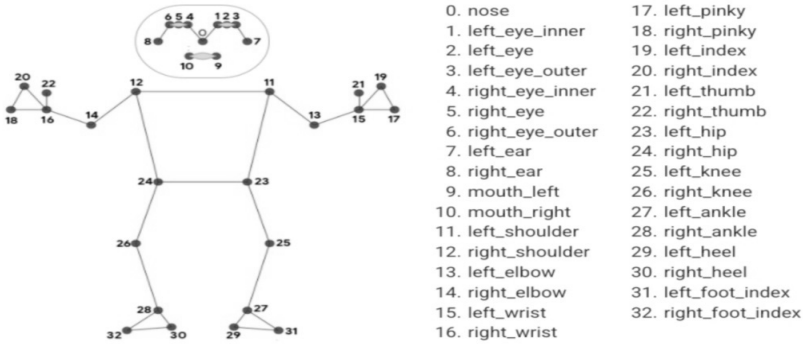


Рис. 6. Ключевые точки скелетной модели

Fig. 6. Key points of the skeletal model

Практическая реализация многослойных персептронов необходимой архитектуры и конфигурации производилась с помощью библиотеки машинного обучения TensorFlow Keras на языке программирования Python 3.6. Сеть, изображенная на рис. 7, представляет собой однослойный персептрон с 512 нейронами, всего имеется 1 120 773 параметров, которые не оптимизируются в процессе обучения. Максимальное количество эпох обучающего цикла составляет 100.

```
_________________________________________________________________
Layer (type)                 Output Shape              Param #
=================================================================
lstm_10 (LSTM)               (None, 512)               1118208
_________________________________________________________________
dense_10 (Dense)             (None, 5)                 2565
=================================================================
Total params: 1,120,773
Trainable params: 1,120,773
Non-trainable params: 0
```

Рис. 7. Архитектура рекуррентной сети (LSTM), реализованная с помощью библиотеки машинного обучения TensorFlow Keras

Fig. 7. The recurrent network architecture (LSTM) implemented using the TensorFlow Keras machine learning library

Результаты распознавания типов движений для выделения эпентезы представлены на рис. 8. Точность правильного распознавания составила 95 %.

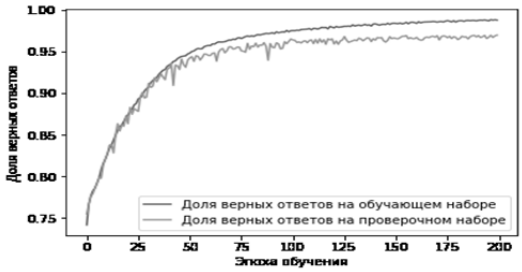
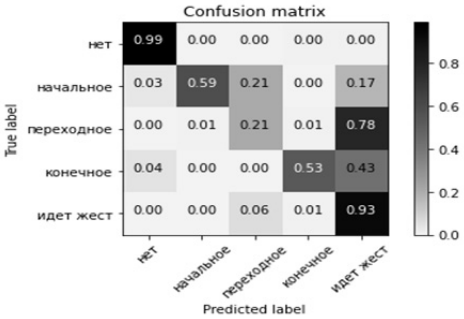


График процесса обучения



Матрица отклонений

Рис. 8. Результаты распознавания типов движений для выделения эпентезы

Fig. 8. The results of recognition of movement types to highlight epenthesis

2. РАЗРАБОТКА ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ И КОРПУСОВ ДЛЯ ИНДИЙСКОГО ЖЕСТОВОГО ЯЗЫКА

В настоящее время отсутствуют общедоступные наборы данных по индийским жестам для разработки системы распознавания индийского жестового языка (ISLR). Поэтому мы собрали и создали наборы данных для распознавания как изолированного, так и непрерывного индийского жестового языка (ISL). Для изолированного ISL были собраны и созданы два набора данных, а именно ISLAN и ISLW. Так, ISLAN состоит из ISL-представлений английского алфавита и чисел; ISLW состоит из ISL-представлений 2774 английских слов. Для непрерывного ISL был создан набор данных, а именно ISLS, который состоит из ISL-представлений ста простых английских предложений. При создании этих наборов данных использовались жесты как для одной руки, так и для двух рук.

Алфавит. ISLAN – это коллекция из 700 изображений и 24 видеороликов. Изображения и видео из набора данных ISLAN были подготовлены с помощью ученых-исследователей и студентов Университета SASTRA Deemed, Тамил Наду (Индия). Цветные изображения с необработанными метками (формат JPG) и видео (формат MP4) были записаны со смартфона. Были задействованы шесть носителей языка (трое мужчин и три женщины) с различным оттенком кожи и с разными размерами рук [16]. Были использованы как одноручные, так и двуручные жесты.

На рис. 9 показано двуручное обозначение буквы А, представленное шестью разными говорящими.

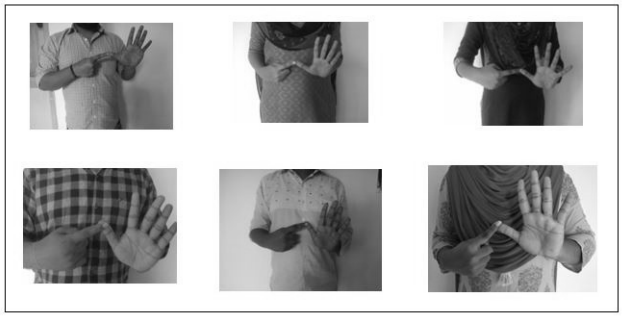


Рис. 9. Изображение двуручного жеста говорящего для буквы А

Fig. 9. Images of the two-handed speaker for the finger spelling of the letter A

На рис. 10 показано одноручное обозначение буквы А, представленное шестью разными говорящими. На рис. 11 показано обозначение цифровой буквы А, представленное пятью разными говорящими.

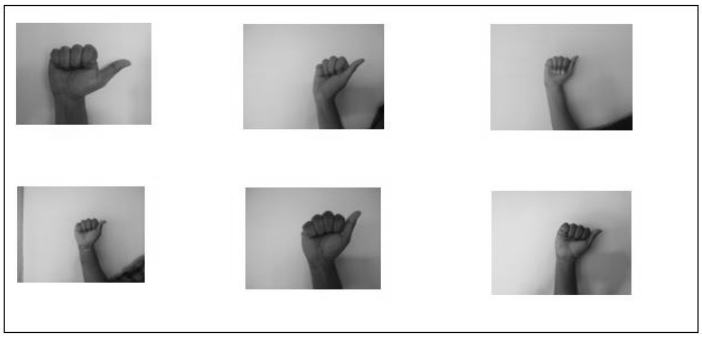


Рис. 10. Изображение жестов, представляющих одноручное лицо с несколькими говорящими сторонами для буквы А

Fig. 10. Gestures representing a one-handed person with several speakers for the finger spelling of the letter A

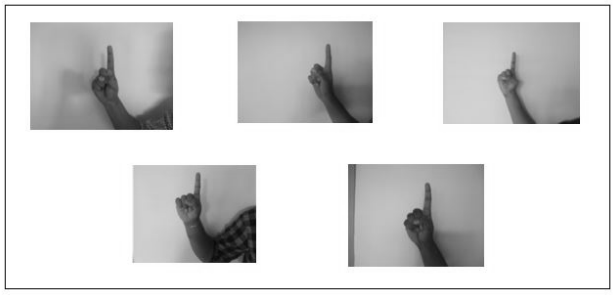


Рис. 11. Изображения представления нескольких говорящих лиц для числа 1

Fig. 11. Sign images of several speakers for the number 1

Отдельные жесты. В основу набора данных ISLW (отдельные жесты) был положен общедоступный портал индийского жестового языка [17].

ISLW состоит из коллекции 2774 индийских видео с несколькими говорящими. Каждый жест в ISLW представляет собой видео в алфавитном порядке. Видео имеет разрешение изображения 480 пикселей с частотой 30 кадров в секунду. Все видео в формате MP4, а кадры изображений – в формате JPEG. Видео были сняты с неоднородным фоном и с обычными условиями освещения в формате RGB в закрытом помещении. На рис. 12 показано жестовое представление слова «Аббревиатура» в индийском жестовом языке.

Рис. 12. Индийское обозначение жеста «Аббревиатура»

Fig. 12. An Indian sign designation of the Abbreviation gesture

Предложения. Мы также создали коллекцию индийских жестовых непрерывных предложений, а именно ISLS, который представляет собой полностью маркированный большой словарный набор видеоданных на уровне предложений на индийском жестовом языке. Каждое видео показывает перевод на язык жестов простого предложения на английском языке. Был создан набор данных на основе представлений говорящих лиц как одной, так и двумя руками. Все видео в формате MP4, а кадры изображений – в формате JPEG.

Набор видеоданных индийского непрерывного распознавания жестового языка для предложений (ISLS) был создан с помощью ученых-исследователей и студентов Университета SASTRA Deemed, Тамил Наду (Индия). Видео были сняты с помощью цифровой зеркальной камеры, прикрепленной к штативу, на неоднородном фоне и при хорошем освещении. Видео были сняты в формате RGB и в помещении с частотой кадров 25 кадров в секунду и с разрешением 1920 × 1080. Набор данных ISLS состоит из жестовых представлений ста уникальных простых предложений, выполненных семью говорящими лицами, среди которых две женщины, а остальные – мужчины. Для сбора этого набора данных были привлечены люди с разным оттенком кожи, а также с разным размером рук. ISLS станет первым набором видеоданных на индийском жестовом языке, состоящим из 100 простых предложений на английском языке. ISLS состоит из 700 видеороликов и 35 299 кадров изображений. Из этих 700 жестов были извлечены видеопредложения, состоящие из 186 фотожестов. Общее количество кадров на один фотожест варьируется. Кадры, извлеченные из видео, имели разные вариации, а также размеры, поэтому они были предварительно обработаны для создания кадров изображений одинакового размера 64 × 64. На рис. 13 показано жестовое представление предложения «Сколько вам лет?».

Рис. 13. Индийский жест, обозначающий предложение «Сколько Вам лет?»

*Fig. 13.*An Indian gesture showing a sentence “How old are you?”

Пути развития. Сбор и создание этих наборов данных окажется полезным для исследователей, работающих над ISLR на основе видеокамеры. ISLAN, ISLW и ISLS будут очень полезны исследователям для разработки новых методов и повышения производительности уже существующих систем ISLR. Эти наборы данных также повысят осведомленность людей об изучении языка жестов. Набор данных можно расширить, пытаясь сделать фон однородным и с различной интенсивностью света. Кроме того, мы также можем попытаться захватить изображения под разными углами или воспроизвести и выполнить различные методы преобразования изображений, чтобы расширить набор данных для дальнейшего обучения. Указанные наборы данных мы планируем расширить, так как их недостаточно для покрытия большого словарного запаса, имеющегося в разговорных языках. В ISLR всё еще есть много проблем, но основным недостатком является отсутствие общедоступных наборов данных. Несмотря на то что доступно несколько наборов данных, в них всё еще не учтены многие ограничения, такие как несколько говорящих лиц, большой словарный запас, интенсивность света изображения, расстояние от камеры, угол камеры, жесты, выполняемые несколькими руками и одной рукой, оттенок кожи, фон и т. д. На данный момент мы рассмотрели только три основные функции: несколько говорящих лиц, оттенок кожи, жесты одной и двумя руками. Развитие методов глубокого обучения в области компьютерного зрения позволило исследователям создавать приложения для распознавания языка жестов. Собранные и созданные наборы данных помогут предоставить ресурсы в форме общедоступного набора данных ISL для дальнейших исследований в ISLR. Мы также благодарим Департамент науки и технологий (DST) Индии за финансовую поддержку в рамках Российско-индийского совместного проекта (INT/RUS /RFBR/393). Мы также благодарим SASTRA Deemed University (Танджавур, Индия) за расширение инфраструктурной поддержки для проведения этой исследовательской работы.

3. РАСПОЗНАВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЖЕСТОВ РУССКОГО ЖЕСТОВОГО ЯЗЫКА

В основу алгоритмов взят подход к распознаванию отдельных жестов по наличию определенного набора компонент: конфигураций-ориентаций, локализации, траектории и характера движения, а также немануальных компонент.

Распознавание ручных жестов

Одним из методов решения задачи распознавания жестов был взят модуль библиотеки mediapipe holistic [18]. Этот модуль содержит группу предварительно обученных нейросетевых алгоритмов, которые позволяют получить координаты ключевых точек тела, ладоней и лица человека на изображении.

Использование модуля mediapipe holistic позволяет решить проблемы с получением координат точек ладоней в различных условиях записи видео (разная освещенность, разрешение и качество видеозаписи и пр.). Для дальнейшей работы с классификацией жеста используется часть результата работы модуля mediapipe – координаты левой и правой ладони (21 точка для каждой руки, координата каждой точки имеет вид $\{x_n, y_n, z_n\}$) человека в кадре. Координаты лица и тела в дальнейшем применяются для учета в модели неманульного компонента РЖЯ. Для дальнейшей классификации используются именно координаты точек каждой из ладоней.

На текущем этапе разработки имеется ограниченное число размеченных данных, при этом имеется большое число цифровых изображений и видеозаписей, на которых показаны те или иные жесты РЖЯ.

Было принято решение использовать эти неразмеченные данные для повышения качества работы модели классификации жестов.

Первым этапом обучения модели классификатора является обучение разреженного автокодировщика (sparse autoencoder) [19], цель которого на основании неразмеченных данных обучиться преобразовывать представление ладоней в виде координат в более сложное представление для классификации семантически сложных признаковых пространств.

Координаты ладоней представляют собой 21 трехмерный вектор $[\{x_1, y_1, z_1\}\ldots\{x_n, y_n, z_n\}]$, который может быть преобразован в 63 признака для входа нейронной сети. Стоит отметить, что помимо координат точек ладоней можно выделить большее число признаков (например, связь точек ладони). Так, точка кончика пальца соединена с точкой конца средней фаланги, а та, в свою очередь, с точкой конца проксимальной фаланги пальца. Еще одним примером может служить тот факт, что точка основания пальца всегда будет на относительно большом (относительно всей ладони) расстоянии в трехмерном пространстве. Еще большее число подобных примеров можно вывести исходя из эмпирических наблюдений за ладонями людей, и в частности за положениями ладоней в РЖЯ (рис. 14).

Гипотетически такие дополнительные признаки можно генерировать на основании большого числа представлений, количество которых около одного миллиона среди имеющихся в нашем распоряжении данных. За счет регуляризации скрытого представления (latent space) в разреженном автокодировщике (sparse autoencoder) [19] появляется возможность генерировать необходимые дополнительные признаки.

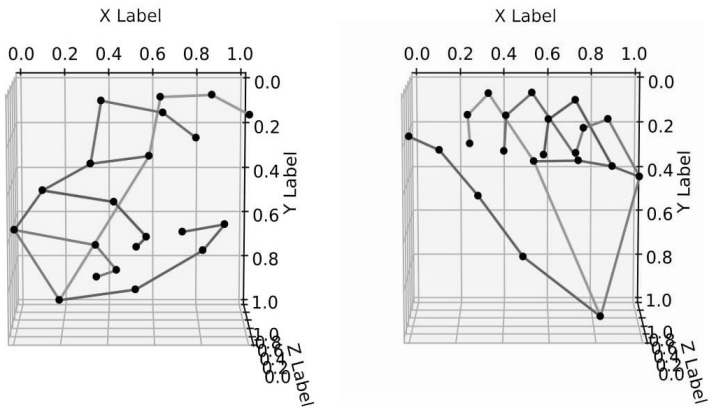


Рис. 14. Пример точек ладоней

Fig. 14. An example of palm points

Таким образом, первым этапом обучения модели является обучение автокодировщика на корпусе неразмеченных данных. Обучение автокодировщика позволило достичь точности 97,5 %. Модель кодировщика имеет следующую структуру.

Слой (type)	Output Shape	Param #
========== Слои кодировщика ==========		
input_1 (InputLayer)	[(None, 3, 21)]	0
flatten (Flatten)	(None, 63)	0
dense (Dense)	(None, 256)	16384
dense_1 (Dense)	(None, 512)	131584
batch_normalization (BatchNo	(None, 512)	2048
dense_2 (Dense)	(None, 1024)	525312
========== Слои декодировщика ==========		
input_2 (InputLayer)	(None, 1024)	
dense_3 (Dense)	(None, 1024)	
batch_normalization (BatchNo	(None, 1024)	
dense_4 (Dense)	(None, 512)	
dense_5 (Dense)	(None, 256)	
dense_6 (Dense)	(None, 63)	
reshape (Reshape)	[(None, 3, 21)]	

В результате обучения такого кодировщика число признаков было увеличено до 1024 в скрытом представлении. Для дальнейшего обучения классификатора используется только первая часть автокодировщика (autoencoder) – кодировщик (encoder). При дальнейшем обучении эта часть нейронной сети остается с неизменными значениями весов.

Следующим этапом обучения модели классификации является обучение на размеченных данных. Обучение выполняется на нескольких наборах данных, собранных нами самостоятельно.

Введен параметр минимального числа примеров для обучения, принятый равным 40. В случае если минимальное число примеров класса не достигнуто, метка класса становится '0' (не относится к распознаваемым жестам). В настоящее время число распознаваемых жестов равно 268.

Используемая базовая модель классификатора имеет следующий вид.

Слой (type)	Output Shape	Param #
========== Слои кодировщика ==========		
input_1 (InputLayer)	[(None, 3, 21)]	0
flatten (Flatten)	(None, 63)	0
dense (Dense)	(None, 256)	16384
dense_1 (Dense)	(None, 512)	131584
batch_normalization (BatchNo	(None, 512)	2048
dense_2 (Dense)	(None, 1024)	525312
========== Слои классификации ==========		
dense (Dense)	(None, 1024)	1049600
dense_1 (Dense)	(None, 2048)	2099200
dense_2 (Dense)	(None, 1024)	2098176
batch_normalization (BatchNo	(None, 1024)	4096
dense_3 (Dense)	(None, 53)	54325

На проверочных данных удалось достичь точности в 81 %.

Классификатор жеста. Использовалась обучающая выборка из 2195 видеозаписей, содержащая 774 отдельных жеста, имеющих подпись, состоящую из последовательностей трех жестов для левой и правой руки. Максимальная длина видеозаписи в наборе данных – 184 кадра. Для обучения модели классификации жестов применялась ранее обученная модель для распознавания конфигурации-ориентации жеста (МКОЖ) на изображениях 268 возможных жестов (по 134 для каждой руки). В дальнейшем коли-

чество поддерживаемых жестов будет увеличиваться с ростом размера набора данных.

Предварительная обработка видеозаписей. Выполняется обработка каждого кадра ранее обученной моделью для определения конфигурации-ориентации каждой ладони в каждом кадре видеозаписи. Таким образом, видео преобразуется в две последовательности данных вида

Xlh = ['0', '0', '0', '0', …, 's15d31', 's15d31', 's18d00', 's15d31', 's14c51', '0', 's1dc30', 's1dc30', 's1dc30', 's15d32', '0', ..., '0', 's1dc30', 's15d32', '0', 's13f30', 's18c08', '0', '0', '0'] (для левой и правой руки отдельно).

Здесь '0' – отсутствие руки в кадре / модель распознавания конфигурации ориентации не обучена на этом жесте / модель не распознала жест; 's15d31' – распознанная моделью МКОЖ конфигурация-ориентация. Общая длина такой последовательности соответствует количеству кадров в видеозаписи жеста. На текущий момент принята максимальная длина видеозаписей – 200 кадров, что соответствует 6,6 секунды при частоте кадров видеозаписи, равной 30. Модель классификации видео (МКВ) в дальнейшем работает с данными вида Xlh. Если количество элементов в полученной последовательности менее 200, то выполняется ее «растяжение», новые элементы последовательности подбираются одним из следующих возможных способов:

1) заполнение левого и правого края «0»;

2) заполнение правого края «0»;

3) интерполяция, заполнение копиями рядом стоящих элементов, т. е. [«0», «s12000», «s20100»] → [«0», «0», «s12000», «s12000», «s20100», «s20100»].

Наиболее эффективным в ходе обучения модели был способ 3.

Далее выполняется преобразование последовательностей к матричному виду:

```
[ [0.          0.        0.        0.        0.        ]
  [0.          0.        0.        0.        0.        ]
  [0.          0.        0.        0.        0.        ]
  ...
  [0.5011157   0.28710333  0.8312101   0.11121226  0.        ]
  [0.4776144   0.30229354  0.6563805   0.04033527  0.        ]
  ...
  [0.          0.        0.        0.        0.        ]].
```

В этом виде конфигурация-ориентация преобразуется из вида «s12000» в вектор $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$, где $x_i = \dfrac{x_i}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}$.

Такое представление обусловлено введенной структурой [20], где жест может быть интерпретирован как вектор размерности 5 (по одному измерению на каждый элемент формальной записи конфигурации-ориентации)

Таким образом, видео преобразуется в последовательность векторов, описывающих ориентацию-конфигурацию, на которых выполняется обучение нейронной сети, архитектура сети показана на рис. 15.

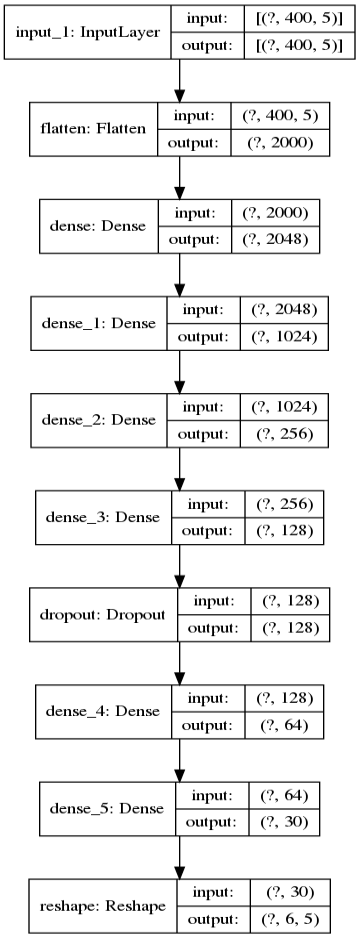


Рис. 15. Архитектура нейронной сети

Fig. 15. Neural network architecture

Результатом работы нейронной сети является матрица вида

```
[   [0.          0.        0.        0.        0.        ]
    [0.          0.        0.        0.        0.        ]
[0.        0.        0.        0.        0.        ]
[0.5       0.26666667  0.8       0.        0.13333333]
[0.5       0.26666667  0.8       1.        0.        ]
[0.        0.        0.        0.        0.        ]].
```

То есть по три конфигурации-ориентации на каждую руку.

Далее в качестве меры близости полученной последовательности векторов используется евклидово расстояние. Результат работы модели показывает точность около 80 %, однако является зависимым от качества модели определения конфигурации-ориентации ладони. С ростом качества модели МКОЖ улучшится и качество работы данной модели.

Распознавание немануальных компонент. Использование модуля mediapipe holistic позволяет решить проблемы с получением координат точек

лица в различных условиях записи видео (разная освещенность, разрешение и качество видеозаписи и пр.). Для работы с классификацией немануального компонента используется часть результата работы модуля mediapipe – координаты точек лица (468 точек лица, координаты каждой из точек имеют вид $\{x_n, y_n, z_n\}$) человека в кадре.

В качестве интересующих точек для контроля движений губ и глаз выбраны точки, указанные на изображении (рис. 16).

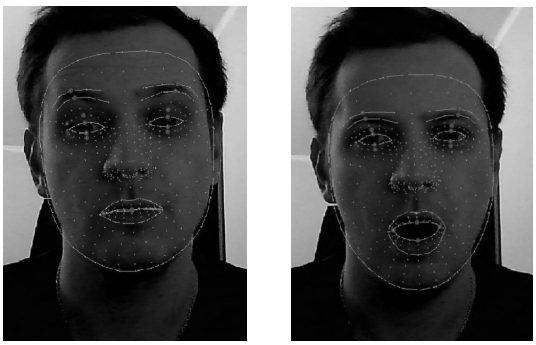


Рис. 16. Распознавание немануальных компонент

Fig. 16. Recognition of non-manual components

На каждом кадре выполняется вычисление эвклидова расстояния между точками лица, и эмпирическим путем выявляется факт движения. Например, поднятие бровей – это увеличение расстояния между нижним краем брови и верхним веком. Таким образом, составлен ряд правил, которые соответствуют тому или иному движению частей лица. Эти правила включают состояния глаз, век, рта, языка и наклоны головы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассмотрены подходы к распознаванию жестовых языков глухих на примере русского и индийского жестовых языков. Проведен анализ используемых методов распознавания отдельных жестов и непрерывной жестовой речи для индийского и русского жестовых языков. Для распознавания отдельных жестов был разработан Датасет РЖЯ, включающий более 35 000 файлов. Для выделения эпентезы в непрерывном РЖЯ были отобраны и записаны на видео 312 предложений с пятью повторениями. Выделено пять типов движений: «нет жеста», «идет жест», «начальное движение», «переходное движение», «конечное движение». Разметка предложений для выделения видов эпентезы осуществлялась на платформе Supervisely.ly. Была построена архитектура рекуррентной сети (LSTM), реализованная с помощью библиотеки машинного обучения TensorFlow Keras. Точность правильного распознавания эпентезы составила 95 %. Для индийского жестового языка были разработаны наборы данных по распознаванию как отдельных жестов, так и непрерывного жестового языка. Для распознавания ручных жестов применялся модуль библиотеки mediapipe holistic. Этот модуль содержит группу предварительно обученных нейросетевых алгоритмов, которые поз-

воляют получить координаты ключевых точек тела, ладоней и лица человека на изображении. На проверочных данных удалось достичь точности в 85 %. Для распознавания немануальных компонет был составлен ряд правил, которые соответствуют тому или иному движению частей лица. Эти правила включают состояния глаз, век, рта, языка и наклоны головы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лексические и грамматические аспекты разработки компьютерного сурдопереводчика русского языка / М.Г. Гриф, О.О. Королькова, Л.Г. Панин, М.К. Тимофеева, Е.Б. Цой. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 292 с.

2. *Гриф М.Г. Королькова О.О., Мануева Ю.С.* Машинный перевод русского жестового языка глухих // Информатика: проблемы, методы, технологии: материалы 20 международной научно-методической конференции, Воронеж, 13–14 февр. 2020. – Воронеж, 2020. – С. 1591–1597. – ISBN 978-5-6042216-9-3.

3. *Wadhawan A., Kumar P.* Sign language recognition systems: a decade systematic literature review // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2021. – Vol. 28. – P. 785–813. – DOI: 10.1007/s11831-019-09384-2.

4. Распознавание русского и индийского языков жестов глухих / Р. Элаккия, М.Г. Гриф, А.Л. Приходько, М.А. Бакаев // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 57–76. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-57-76. – Текст англ.

5. Sign language numeral gestures recognition using convolutional neural network / I. Gruber, D. Ryumin, M. Hrúz, A. Karpov // Interactive Collaborative Robotics. – Cham: Springer, 2018. – P. 70–77.

6. *Константинов В.М., Орлова Ю.А., Розалиев В.Л.* Разработка 3D-модели тела человека с использованием MS Kinect // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – № 6 (163). – С. 65–69.

7. TheRuSLan: Database of Russian Sign Language / I. Kagirov, D. Ivanko, D. Ryumin, A. Axyonov, A. Karpov // Proceedings of the 12th Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2020). – Marseille, 2020. – P. 6079–6085.

8. Automatic classification of handshapes in Russian sign language / M. Mukushev, A. Imashev, V. Kimmelman, A. Sandygulova // Proceedings of the LREC 2020 9th Workshop on the Representation and Processing of Sign Languages: Sign Language Resources in the Service of the Language Community, Technological Challenges and Application Perspectives. – Marseille, 2020. – P. 165–169.

9. Eyebrow position in grammatical and emotional expressions in Kazakh-Russian Sign Language: A quantitative study / V. Kimmelman, A. Imashev, M. Mukushev, A. Sandygulova // Plos One. – 2020. – Vol. 15 (6). – DOI: 10.1371/journal.pone.0233731.

10. Введение в лингвистику жестовых языков. Русский жестовый язык: учебник / ред.: С.И. Буркова, В.И. Киммельман. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 356 с.

11. Словарь русского жестового языка. – URL: https://www.spreadthesign.com/ru (дата обращения: 31.08.2021).

12. *Базоев В.З.* Словарь русского жестового языка. – М.: Флинта, 2009. – 528 с.

13. Supervisely – веб-платформа для компьютерного зрения. – URL: https://supervise.ly/ (дата обращения: 31.08.2021).

14. *Кебец П.Л.* Маркеры перехода хода в дискурсе русского жестового языка // Материалы Седьмой конференции по типологии и грамматике для молодых исследователей (г. Санкт-Петербург, 4–6 ноября 2010 г.). – СПб.: Наука, 2010. – С. 75–80.

15. Система MediaPipe Pose. – URL: https://google.github.io/mediapipe/solutions/pose.html (дата обращения: 31.08.2021).

16. *Elakkiya R., Rajalakshmi E.* ISLAN // Mendeley Data. – 2021. – Ver. 1. – DOI: 10.17632/rc349j45m5.1.

17. Словарь индийского языка жестов. – URL: http://indiansignlanguage.org/dictionary/ (дата обращения: 31.08.2021).

18. Mediapipe: a framework for building perception pipelines / C. Lugaresi, J. Tang, H. Nash, C. McClanahan, E. Uboweja, M. Hays, F. Zhang, C.-L. Chang, M.G. Yong, J. Lee, W.-T. Chang, W. Hua, M. Georg, M. Grundmann. – arXiv preprint arXiv:1906.08172. – 2019.

19. *Le Q.V.* Building high-level features using large scale unsupervised learning // 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – Vancouver, BC, Canada, 2013. – P. 8595–8598.

20. Formal SignWriting (draft-slevinski-formal-signwriting-07). – URL: https://tools.ietf.org/id/draft-slevinski-formal-signwriting-07.html (accessed: 31.08.2021).

Гриф Михаил Геннадьевич, профессор кафедры автоматизированных систем управления факультета автоматики и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Сфера научных интересов – проектирование сложных систем и систем компьютерного перевода на язык жестов. Опубликовано более 300 научных и учебных работ. E-mail: grif@corp.nstu.nstu.ru

Элаккия Р., AP-III, Школа компьютерных технологий, CSE, Университет SASTRA Deemed, Индия. Научные интересы – методы распознавания жестовых языков глухих. Опубликовано более 30 научных и учебных работ. E-mail: elakkiya@cse.sastra.edu

Приходько Алексей Леонидович, младший научный сотрудник кафедры автоматизированных систем управления факультета автоматики и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы – методы распознавания жестовых языков глухих. Опубликовано 15 научных работ. E-mail: alexeyayay@yandex.ru

Бакаев Максим Александрович, доцент кафедры автоматизированных систем управления факультета автоматики и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы: взаимодействие человека с компьютером, дизайн интерфейса, машинное обучение. Имеет более 100 публикаций. E-mail: bakaev@corp.nstu.ru

Раджалакшми Е., аспирант, Школа компьютерных технологий, CSE, Университет SASTRA Deemed, Индия. Область научных интересов: рекомендательные системы, умные города, машинное обучение. Опубликовано 3 научные и учебные работы.

Grif Mikhail G., professor at the Department of Automated Control Systems, Faculty of Automation and Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests include design of complex systems and computer sign language translation systems. He has published more than 300 scientific and tutorials. E-mail: grif@corp.nstu.nstu.ru

Elakkiya R., AP-III, School of Computing, CSE, SASTRA Deemed University, India. His research interests: cover methods for recognizing sign languages of the deaf. He has published more than 30 scientific and tutorials. E-mail: elakkiya@cse.sastra.edu

Prikhodko Alexey L., junior researcher at the Department of Automated Control Systems, Faculty of Automation and Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests include methods for recognizing sign languages of the deaf. He has published 15 research papers. E-mail: alexeyayay@yandex.ru

Bakaev Maxim A., associate professor at the Department of Automated Control Systems, Faculty of Automation and Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are human-computer interaction, interface design, and machine learning. He has over 100 publications. E-mail: bakaev@corp.nstu.ru

Rajalakshmi E., graduate student, School of Computing, CSE, SASTRA Deemed University, India. His research interests cover: recommender systems, smart cities, and machine learning. He has published 3 research papers and tutorials. E-mail: rajalakshmi32210@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-53-74

Recognition of Russian and Indian sign languages based on machine learning[*]

M.G. GRIF[1,a], *R. ELAKKYA*[2,b], *A.L. PRIKHODKO*[1,c], *M.A. BAKAEV*[1,d], *E. RAJALAKSHMI*[2,e]

[1] *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*
[2] *613401, India, Thanjavur, Tamil Nadu, SASTRA Deemed University, School of Computing, CSE*

[a] *grif@corp.nstu* [b] *elakkiya@cse.sastra.edu* [c] *alexeyayay@yandex.ru*
[d] *bakaev@corp.nstu.ru* [e] *rajalakshmi32210@gmail.com*

Abstract

In the paper, we consider recognition of sign languages (SL) with a particular focus on Russian and Indian SLs. The proposed recognition system includes five components: configuration, orientation, localization, movement and non-manual markers. The analysis uses methods of recognition of individual gestures and continuous sign speech for Indian and Russian sign languages (RSL). To recognize individual gestures, the RSL Dataset was developed, which includes more than 35,000 files for over 1000 signs. Each sign was performed with 5 repetitions and at least by 5 deaf native speakers of the Russian Sign Language from Siberia. To isolate epenthesis for continuous RSL, 312 sentences with 5 repetitions were selected and recorded on video. Five types of movements were distinguished, namely, "No gesture", "There is a gesture", "Initial movement", "Transitional movement", "Final movement". The markup of sentences for highlighting epenthesis was carried out on the Supervisely.ly platform. A recurrent network architecture (LSTM) was built, implemented using the TensorFlow Keras machine learning library. The accuracy of correct recognition of epenthesis was 95 %. The work on a similar dataset for the recognition of both individual gestures and continuous Indian sign language (ISL) is continuing. To recognize hand gestures, the mediapipe holistic library module was used. It contains a group of trained neural network algorithms that allow obtaining the coordinates of the key points of the body, palms and face of a person in the image. The accuracy of 85 % was achieved for the verification data. In the future, it is necessary to significantly increase the amount of labeled data. To recognize non-manual components, a number of rules have been developed for certain movements in the face. These rules include positions for the eyes, eyelids, mouth, tongue, and head tilt.

Keywords: Deaf, computer sign language translation, Russian sign language, Indian sign language, gesture recognition, epenthesis, artificial neural network, machine learning, training datasets

REFERENCES

1. Grif M.G., Korolkova O.O., Panin L.G., Timofeeva M.K., Tsoy E.B. *Leksicheskie i grammaticheskie aspekty razrabotki komp'yuternogo surdoperevodchika russkogo yazyka* [Lexical and grammatical aspects of developing computer Russian sign language translator]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 292 p.

2. Grif M.G. Korolkova O.O., Manueva Yu.S. [Machine translation of Russian sign language for the deaf]. *Informatika: problemy, metody, tekhnologii* [Informatics: problems, methods, technologies]. Materials of the 20th International scientific conference, Voronezh, 13–14 February, pp. 1591–1597. ISBN 978-5-6042216-9-3. (In Russian).

3. Wadhawan A., Kumar P. Sign language recognition systems: a decade systematic literature review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, vol. 28, pp. 785–813. DOI: 10.1007/s11831-019-09384-2.

4. Elakkiya R., Grif M.G., Prikhodko A.L., Bakaev M.A. Recognition of Russian and Indian sign languages used by the deaf people. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo*

[*] *Received 20 February 2021.*
Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-57-45006.

tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university, 2020, no. 2–3 (79), pp. 57–76. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-57-76.

5. Gruber I., Ryumin D., Hrúz M., Karpov A. Sign language numeral gestures recognition using convolutional neural network. *Interactive Collaborative Robotics*. Cham, Springer, 2018, pp. 70–77.

6. Konstantinov V.M., Orlova Yu.A., Rozaliev V.L. Razrabotka 3D-modeli tela cheloveka s ispol'zovaniem MS Kinect [The Development of 3D human body model using MS Kinect]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2015, no. 6 (163), pp. 65–69.

7. Kagirov I., Ivanko D., Ryumin D., Axyonov A., Karpov A. TheRuSLan: Database of Russian Sign Language. *Proceedings of the 12th Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2020)*, Marseille, 2020, pp. 6079–6085.

8. Mukushev M., Imashev A., Kimmelman V., Sandygulova A. Automatic classification of handshapes in Russian sign language. *Proceedings of the LREC 2020 9th Workshop on the Representation and Processing of Sign Languages: Sign Language Resources in the Service of the Language Community, Technological Challenges and Application Perspectives*, Marseille, 2020, pp. 165–169.

9. Kimmelman V., Imashev A., Mukushev M., Sandygulova A. Eyebrow position in grammatical and emotional expressions in Kazakh-Russian Sign Language: A quantitative study. *Plos One*, 2020, vol. 15 (6). DOI: 10.1371/journal.pone.0233731.

10. Burkova S.I., Kimmel'man V.I., eds. *Vvedenie v lingvistiku zhestovykh yazykov. Russkii zhestovyi yazyk* [Introduction to the linguistics of sign languages. Russian sign language]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 356 p.

11. *Slovar' russkogo zhestovogo yazyka* [Dictionary of Russian Sign Language]. Available at: https://www.spreadthesign.com/ru (accessed 31.08.2021).

12. Bazoev V.Z. *Clovar' russkogo zhestovogo yazyka* [Dictionary of Russian Sign Language]. Moscow, Flinta Publ., 2009. 528 p.

13. *Supervisely*. *The leading platform for entire computer vision lifecycle*. Available at: https://supervise.ly/ (accessed 31.08.2021).

14. Kebets P.L. [Markers of the transition of the move in the discourse of Russian sign language]. *Materialy Sed'moi Konferentsii po tipologii i grammatike dlya molodykh issledovatelei* [Materials of the Seventh Conference on typology and grammar for young scholars], St. Petersburg, November 4–6, 2010, pp. 75–80. (In Russian).

15. System MediaPipe Pose. Available at: https://google.github.io/mediapipe/solutions/pose.html (accessed 31.08.2021).

16. Elakkiya R., Rajalakshmi E. ISLAN. *Mendeley Data*, 2021, ver. 1. DOI: 10.17632/rc349j45m5.1.

17. Dictionary of Indian Sign Language. Available at: http://indiansignlanguage.org/dictionary/ (accessed 31.08.2021).

18. Lugaresi C., Tang J., Nash H., McClanahan C., Uboweja E., Hays M., Zhang F., Chang C.-L., Yong M.G., Lee J., Chang W.-T., Hua W., Georg M., Grundmann M. *Mediapipe: A framework for building perception pipelines*. arXiv preprint arXiv: 1906.08172. 2019.

19. Le Q.V. Building high-level features using large scale unsupervised learning. *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vancouver, BC, Canada, 2013, pp. 8595–8598.

20. *Formal SignWriting (draft-slevinski-formal-signwriting-07)*. Available at: https://tools.ietf.org/id/draft-slevinski-formal-signwriting-07.html (accessed 31.08.2021).

Для цитирования:

Распознавание русского и индийского жестовых языков на основе машинного обучения / М.Г. Гриф, Р. Элаккия, А.Л. Приходько, М.А. Бакаев, Е. Раджалакшми // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 3 (83). – С. 53–74. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-53-74.

For citation:

Grif M.G., Elakkiya R., Prikhodko A.L., Bakaev M.A., Rajalakshmi E. Raspoznavanie russkogo i indiiskogo zhestovykh yazykov na osnove mashinnogo obucheniya [Recognition of Russian and Indian Sign Languages based on machine learning]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 53–74. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-53-74.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 83, № 3, 2021, с. 75–86

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 83, No. 3, 2021, pp. 75–86

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 53.088, 511.1

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-75-86

Сравнение чисел и анализ переполнения в модулярной арифметике*

В.И. ГУЖОВ[a], И.О. МАРЧЕНКО[b], Е.Е. ТРУБИЛИНА[c], Д.С. ХАЙДУКОВ[d]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *av.guzhov@corp.nstu.ru* [b] *bi.o.marchenko@gmail.com* [c] *csilver-kate94@mail.ru*
[d] *ddmitriyhaydukov@gmail.com*

Модулярная арифметика работает не с самим числом, а с его остатками от деления на некоторые целые числа. В модульной системе счисления, или системе счисления в остаточных классах, многоразрядное целое число в позиционной системе счисления представляется в виде последовательности нескольких позиционных чисел. Эти числа есть остатки (вычеты) от деления исходного числа на некоторые модули, являющиеся взаимно простыми числами. Преимущество модулярного представления состоит в возможности простого распараллеливания выполнения операций сложения, вычитания и умножения.

При параллельном выполнении арифметических операций применение модульной арифметики позволяет существенно сократить время вычислений. Тем не менее есть ряд недостатков модульного представления чисел, которые ограничивают возможность его использования. К ним относятся медленное преобразование чисел из модульного представления в позиционное, сложность сравнения чисел в модульном представлении, трудность выполнения операции деления, сложность определения наличия переполнения. Использование модульной арифметики оправдано, если существуют быстрые алгоритмы вычисления числа по набору остатков.

В настоящей статье представлен новый алгоритм восстановления чисел из модульного (модулярного) представления на основе разработанного авторами геометрического подхода на примере систем сравнений с двумя модулями. Показано, что в результате увеличения чисел в позиционном исчислении они последовательно меняются по спирали на поверхности двумерного тора. На основе данного подхода был разработан быстрый алгоритм сравнения чисел и алгоритм для определения переполнения при сложении и умножении чисел в модульном представлении.

Рассмотрение для многомерного случая возможно при анализе многомерного тора и исследовании поведения витков на его поверхности.

Ключевые слова: модульная арифметика, система сравнений, взаимно простые числа, переполнение, сравнение чисел, модуль, сравнимые по модулю числа, китайская теорема об остатках, переполнение при арифметических операциях

---

* *Статья получена 20 января 2021 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Суть модулярной (или модульной) арифметики заключается в проведении вычислений не с числом a, представленным в позиционной системе, а с остатками от деления числа на различные целые числа m_i [1–5]:

$$b_i = a \bmod m_i \tag{1}$$

Зная набор остатков $(b_1, b_2 \ldots b_n)$, можно в некотором диапазоне однозначно представить и само число a.

Главное достоинство модулярного представления состоит в простоте выполнения и возможности простого распараллеливания выполнения операций сложения, вычитания и умножения [6]:

$$\begin{aligned}
&(b_1, b_2 \ldots b_n) + (c_1, c_2 \ldots c_n) = (b_1 + c_1) \bmod m_1, \ldots, (b_n + c_n) \bmod m_n \\
&(b_1, b_2 \ldots b_n) - (c_1, c_2 \ldots c_n) = (b_1 - c_1) \bmod m_1, \ldots, (b_n - c_n) \bmod m_n \\
&(b_1, b_2 \ldots b_n) * (c_1, c_2 \ldots c_n) = (b_1 \cdot c_1) \bmod m_1, \ldots, (b_n \cdot c_n) \bmod m_n
\end{aligned} \tag{2}$$

Использование модульной арифметики обеспечивает значительное ускорение вычислений при параллельном выполнении операций. К уменьшению общего времени выполнения приводит одновременное выполнение операций, которые связаны с разными модулями.

Тем не менее есть недостатки, ограничивающие использование модулярного представления. К ним относятся:

- медленное преобразование чисел из модульного представления в позиционное;
- сложность оценки большего или меньшего числа в модульном представлении;
- трудность выполнения операции деления;
- сложность определения наличия переполнения.

Таким образом, использование модульной арифметики оправдано, если существуют быстрые алгоритмы вычисления числа по набору остатков.

Если двум целым числам a и b отвечает одинаковый остаток r от деления на некоторое целое число, то эти числа называются сравнимыми по модулю m. Для обозначения сравнимости чисел используется специальная операция ($\equiv$):

$$a \equiv b \bmod m. \tag{3}$$

Найдем решение системы:

$$\begin{aligned}
&X \equiv b_1 \pmod{m_1} \\
&X \equiv b_2 \pmod{m_2} \\
&\ldots \\
&X \equiv b_n \pmod{m_n}
\end{aligned} \tag{4}$$

Если числа $(m_1, m_2 \ldots m_n)$ являются ***взаимно простыми числами***, то в некотором диапазоне, определяемом их произведением, существует единственное решение [1, 2]:

$$X \equiv M_1 N_1 b_1 + M_2 N_2 b_2 + \ldots + M_n N_n b_n \bmod (m_1 m_2, \ldots, m_n), \tag{5}$$

где M_s и N_s определены из следующих условий:

$$m_1 m_2 \ldots m_n = M_s m_s \tag{6}$$

$$M_s N_s \equiv 1 \,(\bmod m_s). \tag{7}$$

Решение является единственным в диапазоне, который определяется произведением модулей $m_1 m_2, \ldots, m_n$.

Нахождение X в формуле (5) требует n умножений и $(n-1)$ операций сложения, вычисления необходимо производить с «длинными» числами (с бóльшим количеством разрядов, чем представление остатков).

В статье предлагается новый алгоритм сравнения модульных чисел и алгоритм определения переполнения при арифметических операциях на основе предложенного авторами геометрического подхода. Рассмотрение выполняется для системы сравнений с двумя модулями.

В качестве эталона в интерференционных измерительных системах используется длина волны лазерного излучения. Следствием этого является периодичность результатов фазовых измерений. Если исключить фазовую неоднозначность, можно увеличить динамический диапазон. В [7–9] приводится способ для восстановления абсолютных значений измеряемой величины интерференционными методами. Этот метод с использованием модульной арифметики получил название G–S-алгоритм [10–13]. Поэтому развитие данных методов играет важную роль не только для компьютерных технологий, но и для ряда инженерных задач.

1. БЫСТРЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННОГО ЧИСЛА ПО НАБОРУ ОСТАТКОВ

Рассмотрим решение системы сравнений (4) для двух произвольных взаимно простых модулей. Например: $m_1 = 11$, $m_2 = 17$. В данном случае: $M_1 = 17$, $M_2 = 11$, $N_1 = 2$, $N_2 = 14$. Из (5) следует

$$X \equiv 17 \cdot 2\, b_1 + 11 \cdot 14\, b_2 \bmod (11 \cdot 17) = 34\, b_1 + 154\, b_2 \bmod (187). \tag{8}$$

Таблица всех возможных результатов будет иметь вид, показанный на рис. 1. Числа, соответствующие решениям, увеличиваются от $i = 0, m_2 - 1$ последовательно по диагоналям, показанным на рисунке.

b1 \ b2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0	154	121	88	55	22	176	143	110	77	44	11	165	132	99	66	33
1	34	1	155	122	89	56	23	177	144	111	78	45	12	166	133	100	67
2	68	35	2	156	123	90	57	24	178	145	112	79	46	13	167	134	101
3	102	69	36	3	157	124	91	58	25	179	146	113	80	47	14	168	135
4	136	103	70	37	4	158	125	92	59	26	180	147	114	81	48	15	169
5	170	137	104	71	38	5	159	126	93	60	27	181	148	115	82	49	16
6	17	171	138	105	72	39	6	160	127	94	61	28	182	149	116	83	50
7	51	18	172	139	106	73	40	7	161	128	95	62	29	183	150	117	84
8	85	52	19	173	140	107	74	41	8	162	129	96	63	30	184	151	118
9	119	86	53	20	174	141	108	75	42	9	163	130	97	64	31	185	152
10	153	120	87	54	21	175	142	109	76	43	10	164	131	98	65	32	186

Рис. 1. Порядок последовательного изменения чисел

Fig. 1. A sequential change order of numbers

Если продолжить выделенные на рис. 1 диагонали, то можно заметить, что при склейке верхней и нижней строк и левого и правого столбцов образуется тор [15], на поверхности которого решения системы сравнений (8) будут возрастать по спирали (рис. 2) от нуля до $m_1 m_2$.

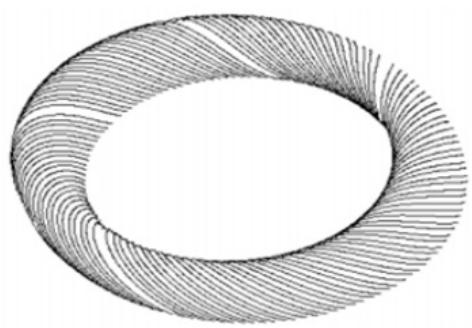


Рис. 2. Возрастание чисел при отображении на поверхности двумерного тора

Fig. 2. An increase in numbers when displayed on the surface of a two-dimensional torus

Для нахождения решений (8) достаточно определить начальное значения витка на поверхности тора и числа точек на этом витке [16, 17].

Для выбранного примера размер витка $m_1 = 11$. Число X можно найти так:

$$X = n[i] \cdot m_1 + b_1, \tag{9}$$

где $i = 0, m_2 - 1$.

Для того чтобы определить число витков, можно воспользоваться выражением, следуемым из (5):

$$n[i] = M_2 N_2 \; i \bmod (m_1 m_2) = N_2 \; i \bmod (m_2), \tag{10}$$

или для конкретного случая $(m_1 = 11,\ m_2 = 17)$

$$n[i] = 14\,i \bmod (17)\,, \quad i = 0,16\,. \tag{11}$$

На рис. 3 представлены начальные значения витков $n[i]$, которые определяются выражением (11).

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	14	11	8	5	2	16	13	10	7	4	1	15	12	9	6	3

Рис. 3. Значения витков $n[i]$. Первая строка $i = b_2$. Вторая строка – начальные значения витков

Fig. 3. Turn values $n[i]$. The first line is $i = b_2$. The second line is initial values of turns

Для столбцов аналогично:

$$n[i] = 2\,i \bmod (11)\,, \quad i = 0,10\,. \tag{12}$$

Отложим начальные значения витков (рис. 4).

	b2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
b1	0	14	11	8	5	2	16	13	10	7	4	1	15	12	9	6	3	
0	3	0	154	121	88	55	22	176	143	110	77	44	11	165	132	99	66	33
1	6	34	1	155	122	89	56	23	177	144	111	78	45	12	166	133	100	67
2	9	68	35	2	156	123	90	57	24	178	145	112	79	46	13	167	134	101
3	12	102	69	36	3	157	124	91	58	25	179	146	113	80	47	14	168	135
4	15	136	103	70	37	4	158	125	92	59	26	180	147	114	81	48	15	169
5	1	170	137	104	71	38	5	159	126	93	60	27	181	148	115	82	49	16
6	4	17	171	138	105	72	39	6	160	127	94	61	28	182	149	116	83	50
7	7	51	18	172	139	106	73	40	7	161	128	95	62	29	183	150	117	84
8	10	85	52	19	173	140	107	74	41	8	162	129	96	63	30	184	151	118
9	13	119	86	53	20	174	141	108	75	42	9	163	130	97	64	31	185	152
10		153	120	87	54	21	175	142	109	76	43	10	164	131	98	65	32	186

Число витков

Число витков

Рис. 4. Изменение чисел в таблице решений, начиная с начального значения витка (значения витков – вторая строка и второй столбец в таблице решений)

Fig. 4. Changing the numbers in the decision table, starting from the initial value of the iteration (the values of the iterations are the second row and the second column in the decision table)

Числа X на рис. 5 изменяются от нуля до 186 (8). Число витков $n[i]$ изменяется от нуля до 16, т. е. максимальное число витков равно 16.

Так как таблица прямоугольная, то некоторые витки, значения для которых $b_2 - b_1 < 0$ (например, виток 1), заканчиваются на правом столбце и продолжаются на нулевом столбце, начиная со следующей строки (рис. 4). В таком случае таблицу решений можно представить в виде, в котором значения разорванных витков симметрично отображаются относительно главной диагонали (рис. 5).

	b2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
b1	0	14	11	8	5	2	16	13	10	7	4	1	15	12	9	6	3		←Число витков									
0	3	0	154	121	88	55	22	176	143	110	77	44	11	165	132	99	66	33										
1	6	34	1	155	122	89	56	23	177	144	111	78	45	12	166	133	100	67	34									
2	9	68	35	2	156	123	90	57	24	178	145	112	79	46	13	167	134	101	68	35								
3	12	102	69	36	3	157	124	91	58	25	179	146	113	80	47	14	168	135	102	69	36							
4	15	136	103	70	37	4	158	125	92	59	26	180	147	114	81	48	15	169	136	103	70	37						
5	1	170	137	104	71	38	5	159	126	93	60	27	181	148	115	82	49	16	170	137	104	71	38					
6	4	17	171	138	105	72	39	6	160	127	94	61	28	182	149	116	83	50	17	171	138	105	72	39				
7	7	51	18	172	139	106	73	40	7	161	128	95	62	29	183	150	117	84	51	18	172	139	106	73	40			
8	10	85	52	19	173	140	107	74	41	8	162	129	96	63	30	184	151	118	85	52	19	173	140	107	74	41		
9	13	119	86	53	20	174	141	108	75	42	9	163	130	97	64	31	185	152	119	86	53	20	174	141	108	75	42	
10		153	120	87	54	21	175	142	109	76	43	10	164	131	98	65	32	186	153	120	87	54	21	175	142	109	76	43

↑ Число витков

Рис. 5. Продолжение таблицы решений (выделены нулевой и первый витки)

Fig. 5. Continuation of the decision table (zero and first turns are highlighted)

Число витков можно определить по модульному представлению (b_1, b_2):

$$n[b_1, b_2] = N_2(b_2 - b_1)\bmod(m_2), \quad \text{если} \quad b_2 - b_1 \geq 0; \tag{13}$$

$$n[b_1, b_2] = N_2(b_2 - b_1 + m_2)\bmod(m_2), \quad \text{если} \quad b_2 - b_1 < 0. \tag{14}$$

Например: $m_1 = 11$, $m_2 = 17$, $N_2 = 14$.

$b_2 - b_1 \geq 0$

$X = 27 \;=\; (5,\ 10)$

$$n(b_1, b_2) \;= N_2(b_2 - b_1)\bmod(m_2) = 14 \cdot (10 - 5)\ (mod 17) = \ 2$$

$X = n[b_1, b_2] \cdot m_1 + b_1 = 2 \cdot 11 + 5 = 27$

$X = 46 \;=\; (2,\ 12)$

$$n(b_1, b_2) \;= N_2(b_2 - b_1)\bmod(m_2) = 14 \cdot (12 - 2)\ (mod 17) = \ 4$$

$X = n[b_1, b_2] \cdot m_1 + b_1 = 4 \cdot 11 + 2 = 46$

$b_2 - b_1 < 0$

$X = 36 \;=\; (3,\ 2)$

$$n(b_1, b_2) \;= N_2(b_2 - b_1 + m_2)\bmod(m_2) = 14 \cdot (2 - 3 + 17)\ (mod 17) = \ 3$$

$X = n[b_1, b_2] \cdot m_1 + b_1 = 3 \cdot 11 + 3 = 36$

$X = 69 \;=\; (3,\ 1)$

$$n(b_1, b_2) \;= N_2(b_2 - b_1 + m_2)\bmod(m_2) = 14 \cdot (-2 + 17)\ (mod 17) = \ 6$$

$X = n[b_1, b_2] \cdot m_1 + b_1 = 6 \cdot 11 + 3 = 69$

С точки зрения упрощения число витков можно посчитать только один раз и записать в одномерном массиве размером m_2 (рис. 6). Индекс в этом массиве будет определяться как $(b_2 - b_1)$ или $(b_2 - b_1 + m_2)$ (13, 14).

На рис. 6 видно, что, зная число витков на торе (рис. 3), можно определить и само число *X*:

$$X = (b_1, b_2) = n(b_1, b_2) \cdot m_1 + b_1, \tag{15}$$

где n является числом витков.

2. СРАВНЕНИЕ ЧИСЕЛ В МОДУЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Для того чтобы сравнить два числа в модулярном представлении вычисляется число витков. Если число витков для одного из чисел больше, чем для другого, то данное число несомненно больше.

Например:

$b_2 - b_1 \geq 0$

$X = 27 \ = \ (5,\ 10) \rightarrow n(b_1, b_2) \ = \ 2$

$X = 46 \ = \ (2,\ 12) \rightarrow n(b_1, b_2) \ = \ 4$

$(2,\ 12) > (5,\ 10)$

$b_2 - b_1 < 0$

$X = 36 \ = \ (3,\ 2) \rightarrow n(b_1, b_2) \ = \ 3$

$X = 69 \ = \ (3,\ 1) \rightarrow n(b_1, b_2) \ = \ 6$

$(3,\ 1) > (3,\ 2)$

Если число витков одинаково, определяется положение числа на расширенной диагонали (по величине b_1).

Например:

$X = 13 \ = \ (2,\ 13) \rightarrow n(b_1, b_2) = 1 \quad b_1 = 2$

$X = 19 \ = \ (8,\ 2) \rightarrow n(b_1, b_2) = 1 \quad b_1 = 8$

$(8,\ 2) > (2,\ 13)$

Так, сравнение чисел в модулярном представлении выполняется достаточно просто.

При сложении или умножении может наступить **переполнение**. Переполнение возникает, если в результате выполнения арифметического действия число превышает максимальное.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕПОЛНЕНИЯ ПРИ СЛОЖЕНИИ ЧИСЕЛ В МОДУЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Рассмотрим операцию сложения (2).

При сложении двух чисел в модульном представлении (15) с использованием подсчета числа витков

$$n(b_1,b_2)\cdot m_1+b_1+n(c_1,c_2)\cdot m_1+c_1=\left[n(b_1,b_2)+n(b_1,b_2)\right]+b_1+c_1. \quad (16)$$

Если учитывать, что b_1+c_1 максимально изменяются от нуля до $(2m_1-1)$, то сложение этих чисел может привести к увеличению числа витков на 1.

Так, при сложении двух чисел в модульном представлении переполнение наступит в следующих случаях:

1) если сумма числа витков больше максимального числа витков;

2) если $b_1+c_1\geq m_1$, то к сумме числа витков добавляется 1, а эта сумма превышает максимальное число витков.

Рассмотрим примеры, представленные в таблице. Максимальное число витков не может превышать 16.

Сложение чисел в модульном представлении

Addition of numbers in modular representation

Число витков	11+16 = 27	(0,11) + (5,16) = (5, 27) = (5, 10) 1 1 2
	21+21 = 42	(10,4) + (10,4) = (20, 8) = (9, 8) 1 1 3
	143 +43 = 186	(0,7) + (10,9) = (10, 16) 13 3 16
	144 +43 = 187	**(1,8) + (10,9) = (11, 17) = (0, 0)** **13 3 0**

В таблице представлены значения чисел в модульной форме и значения витков. Полужирным шрифтом выделены примеры сложения чисел, когда наступает переполнение.

Рассмотрим, как определить переполнение при умножении.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕПОЛНЕНИЯ ПРИ УМНОЖЕНИИ ЧИСЕЛ В МОДУЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Рассмотрим операцию умножения (2). При умножении в модульном представлении имеем

$$\left[n(b_1,b_2)\cdot m_1+b_1\right]\cdot\left[n(c_1,c_2)\cdot m_1+c_1\right]=$$

$$=\left[n(b_1,b_2)\cdot n(c_1,c_2)\cdot m_1\cdot m_1+n(c_1,c_2)\cdot b_1\cdot m_1+n(b_1,b_2)\cdot c_1\cdot m_1+b_1c_1\right]\bmod m_1=$$

$$=n(b_1,b_2)\cdot n(c_1,c_2)\cdot m_1+n(c_1,c_2)\cdot b_1 n(b_1,b_2)\cdot c_1+b_1c_1=n_p m_1+b_1c_1, \quad (17)$$

где число витков будет

$$n_p=n(b_1,b_2)\cdot n(c_1,c_2)\cdot m_1+n(c_1,c_2)\cdot b_1+n(b_1,b_2)\cdot c_1. \quad (18)$$

Так, при умножении двух чисел в модульном представлении переполнение наступит в следующих случаях:

1) если результирующее число витков больше максимального числа витков;

2) если $b_1c_1 \geq m_1$, то к сумме числа витков добавляется целая часть $\mathrm{int}\left[b_1c_1 / m_1\right]$, и эта сумма превышает максимальное число витков.

Например:

$$12 \cdot 13 = 156 \quad (1,12) \cdot (2,13) = (2,3)$$

$$b_1c_1 < m_1 \quad 2 < 11$$

$$n(1,12) = 1 \quad n(2,13) = 1 \quad n(2,3) = 14 \rightarrow n_p = 11 + 1 + 2 = 14.$$

В подобном случае переполнения не возникает.

$$51 \cdot 14 = 204 \quad (7,0) \cdot (4,4) = (6,0)$$

$$b_1c_1 > m_1 \quad 28 > 11 \quad \mathrm{int}\left[28 / 11\right] = 2$$

$$n(7,0) = 1 \quad n(4,4) = 0 \quad n(6,0) = 1 \rightarrow n_p = 16 + 2 > 16.$$

Возникает переполнение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование модульной арифметики позволяет легко распараллелить выполнение операций, что приводит к резкому сокращению общего времени вычислений. Кроме того, использование модульных операций позволяет сократить размер разрядов чисел, что приводит к упрощению вычислительных устройств.

Основными недостатками модульного представления числа являются: медленное преобразование чисел из модульного представления в позиционное, сложность определения большего или меньшего числа в модулярном представлении, сложность проверки возникновения переполнения в результате математических операций.

В статье рассмотрен быстрый алгоритм восстановления чисел из модульного представления на основе представления решений системы сравнений в виде тора. Это позволяет упростить восстановление чисел с помощью нахождения числа витков и определения положения числа на этом витке.

На основе этого подхода разработаны быстрые алгоритмы сравнения чисел и алгоритмы определения переполнения при сложении и умножении чисел в модульном представлении.

Переход к многомерному случаю возможен при рассмотрении поведения витков на поверхности многомерного тора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бухштаб А.А.* Теория чисел. – М.: Просвещение, 1966. – 384 с.

2. *Виноградов И.М.* Основы теории чисел. – 8-е изд., испр. – М.: Наука, 1972. – 168 с.

3. *Галочкин А.И., Нестеренко Ю.В., Шидловский А.Б.* Введение в теорию чисел. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 159 с.

4. *Сизый С.В.* Лекции по теории чисел. – М.: Физматлит, 2007. – 190 с.

5. *Осипов Н.Н.* Теория чисел. – Красноярск: ИКИТ СФУ, 2008. – 117 с.

6. *Кнут Д.Э.* Искусство программирования. Т. 2. Получисленные алгоритмы. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 832 с.

7. *Gushov V.I., Solodkin Yu.N.* Automatic processing of fringe patterns in integer interferometers // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 14, iss. 4–5. – P. 311–324.

8. Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry / V.I. Guzhov, S.P. Il'inykh, R.A. Kuznetsov, A.R. Vagizov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2013. – Vol. 49, iss. 2. – P. 178–183.

9. *Гужов В.И., Солодкин Ю.Н.* Использование свойств целых чисел для расшифровки интерферограмм // Оптика и спектроскопия. – 1988. – Т. 65, № 6. – С. 1123–1128.

10. Measurement system based on multi wavelength interferometry for long gauge block calibration / M. Wengierow, L. Salbut, Z. Ramotowski, R. Szumski, K. Szykiedans // Metrology and Measurement Systems. – 2013. – Vol. 20, iss. 3. – P. 479–490.

11. *Zhong J., Zhang Y.* Absolute phase-measurement technique based on number theory in multifrequency grating projection profilometry // Applied Optics. – 2001. – Vol. 40, N 4. – P. 492–500.

12. *Kujawińska M., Osten W.* Fringe pattern analysis methods: up-to-date review // Proceedings SPIE. – 1998. – Vol. 3407. – P. 56–66.

13. Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: a single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations / M. Takeda, Q. Gu, M. Kinoshita, H. Takai, Y. Takahashi // Applied Optics. – 1997. – Vol. 36, N 22. – P. 5347–5354.

14. *Арнольд И.В.* Теоретическая арифметика. – М.: Учпедгиз, 1938. – 480 с.

15. *Гильберт Д., Кон-Фоссен С.* Наглядная геометрия. – М.: Наука, 1981. – 344 с.

16. *Гужов В.И., Кабак Е.С., Орлов И.С.* Использование модулярной арифметики при фазовых измерениях // Автоматика и программная инженерия. – 2015. – № 1 (1). – С. 97–107.

17. *Гужов В.И.* Методы измерения 3D профиля объектов. Фазовые методы: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 83 с.

Гужов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных (ССОД) Новосибирского государственного технического уиверситета. Направление научных исследований – высокоточные оптические измерительные системы. Автор более 268 публикаций. E-mail: v.guzhov@corp.nstu.ru

Марченко Илья Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры ССОД. Направление исследований – бесконтактное измерение методами структурированного освещения. Автор 40 публикаций. E-mail: i.o.marchenko@gmail.com

Трубилина Екатерина Евгеньевна, аспирант, ассистент кафедры ССОД. Направление исследований – структурированное освещение. Имеет 16 публикаций. E-mail: silverkate94@mail.ru

Хайдуков Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры ССОД. Автор более 30 работ. Область научных интересов: голография, бесконтактное измерение деформаций. E-mail: dmitriyhaydukov@gmail.com

Guzhov Vladimir I., D.Sc. (Eng.), professor at the department of data collection and data processing systems, NSTU. The main field of his scientific research is high-precision measuring systems. He is the author of more than 268 publications. Email: v.guzhov@corp.nstu.ru

Marchenko Ilya O., Ph.D, associate professor at the department of data collection and data processing systems. The main field of research is a non-contact measurement by the methods of struc-tured lighting. He is the author of 40 publications. E-mail: i.o.marchenko@gmail.com

Trubilina Ekaterina E., postgraduate student, assistant of the data collection and data processing systems department. The main field of research is structured lighting. She has 16 publications. Email: sil-ver-kate94@mail.ru

Khaidukov Dmitry, Ph.D, assistant, Department SSOD. He is the author of more than 30 works. Re-search interests: holography, contactless measurement of deformations. E-mail: dmitriyhaydu-kov@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-75-86

Comparison of numbers and analysis of overflow in modular arithmetic[*]

V.I. GUZHOV[a], *I.O. MARCHENKO*[b], *E.E. TRUBILINA*[c], *D.S. KHAIDUKOV*[d]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *av.guzhov@corp.nstu.ru* [b] *bi.o.marchenko@gmail.com* [c] *csilver-kate94@mail.ru*
[d] *ddmitriyhaydukov@gmail.com*

Abstract

The method of modular arithmetic consists in operating not with a number, but with its remainders after division by some integers. In the modular number system or the number system in the residual classes, a multi-bit integer in the positional number system is represented as a sequence of several positional numbers. These numbers are the remainders (residues) of dividing the original number into some modules that are mutually prime integers. The advantage of the modular representation is that it is very simple to perform addition, subtraction and multiplication operations.

In parallel execution of operations, the use of modular arithmetic can significantly reduce the computation time. However, there are drawbacks to modular representation that limit its use. These include a slow conversion of numbers from modular to positional representation; the complexity of comparing numbers in modular representation; the difficulty in performing the division operation; and the difficulty of determining the presence of an overflow. The use of modular arithmetic is justified if there are fast algorithms for calculating a number from a set of remainders.

This article describes a fast algorithm for converting numbers from modular representation to positional representation based on a geometric approach. The review is carried out for the case of a comparison system with two modules. It is also shown that as a result of increasing numbers in positional calculus, they successively change in a spiral on the surface of a two-dimensional torus.

Based on this approach, a fast algorithm for comparing numbers and an algorithm for detecting an overflow during addition and multiplication of numbers in modular representation were developed.

Consideration for the multidimensional case is possible when analyzing a multidimensional torus and studying the behavior of the turns on its surface.

Keywords: modular arithmetic, comparison system, coprime integers, overflow, comparison of numbers, module, numbers comparable in absolute value, Chinese Remainder Theorem, overflow during arithmetic operations

[*] *Received 20 January 2021.*

REFERENCES

1. Bukhshtab A.A. *Teoriya chisel* [The theory of numbers]. Moscow, Prosveshchenie Publ., 1966. 384 p.

2. Vinogradov I.M. *Osnovy teorii chisel* [Fundamentals of the theory of numbers]. 8th ed. Moscow, Nauka Publ., 1972. 168 p.

3. Galochkin A.I., Nesterenko Yu.V., Shidlovskii A.B. *Vvedenie v teoriyu chisel* [Introduction to the theory of numbers]. Moscow, MSU Publ., 1995. 159 p.

4. Sizyi S.V. *Lektsii po teorii chisel* [Lectures on the theory of numbers]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 190 p.

5. Osipov N.N. Teoriya chisel [The theory of numbers]. Krasnoyarsk, SibFU Institute of space and information technologies Publ., 2008. 117 p.

6. Knuth D. *Iskusstvo programmirovaniya*. T. 2. *Poluchislennye algoritmy* [The art of computer programming. Vol. 2. Seminumerical algorithms]. 3rd ed. Moscow, Vil'yams Publ., 2007. 832 p. (In Russian).

7. Gushov V.I., Solodkin Yu.N. Automatic processing of fringe patterns in integer interferometers. *Optics and Lasers in Engineering*, 1991, vol. 14, iss. 4–5, pp. 311–324.

8. Guzhov V.I., Il'inykh S.P., Kuznetsov R.A., Vagizov A.R. Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2013, vol. 49, iss. 2, pp. 178–183.

9. Guzhov V.I., Solodkin Yu.N. Ispol'zovanie svoistv tselykh chisel dlya rasshifrovki interferogramm [Using the properties of integer numbers to decrypt interferograms]. *Optika i spektroskopiya = Optics and Spectroscopy*, 1988, vol. 65, no. 6, pp. 1123–1128. (In Russian).

10. Wengierow M., Salbut L., Ramotowski Z., Szumski R., Szykiedans K. Measurement system based on multi wavelength interferometry for long gauge block calibration. *Metrology and Measurement Systems*, 2013, vol. 20, iss. 3, pp. 479–490.

11. Zhong J., Zhang Y. Absolute phase-measurement technique based on number theory in multifrequency grating projection profilometry. *Applied Optics*, 2001, vol. 40, no. 4, pp. 492–500.

12. Kujawińska M., Osten W. Fringe pattern analysis methods: up-to-date review. *Proceedings SPIE.*, 1998, vol. 3407, pp. 56–66.

13. Takeda M., Gu Q., Kinoshita M., Takai H.,Takahashi Y. Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: a single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations. *Applied Optics*, 1997, vol. 36, no. 22, pp. 5347–5354.

14. Arnol'd I.V. *Teoreticheskaya arifmetika* [Theoretical Arithmetic]. Moscow, Uchpedgiz Publ., 1938. 480 p.

15. Hilbert D., Cohn-Vossen S. *Naglyadnaya geometriya* [Visual geometry]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 344 p.

16. Guzhov V.I., Kabak E.S., Orlov I.S. Ispol'zovanie modulyarnoi arifmetiki pri fazovykh izmereniyakh [Use of modular arithmetic with phase measurements]. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya = Automatics and Software Enginery*, 2015, no. 1 (1), pp. 97–107.

17. Guzhov V.I. *Metody izmereniya 3D profilya ob"ektov. Fazovye metody* [Methods for measuring 3D profile objects. Phase methods]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 83 p.

Для цитирования:

Сравнение чисел и анализ переполнения в модулярной арифметике / В.И. Гужов, И.О. Марченко, Е.Е. Трубилина, Д.С. Хайдуков // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 3 (83). – С. 75–86. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-75-86.

For citation:

Guzhov V.I., Marchenko I.O., Trubilina E.E., Khaidukov D.S. Sravnenie chisel i analiz perepolneniya v modulyarnoi arifmetike [Comparison of numbers and analysis of overflow in modular arithmetic]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 75–86. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-75-86.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 83, № 3, 2021, с. 87–98

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 83, No. 3, 2021, pp. 87–98

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.9; 528.1

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-87-98

Метод шифрования геоизображений на основе реорганизации внутренней структуры цифрового фильтра*

И.Л. ЖБАНОВ[a], В.Л. ЖБАНОВА[b]

214013, РФ, г. Смоленск, Энергетический пр., 1, филиал Национального исследовательского университета МЭИ в г. Смоленске

[a] *gens84@yandex.ru* [b] *vera-zhbanova@yandex.ru*

В работе представлен метод шифрования геоизображений на основе реорганизации внутренней структуры фильтра. За основу приняты методы цифровой фильтрации изображений в среде MATLAB. Суть шифрования – в управлении наложением шумов и ядром смазывания. Знание этих величин позволит адресату восстановить передаваемые карты с минимальными помехами, что для перехватчика данных будет недостижимым. В условиях неблагоприятных факторов иногда возникают условия, приводящие к потере информативности изображений и, как следствие, к повреждению информации, поэтому развитие способов, минимизирующих их влияние, является актуальной задачей исследования. Таким образом, предлагается один из подходов по построению пространственных фильтров с управляемой структурой для выделения контрастных изображений в шумах различной интенсивности. Описана процедура преобразования любого пространственного фильтра из начального отображения в вид, позволяющий управлять его внутренним состоянием. Полученные результаты исходного и преобразованного изображения позволяют сделать выводы о возможности практического применения предлагаемого инвариантного пространственного фильтра в блоках анализа исходного изображения. За счет факториальной зависимости найти необходимое результирующее положение всех параметров шифрования изображения (размеров, вида функции искажения, параметра регуляризации α и σ) вычислительным путем для перехватчиков информации весьма проблематично, так как вычислительные затраты при этом не соизмеримы с возможностями современных ЭВМ. Это может быть использовано для передачи фото, видеосообщений и текстовой информации между потребителями использующими системы передачи данных любого назначения, особенно при передаче картографической информации.

Ключевые слова: шифрование, сингулярный, геоизображения, цифровые фильтры, цифровые изображения, картография, обработка изображений, факториал, пространственный фильтр, MATLAB

* *Статья получена 10 февраля 2021 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Конфиденциальность информации на сегодняшнем этапе развития современных телекоммуникационных технологий является актуальной областью интересов современного общества. Возрастают требования по криптоустойчивости при хранении и передаче данных. Обработка изображений ввиду распространения визуального контента становится всё более востребованной [1–6]. Наиболее важным направлением исследования является защита картографической информации – геоизображений [6–11]. Геодезия и картография являются направлениями, тесно связанными с радиотехнической разведкой местности, изображение которой получают мобильные средства локации, реализующие различные принципы синтезирования апертуры антенны. Не исключено, что существует возможность применять данные подходы на «закрытых» секторах ответственности, а чтобы сформированные таким образом изображения передавались быстро (по открытым линиям передачи данных без предварительного избыточного кодирования), предложен новый способ шифрования изображения. Если возникает необходимость передачи информации в виде, доступном только общающимся абонентам, то, применяя метод, указанный в данной статье, это возможно без особых многоэтапных процедур (согласно действующему законодательству с соблюдением требований режима секретности).

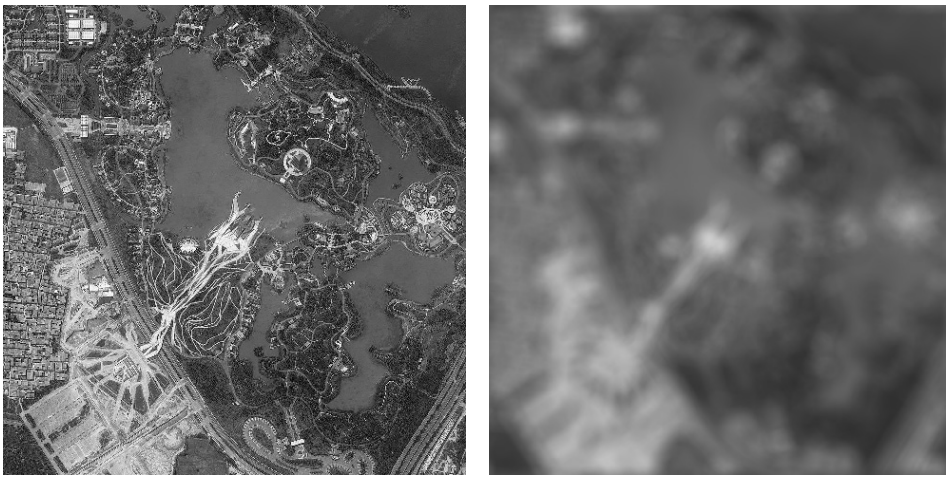
Интеллектуализация современного общества диктует новые условия и требования для совершенствования криптоустойчивочти цифровых изображений, а именно по их надежности и безотказности. На сегодняшний день приоритет основных криптографических устройств определен оптико-электронными системами с возможностью выделения отдельных участков изображения по определенным алгоритмам с нейросетевым интерфейсом [8, 12].

Однако в условиях неблагоприятных факторов (собственные шумы, радиация, неисправность отдельных блоков и систем и т. д.) возникают условия, приводящие к потере информативности изображений и, как следствие, к потере части передаваемой информации, поэтому развитие подходов, минимизирующих их влияние, является актуальной задачей исследования. Основная задача исследования – разработка метода шифрования геоизображений. Предлагается применить методы цифровой фильтрации изображений в среде MATLAB. Основой шифрования является управление наложением шумов и ядром смазывания. Знание этих величин позволит адресату восстановить передаваемые карты с минимальными помехами, что для перехватчика данных будет невозможным. Последнее достигается применением фильтрации на основе сингулярного дополнения матрицы опорного фильтра свертки.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ШИФРОВАНИЯ

В качестве одного из возможных направлений развития теории пространственной фильтрации изображений предложен подход, который заключается в возможности преобразования стандартного фильтра в инвариантный с управляемой структурой, который раскрыт в следующей последовательности действий на примере одного изображения (рис. 1, *а*). Выбирается

фильтр восстановления изображения, имеющий матричную форму записи **A** (N, K-размер в пикселях). В предлагаемом способе в качестве такого фильтра предложено использовать фильтр Лапласа laplacian (широко используется в пакете программирования MATLAB), которым описывается эффект расфокусировки объектива камеры (рис. 1, *б*).



а *б*

Рис. 1. Обработка изображений:

а – исходное изображение; *б* – применение «смазывания» к исходному изображению

Fig. 1. Image processing:

a is an original image; *b* is applying “blur” to the original image

Далее фильтр восстановления $\mathbf{A}(\mathrm{N}\times\mathrm{N})$ подвергается сингулярному разложению [13, 14]

$$\mathbf{A} = \mathbf{U\Sigma V}^{\mathrm{H}}, \tag{1}$$

где **U** и **V** – унитарные матрицы порядка N, состоящие из левых и правых сингулярных векторов соответственно; $(\ )^{\mathrm{H}}$ – Эрмитово сопряжение; $\mathbf{\Sigma}$ – диагональная матрица порядка N сингулярных значений ξ_i матрицы **A**.

Таким образом, формируется новая матричная запись инвариантного фильтра восстановления **X**, полученная методом сингулярного дополнения матрицы **A**:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A} + \alpha\mathbf{UV}^{\mathrm{T}}), \tag{2}$$

где α – регуляризирующий множитель, принимающий значения от нуля до N; $(\ )^{\mathrm{T}}$ – оператор транспонирования.

Затем формируется новое изображение $\overset{*}{\mathbf{I}}$ на основе исходного (**I**) путем его свертки с инвариантным фильтром восстановления **X**:

$$\overset{*}{\mathbf{I}} = \mathbf{X} \otimes \mathbf{I}, \tag{3}$$

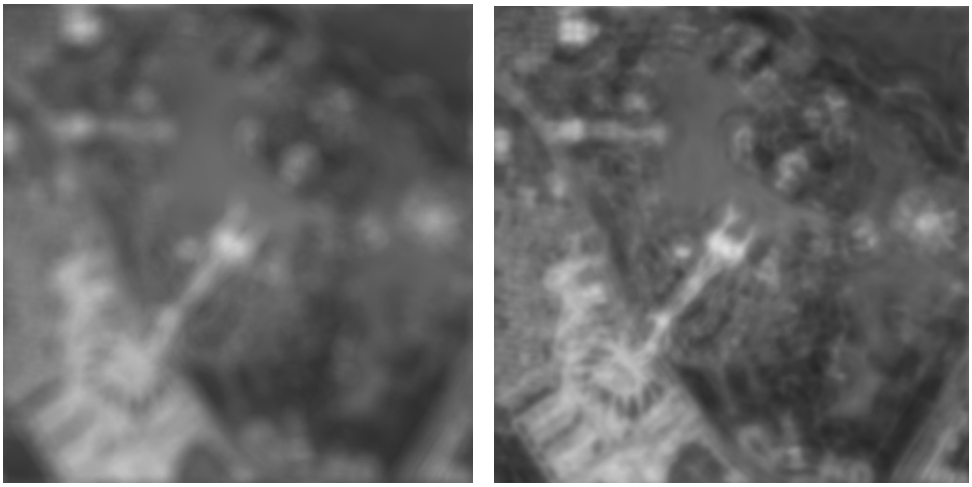
где $\otimes$ – оператор свертки [15].

Для сравнения результатов работы предложенного инвариантного фильтра с исходным проводилось принудительное зашумление изображения с нормальным законом распределения, нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением α (вид шума «соль–перец») (рис. 2, *а*).

В результате полученное изображение обозначим **Z**, и оно будет описываться по следующему выражению:

$$\mathbf{Z} = \overset{*}{\mathbf{I}} + \sigma. \tag{4}$$

Анализ рис. 2, *а* показывает, что для выделения наиболее контрастных областей необходимы сложные соответствующие процедуры поиска и определения границ исследования, и невозможно выставить порог принятия решения (рис. 2, *б*, 3, 4, 5, *а*), в то время как при использовании предложенного подхода, описанного выше, данная процедура осуществима с некоторой потерей качества исходного изображения.



а *б*

Рис. 2. Обработка изображений:

а – применение «смазывания» и «шума» к исходному изображению; *б* – восстановление изображения методом Винера

Fig. 2. Image processing:

a is applying “blur” and “noise” to the original image; *b* is image restoration by the Wiener method

Обратите внимание, насколько нечетко происходит восстановление изображения по каждому методу. Дело в том, что при каждом восстановлении не известно ядро смазывания и параметр шума. Но если отправитель пересылает данные с заранее известным получателю набором исходных вмешательств, восстановление любым из методов будет результативным. Как пример, восстановление изображения методом Винера без заданных параметров (рис. 5, *а*) и с заданными параметрами (рис. 5, *б*).

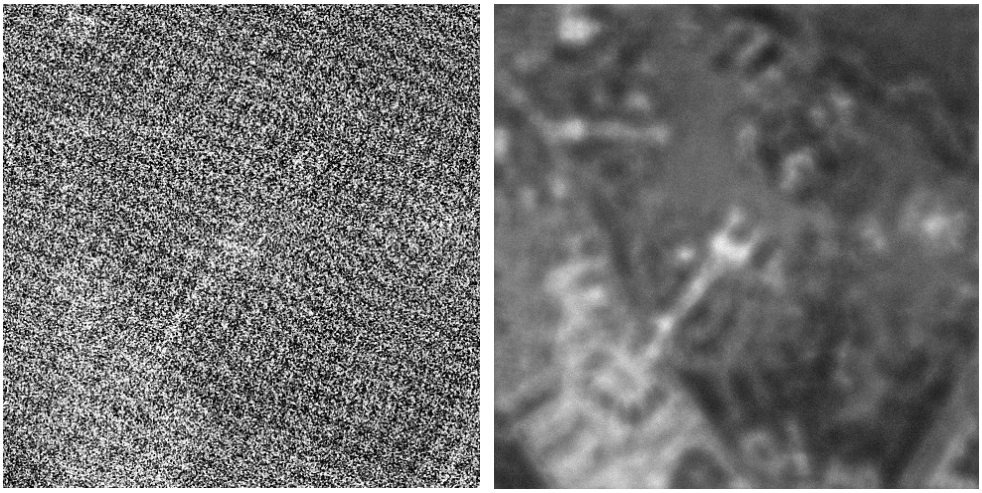
Основным достоинством в первую очередь выступает отсутствие необходимости двойного преобразования Фурье в отличие от фильтрации в частотной области, что существенно снижает вычислительные затраты при данном подходе.

Стоит отметить, что для декодирования информации потребителю необходимо знать размеры, вид функции искажения, параметр регуляризации α и σ, что повышает уровень адресности передаваемых данных.

Для декодирования информации на пункте приема потребителю после ввода вышеуказанных параметров необходимо провести операцию восстановления изображения $\overset{\times}{\mathbf{I}}$ по следующему правилу (рис. 5, *б*):

$$\overset{\times}{\mathbf{I}} = \mathbf{Z} \otimes \mathbf{X}_{\mathrm{B}}^{-1}, \tag{5}$$

где $\mathbf{X}_{\mathrm{B}}$ – функция искажения по Винеру, получаемая на основе преобразования функции $\mathbf{X}$ [16].



а *б*

Рис. 3. Обработка изображений:

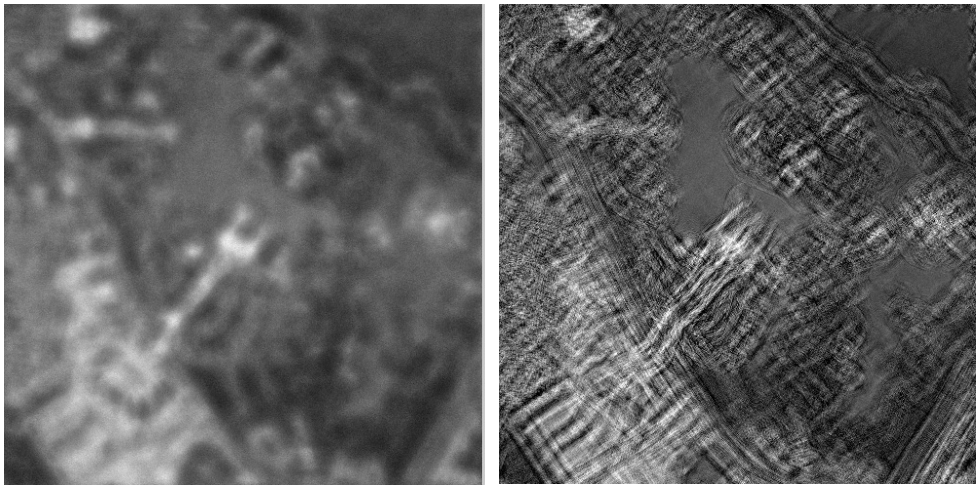
а – восстановление изображения методом Тихонова; *б* – восстановление изображения методом «слепой» деконволюции

Fig. 3. Image processing:

a is image restoration by the Tikhonov method; *b* is image restoration by the “blind” deconvolution method

При анализе изображения $\overset{\times}{\mathbf{I}}$ можно отметить, что оно стало несколько «зернистей» и зашумленней, однако общая детальность изображения не потеряна, этот эффект возникает за счет влияния шумов, которые оптимально ограничиваются стабилизатором Винера с учетом информации о значении σ.

Допустим, что перехватчикам информации известны функция искажения $\mathbf{A}$, критерий σ, выражение восстановления изображения (5), но не известны параметры преобразования $\mathbf{A}$ в $\mathbf{X}$ и параметра α, тогда восстановленное изображение примет вид, представленный на рис. 5, *а*.



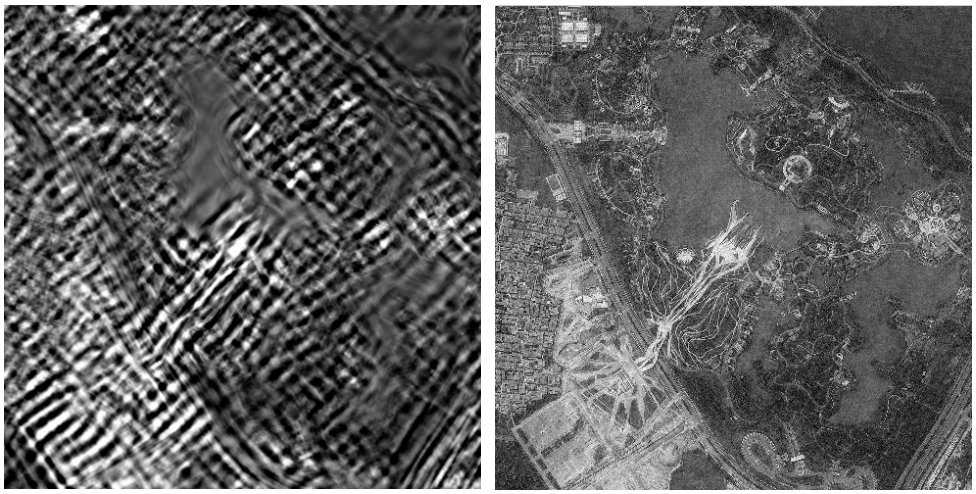
а *б*

Рис. 4. Обработка изображений:

а – восстановление изображения методом Люси–Ричардсона; *б* – смазывание «своим» ядром и добавление шума

Fig. 4. Image processing:

a is image restoration by the Lucy–Richardson method; *b* is smearing with “own” core and adding noise



а *б*

Рис. 5. Обработка изображений:

а – восстановление обработанного изображения методом Винера; *б* – восстановление изображения авторским методом Винера

Fig. 5. Image processing:

a is restoration of the processed image by the Wiener method; *b* is image restoration by the author Wiener's method

Далее, подбирая параметр регуляризации α при шифровании изображения I, возможно регулировать области изображения, необходимые для представления потребителю.

Для выбора критерия эффективности предлагаемого способа шифрования фото- и видеоинформации на основе преобразования функции рассогласования визуальных изображений предложено выражение (6), максимизирующее вероятностный эффект восстановления изображения за счет перебора возможных комбинаций из размеров, вида функции искажения, параметра регуляризации α и σ [12].

В статье приведен пример, в котором восстановленное изображение несколько хуже исходного лишь потому, что после его свертки с фильтром был наложен шум, уровень шума влияет на уровень защиты изображения, так как делает процедуру его восстановления нелинейной и оптимальной только для предложенного сингулярно измененного фильтра. Если не применять шум, то изображение восстановится без потерь.

Для этого зададимся их конечными значениями. Пусть размер изображения будет от 0 до **R**, вид функции – от 0 до **F**, параметр регуляризации $\alpha = 0\ldots N$ и $\sigma = 0\ldots\mathbf{Sk}$, а в качестве показателя криптоустойчивости системы передачи данных зададимся параметром **D**, характеризующим количество необходимых сочетаний и перестановок для восстановления переданной информации из известного пространства показателей, кодирующего один битовый знак:

$$\mathbf{K}_{\max} = \mathbf{D} + \left(\mathbf{K}^{4}_{\mathrm{R+F+N+Sk}}\right) = \mathbf{D} + \frac{(\mathbf{R}+\mathbf{F}+\mathbf{N}+\mathbf{Sk})!}{(\mathbf{R}+\mathbf{F}+\mathbf{N}+\mathbf{Sk}-\mathbf{4})!}. \qquad (6)$$

Из представленного выражения видно, что за счет факториальной зависимости найти необходимое результирующее положение всех параметров шифрования изображения (размеров, вида функции искажения, параметра регуляризации α и σ) вычислительным путем весьма проблематично, так как вычислительные затраты при этом несоизмеримы с возможностями современных ЭВМ. Из-за превышения количества переборов $\boldsymbol{P} = \mathbf{100}$ всех комбинаций процедура восстановления изображения является невыполнимой задачей для ЭВМ даже при известных конечных значениях **R**, **F**, **N**, **Sk** (рис. 6).

Этот пример показывает, что факториальный рост комбинаций сочетаний и перестановок всех вариантов применения фильтров с учетом их размерностей и вариаций изменения СКО шума, помноженного на вычислительные затраты, делает процедуру восстановления изображения несвоевременной. Реально принципы шифрования изображений и фильтр искажения неизвестны. Поэтому выбор из бесконечного пространства способов шифрования и фильтров искажений является бесконечно мерной задачей восстановления изображения.

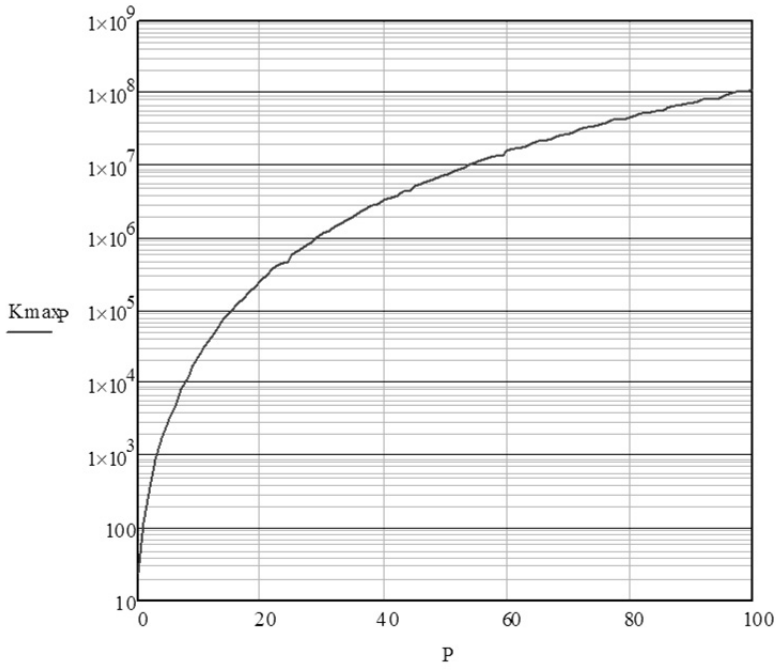


Рис. 6. Зависимость K_{max} от P

Fig. 6. Dependence of K_{max} on P

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ шифрования геоизображений на основе преобразования функции рассогласования визуальных изображений легко реализуется и накладывает требования на вычислительные затраты только по возможности выполнения операции свертки, предложенной авторами.

Метод может быть использован для передачи фото- и видеосообщений и текстовой информации между потребителями, использующими системы передачи данных любого назначения.

За счет факториальной зависимости найти необходимое результирующее положение всех параметров шифрования изображения (размеров, вида функции искажения, параметра регуляризации α и σ) вычислительным путем для перехватчиков информации весьма проблематично, так как вычислительные затраты при этом несоизмеримы с возможностями современных ЭВМ.

На сегодняшний день теория инверсной фильтрации с учетом многообразия фильтров является достаточно проработанной. В предложенной статье показано, как из любого известного двумерного фильтра получить еще N фильтров, которые отличны по структуре и имеют зашумленный вид из-за разрыва корреляционных связей между векторами и столбцами исходного фильтра. Уровень зашумленности можно определить параметром регуляризации и восстановить, зная исходный фильтр, чего невозможно добиться фильтром Винера, учитывающим СКО шума.

В следующих трудах авторы планируют рассмотреть влияние параметров регуляризации α и σ на точность восстановления информации различными методами обработки геоизображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

2. *Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С.* Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.

3. *Приоров А.Л., Ганин А.Н., Хрящев В.В.* Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 2001. – 312 с.

4. Using a Haar wavelet transform, principal component analysis and neural networks for OCR in the presence of impulse noise / V.G. Spitsyn, Yu.A. Bolotova, N.H. Phan, T.T.T. Bui // Computer Optics. – 2016. – Vol. 40 (2). – P. 249–257. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-249-257.

5. *Жбанов И.Л., Жбанова В.Л.* Способ шифрования текстовой информации сингулярным дополнением матрицы опорного фильтра свертки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 73–78.

6. Семантическая сегментация спутниковых снимков аэропортов с помощью сверточных нейронных сетей / В.А. Горбачёв, И.А. Криворотов, А.О. Маркелов, Е.В. Котлярова // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 636–645. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-636.

7. *Евдокимов А.А., Вязовов В.А., Жирный А.В.* Нейронная сеть для шифрования изображений // Мир науки глазами современной молодежи: материалы Всероссийской научной конференции. – Ставрополь, 2014. – С. 137–141.

8. *Вербицкий Б.Б., Вербицкая Е.А., Журкин И.Г.* Особенности применения нейронных сетей в задачах автоматизированного дешифрирования аэрокосмических изображений при обновлении электронных карт // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 103–108.

9. *Журкин И.Г., Бадышев Т.Т., Бадышева Е.К.* Шифрование геоизображений средствами программного продукта MATLAB // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 108–111.

10. *Райхлин В.А., Вершинин И.С.* Моделирование процессов двумерно-ассоциативного маскирования распределенных точечных объектов картографии // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8, № 5. – С. 288–296.

11. *Титков Б.В., Галактионов И.Е., Тришин Н.Д.* Сжатие данных шифрованных изображений // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. – № 9. – С. 43–48.

12. *Евдокимов А.А., Вязовов В.А., Жирный А.В.* Нейронная сеть для шифрования изображений // Мир науки глазами современной молодежи: материалы Всероссийской научной конференции. – Ставрополь, 2014. – С. 137–141.

13. *Дьяконов В.П., Абраменкова И.* Matlab. Обработка сигналов и изображений: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 602 с.

14. *Gentle J.E.* Singular value factorization // Gentle J.E. Numerical linear algebra for applications in statistics. – Berlin: Springer, 1998. – P. 102–103.

15. *Василенко Г.И.* Теория восстановления сигналов. – М.: Советское радио, 1979. – 272 с.

16. *Гуриев М.А.* Теория вероятностей и элементы математической статистики. – М.: Воениздат, 1980. – 383 с.

Жбанов Игорь Леонидович, кандидат технических наук, преподаватель Военной академии ВПВО ВС РФ, г. Смоленск. Основное направление – преобразователи информации, обработка изображений. Имеет более 20 публикаций. E-mail: gens84@yandex.ru

Жбанова Вера Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оптико-электронных систем филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске. Основное направление – колориметрия и оптико-электронные приборы и системы. Имеет более 40 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

Zhbanov Igor L., candidate of technical sciences, lecturer at the Military Academy of the Air Defense Forces of the Armed Forces of the Russian Federation, Smolensk. The main direction is information converters, image processing. Over 20 publications. E-mail: gens84@yandex.ru

Zhbanova Vera L., candidate of technical sciences, scientific title of associate professor, position Associate Professor of the Department of Optoelectronic Systems of The Branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk. The main direction is colorimetry and optoelectronic devices and systems. Over 40 publications, including a monograph. E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-87-98

Method for encryption of cartographic images on the basis of internal reorganization of the digital filter structure[*]

I.L. ZHBANOV[a], *V.L. ZHBANOVA*[b]

Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk, 1 Energetichesky Prospekt, Smolensk, 214013, Russian Federation

[a] *gens84@yandex.ru* [b] *vera-zhbanova@yandex.ru*

Abstract

The paper presents a method for encrypting geo-images based on the reorganization of the internal structure of the filter. Methods for digital image filtering in the MATLAB environment are taken as a basis. The essence of encryption is to control the aliasing of noise and the kernel of smearing. Knowing these values will allow the addressee to recover the transmitted cards with minimal interference, which will be unattainable for the data interceptor. Under conditions of unfavorable factors, conditions sometimes arise that lead to the loss of information content of images and, as a consequence, damage to information. Therefore, the development of methods to minimize their influence is an urgent task of the study. Thus, one of the approaches to the construction of spatial filters with a controlled structure is proposed for the selection of contrasting images in noises of different intensities. The procedure for converting any spatial filter from an initial display to a form that allows you to control its internal state is described. The obtained results of the original and transformed images make it possible to draw conclusions about the possibility of practical application of the proposed invariant spatial filter in the blocks for analyzing the original image. The method can be used to transfer photo, video messages and text information between consumers using data transmission systems for any purpose. Due to the factorial dependence, it is very problematic for information interceptors to find the required resulting position of all image encryption parameters (sizes, type of the distortion function, regularization parameters α and σ) for information interceptors, since the computational costs are not commensurate with the capabilities of modern computers. This can be used to transfer photo, video messages and text information between consumers using data transmission systems for any purpose, especially when transferring cartographic information.

Keywords: encryption, singular, geoimaging, digital filters, digital images, cartography, image processing, factorial, spatial filter, MATLAB

[*] *Received 10 February 2021.*

REFERENCES

1. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* [Digital image processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 1072 p. (In Russian).

2. Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii v srede MATLAB* [Digital image processing using MATLAB]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 616 p. (In Russian).

3. Priorov A.L., Ganin A.N., Khryashchev V.V. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* [Digital image processing]. Moscow, Mir Publ., 2001. 312 p.

4. Spitsyn V.G., Bolotova Yu.A., Phan N.H., Bui T.T.T. Using a Haar wavelet transform, principal component analysis and neural networks for OCR in the presence of impulse noise. *Computer Optics*, 2016, vol. 40 (2), pp. 249–257. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-249-257.

5. Zhbanov I.L., Zhbanova V.L. Sposob shifrovaniya tekstovoi informatsii singulyarnym dopolneniem matritsy opornogo fil'tra svertki [A method for encrypting text information by singular complement of the matrix of the basic convolution filter]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2021, no. 2, pp. 73–78.

6. Gorbachev V.A., Krivorotov I.A., Markelov A.O., Kotlyarova E.V. Semanticheskaya segmentatsiya sputnikovykh snimkov aeroportov s pomoshch'yu svertochnykh neironnykh setei [Semantic segmentation of satellite images of airports using convolutional neural networks]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 4, pp. 636–645. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-636. (In Russian).

7. Evdokimov A.A., Vyazovov V.A., Zhirnyi A.V. [Neural network for image encryption]. *Mir nauki glazami sovremennoi molodezhi*: materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii [The world of science through the eyes of modern youth]. Stavropol, 2014, pp. 137–141. (In Russian).

8. Verbitskii B.B., Verbitskaya E.A., Zhurkin I.G. Osobennosti primeneniya neironnykh setei v zadachakh avtomatizirovannogo deshifrirovaniya aerokosmicheskikh izobrazhenii pri obnovlenii elektronnykh kart [Features of the use of neural networks in the tasks of automated decoding of aerospace images when updating electronic maps]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka = Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotosurveying*, 2014, no. 1, pp. 108–111.

9. Zhurkin I.G., Badyshev T.T., Badysheva E.K. Shifrovanie geoizobrazhenii sredstvami programmnogo produkta MATLAB [Encryption of geoimages by means of the MATLAB software product]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka = Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotosurveying*, 2014, no. 1, pp. 108–111.

10. Raikhlin V.A., Vershinin I.S. Modelirovanie protsessov dvumerno-assotsiativnogo maskirovaniya raspredelennykh tochechnykh ob"ektov kartografii [Modelling the processes of two-dimensional-associative masking of the distributed dot objects of cartography]. *Nelineinyi mir = Nonlinear world*, 2010, vol. 8, no. 5, pp. 288–296.

11. Titkov B.V., Galaktionov I.E., Trishin N.D. Szhatie dannykh shifrovannykh izobrazhenii [Data compressing of encrypted images]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2018, no. 9, pp. 43–48.

12. Evdokimov A.A., Vyazovov V.A., Zhirnyi A.V. [Neural network for image encryption]. *Mir nauki glazami sovremennoi molodezhi*: materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii [The world of science through the eyes of modern youth]. Stavropol, 2014, pp. 137–141. (In Russian).

13. D'yakonov V.P., Abramenkova I. *Matlab. Obrabotka signalov i izobrazhenii* [Signal and image processing]. St. Petersburg, Piter Publ., 2002. 602 p.

14. Gentle J.E. Singular value factorization. Gentle J.E. *Numerical Linear Algebra for Applications in Statistics*. Berlin, Springer, 1998, pp. 102–103.

15. Vasilenko G.I. *Teoriya vosstanovleniya signalov* [Signal recovery theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979. 272 p.

16. Guriev M.A. *Teoriya veroyatnostei i elementy matematicheskoi statistiki* [Probability theory and elements of mathematical statistics]. Moscow, Voenizdat Publ., 1980. 383 p.

Для цитирования:

Жбанов И.Л., Жбанова В.Л. Метод шифрования геоизображений на основе реорганизации внутренней структуры цифрового фильтра // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 3 (83). – С. 87–98. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-87-98.

For citation:

Zhbanov I.L., Zhbanova V.L. Metod shifrovaniya geoizobrazhenii na osnove reorganizatsii vnutrennei struktury tsifrovogo fil'tra [Method for encryption of cartographic images on the basis of internal reorganization of the digital filter structures]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 87–98. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-87-98.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 83, № 3, 2021, с. 99–114

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 83, No. 3, 2021, pp. 99–114

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.832, 622.2

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-99-114

Интеллектуальный поиск точных решений задачи планирования открытых горных работ*

А.А. ЗУЕНКО[a], Р.А. МАКЕДОНОВ[b], Ю.А. ОЛЕЙНИК[c]

184209, РФ, г. Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, 24А, Институт информатики и математического моделирования – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИИММ КНЦ РАН)

[a] *zuenko@iimm.ru* [b] *makedonov@iimm.ru* [c] *yoleynik@iimm.ru*

Разработан метод интеллектуального поиска точных решений задачи планирования открытых горных работ. Метод реализован в рамках парадигмы программирования в ограничениях, что позволяет совместно обрабатывать разнородные количественные и качественные ограничения (в частности, экономические, технологические и др.), а также поддерживать развивающуюся модель предметной области, открытую для добавления новых или удаления имеющихся ограничений. В модель можно добавлять различные ограничения, включая те, для которых сложно найти подходящее аналитическое выражение. В отличие от существующих методов локального поиска, предложенный метод позволяет исследовать пространство поиска. Он позволяет находить глобальный оптимум в пространствах большой размерности, описывающих практически значимые задачи, которые возникают на производстве. В настоящее время для решения поставленной задачи широко применяются методы целочисленного линейного программирования, принципиальным недостатком которых является необходимость представления всех ограничений в форме линейных уравнений и неравенств. На практике же некоторые задачи комбинаторной оптимизации невозможно линеаризовать и решить с помощью традиционных методов математического программирования. Разработанный метод проиллюстрирован на примере трехмерной задачи поиска положений рабочего борта карьера по периодам отработки с учетом заданной производительности по полезному ископаемому и вскрышным породам и целевой функции максимизации прибыли с учетом дисконтирования. Выделены типы ограничений, необходимые для моделирования рассматриваемой задачи. Для них рассмотрена возможность применения существующих процедур вывода на ограничениях. Предложенный метод позволяет получать точные решения за счет интеллектуализации процесса решения путем использования высокоэффективных алгоритмов редукции пространства поиска

* *Статья получена 01 марта 2021 г.*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-07-00708-а, 19-07-00359-а.

для каждого из типов ограничений и специализированных эвристик отсечения неперспективных альтернатив в дереве поиска.

Ключевые слова: программирование в ограничениях, задача удовлетворения ограничений, распространение ограничений, вывод на ограничениях, интеллектуальное планирование, открытые горные работы, целочисленное линейное программирование, развивающаяся модель предметной области

ВВЕДЕНИЕ

Открытые горные работы – это способ добычи полезных ископаемых с поверхности земли с помощью горных выработок, находящихся под открытым небом. При создании модели рудное тело обычно дискретизируется и моделируется как набор блоков. Существуют различные варианты формулировки данной задачи. За последние 30 лет были предложены различные подходы к ее решению: классическое линейное и математическое программирование [1–6], а также метаэвристическое программирование [7–9].

Наиболее развитым подходом к решению задачи планирования открытых горных работ следует признать подход, основанный на применении методов целочисленного линейного программирования [1, 4]. К его достоинствам можно отнести то, что он позволяет находить глобальный оптимум для задачи планирования открытых горных работ. При использовании же метаэвристического программирования зачастую приходится довольствоваться лишь нахождением локального оптимума. Принципиальным недостатком методов целочисленного линейного программирования является то, что все ограничения должны быть представлены в форме линейных уравнений и неравенств. К сожалению, при решении практических задач этот недостаток является непреодолимым препятствием для применения рассматриваемого подхода. Технология разработки каждого конкретного карьера определяется тем, какое полезное ископаемое будет извлечено, а также экономическими, технологическими и другими ограничениями, определяемыми заказчиком при проведении открытых горных работ. При этом требования заказчика могут уточняться, т. е. модель предметной области постоянно развивается и должна быть открыта для добавления новых или удаления имеющихся ограничений. В этих условиях применение классических методов теории исследования операций представляется затруднительным.

В ходе исследований разработан новый метод интеллектуального поиска точных решений задачи планирования открытых горных работ, который далее проиллюстрирован на примере задачи поиска положений рабочего борта карьера по периодам отработки с учетом заданной производительности по полезному ископаемому (ПИ) и вскрышным породам (ВП). В настоящих исследованиях для точного решения задачи планирования открытых горных работ предлагается применять технологию программирования в ограничениях (Constraint Programming) [10, 12]. Идея возможности применения технологии программирования в ограничениях для решения рассматриваемого класса задач была впервые выдвинута в [13], однако, по мнению авторов, не получила должного развития. Благодаря архитектуре библиотек программирования в ограничениях появляется возможность совместно обрабатывать разнородные ограничения и по мере необходимости

вводить новые типы ограничений. При этом не меняется общий алгоритм поиска решения задачи: для новых типов ограничений требуется только описать специализированные методы-распространители, осуществляющие вывод на ограничениях данного типа.

Далее приведем постановку задачи на содержательном уровне.

1. СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Начальное (на момент начала планирования) и конечное положение борта карьера ограничивают пространство геологической среды. В качестве исходных данных задачи выступает модель геологической среды, которая представляет собой набор блоков одинакового размера (рис. 1). Для каждого блока определены его размеры, положение в пространстве, процент содержания в нем ПИ и ценность блока – разницу между стоимостью работ по извлечению ПИ из блока (выемка блока из карьера и дальнейшая переработка блока) и выгодой от реализации извлеченного ПИ.

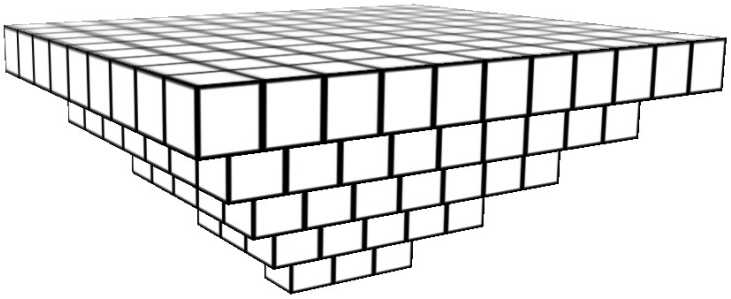


Рис. 1. Блочная модель карьера

Fig. 1. An open-pit block model

Содержательная постановка задачи календарного планирования состоит в том, чтобы определить такие положения рабочих бортов по периодам отработки, чтобы объемы ПИ и ВП, заключенные между последовательными положениями, соответствовали заданным с точностью до допустимой погрешности, при этом прибыль (суммарная ценность блоков) от разработки карьера должна быть максимальной. Развитие карьера – его углубление и расширение – происходит с соблюдением технических ограничений (ширина рабочей площадки) и технологических (какие блоки должны быть извлечены перед извлечением заданного блока). Исходная ценность каждого блока меняется в зависимости от года его добычи. Далее условимся называть конечное положение борта карьера конечным карьером, а текущую границу разработки – рабочим карьером или просто карьером.

Структура исходных данных может быть представлена в виде таблицы в *Excel.* Каждая строка данной таблицы описывает один блок карьера и содержит информацию о координатах блока, размерах блока, ценности блока и процентном содержании ПИ в блоке. Объем блока вычисляется из его размеров. Этот объем, в свою очередь, разделяется на объем ВП и объем ПИ в соответствии с заданным для блока содержанием ПИ.

Прежде чем перейти к описанию предлагаемого метода планирования, кратко рассмотрим особенности технологии программирования в ограничениях.

2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ОГРАНИЧЕНИЯХ

На настоящий момент технология программирования в ограничениях является мощным инструментом решения задач комбинаторного поиска и комбинаторной оптимизации. Для применения данной технологии любая задача должна быть сформулирована как задача удовлетворения ограничений (CSP – Constraint Satisfaction Problem), состоящая из трех компонент – $<X, D, C>$ [14]:

X – множество переменных $\{X_1, X_2,\ldots, X_n\}$;

D – множество доменов переменных $\{D_1, D_2,\ldots, D_n\}$, где D_i является доменом (областью определения) переменной X_i;

C – множество ограничений $\{C_1, C_2,\ldots, C_m\}$, которые предписывают допустимые комбинации значений переменных.

Каждый домен D_i описывает множество допустимых значений $\{v_1,\ldots, v_k\}$ для переменной X_i. Под ограничением понимается любое соотношение между переменными предметной области. В качестве ограничений могут выступать арифметические выражения, логические формулы, таблицы, а также выражения, формулируемые на языке специализированных теорий. С точки зрения конечного пользователя задача CSP формулируется в декларативном виде на языке, близком к языку математики.

Решением задачи CSP является полное присваивание, которое удовлетворяет всем ограничениям. В некоторых случаях необходимо получить все решения. Иногда требуется найти такое решение, в котором значения переменных оптимизировали бы некоторый заданный функционал.

Технология программирования в ограничениях предоставляет мощные и гибкие методы решения задач комбинаторного поиска. Алгоритмы удовлетворения ограничений содержат две обязательные компоненты: а) компоненту, реализующую вывод на ограничениях (распространение ограничений, фильтрация ограничений); б) компоненту, реализующую стратегию поиска. Обе эти компоненты нацелены на интеллектуализацию процесса поиска, т. е. на то, чтобы избежать полного перебора альтернатив путем быстрого обнаружения заведомо неперспективных комбинаций значений переменных. Термин «интеллектуальный поиск» является антонимом термина «слепой поиск» [12].

Сначала рассмотрим некоторые стратегии интеллектуального поиска. В рамках программирования в ограничениях традиционная стратегия поиска состоит в совместном применении методов распространения ограничений с методами поиска в глубину с возвратами, при этом применяются специализированные эвристики для выбора переменной и ее значения, а также используются разумные стратегии возврата к состоянию, являющемуся причиной возникновения недопустимого присваивания, такие как бэкмаркинг (back-

marking), бэкджампинг (backjumping), динамический бэктрекинг и др. [12]. Особенность методов поиска с возвратами заключается в том, что частичное допустимое решение пошагово расширяется до полного. Если частичное решение окажется недопустимым, то осуществляется возврат и расширяется в альтернативном направлении предыдущее частичное решение. Методы поиска в глубину с возвратами называются также методами систематического (конструктивного) поиска, поскольку они гарантируют нахождение оптимума целевой функции задачи CSP в случае его существования и выдают негативный ответ в случае отсутствия решения задачи.

Также для организации эффективного поиска часто используются методы локального поиска. Идея локального поиска заключается в генерировании начального кандидата решения задачи CSP (полного присваивания), пошаговом его улучшении, например, путем уменьшения количества неудовлетворенных ограничений. Алгоритмы локального поиска отличаются методами нахождения этого улучшения и способами преодоления «ловушек» локальных оптимумов. Главным недостатком алгоритмов локального поиска в контексте решения рассматриваемых задач оптимизации является их неполнота, т. е. поиск может остановиться в локальном минимуме, который в действительности не является глобальным решением. К методам локального поиска относят поиск с восхождением к вершине, имитацию отжига (simulated annealing), поиск с запретами, роевой интеллект, генетические алгоритмы и т. д.

Теперь перейдем к рассмотрению методов вывода на ограничениях (распространения ограничений). Вывод на ограничениях реализуется как целенаправленное сужение областей определения одних переменных на основе усеченных на данном шаге вывода доменов других переменных. Для каждого типа ограничений разрабатываются собственные методы распространения. Например, для ограничения $alldiff(x_1,\ldots, x_n)$, предписывающего, что все переменные $x_1,\ldots, x_n$ должны принимать различные значения, соответствующий метод распространения опирается на теорию графов, а именно на алгоритм обнаружения паросочетаний в графе [15]. Чтобы процедуры вывода на ограничениях имели низкую вычислительную сложность, для их разработки применяются развитые научные теории (например, теория исследования операций, теория графов и т. п.). При использовании стратегий локального поиска процесс распространения ограничения, по сути, сводится к подстановке всех переменных конкретных значений и проверке того, удовлетворено ли данное ограничение.

Особую важность эффективность процедур вывода на ограничениях приобретает при совместном применении с методами систематического поиска, поскольку позволяет отсекать несовместные значения переменных, редуцируя пространство поиска. В реальных задачах количество ограничений очень велико и любое самое незначительное изменение домена на этапе распространения в каком-либо ограничении запускает целый каскад вызовов алгоритмов распространения для других ограничений. Причем прослеживается закономерность: чем проще ограничение, тем меньше возможностей у алгоритма распространения для сокращения доменов участвующих в нем переменных. Таким образом, набор однотипных ограничений целесообразно объединять в одно ограничение, разрабатывая для данного набора

эффективные алгоритмы распространения. Такие составные ограничения называют глобальными. В [11] глобальное ограничение трактуется как ограничение, описывающее отношение, арность которого заранее не ограничена. Ранее уже упоминалось глобальное ограничение *alldiff*, которое в зависимости от того, какие конкретно переменные оно затрагивает, может иметь различную арность.

В рамках рассматриваемой в работе задачи планирования открытых горных работ используются глобальные ограничения двух основных типов: ограничение выбора максимального значения (*max constraint*) и ограничение, описывающее задачу об упаковке в контейнеры (*bin-packing constraint*).

Ограничение max [16]. Это ограничение предписывает, что значение одной указанной переменной из набора должно быть не меньше значений всех остальных переменных рассматриваемого набора. В рамках рассматриваемой задачи оно используется для описания технологических ограничений на порядок выемки блоков.

Пример 1. Пусть $X_1 \in \{2, 3\}$, $X_2 \in \{2, 3\}$, $X_3 \in \{1, 2\}$, $X_4 \in \{4, 5\}$, $X_5 \in \{2, 3, 4\}$, тогда некоторыми решениями, удовлетворяющими ограничению $\max(X_5, \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\})$ будут следующие:

1) $X_1 = 2,\ X_2 = 2,\ X_3 = 1,\ X_4 = 4,\ X_5 = 4;$

2) $X_1 = 2,\ X_2 = 2,\ X_3 = 2,\ X_4 = 4,\ X_5 = 4;$

3) $X_1 = 2,\ X_2 = 3,\ X_3 = 2,\ X_4 = 4,\ X_5 = 4.$

Ограничение bin-packing [17]. Задача *bin-packing* описывается следующим образом: существует n предметов и m контейнеров, каждый предмет имеет свой объем и у каждого контейнера есть своя вместимость. Цель состоит в распределении всех предметов по контейнерам таким образом, чтобы вместимость ни одного из контейнеров не была превышена. Это ограничение описывается с помощью следующих массивов:

- массива переменных $X_1, \ldots, X_n$, каждая из которых имеет домен $[1, \ldots, m]$ и показывает, что предмет под номером i будет помещен в контейнер под номером X_i;
- массива объемов $vol_1, \ldots, vol_n$, определяющего, что предмет под номером i имеет объем vol_i;
- массива вместимостей $cap_1, \ldots, cap_m$, определяющего, что контейнер под номером j имеет вместимость cap_j.

Пример 2. Пусть $X_1 \in \{1, 2\}$, $X_2 \in \{1, 2\}$, $X_3 \in \{1, 2\}$, $vol = \{4, 3, 1\}$, $cap = \{4, 5\}$, тогда всеми решениями, удовлетворяющими ограничению $bin_packing(\{X_1, X_2, X_3, X_4\}, vol, cap,)$ будут:

1) $X_1 = 1,\ X_2 = 2,\ X_3 = 2;$

2) $X_1 = 2,\ X_2 = 1,\ X_3 = 1;$

3) $X_1 = 2,\ X_2 = 1,\ X_3 = 2.$

Для программирования в ограничениях используются как отдельные среды программирования с поддержкой специализированных языков ограничений (например, MiniZinc, IBM ILOG CPLEX, ECLiPSe Constraint Programming System), так и подключаемые библиотеки на обычных языках программирования (например, Google Optimization Tools (C++, Python, .Net, Java), Choco (Java), Gecode (C++)). В настоящей работе выбор в пользу подключаемых библиотек, а именно Choco [18], обусловлен тем, что в специализированных средах программирования в ограничениях затруднена разработка методов-распространителей для пользовательских ограничений, отличных от встроенных. Кроме того, разработанные с использованием подключаемых библиотек методы планирования могут быть легко интегрированы в специализированные программные комплексы для автоматизации горных производственных работ.

Наконец, приведем некоторые достоинства технологии программирования в ограничениях, которые играют важную роль в настоящей работе.

- Благодаря архитектуре библиотек программирования в ограничениях появляется возможность совместно обрабатывать количественные и качественные ограничения.
- Обеспечивается возможность сопровождать модели, открытые для оперативных модификаций, т. е. развивающиеся модели. При добавлении в модель новых типов ограничений зачастую требуется лишь разработать соответствующий метод-распространитель, а не придумывать принципиально иную схему поиска.
- Библиотеки программирования в ограничениях содержат высокоэффективные алгоритмы вывода для обработки так называемых глобальных ограничений. Применение подобных ограничений позволяет конструировать решаемую задачу.

Ниже подробно описаны типы ограничений, используемые для формализации задачи планирования открытых горных работ, а также методы вывода на данных ограничениях и разработанные эвристики для организации интеллектуального поиска.

3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ В ПАРАДИГМЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ОГРАНИЧЕНИЯХ

В парадигме программирования в ограничениях задача планирования открытых горных работ ставится следующим образом: каждому блоку карьера сопоставляется целочисленная переменная $X_{i,j,k}$, которая может принимать значения от 1 до N, где N – номер последнего возможного периода разработки карьера. Присваивание $X_{i,j,k} = a$, где $a \in [1, N]$, означает, что блок с координатами (i, j, k) извлекается в период a.

Базовыми для рассматриваемой постановки задачи являются следующие ограничения: а) ограничения на порядок извлечения блоков; б) ограничения на заданную производительность по полезному ископаемому и вскрышным породам. В качестве целевой функции рассматривается максимизация прибыли от разработки карьера. Однако в рамках предложенного метода нет принципиальных запретов на то, чтобы обрабатывать ограничения и других типов.

Решение задачи состоит в том, чтобы назначить всем переменным $X_{i,j,k}$ целочисленные значения таким образом, чтобы одновременно выполнялись все перечисленные выше ограничения и функция прибыли принимала максимальное значение. Разберем семантику используемых ограничений более подробно.

Ограничения на порядок извлечения блоков (отношения предшествования-следования) обеспечивают последовательную разработку карьера, исключая технологически невозможные варианты выемки блоков. Правила извлечения блоков задаются в виде некоторого шаблона (схемы) выемки блоков и описывают принципы заглубления и расширения карьера. В качестве примера рассмотрим следующий шаблон (рис. 2): для выемки блока $X_{i,j,k}$, где i, j, k – координаты блока, необходимо выкопать блоки $X_{i,j,k+1}$, $X_{i-1,j,k+1}$, $X_{i+1,j,k+1}$, $X_{i,j-1,k+1}$, $X_{i,j+1,k+1}$, другими словами, необходимо извлечь пять вышележащих блоков при их наличии.

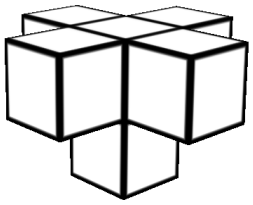


Рис. 2. Пример шаблона (схемы) извлечения блоков

Fig. 2. An example of a block mining template (scheme)

Этот шаблон можно задать с помощью пяти неравенств:

$$X_{i,j,k} \geq X_{i,j,k+1},\ X_{i,j,k} \geq X_{i-1,j,k+1},\ X_{i,j,k} \geq X_{i+1,j,k+1},$$

$$X_{i,j,k} \geq X_{i,j-1,k+1},\ X_{i,j,k} \geq X_{i,j+1,k+1}.$$

Теперь рассмотрим альтернативный способ формализации этого шаблона, предполагающий использование глобального ограничения *max*.

Все пять перечисленных выше неравенств можно описать с помощью одного глобального ограничения *max*:

$$\max(X_{i,j,k}, \{X_{i,j,k}, X_{i,j,k+1}, X_{i-1,j,k+1}, X_{i+1,j,k+1}, X_{i,j-1,k+1}, X_{i,j+1,k+1}\}).$$

В настоящей работе предлагается с помощью ограничения *max* описывать связи рассматриваемого блока не только с вышележащими непосредственными соседями, а со всеми блоками, которые необходимо извлечь для извлечения заданного блока. Таким образом, с увеличением глубины залегания блока ограничение *max* будет охватывать всё больше переменных, позволяя эффективнее сокращать их домены в процессе решения.

Ограничения на заданную производительность по полезному ископаемому и вскрышным породам моделируются линейными неравенствами. Пусть $o_{i,j,k}$ – это константа, показывающая содержание руды в блоке с индексами i, j, k; $w_{i,j,k}$ – это константа, показывающая содержание вскрышных пород в блоке с индексами i, j, k. Введем следующие обозначения: O – заданная производительность по полезному ископаемому; ΔO – допустимая погрешность O; W – заданная производительность по вскрышным породам; ΔW – допустимая погрешность W. Тогда ограничения на заданную производительность по полезному ископаемому и вскрышным породам можно выразить в виде неравенств:

$$O - \Delta O \le \sum_{i,j,k} o_{ijk}(X_{ijk} = y) \le O + \Delta O \text{ для каждого } y \in [1 \ldots N],$$

$$W - \Delta W \le \sum_{i,j,k} w_{ijk}(X_{ijk} = y) \le W + \Delta W \text{ для каждого } y \in [1 \ldots N].$$

Эти ограничения могут быть сформулированы в виде задачи об упаковке в N контейнеров (bin-packing) вместимостью от $O - \Delta O$ до $O + \Delta O$ и от $W - \Delta W$ до $W + \Delta W$ соответственно. Далее кратко рассмотрим, каким образом ограничение на то, что за каждый период ведения работ объем добытого ПИ должен принадлежать заданному интервалу [$O - \Delta O$; $O + \Delta O$], сводится к ограничению *bin-packing*. Массив $X_1, \ldots, X_n$, являющийся одним из параметров глобального ограничения *bin-packing*, должен состоять из переменных, каждая из которых соотносится с блоком карьера, содержащим ПИ (n – число таких блоков). Домен этих переменных будет [1, …, m], где m – номер последнего периода ведения работ. Период ведения работ можно интерпретировать как «контейнер», тогда массив $vol_1, \ldots, vol_n$ будет содержать информацию об объеме ПИ в каждом из соответствующих блоков, массив $cap_1, \ldots, cap_m$ будет содержать переменные с доменами [$O - \Delta O$; $O + \Delta O$].

Рассмотрим *целевую функцию* (*функцию максимизации прибыли от разработки карьера*). Для описания зависимости ценности блока от периода ведения работ зададим функцию $Fr(X_{i,j,k})$ вида

$$Fr(X_{i,j,k}) = V_{i,j,k}(0.9)^{X_{i,j,k}-1},$$

где $V_{i,j,k}$ – начальная ценность блока с индексами i, j, k. Тогда общая оптимизационная функция будет иметь вид $\sum_{i,j,k} Fr(X_{i,j,k}) \to \max$. Ограничение определяет, что каждое новое найденное решение должно давать значение оптимизационной функции бóльшее, чем предыдущие решения.

4. СТРАТЕГИЯ ПОИСКА РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ CSP

На этапе формирования (генерации) ограничений для каждого блока осуществляется построение множества всех вышележащих блоков, а не только его непосредственных соседей, которые, согласно ограничению на поря-

док выемки блоков, необходимо извлечь перед тем, как приступать к разработке рассматриваемого блока. Данное множество используется для построения глобального ограничения *max*, а также для оценки минимальных объемов ВП и ПИ, которые необходимо извлечь для выемки рассматриваемого блока. Сравнивая эти объемы с верхними границами заданных диапазонов норм выработки ВП и ПИ за один период разработки, можно прийти к выводу, что некоторые блоки невозможно извлечь раньше определенного периода. Исходя из этой информации производится предварительное «прореживание» доменов переменных, соответствующих блокам модели.

Рассмотрим небольшой пример. Пусть для некоторого блока модели доменом сопоставленной ему переменной X является множество $\{1, \ldots, 5\}$. Допустим, что объем ПИ в блоках, которые располагаются выше рассматриваемого, равен 10 000, а верхняя граница нормы выработки ПИ за один период равна 3000. Очевидно, что при заданной норме рассматриваемый блок будет извлечен не ранее четвертого периода разработки, поэтому домен переменной X следует сократить до множества $\{4, 5\}$.

В результате такого «прореживания» блокам на нижних уровнях будут соответствовать переменные с доменами меньшей мощности, чем блокам на уровнях, расположенных выше.

В качестве стратегии поиска предлагается использовать поиск в глубину с возвратами. Для выбора переменной в процессе поиска используется следующая эвристика: в первую очередь выбираются переменные с наименьшими мощностями доменов; при наличии нескольких переменных с доменами одинаковой мощности выбирается переменная, которой соответствует самый глубоко залегающий блок. Принимая во внимание вид целевой функции, можно заключить, что рудные блоки (блоки с положительной ценностью) выгодно извлекать как можно раньше, а вскрышные (блоки с отрицательной ценностью) – как можно позже. В силу приведенных соображений предлагается следующая эвристика для выбора значения переменной: для переменной вскрышного блока в первую очередь выбирается наибольшее значение в домене, а у рудного блока – наименьшее.

Данные эвристики позволяют эффективно сокращать домены переменных в процессе поиска, а также быстрее максимизировать значение целевой функции.

5. АНАЛИЗ НЕСТАНДАРТНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

В рамках предложенного подхода можно добавлять в задачу самые различные ограничения, и даже те, для которых сложно найти подходящее аналитическое выражение (формулу). В качестве примера рассмотрим ограничение, смысл которого заключается в том, что в карьере не допускается наличие сразу нескольких локальных заглублений (допускается только одно заглубление). Для простоты возьмем плоский (двумерный) карьер.

На рис. 3 приведен пример конфигурации карьера с несколькими локальными заглублениями.

Все блоки карьера можно отнести к тому или иному горизонтальному слою. Каждый горизонтальный слой может быть представлен в виде одно-

мерного массива переменных задачи CSP. При решении задачи CSP каждой переменной приписывается временная метка, показывающая, в какой период разработки карьера была осуществлена выемка соответствующего блока. При этом расстановка меток в пределах каждого такого одномерного массива (горизонтального слоя блоков) согласно рассматриваемому ограничению должна удовлетворять следующим требованиям: все значения одномерного массива, стоящие перед минимальным значением, должны образовывать монотонно невозрастающую последовательность, а после минимального – монотонно неубывающую последовательность. При этом допускается ситуация, когда минимальное значение стоит в начале и/или в конце массива. На рис. 4 приведены примеры правильной (слева) и неправильной (справа) расстановки временных меток для горизонтального слоя карьера. Расстановка меток справа на рис. 4 соответствует ситуации, когда на некотором промежуточном этапе разработки карьера имеется два локальных заглубления.

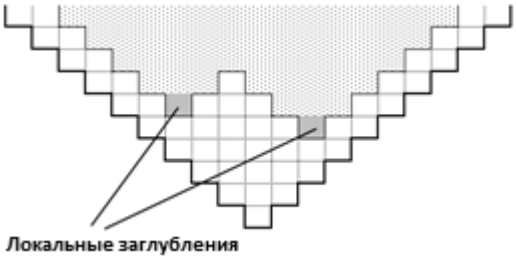


Рис. 3. Пример конфигурации карьера
с несколькими локальными заглублениями

*Fig. 3.*An example of the pit configuration
with several local depths

Рис. 4. Примеры правильной (слева) и неправильной (справа)
расстановки временных меток для горизонтального слоя карьера

Fig. 4. An examples of regular (left) and irregular (right) time
stamp assignments for a horizontal layer of the pit

Поскольку стандартных процедур-распространителей, реализующих требуемую логику, авторам обнаружить не удалось, то был разработан собственный метод *linepropagator*. Для того чтобы дно карьера всегда в ходе выемки было требуемой формы, нужно задать ограничение *linepropagator* для всех горизонтальных слоев карьера.

Кратко опишем работу распространителя *linepropagator*, которая заключается в следующем. На первом этапе в массиве ищутся последовательно расположенные переменные, значения которых еще не установлены. Эти последовательности переменных образуют своеобразные «промежутки неопределенности». Причем перед каждым их таких промежутков и после него должны стоять переменные с уже конкретизированными значениями. Домены переменных, принадлежащих «промежутку неопределенности», редуцируются таким образом, чтобы эти переменные не могли принимать значения

больше, чем максимальное из граничащих с ними значений конкретизированных переменных на концах этого промежутка. На рис. 5 показан первый этап работы распространителя.

Рис. 5. Первый этап работы распространителя

Fig. 5. The first stage of propagation

На втором этапе проводится проверка переменных, которым уже присвоено конкретное значение, на соответствие условию упорядоченности. На рис. 6 приведен пример прошедшего проверку массива и не прошедшего.

Рис. 6. Пример массивов, прошедшего (слева) и не прошедшего (справа) проверку на втором этапе работы распространителя

*Fig. 6.*An examples of arrays that passed (left) and failed (right) testing during the second stage of propagation

Таким образом, интересующее пользователя ограничение может быть выражено не только аналитически, но и путем описания логики работы соответствующей процедуры-распространителя, что удобно в случае необходимости учета и анализа нестандартных пользовательских ограничений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход на основе парадигмы программирования в ограничениях продемонстрировал свою применимость для решения практически значимых задач планирования открытых горных работ, характеризующихся высокой размерностью пространства поиска. Дальнейшие направления исследований связаны с разработкой гибридных методов, интегрирующих методы целочисленного программирования и методы программирования в ограничениях для получения точных решений рассматриваемого класса задач в пространствах еще более высокой размерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. LP-based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity / N. Boland, I. Dumitrescu, G. Froyland, A.M. Gleixner // Computers and Operations Research. – 2009. – Vol. 36, N 4. – P. 1064–1089.

2. *Caccetta L.* Application of optimization techniques in open pit mining // Handbook of Operations Research in Natural Resources. – Boston, MA: Springer, 2007. – P. 547–559. – (International Series in Operations Research).

3. A new algorithm for the open-pit mine production scheduling problem / R. Chicoisne, D.G. Espinoza, M. Goycoolea, E. Moreno, E. Rubio // Operations Research. – 2012. – Vol. 60, N 3. – P. 517–528.

4. *Dagdelen K.* A new linear programing approach to determining risk-quantified open pit mine production schedules incorporating mineral resource classification categories // Proceedings of the

38th International Symposium “Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry” (APCOM 2017). – Colorado, USA, 2017. – P. 451–460.

5. *Molina E.* Analytical properties of the feasible and optimal profiles in the binary programming formulation of open pit // Proceedings of the 38th International Symposium “Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry” (APCOM 2017). – Colorado, USA, 2017. – P. 603–610.

6. *Ramazan S.* The new Fundamental Tree Algorithm for production scheduling of open pit mines // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 177, N 2. – P. 1153–1166.

7. *Denby B., Schofield D.* Open-pit design and scheduling by use of genetic algorithms // Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry. – 1994. – Vol. 103. – P. A21–A26.

8. *Hazra T.* Genetic algorithm based approach for simultaneous optimization of open pit mine planning parameters // Proceedings of the 38th International Symposium “Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry” (APCOM 2017). – Colorado, USA, 2017. – P. 595–602.

9. *Zhang M.* Combining genetic algorithms and topological sort to optimize open-pit mine plans // Proceedings of the 15th Mine Planning and Equipment Selection. – Torino, Italy, 2006. – P. 1234–1239.

10. *Bartak R.* Constraint programming: in pursuit of the Holy Grail // Proceedings of the Week of Doctoral Students (WDS 99). – Prague: MatFyzPress, 1999. – Pt. 4. – P. 555–564.

11. *Rossi F., Beek P. van, Walsh T.* Handbook of constraint programming. – Boston, MA: Elsevier, 2006. – 955 p.

12. *Russel S., Norvig P.* Artificial intelligence: a modern approach. – 3rd ed. – Prentice Hall, 2010. – 1132 p.

13. Easy modeling of open pit mining problems via constraint programming / B. Crawford, R. Soto, C. Zec, E. Monfroy, F. Paredes // Communications in Computer and Information Science. – Cham: Springer, 2014. – Vol. 434. – P. 519–522.

14. *Régin J.* global constraints: a survey // Hybrid Optimization. Springer Optimization and Its Applications. – 2011. – Vol. 45. – P. 63–134.

15. *Régin J.* A filtering algorithm for constraints of difference in CSPs // Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI’94). – Menlo Park, CA, 1994. – P. 362–367.

16. *Beldiceanu N.* Pruning for the minimum Constraint Family and for the number of distinct values Constraint Family // Principles and Practice of Constraint Programming (CP'2001). – Paphos, Cyprus, 2001. – P. 211–224.

17. *Aggoun A., Beldiceanu N.* Extending CHIP in order to solve complex scheduling and placement problems // Mathematical and Computer Modelling. – 1993. – Vol. 17 (7). – P. 57–73.

18. *Jussien N., Rochart G., Lorca X.* Choco documentation. – URL: https://choco-solver.org/docs/ (accessed: 01.09.2021).

Зуенко Александр Анатольевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт информатики и математического моделирования ФИЦ КНЦ РАН. Основное направление научных исследований – искусственный интеллект, программирование в ограничениях, моделирование слабо формализованных предметных областей. Имеет более 100 печатных работ и учебных пособий. E-mail: zuenko@iimm.ru

Македонов Роман Александрович, младший научный сотрудник, Институт информатики и математического моделирования ФИЦ КНЦ РАН. Основное направление научных исследований – ситуационное моделирование, моделирование технических и бизнес-процессов. Имеет более 10 печатных работ и учебных пособий. E-mail: makedonov@iimm.ru

Олейник Юрий Андреевич, младший научный сотрудник, Институт информатики и математического моделирования ФИЦ КНЦ РАН. Основное направление научных исследо-

ваний – программирование в ограничениях, интеллектуальное планирование. Имеет более 20 печатных работ. E-mail: yoleinik@iimm.ru

Zuenko Aleksandr A., PhD (Eng.), leading researcher, IIMM KSC RAS. His research interests are currently focused on artificial intelligence, constraint programming, modeling of poorly formalized subject domains. He has more than 100 publications and teaching manuals. E-mail: zuenko@iimm.ru

Makedonov Roman A., junior researcher, IIMM KSC RAS. His research interests are currently focused on situational modeling, modeling of technical and business processes. He has more than 10 publications and teaching manuals. E-mail: makedonov@iimm.ru

Oleynik Yuri A., junior researcher, IIMM KSC RAS. His research interests are currently focused on constraint programming and AI planning. He has more than 20 publications. E-mail: yoleinik@iimm.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-99-114

*Intelligent search for accurate solutions to the planning open-pit mining**

A.A. ZUENKO[a], R.A. MAKEDONOV[b], Y.A. OLEYNIK[c]

Institute for Informatics and Mathematical Modeling, a subdivision of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences" (IIMM KSC RAS), 24A Fersman Street, Apatity, 184209, Russian Federation

[a] *zuenko@iimm.ru* [b] *makedonov@iimm.ru* [c] *yoleynik@iimm.ru*

Abstract

A method of intelligent search for accurate solutions to the planning of open-pit mining has been developed. The method is implemented within the framework of the Constraint Programming Paradigm that allows us to process heterogeneous qualitative and quantitative constraints (in particular, economic, technological, etc.) simultaneously, as well as to maintain the model of subject domain being developed which is open to adding new constraints or deleting existing constraints. Various constraints can be added to the model, including those for which it is difficult to find a suitable analytical expression. In contrast to existing methods of local search the proposed method systematically explores the search space. The method allows us to find a global optimum in large dimensional spaces that describe practically significant problems arising in production. Currently, to solve this problem, the methods of integer linear programming are widely used. But its fundamental disadvantage is the need to represent all the constraints in the form of linear equalities and inequalities. However, in practice, some combinatorial optimization problems cannot be linearized and solved using traditional methods of mathematical programming. The developed method is illustrated by the example of a three-dimensional problem of finding the position of an intermediate pit wall by the processing periods taking into account the specified performance for mineral and overburden rocks and the objective profit function taking into account discounting. The types of constraints necessary for modeling the problem under consideration are identified. The possibility of applying the existing inference procedures on constraints is considered for these types. The method proposed makes it possible to obtain accurate solutions due to the intellectualization of the solution process by using highly efficient algorithms of reducing the search space for each type of constraints and specialized heuristics for pruning unpromising alternatives in the search tree.

* *Received 01 March 2021.*

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific projects No. 20-07-00708-a, 19-07-00359-a.

Keywords: Constraint programming, constraint satisfaction problem, constraint propagation, inference on constraints, AI (Artificial Intelligence) planning, open-pit mining, integer linear programming, developing model of subject domain

REFERENCES

1. Boland N., Dumitrescu I., Froyland G., Gleixner A.M. LP-based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity. *Computers and Operations Research*, 2009, vol. 36, no. 4, pp. 1064–1089.

2. Caccetta L. Application of optimization techniques in open pit mining. *Handbook of Operations Research In Natural Resources. International Series in Operations Research.* Boston, MA, Springer, 2007, pp. 547–559.

3. Chicoisne R., Espinoza D.G., Goycoolea M., Moreno E., Rubio E. A new algorithm for the open-pit mine production scheduling problem. *Operations Research*, 2012, vol. 60, no. 3, pp. 517–528.

4. Dagdelen K. A new linear programing approach to determining risk-quantified open pit mine production schedules incorporating mineral resource classification categories. *Proceedings of the 38th International Symposium* "*Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*" (*APCOM 2017*), Colorado, USA, 2017, pp. 451–460.

5. Molina E. Analytical properties of the feasible and optimal profiles in the binary programming formulation of open pit. *Proceedings of the 38th International Symposium* "*Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*" (*APCOM 2017*), Colorado, USA, 2017, pp. 603–610.

6. Ramazan S. The new Fundamental Tree Algorithm for production scheduling of open pit mines. *European Journal of Operational Research*, 2007, vol. 177, no. 2, pp. 1153–1166.

7. Denby B., Schofield D. Open-pit design and scheduling by use of genetic algorithms. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, *Section A*: *Mining Industry*, 1994, vol. 103, pp. A21–A26.

8. Hazra T. Genetic algorithm based approach for simultaneous optimization of open pit mine planning parameters. *Proceedings of the 38th International Symposium* "*Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*" (*APCOM 2017*), Colorado, USA, 2017, pp. 595–602.

9. Zhang M. Combining genetic algorithms and topological sort to optimize open-pit mine plans. *Proceedings of the 15th Mine Planning and Equipment Selection*, Torino, Italy, 2006, pp. 1234–1239.

10. Bartak R. Constraint programming: in pursuit of the Holy Grail. *Proceedings of the Week of Doctoral Students* (*WDS 99*), Prague, MatFyzPress, 1999, pt. 4, pp. 555–564.

11. Rossi F., Beek P. van, Walsh T. *Handbook of constraint programming*. Boston, MA, Elsevier, 2006. 955 p.

12. Russel S., Norvig P. *Artificial intelligence*: *a modern approach*. 3rd ed. Prentice Hall, 2010. 1132 p.

13. Crawford B., Soto R., Zec C., Monfroy E., Paredes F. Easy modeling of open pit mining problems via constraint programming. *Communications in Computer and Information Science*, Cham, Springer, 2014, vol. 434, pp. 519–522.

14. Régin J. Global constraints: a survey. *Hybrid Optimization. Springer Optimization and Its Applications*, 2011, vol. 45, pp. 63–134.

15. Régin J. A filtering algorithm for constraints of difference in CSPs. *Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'94)*, Menlo Park, CA, 1994, pp. 362–367.

16. Beldiceanu N. Pruning for the minimum Constraint Family and for the number of distinct values Con-straint Family. *Principles and Practice of Constraint Programming (CP'2001)*, Paphos, Cyprus, 2001, pp. 211–224.

17. Aggoun A., Beldiceanu N. Extending CHIP in order to solve complex scheduling and placement problems. *Mathematical and Computer Modelling*, 1993, vol. 17 (7), pp. 57–73.

18. Jussien N., Rochart G., Lorca X. *Choco documentation*. Available at: https://choco-solver.org/docs/ (accessed: 01.09.2021).

Для цитирования:

Зуенко А.А., Македонов Р.А., Олейник Ю.А. Интеллектуальный поиск точных решений задачи планирования открытых горных работ // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 3 (83). – С. 99–114. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-99-114.

For citation:

Zuenko A.A., Makedonov R.A., Oleynik Yu.A. Intellektual'nyi poisk tochnykh reshenii zadachi planirovaniya otkrytykh gornykh rabot [Intelligent search for accurate solutions to the planning open-pit mining]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 99–114. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-99-114.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 83, № 3, 2021, с. 115–128

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 83, No. 3, 2021, pp. 115–128

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.048 DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-115-128

Разработка подсистемы интеллектуального анализа данных для системы электронного документооборота Citeck*

Е.Е. ИСТРАТОВА[a], Д.Н. ДОСТОВАЛОВ[b]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *istratova@corp.nstu.ru* [b] *d.dostovalov@corp.nstu.ru*

Актуальной задачей при внедрении систем электронного документооборота (СЭД) является расширение их функциональных возможностей за счет персонализации и учета индивидуальных особенностей организации. В статье рассматривается вопрос расширения функциональных возможностей системы электронного документооборота за счет проектирования подсистемы интеллектуального анализа данных. В рамках проведенного исследования были изучены принципы формализации процессов обработки входящей корреспонденции и организационно-распорядительных документов, способы сбора и анализа данных о работе пользователей с различными видами документов за счет применения искусственных нейронных сетей и комплексная оценка повышения эффективности работы СЭД образовательной организации. Для этого определены количественные характеристики, непосредственно влияющие на процесс контроля исполнения поручений, – временные затраты на создание и объем исполнения документа. На основе данных из системы электронного документооборота разработана математическая модель процесса создания документов, рассчитаны коэффициенты регрессии и получены аналитические зависимости качества разработанных документов от времени их исполнения и объема. Научная новизна исследования заключается в разработке алгоритма и программного обеспечения для автоматизации сбора и анализа данных за счет применения нейронных сетей в СЭД. К основным научным результатам относятся формализованные критерии документов и этапов их разработки, алгоритм работы подсистемы интеллектуального анализа данных и разработанное программное обеспечение для СЭД лицея. Полученные результаты позволили выявить типы документации и этапы их разработки, отражающие наибольшие требования к ресурсам, необходимым для их выполнения, что в дальнейшем может быть использовано для поиска способов оптимальной организации работ по подготовке документов различного вида.

Ключевые слова: интеллектуальная система, электронный документооборот, Citeck, анализ данных, образовательная организация, машинное обучение, система электронного документооборота, жизненный цикл корреспонденции, оценка эффективности документооборота, количественные характеристики, качественные показатели

---

* *Статья получена 26 декабря 2020 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в автоматизации процесса управления документооборотом практически в любой организации не вызывает сомнений с точки зрения эффективности управления ею. Предпосылками для этого являются следующие потребности предприятия:

– упорядочивание документооборота;

– повышение исполнительской дисциплины;

– формирование базы знаний организации;

– предоставление регламентированного доступа к необходимой информации.

В связи с интенсивным ростом информационных потоков в подразделениях образовательных организаций возникает потребность в применении комплексных средств автоматизации, которые смогли бы повысить оперативность, гибкость и мобильность принятия управленческих решений [1–4]. Так, переход от бумажного к электронному документообороту представляет собой одну из актуальных и первоочередных задач автоматизации образовательного учреждения [5–8]. Кроме того, в условиях усложнения бизнес-процессов образовательных учреждений для повышения их конкурентоспособности требуется усилить взаимодействие структурных подразделений с целью сокращения времени принятия управленческих решений [9–11]. Поэтому в качестве критериев для оптимизации деятельности подразделений выберем продолжительность и объем исполнения организационно-распорядительных документов.

При этом основная концепция внедряемых в настоящее время систем электронного документооборота исходит из следующих требований, предъявляемых к программным продуктам [12]:

– наличие веб-интерфейса для пользователей системы, причем как участников документооборота, так и разработчиков маршрутов документов, что объясняется необходимостью работы в системе большого числа пользователей, находящихся как в локальной сети образовательного учреждения, так и во внешней среде или даже в других городах региона [13–15];

– возможность автоматизированного управления доступом к документам системы в связи с большим числом часто меняющихся пользователей системы электронного документооборота;

– возможность масштабирования системы с точки зрения использования похожих маршрутов в различных структурах образовательной организации с возможностью разбивки по подразделениям;

– интеграция со всеми понятиями корпоративной информационной системы в связи с необходимостью реализации бизнес-процессов всех направлений деятельности учреждения [16];

– возможность реализации различных маршрутов документов, а также маршрутов работы [17].

Исходя из этого использование системы электронного документооборота в образовательной организации позволяет не только контролировать потоки информации, но и значительно сокращать сроки обработки документов, что в результате дает возможность оптимизировать процессы принятия управленческих решений. Согласно литературным источникам [1, 3, 18–21], опыт внедрения систем электронного документооборота позволил решить задачи, связанные как со скоростью обработки информации, так и с защитой обрабатываемых и передаваемых данных [22, 23].

Таким образом, формирование документооборота в современном образовательном учреждении в качестве базового структурного элемента позволяет повысить эффективность работы образовательной организации, провести корректировку бизнес-процессов, обеспечить возможность использования данных в соответствии с нормативными требованиями и ускорить обработку документов. В результате внедрение в эксплуатацию системы электронного документооборота способно оказать положительное влияние на повышение конкурентоспособности образовательного учреждения в целом.

Несмотря на доказанные преимущества от внедрения в эксплуатацию систем электронного оборота, в некоторых случаях требуются дополнительные информационные технологии и инструменты для анализа качества обработки данных. В первую очередь это связано с интенсивным ростом объемов информации в сфере образования и необходимостью принятия оперативных управленческих решений. Помимо этого, подобный анализ значительно упрощает контроль выполнения поручений и может быть применен как метод повышения исполнительской дисциплины. Для реализации данного направления целесообразно использовать методы интеллектуального анализа данных [24–27].

Целью исследования являлось расширение функциональных возможностей системы электронного документооборота образовательной организации за счет проектирования подсистемы интеллектуального анализа данных.

Исследование проводилось на базе образовательного учреждения – лицея № 22 «Надежда Сибири» города Новосибирска. В качестве исходных данных были рассмотрены входящие, исходящие и внутренние документы организации, а также взаимосвязи между ними. Основные задачи разработки подсистемы интеллектуального анализа данных:

– исследование этапов работы с различными типами документов;

– структурирование документов по функциональному признаку;

– определение критериев, влияющих на скорость и качество обработки документов;

– выявление зависимостей между данными критериями и эффективностью организации документооборота предприятия в целом;

– анализ результатов и их применение при разработке подсистемы интеллектуального анализа данных.

Поскольку проектируемая подсистема интеллектуального анализа данных является одним из элементов системы электронного документооборота организации, в ее функции должны входить такие операции:

– сбор данных об особенностях и временных характеристиках разработки документов;

– определение вероятностных характеристик на основе собранных данных;

– выявление статистических зависимостей (корреляция, регрессия) между различными критериями разработки организационно-распорядительных документов;

– анализ полученных результатов для дальнейшего формирования решений по оптимизации процесса организации работ с документами.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА ЛИЦЕЯ

Совокупность документов рассматриваемой образовательной организации можно условно разделить на две группы: организационно-распорядительная документация и корреспонденция. На основе собранных данных об

организационной структуре лицея № 22 «Надежда Сибири» и о существующих бизнес-процессах была спроектирована блок-схема, описывающая жизненный цикл входящей корреспонденции (рис. 1).

Рис. 1. Жизненный цикл входящей корреспонденции

Fig. 1. Life cycle of incoming documents

Жизненный цикл входящей корреспонденции начинается в лицее с ее поступления и внесения в систему электронного документооборота. Следующим принципиальным этапом является регистрация документа, осуществляемая путем внесения отдельных его реквизитов в соответствующие поля. После регистрации необходимо решить, требуется ли на конкретном документе резолюция руководителя, т. е. директора лицея. Если резолюция не требуется, документ отправляется далее по маршруту на исполнение, а потом в архив, если не предусмотрено других вариантов. Если резолюция требуется, то сначала документ направляется на резолюцию, после формирования которой он идет на исполнение.

В ходе исследования были определены основные этапы утверждения организационно-распорядительных документов в организации. К подобным документам были отнесены приказы, инструкции, правила и т. д. Все документы данного вида готовятся, оформляются и исполняются в пределах самой

организации. Основной порядок их прохождения и утверждения включает следующие этапы: согласование, подписание, ознакомление, начало действия документа. Кроме перечисленных основных этапов, маршрут следования документа также может включать еще несколько стадий (например, доработка, сканирование). На этапе подписания документ может отправиться на доработку и опять вернуться на подпись, также документ может проходить несколько раз эту процедуру, прежде чем его отправят на ознакомление персоналу. Подробная диаграмма всех этапов утверждения организационно-распорядительной документации приведена на рис. 2.

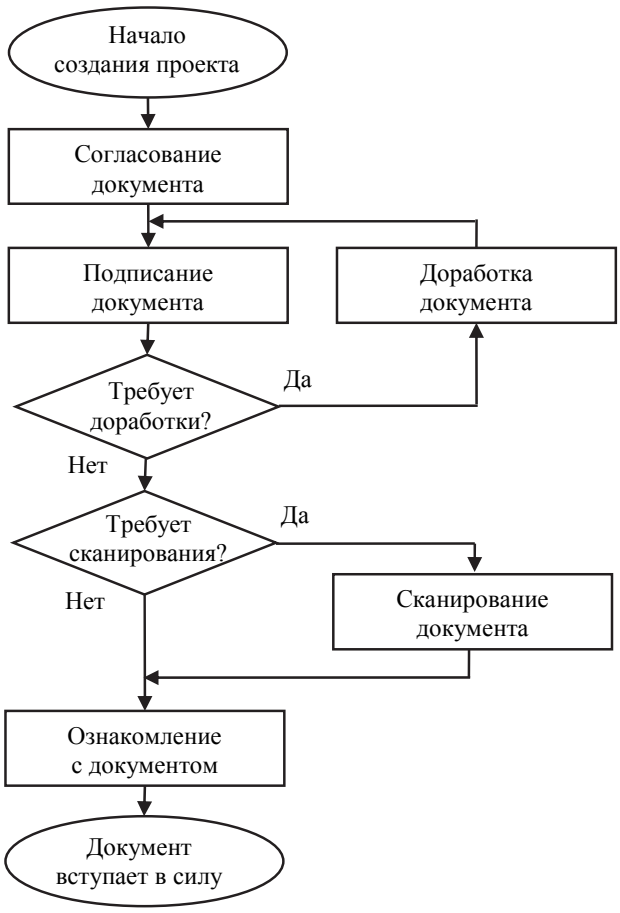


Рис. 2. Диаграмма этапов утверждения документа

Fig. 2. Diagram of document approval stages

Эксплуатация системы электронного документооборота образовательного учреждения включает в себя автоматизацию перемещения основных информационных потоков документов между исполнителями и утверждающими должностными лицами. При этом обмен всеми данными, к которым относятся как генерируемые системой сообщения, так и файлы пользователей, осуществляется посредством системы без непосредственного общения между участниками процесса.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ДАННЫХ ИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

В исследовании предлагается расширение функциональных возможностей системы электронного документооборота образовательной организации за счет проектирования подсистемы интеллектуального анализа данных. Ее основными задачами являются: сбор информации о процессах разработки и согласования документов; определение вероятностных характеристик и зависимостей между различными показателями, влияющими на процесс создания документов; вывод результатов анализа для принятия пользователем решения по организации документооборота. В результате возможно сформировать совокупность правил и выстроить приоритеты при передаче и обработке документов.

Для реализации указанных задач подсистема интеллектуального анализа данных должна содержать следующие три функциональных модуля, отвечающие за планирование, разработку и контроль выполнения документов соответственно. Состав модулей подсистемы интеллектуального анализа данных приведен на рис. 3.

Рис. 3. Структура подсистемы интеллектуального анализа данных

Fig. 3. Structure of the data mining subsystem

На этапе планирования создания документа пользователь, инициирующий этот процесс, с помощью инструментария существующей системы электронного документооборота разрабатывает план формирования документа, назначает ответственных исполнителей, а также в зависимости от ситуации добавляет график и определяет время, необходимое для разработки документа. В качестве основы для нового документа может быть использован шаблон ранее разработанного документа, к которому добавляются пользователи-исполнители. Проектируемый шаблон документа отображается в виде диаграммы Ганта. В рамках этого модуля осуществляется составление плана-графика изготовления документа, производится сбор данных об исполнителях, маршруте следования и составе полей документа.

Процесс разработки документа начинается с момента его запуска инициатором процесса, имеющим соответствующие права. При этом в процессе запуска каждый документ проходит проверку на корректность в соответствии с определенными установленными критериями. Если документ содержит ошиб-

ки, то у пользователя отображается сообщение об ошибке и список всех некорректных элементов. После успешного выполнения документа ответственные исполнители получают соответствующее оповещение и дальше могут приступать к оформлению, отправке на согласование и утверждение документов за счет средств электронного документооборота организации. В рамках этого модуля осуществляется сбор данных о времени изготовления документа и выполнении запланированных разделов и показателей качества.

На этапе контроля выполнения документов пользователи, задействованные в процессах разработки или согласования конкретного документа, могут отслеживать ход его выполнения, т. е. имеют доступ к графику и статистическим данным по пользователям-исполнителям. Такой модуль позволяет собрать и проанализировать информацию о выполнении документа, его соответствии изначально запланированным характеристикам и срокам.

Таким образом, использование подсистемы интеллектуального анализа данных дает возможность выявить проблемные виды и этапы создания документов, необходимые для поиска как методов оптимизации документооборота в целом, так и путей повышения качества отдельных документов.

3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ ДОКУМЕНТОВ

Для развития существующей системы электронного документооборота предлагается применить методы интеллектуального анализа данных, позволяющие реализовать функциональную подсистему на основе выявленных математических зависимостей между критериями разработки и учета различных видов документов [8, 9, 14].

В данном исследовании под интеллектуальным анализом данных подразумевается как поиск и объяснение закономерностей в получаемых из системы электронного документооборота образовательной организации данных, так и их вывод в разрезе эффективности работы структурных подразделений лицея над отдельными видами документов.

Таким образом, проектирование подсистемы интеллектуального анализа данных на основе существующей системы электронного документооборота образовательной организации позволило выявить виды документов и этапы их разработки, наиболее требовательные к ресурсам, необходимым для их выполнения, что, в свою очередь, дает возможность поиска способов для ускорения разработки документов и повышения их качества.

Сведения, содержащие информацию о разработке, согласовании и утверждении различных видов документов, хранятся в базе данных системы электронного документооборота образовательной организации. Однако для проведения интеллектуального анализа данных необходимо дополнить уже существующий набор двумя количественными характеристиками, непосредственно влияющими на процесс контроля исполнения поручений. Такими характеристиками являются показатели оперативности и объема исполнения документов.

Первый количественный критерий напрямую связан с затратами времени на подготовку конкретного документа строго определенного вида, относящегося к организационно-распорядительной документации или к корреспонденции. Этот критерий показывает отношение времени, затраченного на

разработку документа, к запланированному времени. В математическом виде зависимость процесса разработки документа от времени можно представить следующим образом:

$$T_d = \frac{T_{\text{ф}}}{T_{\text{п}}}, \tag{1}$$

$$T_d = \{T_{d1}, T_{d2}, ..., T_{dn}\}, \tag{2}$$

где T_d – критерий, характеризующий временные затраты на создание документа; $T_{\text{ф}}$ – время, фактически затраченное на изготовление документа; $T_{\text{п}}$ – время, запланированное на создание документа; n – количество данных в выборке.

Рассматриваемые документы могут быть разделены на виды и этапы выполнения, что дает возможность анализа по каждому виду отдельно. С учетом этого формула (2) примет вид

$$\begin{gathered} T_{dij} = \{T_{dij1}, T_{dij2}, ..., T_{dijn}\}, \\ i = [1, m], \quad j = [1, k], \end{gathered} \tag{3}$$

где i – номер вида документа; m – количество видов документов; j – номер этапа разработки документа; k – количество этапов.

Второй количественный критерий для проведения интеллектуального анализа данных связан с объемом исполнения документов. Так как на величину этого критерия влияет совокупность различных факторов, то для упрощения математической модели учитывается только объем разработанных и при необходимости утвержденных документов. В математическом виде зависимость процесса разработки документа от объема его выполнения можно представить следующим образом:

$$V_d = \frac{V_{\text{ф}}}{100\ \%}, \tag{4}$$

$$V_{dij} = \{V_{dij1}, V_{dij2}, ..., V_{dijn}\}, \tag{5}$$

где V_d – критерий, характеризующий объем исполнения документа; $V_{\text{ф}}$ – фактическая доля от объема исполнения документа, %; n – количество данных в выборке; i – номер вида документа; m – количество видов документов; j – номер этапа разработки документа; k – количество этапов.

В качестве результирующей функции оценки выполнения заданного регламента целесообразно рассмотреть качество разработанного документа Q, определяемое по формуле

$$Q = T_{dij} V_{dij}, \tag{6}$$

С точки зрения качества изготовления документа его объем выполнения и скорость разработки имеют одинаковые приоритеты, т. е. при высокой скорости и недостаточном объеме исполнения итоговая интегральная оценка качества будет невысокой. При необходимости можно получить отчет по каж-

дому из критериев отдельно. Для интерпретации уровня качества документов были установлены интервалы (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Интерпретация значений *Q*

Interpretation of *Q* values

Интервал значений *Q*	Оценка уровня качества
Менее 0,3	Неудовлетворительно
0,3…0,5	Удовлетворительно
0,5…0,7	Хорошо
0,7…1,0	Отлично

Проведенный в рамках исследования интеллектуальный анализ данных включал в себя следующие этапы:

– определение цели и задач анализа;

– сбор и предварительная обработка данных, необходимых для проведения анализа;

– построение моделей за счет использования методологии Data Mining;

– проверка полученных математических моделей;

– интерпретация результатов.

На основе данных, полученных из системы электронного документооборота лицея, была разработана математическая модель, описывающая процесс создания документов в образовательной организации, были рассчитаны коэффициенты регрессии и получены экспериментальные значения для построения аналитических зависимостей качества разработанных документов от времени их исполнения и объема.

В качестве исходных данных для проведения анализа качества и скорости разработки документов были рассмотрены организационно-распорядительные документы и входящая корреспонденция образовательной организации. Предварительно документы были разделены на восемь типов, для каждого из которых были определены качественные показатели, рассчитаны коэффициенты регрессии и получены экспериментальные значения для построения аналитических зависимостей качества разработанных документов от времени их исполнения и объема (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Результаты анализа

Results of the analysis

Документы	*T*	*V*	*Q*
Тип 1	0,73	0,79	0,58
Тип 2	0,84	0,93	0,78
Тип 3	0,96	0,84	0,81
Тип 4	0,84	0,91	0,76
Тип 5	0,69	0,83	0,57
Тип 6	0,91	0,84	0,76
Тип 7	0,94	0,89	0,84
Тип 8	0,97	0,95	0,92

На основе такого набора данных построено восемь математических моделей, качественные показатели шести из которых располагались в интервале от 0,7 до 1,0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволили выявить, что наиболее требовательными к ресурсам являются такие виды документов, как внутренние распоряжения и входящая корреспонденция, причем если первый вид документов значительно отстает на этапе разработки, то второй – на этапе планирования, т. е. при регистрации, что существенно влияет на итоговый качественный показатель. Выявленные закономерности могут быть использованы для поиска способов оптимальной организации работы по подготовке документов различного вида с учетом различных этапов работы.

Таким образом, в результате проведения исследования была разработана и протестирована на реальных значениях подсистема интеллектуального анализа данных, позволяющая расширить функциональные возможности существующей в образовательной организации системы электронного документооборота для дальнейшего формирования решений по оптимизации процесса организации работ с документами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы электронного документооборота / Н.Ф. Алтухова, А.Л. Дзюбенко, В.В. Лосева, Ю.Б. Чечиков. – М.: Кнорус, 2019. – 202 с.

2. *Истратова Е.Е., Син Д.Д.* Выбор Data Mining-инструмента для обработки научных данных // Вызовы цифровой экономики: развитие комфортной городской среды: сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Брянск, 2020. – С. 348–352.

3. *Черников А.А., Истратова Е.Е.* Применение систем электронного документооборота в сфере малого бизнеса города Новосибирска // Актуальные проблемы мировой экономики и менеджмента: материалы международной интернет-конференции. – Гомель, 2019. – С. 256–257.

4. *Симонова С.И.* Интеллектуальный анализ данных для задач CRM // International Journal of Open Information Technologies. – 2015. – Vol. 3, N 2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnyy-analiz-dannyh-dlya-zadach-crm (accessed: 01.09.2021).

5. *Ефремова Л.И., Колекина А.О.* Выбор системы электронного документооборота для предприятия // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2019. – Т. 2, № 1. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-sistemy-elektronnogo-dokumentooborota-dlya-predpriyatiya (дата обращения: 01.09.2021).

6. *Апришко Д.В., Таран В.Н.* Системы электронного документооборота и их обзор // Дистанционные образовательные технологии: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Симферополь, 2019. – С. 244–249. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40453380 (дата обращения: 01.09.2021).

7. *Lange P. de, Nicolaescu P., Neumann A.T.* Integrating web-based collaborative live editing and wireframing into a model-driven web engineering process // Data Science and Engineering. – 2020. – Vol. 5. – P. 240–260. – DOI: 10.1007/s41019-020-00131-3.

8. *Медведева О.В., Парамонова М.Г.* Цифровизация управления и системы электронного документооборота // Ученые записки Тамбовского отделения РоСМУ. – 2019. – № 13. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-upravleniya-i-sistemy-elektronnogo-dokumentooborota (дата обращения: 02.09.2021).

9. *Patil T., Bhavsar A.K.* Data science team roles and need of data science: a review of different cases // Data Science and Intelligent Applications: Proceedings of ICDSIA 2020. – Singapore:

Springer, 2020. – (Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies; vol. 52). – DOI: 10.1007/978-981-15-4474-3_2.

10. *Bhagchandani A., Trivedi D.* a machine learning algorithm to predict financial investment // Data Science and Intelligent Applications: Proceedings of ICDSIA 2020. – Singapore: Springer, 2020. – (Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies; vol. 52). – DOI: 10.1007/978-981-15-4474-3_30.

11. *Paramonova I.E.* Electronic document-management systems: a classification and new opportunities for a scientific technical library // Scientific and Technical Information Processing. – 2016. – Vol. 43. – P. 136–143. – DOI: 10.3103/S0147688216030047.

12. *Ginsburg M.* An agent framework for intranet document management // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 1999. – Vol. 2. – P. 271–286. – DOI: 10.1023/A:1010012406205.

13. *Hillah L.M., Maesano A.P., Rosa F. De.* Automation and intelligent scheduling of distributed system functional testing // International Journal on Software Tools for Technology Transfer. – 2017. – Vol. 19. – P. 281–308. – DOI: 10.1007/s10009-016-0440-3.

14. *Ahmad K., Sahu M., Shrivastava M.* An efficient image retrieval tool: query based image management system // International Journal of Information Technology. – 2020. – Vol. 12. – P. 103–111. – DOI: 10.1007/s41870-018-0198-9.

15. *Kleshchev A.S., Chernyakhovskaya M.Y., Shalfeeva E.A.* Features of the automation of intellectual activities // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2015. – Vol. 49. – P. 10–20. – DOI: 10.3103/S0005105515010021.

16. *Kolekar S., Sanjeevi S., Bormane D.S.* The framework of an adaptive user interface for e-learning environment using artificial neural network // International Conference on E-Learning E-Business, EEE 2010. – Las Vegas, Nevada, USA, 2010. – P. 65–69.

17. *Fernndez-Garca A.J.* A recommender system for component-based applications using machine learning techniques // Knowledge-Based Systems. – 2019. – Vol. 164. – P. 68–84. – DOI: 10.1016/j.knosys.2018.10.019.

18. *Okuda H., Ogata S., Matsuura S.* Experimental development based on mapping rule between requirements analysis model and web framework specific design model // SpringerPlus. – 2013. – Vol. 2. – P. 123. – DOI: 10.1186/2193-1801-2-123.

19. *Бобылева М.П.* Управленческий документооборот: от бумажного к электронному: вопросы теории и практики. – М.: Термика, 2019. – 470 с.

20. *Obukhov A., Krasnyanskiy M., Nikolyukin M.* Algorithm of adaptation of electronic document management system based on machine learning technology // Progress in Artificial Intelligence. – 2020. – Vol. 9. – P. 287–303. – DOI: 10.1007/s13748-020-00214-2.

21. *Ghaibi N., Dassi O., Ayed L.* User interface adaptation based on a business rules management system and machine learning // Communications of the IBIMA. – 2018. – Vol. 2018. – Art. 281881. – DOI: 10.5171/2018.281881.

22. Model-based frameworks for user adapted information exploration: an overview / M. Kotzyba, T. Gossen, S. Stober, A. Nurnberger // Companion Technology. – Cham: Springer, 2017. – P. 37–56. – DOI: 10.1007/978-3-319-43665-4_3.

23. Multi-level preference regression for cold-start recommendations / F. Peng, X. Lu, C. Ma, Y. Qian, J. Lu, J. Yang // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2018. – Vol. 9, N 7. – P. 1117–1130.

24. *Кривенко Ю.С., Минасян А.Т., Разиньков А.О.* Исследование технологий интеллектуального анализа данных (Data Mining) // Актуальные проблемы управления в электронной экономике. Одиннадцатые Ходыревские чтения. – Курск, 2018. – С. 182–184.

25 *Elmabaredy A., Elkholy E., Tolba A.A.* Web-based adaptive presentation techniques to enhance learning outcomes in higher education // Research and Practice in Technology Enhanced Learning. – 2020. – Vol. 15. – DOI: 10.1186/s41039-020-00140-w.

26. *Шокин Ю.И., Юрченко А.В.* О моделях организации хранения и использования научных данных: основные принципы, процессы и механизмы // Информационно-управляющие системы. – 2019. – № 3. – С. 45–54.

27. Методы и модели анализа данных: OLAP и DataMining: учебное пособие / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 336 с.

Истратова Евгения Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – сетевые информационные технологии, информационные системы, интеллектуальный анализ данных. Имеет более 50 печатных работ и учебных пособий. E-mail: istratova@corp.nstu.ru

Достовалов Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое и программное обеспечение, компьютерное моделирование, сетевые информационные технологии. Имеет более 70 печатных работ и учебных пособий. E-mail: d.dostovalov@corp.nstu.ru

Istratova Evgeniya E., PhD (Eng.), associate professor at the Department of Automated Control Systems, Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is network information technologies, information systems, and data mining. She has over 50 publications and tutorials. E-mail: istratova@corp.nstu.ru

Dostovalov Dmitry N., PhD (Eng.), associate professor at the Department of Automated Control Systems, Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is mathematical support and software, computer modeling, and network information technologies. He has over 70 publications and tutorials. E-mail: d.dostovalov@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-115-128

Development of a data mining subsystem for the Citeck electronic document management system[*]

E.E. ISTRATOVA[a], *D.N. DOSTOVALOV*[b]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *istratova@corp.nstu.ru* [b] *d.dostovalov@corp.nstu.ru*

Abstract

An urgent task in the implementation of electronic document management systems (EDMS) is to expand their functionality through personalization and taking into account individual characteristics of the organization. The article deals with expanding the functionality of EDMS by designing a subsystem for data mining. As part of the study, the principles of formalizing the processes of processing incoming correspondence and organizational and administrative documents, methods of collecting and analyzing data on the work of users with various types of documents through the use of artificial neural networks and a comprehensive assessment of improving the efficiency of the EDMS of an educational institution were studied. Quantitative characteristics that directly affect the process of monitoring the execution of orders have been determined. This is the time spent for creation of the document and execution completeness of the document. A mathematical model of the process of creating documents based on data from the EDMS has been developed. Regression coefficients have been calculated. Analytical dependences of the quality of the developed documents on the time of their execution and volume have been obtained. The scientific novelty of the research lies in the development of an algorithm and software for automating the collection and analysis of data through the use of neural networks in the EDMS. The main scientific results include formalized criteria for documents and stages of their development, the algorithm of the mining subsystem, the developed software for the EDMS of the Lyceum. The results obtained made it possible to identify the types of documents and the stages of their development that are most demanding on the resources necessary for their implementation, which can later be used to find ways to optimally organize work on the preparation of documents of various types.

[*] *Received 26 December 2020.*

Keywords: intelligent system, electronic document management, Citeck, data analysis, educational organization, machine learning, electronic document management system

REFERENCES

1. Altukhova N.F., Dzyubenko A.L., Loseva V.V., Chechikov Yu.B. *Sistemy elektronnogo dokumentooborota* [Electronic document management systems]. Moscow, Knorus Publ., 2019. 202 p.

2. Istratova E.E., Sin D.D. [The data mining tools selection for scientific data processing]. *Vyzovy tsifrovoi ekonomiki: razvitie komfortnoi gorodskoi sredy*: sbornik statei III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference "Challenges of the Digital Economy: Development of a Comfortable Urban Environment"], Bryansk, 2020, pp. 348–352. (In Russian).

3. Chernikov A.A., Istratova E.E. [Using of electronic document management systems in the small business of the city of Novosibirsk]. *Aktual'nye problemy mirovoi ekonomiki i menedzhmenta*: materialy mezhdunarodnoi internet-konferentsii [Proceedings of the International Internet conference "Actual problems of the world economy and management"], Gomel, 2019, pp. 256–257. (In Russian).

4. Simonova S.I. Intellektual'nyi analiz dannykh dlya zadach CRM [Data mining for CRM tasks]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2015, vol. 3, no. 2. (In Russian). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnyy-analiz-dannyh-dlya-zadach-crm (accessed 01.09.2021).

5. Efremova L.I., Kolekina A.O. Vybor sistemy elektronnogo dokumentooborota dlya predpriyatiya [Choice of electronic document turning system for enterprise]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V.N. Tatishcheva = Vestnik of Volzhsky University after V.N. Tatishchev*, 2019, vol. 2, no. 1. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-sistemy-elektronnogo-dokumentooborota-dlya-predpriyatiya (accessed 01.09.2021).

6. Aprishko D.V., Taran V.N. [Electronic document management systems and their review]. *Distantsionnye obrazovatel'nye tekhnologii*: materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem) [Distance educational technologies. Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)]. Simferopol, 2019, pp. 244–249. (In Russian). Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40453380 (accessed 01.09.2021).

7. Lange P. de, Nicolaescu P., Neumann A.T. Integrating web-based collaborative live editing and wireframing into a model-driven web engineering process. *Data Science and Engineering*, 2020, vol. 5, pp. 240–260. DOI: 10.1007/s41019-020-00131-3.

8. Medvedeva O.V., Paramonova M.G. Tsifrovizatsiya upravleniya i sistemy elektronnogo dokumentooborota [Digitalization of control and electronic system document flow]. *Uchenye zapiski Tambovskogo otdeleniya RoSMU = Scientific notes of the Tambov branch of the RUYS*, 2019, no. 13. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-upravleniya-i-sistemy-elektronnogo-dokumentooborota (accessed 02.09.2021).

9. Patil T., Bhavsar A.K. Data science team roles and need of data science: a review of different cases. *Data Science and Intelligent Applications: Proceedings of ICDSIA 2020. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 52. Singapore, Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-4474-3_2.

10. Bhagchandani A., Trivedi D. A machine learning algorithm to predict financial investment. *Data Science and Intelligent Applications: Proceedings of ICDSIA 2020. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 52. Singapore, Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-4474-3_30.

11. Paramonova I.E. Electronic document-management systems: a classification and new opportunities for a scientific technical library. *Scientific and Technical Information Processing*, 2016, vol. 43, pp. 136–143. DOI: 10.3103/S0147688216030047.

12. Ginsburg M. An agent framework for intranet document management. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1999, vol. 2, pp. 271–286. DOI: 10.1023/A:1010012406205.

13. Hillah L.M., Maesano A.P., Rosa F. De. Automation and intelligent scheduling of distributed system functional testing. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 2017, vol. 19, pp. 281–308. DOI: 10.1007/s10009-016-0440-3.

14. Ahmad K., Sahu M., Shrivastava M. An efficient image retrieval tool: query based image management system. *International Journal of Information Technology*, 2020, vol. 12, pp. 103–111. DOI: 10.1007/s41870-018-0198-9.

15. Kleshchev A.S., Chernyakhovskaya M.Y., Shalfeeva E.A. Features of the automation of intellectual activities. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*, 2015, vol. 49, pp. 10–20. DOI: 10.3103/S0005105515010021.

16. Kolekar S., Sanjeevi S., Bormane D.S. The framework of an adaptive user interface for e-learning environment using artificial neural network. *International Conference on E-Learning E-Business, EEE 2010*, Las Vegas, Nevada, USA, 2010, pp. 65–69.

17. Fernndez-Garca A.J. A recommender system for component-based applications using machine learning techniques. *Knowledge-Based Systems*, 2019, vol. 164, pp. 68–84. DOI: 10.1016/j.knosys.2018.10.019.

18. Okuda H., Ogata S., Matsuura S. Experimental development based on mapping rule between requirements analysis model and web framework specific design model. *SpringerPlus*, 2013, vol. 2, p. 123. DOI: 10.1186/2193-1801-2-123.

19. Bobyleva M.P. *Upravlencheskii dokumentooborot: ot bumazhnogo k elektronnomu: voprosy teorii i praktiki* [Management document flow: from paper to electronic]. Moscow, Termika Publ., 2019. 470 p.

20. Obukhov A., Krasnyanskiy M., Nikolyukin M. Algorithm of adaptation of electronic document management system based on machine learning technology. *Progress in Artificial Intelligence*, 2020, vol. 9, pp. 287–303. DOI: 10.1007/s13748-020-00214-2.

21. Ghaibi N., Dassi O., Ayed L. User interface adaptation based on a business rules management system and machine learning. *Communications of the IBIMA*, 2018, vol. 2018, art. 281881. DOI: 10.5171/2018.281881.

22. Kotzyba M., Gossen T., Stober S., Nurnberger A. Model-based frameworks for user adapted information exploration: an overview. *Companion Technology*. Cham, Springer, 2017, pp. 37–56. DOI: 10.1007/978-3-319-43665-4_3.

23. Peng F., Lu X., Ma C., Qian Y., Lu J., Yang J. Multi-level preference regression for cold-start recommendations. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2018, vol. 9, no. 7, pp. 1117–1130.

24. Krivenko Yu.S., Minasyan A.T., Razin'kov A.O. [Research of technologies of Data Mining]. *Aktual'nye problemy upravleniya v elektronnoi ekonomike. Odinnadtsatye Khodyrevskie chteniya* [Actual problems of management in the electronic economy. Eleventh Khodyrev Readings], Kursk, 2018, pp. 182–184. (In Russian).

25. Elmabaredy A., Elkholy E., Tolba A.A. Web-based adaptive presentation techniques to enhance learning outcomes in higher education. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, 2020, vol. 15. DOI: 10.1186/s41039-020-00140-w.

26. Shokin Yu.I., Yurchenko A.V. O modelyakh organizatsii khraneniya i ispol'zovaniya nauchnykh dannykh: osnovnye printsipy, protsessy i mekhanizmy [On the models for organizing the storage and use of scientific data: basic principles, processes and mechanisms]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2019, no. 3, pp. 45–54.

27. Barsegyan A.A., Kupriyanov M.S., Stepanenko V.V. , Kholod I.I. *Metody i modeli analiza dannykh: OLAP i DataMining* [Methods and models of data analysis: OLAP and DataMining]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2004. 336 p.

Для цитирования:

Истратова Е.Е., Достовалов Д.Н. Разработка подсистемы интеллектуального анализа данных для системы электронного документооборота Citeck // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 3 (83). – С. 115–128. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-115-128.

For citation:

Istratova E.E., Dostovalov D.N. Razrabotka podsistemy intellektual'nogo analiza dannykh dlya sistemy elektronnogo dokumentooborota Citeck [Development of a data mining subsystem for the Citeck electronic document management system]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 115–128. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-115-128.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 83, № 3, 2021, с. 129–142

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 83, No. 3, 2021, pp. 129–142

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 519.2 DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-129-142

Проверка значимости случайного эффекта для винеровской деградационной модели*

Е.С. ЧЕТВЕРТАКОВА[1,a], Е.В. ЧИМИТОВА[1,2,b]

[1] *634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 60/1, ООО «Эко-Томск»*
[2] *630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет*

[a] *evgenia.chetvertakova@gmail.com* [b] *chimitova@corp.nstu.ru*

В настоящей статье рассматривается винеровская деградационная модель со случайным эффектом, которая позволяет учесть вариабельность тренда изменения деградационного показателя от объекта к объекту. Предполагается, что случайный параметр модели имеет усеченное слева нормальное распределение. В работе получены выражения, необходимые для вычисления оценок максимального правдоподобия параметров модели и получения прогноза вероятности безотказной работы до некоторого момента времени (функции надежности).

Предложены два статистических критерия для проверки гипотезы об отсутствии случайного эффекта для рассматриваемой винеровской деградационной модели. Первый критерий представляет собой хорошо известный критерий отношения правдоподобия, а второй основан на оценке дисперсии случайного параметра. Применение критериев предполагает использование распределений статистик при верной нулевой гипотезе, получаемых методами статистического моделирования в режиме реального времени. В результате проведенного исследования мощности предложенных критериев показано, что критерий, основанный на оценке дисперсии случайного параметра, является более предпочтительным по мощности в случае рассмотренных пар конкурирующих гипотез.

Применение разработанных критериев рассмотрено на примере данных о деградации турбовентиляторных двигателей. Набор данных представляет собой измерения, зарегистрированные на 18 датчиках для 100 двигателей. Перед построением деградационной модели получен единый деградационный показатель с использованием метода главных компонент. Гипотеза о незначимости случайного эффекта отверглась по обоим критериям. Показано, что винеровская деградационная модель со случайным эффектом более адекватно описывает распределение наработок до отказа, чем аналогичная модель с фиксированным эффектом.

Ключевые слова: винеровская деградационная модель, модель с фиксированным эффектом, модель со случайным эффектом, усеченное нормальное распределение, гипотеза об отсутствии случайного эффекта, критерий отношения правдоподобия, оценка диспресии случайного параметра, метод Монте-Карло, надежность, турбовентиляторные двигатели

* *Статья получена 23 декабря 2020 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Статистические деградационные модели используются в анализе данных о сроке службы тестируемых изделий в случаях, когда помимо информации об отказах имеется и информация об изменении показателя старения (деградации) [1–3]. Часто на практике рассматриваются параметрические модели, которые различаются распределением приращений показателя деградации и наличием или отсутствием случайного эффекта. Так, например, в [4–8] авторы рассматривают деградационную гамма-модель с фиксированным и случайным эффектами, где в случае модели со случайным эффектом параметр масштаба рассматривают как случайную величину, имеющую гамма-распределение. В [9–11] определяют распределение приращений деградационного показателя как обратное гауссовское распределение, а в [10, 12–14] исследуются винеровские деградационные модели с фиксированным и случайным эффектами, где во втором случае параметр тренда является случайной величиной из усеченного нормального распределения.

При работе с деградационной моделью со случайным эффектом необходимо учитывать распределение случайного параметра, что, в свою очередь, увеличивает число неизвестных параметров модели в сравнении с соответствующей моделью с фиксированным эффектом. В результате точность оценки параметров для модели со случайным эффектом может снизиться, поэтому не рекомендуется использовать такую модель, если случайный эффект незначителен или не наблюдается вовсе [7, 8]. С другой стороны, если разброс значений от объекта к объекту довольно велик, модель с фиксированным эффектом также может оказаться неподходящей, при этом использование модели со случайным эффектом может дать более точные оценки параметров. Таким образом, для того чтобы определиться с выбором между моделями с фиксированным и случайным эффектами, необходимо проверить статистическую гипотезу об отсутствии случайного эффекта.

В [15] для выявления случайного эффекта в модели предлагается использовать тест Хаусмана. Однако этот статистический критерий применяется только для моделей линейной регрессии, где оценки рассчитываются при помощи метода наименьших квадратов, поэтому данный критерий не является подходящим для определения случайного эффекта в деградационных моделях. Другими критериями сравнения статистических моделей являются информационные критерии AIC и BIC [10], которые основаны на значениях функции максимального правдоподобия и накладывают так называемый штраф на количество оцениваемых параметров. Такие информационные критерии позволяют сравнивать статистические модели, но не используются для проверки гипотез. В связи с этим появилась необходимость в разработке статистического критерия для выявления значимости случайного эффекта в случае винеровской деградационной модели.

В настоящей статье для проверки гипотезы об отсутствии случайного эффекта предлагаются два критерия: критерий отношения правдоподобия и критерий, основанный на оценке дисперсии случайного параметра. С использованием метода Монте-Карло было проведено исследование мощности построенных критериев для различных пар конкурирующих гипотез. Применение этих критериев показано на примере данных о деградации турбовентиляторных двигателей [16].

1. ВИНЕРОВСКАЯ ДЕГРАДАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Случайный процесс $Z(t)$, характеризующий процесс деградации исследуемых изделий, будем называть винеровским деградационным процессом, если

- $Z(0)=0$;
- $Z(t)$ является случайным процессом с независимыми приращениями;
- приращения $\Delta Z(t)=Z(t+\Delta t)-Z(t)$ подчиняются нормальному распределению с функцией плотности

$$f_N(u;\ \Delta s(t),\ \sigma)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\Delta s(t)}{\sigma}\right)^2},$$

где $\Delta s(t)=m(t+\Delta t)-m(t)$ – параметр сдвига и σ – параметр масштаба.

Обозначим математическое ожидание случайного процесса $Z(t)$ через

$$M(Z(t))=m(t),$$

где $m(t)$ – положительная возрастающая функция. Будем называть ее функцией тренда показателя деградации. В настоящей статье будем использовать функции тренда вида

$$m(t;\ \gamma)=\gamma_0 t,\quad \gamma_0>0, \tag{1}$$

$$m(t;\ \gamma)=\gamma_0(e^{\gamma_1 t}-1),\quad \gamma_0>0,\quad \gamma_1>0. \tag{2}$$

Таким образом, время безотказной работы представляет собой случайную величину

$$T=\sup\{t: Z(t)<\tilde{z}\},$$

где $\tilde{z}$ – критический уровень показателя деградации, при достижении которого фиксируется отказ изделия.

Если случайные величины ξ_1 и ξ_2 подчиняются нормальному распределению с параметрами сдвига μ_1 и μ_2 и параметрами масштаба σ_1 и σ_2 соответственно, то их сумма $\xi_1+\xi_2$ имеет нормальное распределение с параметром сдвига $\mu_1+\mu_2$ и параметром масштаба $\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2}$. Таким образом, при выполнении сформулированных предположений случайный процесс $Z(t)$ в некоторый фиксированный момент времени $t=t_k$ представляет собой случайную величину, имеющую нормальное распределение с параметром сдвига, равным $m(t_k)$, и параметром масштаба, равным σ.

Тогда функция надежности для рассматриваемой винеровской деградационной модели принимает вид

$$S(t)=P\{T>t\}=P\{Z(t)<\tilde{z}\}=\Phi\left(\frac{\tilde{z}-m(t)}{\sigma}\right), \tag{3}$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция стандартного нормального распределения.

При рассмотрении винеровской деградационной модели со случайным эффектом будем предполагать, что параметр γ_0 является случайной величиной ξ, которая имеет усеченное нормальное распределение с функцией плотности

$$f_{trunc}(u;\ \mu,\ \delta) = \frac{f_N(u;\ \mu,\ \delta)}{1 - F_N(0;\ \mu,\ \delta)}, \quad u > 0,$$

где $F_N(\cdot)$ – функция распределения нормального закона с параметром сдвига μ и параметром масштаба δ.

Введем следующее обозначение для функции тренда:

$$m(t;\ \gamma) = \xi \cdot \nu(t;\ \gamma).$$

Тогда в случае модели со случайным эффектом маргинальную функцию плотности для $Z(t)$ можно записать следующим образом:

$$f_{Z(t)}(u;\ \nu(t,\gamma),\ \sigma,\ \mu,\ \delta) = \int_0^\infty f_N(u;\ \omega \cdot \nu(t,\gamma),\ \sigma) f_{trunc}(\omega;\ \mu,\ \delta) d\omega.$$

Функция надежности для винеровской деградационной модели со случайным эффектом вычисляется по формуле

$$S(t) = P\{T > t\} = P\{Z(t) < \tilde{z}\} = \int_{-\infty}^{\tilde{z}} f_{Z(t)}(u;\ \nu(t,\gamma),\ \sigma,\ \mu,\ \delta) du. \qquad (4)$$

Обозначим измерения показателя деградации для i-го объекта через

$$\left(0,\ Z_0^i\right),\ \left(t_1^i,\ Z_1^i\right),\ldots,\ \left(t_{k_i}^i,\ Z_{k_i}^i\right),$$

где k_i – это число измерений деградационного показателя во времени. Без потери общности будем считать, что начальное значение показателя старения $Z_0^i = 0$, $i = \overline{1,n}$.

Тогда выборка приращений деградационного показателя может быть записана как

$$\mathbf{X}_n = \left\{ X_j^i = Z_j^i - Z_{j-1}^i,\ i = \overline{1,n},\ \ j = \overline{1,k_i} \right\}.$$

В таком случае оценка максимального правдоподобия параметров σ, γ винеровской деградационной модели с фиксированным эффектом будет вычисляться в результате максимизации логарифма функции правдоподобия:

$$L(\mathbf{X}_n) = \prod_{i=1}^{n} \prod_{j=1}^{k_i} f_N\left(X_j^i;\ \nu_j^i,\ \sigma\right), \qquad (5)$$

где $\nu_j^i = \gamma_0\left(v\left(t_j^i;\ \gamma\right) - v\left(t_{j-1}^i;\ \gamma\right)\right)$.

Если же рассматривается винеровская деградационная модель со случайным эффектом, то функция правдоподобия будет записана как произведение совместных функций плотности приращений, где случайный эффект является единым на протяжении всего деградационного процесса каждого объекта:

$$L(\mathbf{X}_n) = \prod_{i=1}^{n} \int_0^{\infty} \left[\prod_{j=1}^{k_i} f_N\left(X_j^i;\ \omega \cdot \nu\left(t_j^i,\ \gamma\right),\ \sigma \right) \right] f_{trunc}(\omega;\ \mu,\ \delta) d\omega . \qquad (6)$$

2. ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ ОБ ОТСУТСТВИИ СЛУЧАЙНОГО ЭФФЕКТА

Пусть наблюдаемый деградационный процесс $Z(t)$ является винеровским деградационным процессом. Если разброс значений от объекта к объекту довольно велик, то влияние случайного эффекта может оказаться значительным, а деградационная модель с фиксированным эффектом – не подходящей для дальнейшего анализа. Таким образом, появляется необходимость в проверке гипотезы об отсутствии случайного эффекта в модели. Иными словами, требуется проверить, является ли параметр ξ случайной величиной:

$$H_0 :\ \xi = \text{const} .$$

Конкурирующая гипотеза, соответствующая деградационной модели со случайным эффектом, будет иметь вид

$$H_1 : D\xi > 0 .$$

Для проверки гипотезы H_0 рассмотрим статистический критерий отношения правдоподобия, который обычно используется для определения наилучшей из двух предложенных моделей. Значение статистики критерия рассчитывается как

$$\lambda_n = \ln \frac{L\left(\mathbf{X}_n \mid H_1\right)}{L\left(\mathbf{X}_n \mid H_0\right)},$$

где $L\left(\mathbf{X}_n \mid H_0\right)$ – это значение максимума функции правдоподобия для деградационной модели с фиксированным эффектом, $L\left(\mathbf{X}_n \mid H_1\right)$ – значение максимума функции правдоподобия для деградационной модели со случайным эффектом. При достаточно больших значениях λ_n нулевая гипотеза отклоняется.

Необходимо отметить, что согласно лемме Неймана–Пирсона критерий отношения правдоподобия является наиболее мощным при проверке лишь простых гипотез, однако в данной задаче рассматривается сложная гипотеза, поскольку значения параметров модели заранее неизвестны. Поэтому в качестве альтернативного подхода предлагается критерий, основанный на оценке дисперсии случайного параметра модели.

Для винеровской деградационной модели со случайным эффектом вида (4) оценка дисперсии случайного параметра будет рассчитываться как

$$d_n = \hat{\delta}_n^2 \left(1 - \frac{\hat{\mu}_n \cdot f_N\left(0;\ \hat{\mu}_n,\ \hat{\delta}_n\right)}{1 - F_N\left(0;\ \hat{\mu}_n,\ \hat{\delta}_n\right)} - \left(\frac{\hat{\delta}_n \cdot f_N\left(0;\ \hat{\mu}_n,\ \hat{\delta}_n\right)}{1 - F_N\left(0;\ \hat{\mu}_n,\ \hat{\delta}_n\right)} \right)^2 \right),$$

где $\hat{\mu}_n$ и $\hat{\delta}_n$ являются оценками максимального правдоподобия параметров сдвига и масштаба случайного параметра ξ соответственно.

Для того чтобы определить, может ли выбранная оценка дисперсии d_n быть использована в качестве статистики критерия, проведем исследование статистических свойств d_n для винеровской деградационной модели с использованием метода Монте-Карло. Зафиксируем истинные значения параметров $\sigma = 2$, $\mu = 0.5$, $\delta = 0.05$ для модели со случайным эффектом и $\sigma = 2$, $\xi = 0.5$ – для модели с фиксированным эффектом. Количество сгенерированных выборок приращений деградационного показателя $N = 10\ 000$. Полученные значения среднего $\bar{X}$ и выборочной дисперсии S^2 оценок d_n для винеровских деградационных моделей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Значения среднего $\bar{X}$ и выборочной дисперсии S^2 статистики d_n

Means $\bar{X}$ and variance values S^2 of estimates d_n

Винеровская модель	Описательная статистика	$n = 5$	$n = 10$	$n = 30$	$n = 50$
С фиксированным эффектом	$\bar{X}$	$3.45 \cdot 10^{-7}$	$1.31 \cdot 10^{-7}$	$5.32 \cdot 10^{-8}$	$3.27 \cdot 10^{-8}$
	S^2	$7.75 \cdot 10^{-10}$	$3.42 \cdot 10^{-11}$	$9.89 \cdot 10^{-12}$	$6.23 \cdot 10^{-12}$
Со случайным эффектом	$\bar{X}$	$5.15 \cdot 10^{-3}$	$3.97 \cdot 10^{-3}$	$2.59 \cdot 10^{-3}$	$2.51 \cdot 10^{-3}$
	S^2	$4.61 \cdot 10^{-4}$	$9.80 \cdot 10^{-5}$	$3.07 \cdot 10^{-5}$	$1.37 \cdot 10^{-5}$

Как видно из табл. 1, средние значения оценки дисперсии d_n, полученные для модели с фиксированным эффектом, с увеличением объема выборки стремятся к нулю, в отличие от средних значений d_n, полученных для модели со случайным эффектом, которые стремятся к истинному значению дисперсии, равному $D\xi = 2.5 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, полученные результаты подтверждают асимптотическую несмещенность и состоятельность оценки дисперсии d_n, что позволяет использовать ее в качестве статистики критерия

для проверки гипотезы об отсутствии случайного эффекта. Аналогично критерию отношения правдоподобия гипотеза H_0 будет отклоняться при достаточно больших значениях d_n.

Теоретическое распределение статистик предложенных критериев при верной нулевой гипотезе остается неизвестным, так как на вид распределения влияет ряд факторов: вид функции тренда, значения и число моментов времени замера показателя деградации, объем выборки и другие. Таким образом, применение данных критериев предполагает использование распределений статистик при верной нулевой гипотезе, получаемых методами статистического моделирования в режиме реального времени в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Сгенерировать выборку приращений для деградационной модели с фиксированным эффектом в соответствии с заданными моментами времени замера t_j^i, $i=\overline{1,n}$, $j=\overline{1,k_i}$, и параметрами, представляющими собой значения оценок максимального правдоподобия, полученные по выборкам исходных данных.

2. Методом максимального правдоподобия оценить параметры деградационной модели с фиксированным эффектом по смоделированной выборке, полученной в пункте 1, используя функцию правдоподобия вида (5).

3. Методом максимального правдоподобия оценить параметры деградационной модели со случайным эффектом по смоделированной выборке, полученной в пункте 1, используя функцию правдоподобия вида (6).

4. Вычислить значения статистик λ_n и d_n.

5. Повторив действия из пунктов 1–4 M раз, получить эмпирическую функцию распределения $G_M(s\,|\,H_0)$ для каждого из предложенных критериев.

6. Вычислить значения достигаемого уровня значимости

$$\alpha_n = 1 - G_M(S_n\,|\,H_0),$$

где S_n – это соответствующее значение статистики (λ_n или d_n).

7. Если значения α_n меньше заданного уровня значимости α, то гипотеза H_0 отклоняется.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ КРИТЕРИЕВ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ ОБ ОТСУТСВИИ СЛУЧАЙНОГО ЭФФЕКТА

Для сравнения критерия отношения правдоподобия и критерия, основанного на оценке дисперсии случайного параметра, для винеровской деградационной модели и различных пар конкурирующих гипотез проведено исследование мощности с использованием метода Монте-Карло. Оценки мощности для обоих критериев были получены при различных объемах выборок, моментах времени замера показателя деградации t_j, $j=\overline{1,k}$, а также различной величине случайного эффекта. Количество смоделированных выборок

для каждого значения оценки мощности $M = 10\,000$, уровень значимости задан равным $\alpha = 0.01$.

В табл. 2 представлены значения мощности предложенных критериев при различных наборах моментов времени замера:

$$T_1: \ t_j = t_{j-1} + 400, \text{ где } t_0 = 0, \ j = \overline{1, 10},$$

$$T_2: \ t_j = t_{j-1} + 250, \text{ где } t_0 = 0, \ j = \overline{1, 16},$$

$$T_3: \ t_j = t_{j-1} + 125, \text{ где } t_0 = 0, \ j = \overline{1, 32}.$$

При справедливости гипотезы H_0 выборки приращений генерируются из модели с фиксированным эффектом с параметром тренда, равным $\gamma_0 = 0.5$. В случае же, если верна конкурирующая гипотеза H_1, выборки генерируются из модели со случайным эффектом с параметрами $\mu = 0.5$, $\delta = 0.05$. В качестве функции тренда во всех случаях была выбрана линейная функция вида (1).

Таблица 2

Table 2

Оценки мощности критериев при различных наборах моментов времени замера деградационного показателя

Tests of power estimates for different sets of time moments

Моменты замера	$n = 5$	$n = 10$	$n = 15$	$n = 20$
Критерий, основанный на оценке дисперсии случайного параметра				
T_1	0.50	0.82	0.94	1.0
T_2	0.61	0.84	0.98	1.0
T_3	0.64	0.87	0.99	1.0
Критерий отношения правдоподобия				
T_1	0.53	0.81	0.90	1.0
T_2	0.59	0.84	0.96	1.0
T_3	0.62	0.85	0.99	1.0

Как видно из табл. 2, для винеровской деградационной модели мощность обоих критериев растет с увеличением числа объектов n, а также частоты измерений показателя деградации.

Чтобы продемонстрировать, как меняется мощность в зависимости от величины случайного эффекта, рассмотрим модели с различными значениями параметра масштаба δ. Моменты замера были получены по формуле $t_j = t_{j-1} + 250$, где $t_0 = 0$, $j = \overline{1, 16}$. Уровень значимости α выбран равным 0.01.

Таблица 3

Table 3

Оценки мощности критериев при различных значениях параметра масштаба δ винеровской деградационной модели со случайным эффектом

Tests power estimates for different values of the scale parameter δ for the Wiener degradation model with random effects

Параметр масштаба δ	$n = 5$	$n = 10$	$n = 15$	$n = 20$
Критерий, основанный на оценке дисперсии случайного параметра				
$\delta = 0.05$	0.56	0.82	0.99	1.0
$\delta = 0.1$	0.63	0.86	0.99	1.0
$\delta = 0.5$	0.64	0.89	0.99	1.0
Критерий отношения правдоподобия				
$\delta = 0.05$	0.51	0.79	0.97	0.99
$\delta = 0.1$	0.58	0.83	0.97	1.0
$\delta = 0.5$	0.60	0.85	0.99	1.0

Как видно из табл. 3, значения мощности увеличиваются с ростом величины случайного эффекта. Кроме того, можно предположить, что критерий, основанный на оценке дисперсии случайного параметра, по мощности несколько превосходит критерий отношения правдоподобия.

4. АНАЛИЗ ДАННЫХ О ДЕГРАДАЦИИ ТУРБОВЕНТИЛЯТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проиллюстрируем работу критериев проверки значимости случайного эффекта для винеровской деградационной модели на примере данных о турбовентиляторных двигателях [15]. Турбовентиляторный двигатель представляет собой турбореактивный двухконтурный двигатель с высокой степенью двухконтурности. Такие двигатели широко применяются в качестве силовых установок самолетов и требуют адекватного контроля и своевременного обслуживания для обеспечения безопасности полета [16]. В связи с этим очевидна необходимость прогнозирования состояния системы.

В ходе эксперимента в [15] были получены результаты измерения с 18 датчиков по различным показателям для 100 двигателей.

Построение винеровской деградационной модели предполагает наличие некоторого скалярного деградационного показателя, который в полной мере характеризует состояние объекта. Для него должен быть известен критический уровень, при достижении которого фиксируется отказ объекта. Поэтому для получения единого деградационного показателя к полученным многомерным измерениям применен метод главных компонент. Критический уровень взят равным медиане, вычисленной по выборке значений деградационного показателя в момент отказа, $\tilde{z} = 7.05$. Полученные значения деградационного показателя представлены на рис. 1.

При построении деградационной модели в качестве функции тренда рассмотрим экспоненциальную функцию вида (2).

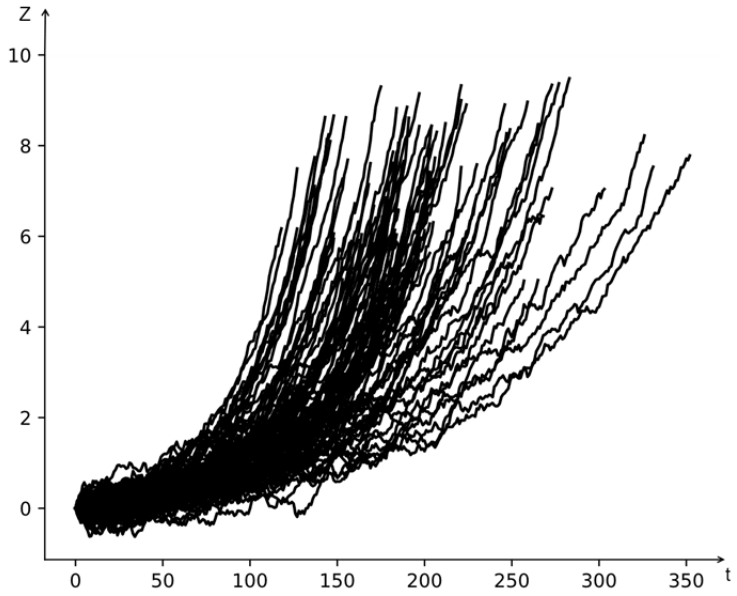


Рис. 1. График изменения деградационного показателя с течением времени для данных о турбовентиляторных двигателях

Fig. 1. The degradation paths for the turbofan engine data

Поскольку разброс значений деградационного показателя от объекта к объекту достаточно велик, проверим гипотезу об отсутствии случайного эффекта с использованием предложенных критериев. Результаты оценки параметров винеровских деградационных моделей, а также значения статистик и достигаемые уровни значимости рассмотренных критериев представлены в табл. 4.

Таблица 4

Table 4

Значения оценок параметров винеровских деградационных моделей, статистик и достигаемых уровней значимости предложенных критериев проверки гипотезы об отсутствии случайного эффекта

MLEs of the Wiener degradation model parameters, statistics, and p-values for the proposed tests

Винеровская деградационная модель	Оценки параметров модели	Критерий отношения правдоподобия		Критерий, основанный на оценке дисперсии случайного параметра	
		λ_n	α_n	d_n	α_n
С фиксированным эффектом	$\hat{\sigma} = 2.1$ $\hat{\gamma} = (2.48,\ 0.07)$	1.3	$< 10^{-3}$	0.003	$< 10^{-4}$
Со случайным эффектом	$\hat{\sigma} = 0.5$ $\hat{\mu} = 2.31$ $\hat{\delta} = 0.867$ $\hat{\gamma}_1 = 0.008$				

Поскольку достигаемый уровень значимости α_n меньше заданного уровня значимости $\alpha = 0.05$ для обоих критериев, то гипотеза об отсутствии случайного эффекта отвергается.

На рис. 2 представлены графики функций надежности для винеровских деградационных моделей с фиксированным и случайным эффектами (пунктирная и сплошная линии соответственно), а также график эмпирической функции надежности. Значения времени наработки до отказа для эмпирической функции надежности получены следующим образом: по каждому деградационному процессу строилась функция тренда вида (2), далее в качестве времени наработки до отказа взято время, при котором тренд пересекает критический уровень деградации $\tilde{z} = 7.05$.

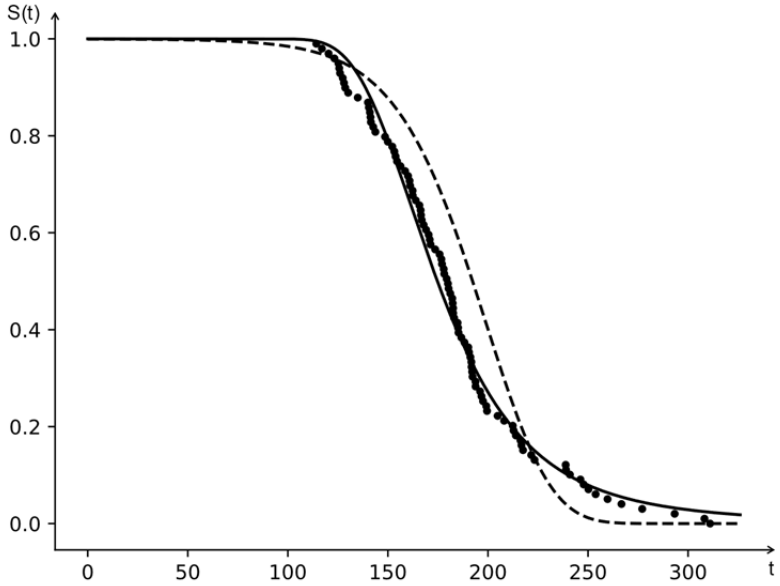


Рис. 2. Функции надежности моделей с фиксированным и случайным эффектами и эмпирическая функция надежности отказов

Fig 2. The reliability functions of the fixed-effect and random-effect Wiener degradation models and the empirical distribution of engines failures

Как видно из рис. 2, функция надежности модели со случайным эффектом располагается ближе к наблюдаемому распределению отказов, тем самым демонстрируя, что винеровская деградационная модель со случайным эффектом является наиболее подходящей для описания поведения исследуемых турбовентиляторных двигателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье рассмотрены вопросы построения винеровских деградационных моделей с фиксированным и случайным эффектами. Для выявления значимости случайного эффекта на базе винеровской деградационной модели предложены критерий отношения правдоподобия и критерий, основанный на оценке дисперсии случайного параметра.

Для предложенных критериев проведено исследование мощности, в результате которого показано, что критерий, основанный на оценке дисперсии случайного параметра, является более мощным.

Применение критериев проиллюстрировано на примере данных о деградации турбовентиляторных двигателей. В результате анализа показано, что винеровская деградационная модель со случайным эффектом является наиболее подходящей для рассматриваемых данных, так как описывает поведение исследуемых турбовентиляторных двигателей лучше модели с фиксированным эффектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Meeker W.Q., Escobar L.A.* Statistical methods for reliability data. – New York: John Wiley and Sons, 1998. – 680 p.

2. *Nikulin M., Bagdonavicius V.* Accelerated life models: modeling and statistical analysis. – Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2001. – 334 p.

3. *Антонов А.В., Никулин М.С.* Статистические модели в теории надежности. – М.: Абрис, 2012. – 390 с.

4. *Bordes L., Paroissin C., Salami A.* Parametric inference in a perturbed gamma degradation process. – arXiv preprint arXiv:1005.1214. – 2010. – 13 p.

5. *Lawless J., Crowder M.* Covariates and random effects in a gamma process model with application to degradation and failure // Lifetime Data Analysis. – 2004. – Vol. 10. – P. 213–227.

6. *Pan Z., Balakrishnan N.* Reliability modeling of degradation of products with multiple performance characteristics based on gamma processes // Reliability Engineering and System Safety. – 2011. – Vol. 96. – P. 949–957.

7. *Chetvertakova E.S., Chimitova E.V.* Testing significance of random effects for the gamma degradation model // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 49. – С. 92–100.

8. *Четвертакова Е.С.* Исследование деградационных гамма-моделей со случайным и фиксированным эффектами // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 6. – С. 120–128. – DOI: 10.21285/1814-3520-2018-6-120-128.

9. *Pan D., Liu J.B., Cao J.* Remaining useful life estimation using an inverse Gaussian degradation model // Neurocomputing. – 2016. – Vol. 185. – P. 64–72.

10. A comparative analysis of the Wiener, gamma and inverse gaussian degradation models / E.V. Chimitova, E.S. Chetvertakova, S.A. Sergeeva, E. Osinceva // Applied methods of statistical analysis. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – Vol. 4: Nonparametric methods in cybernetics and system analysis: proceedings of the international workshop, Krasnoyarsk, 18–22 Sept. 2017. – P. 160–167.

11. *Wang X., Xu D.* An inverse Gaussian process model for degradation data // Technometrics. – 2010. – Vol. 52. – P. 188–197.

12. *Tsai C.-C., Tseng S.-T., Balakrishnan N.* Mis-specification analyses of gamma and Wiener degradation processes // Journal of Statistical Planning and Inference. – 2011. – Vol. 12. – P. 25–35.

13. *Wang X.* Wiener processes with random effects for degradation data // Journal of Multivariate Analysis. – 2010. – Vol. 101, N 2. – P. 340–351.

14. *Chetvertakova E.S., Chimitova E.V.* The wiener degradation model with random effects in reliability metrology // Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI. – Glasgow: World Scientific, 2018. – P. 162–169.

15. *Hausman J.A.* Specification tests in econometrics // Econometrica. – 1978. – Vol. 46. – P. 1251–1271.

16. Hidden Markov model for health estimation and prognosis of turbofan engines / A. Giantomassi, F. Ferracuti, A. Benini, G. Ippoliti, S. Longhi, A. Petrucci // International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (AMSE). – Washington, DC, USA, 2011. – P. 1–9.

17. *Кулагин В., Кузьмичев В.С.* Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. В 2 кн. Кн. 2. Основы теории ГТД. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. – 4-е изд., испр. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 280 с.

Четвертакова Евгения Сергеевна, ведущий программист-аналитик ООО «Эко-Томск». Основное направление научных исследований – анализ надежности, статистические деградационные модели. Имеет более 20 печатных работ. E-mail: evgenia.chetvertakova@gmail.com

Чимитова Екатерина Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета, старший программист-аналитик ООО «Эко-Томск». Основное направление научных исследований – анализ надежности, статистические деградационные модели. Имеет более 80 печатных работ и учебных пособий. E-mail: chimitova@corp.nstu.ru

Chetvertakova Evgeniia S., leading programmer-analyst, OOO Eco-Tomsk. Her research interests are currently focused on reliability analysis and statistical degradation models. She has more than 20 publications. E-mail: evgenia.chetvertakova@gmail.com

Chimitova Ekaterina V., D. Sc. (Eng.), professor, department of theoretical and applied informatics; senior programmer-analyst, OOO Eco-Tomsk. Her research interests are currently focused on mathematical modeling methods, survival and reliability analysis. She has more than 80 publications. E-mail: chimitova@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-129-142

Testing significance of random effects for the Wiener degradation model[*]

E.S. CHETVERTAKOVA[1,a], *E.V. CHIMITOVA*[1,2,b]

[1] *OOO "Eco-Tomsk", 60/1 Lenin Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation*
[2] *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*

[a] *evgenia.chetvertakova@gmail.com* [b] *chimitova@corp.nstu.ru*

Abstrsct

This paper considers the Wiener degradation model with random effects. Random-effect models take into account the unit-to-unit variability of the degradation index. It is assumed that a random parameter has a truncated normal distribution. During the research, the expression for the maximum likelihood estimates and the reliability function has been obtained. Two statistical tests have been proposed to reveal the existence of random effects in degradation data corresponding to the Wiener degradation model. The first test is a well-known likelihood ratio test, and the second one is based on the variance estimate of the random parameter. These tests have been compared in terms of power with the Monte-Carlo simulation method. The result of the research has shown that the criterion based on the variance estimate of the random parameter is more powerful than the likelihood ratio test in the case of the considered pairs of competing hypotheses.

An example of the analysis using the proposed tests for the turbofan engine degradation data has been considered. The data set includes the measurements recorded from 18 sensors for 100 engines. Before constructing the degradation model, the single degradation index has been obtained using the principal component method. The hypothesis of the random effect insignificance in the model has been rejected for both tests. It has been shown that the random-effect Wiener degradation model describes the failure time distribution more accurately than the fixed-effect Wiener degradation model.

Keywords: Wiener degradation model, fixed-effect model, model with random effects, truncated normal distribution, absence of random effects hypothesis, likelihood ratio test, variance estimate of the random parameter, Monte-Carlo method, reliability, turbofan engine data

[*] *Received 23 December 2020.*

REFERENCES

1. Meeker W.Q., Escobar L.A. *Statistical methods for reliability data*. New York, John Wiley and Sons, 1998. 680 p.

2. Nikulin M., Bagdonavicius V. *Accelerated life models: modeling and statistical analisys*. Boca Raton, Chapman and Hall/CRC, 2001. 334 p.

3. Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statisticheskie modeli v teorii nadezhnosti.* Moscow, Abris Publ., 2012. 390 p.

4. Bordes L., Paroissin C., Salami A. *Parametric inference in a perturbed gamma degradation process*. arXiv preprint arXiv:1005.1214. 2010. 13 p.

5. Lawless J., Crowder M. Covariates and random effects in a gamma process model with application to degradation and failure. *Lifetime Data Analysis*, 2004, vol. 10, pp. 213–227.

6. Pan Z., Balakrishnan N. Reliability modeling of degradation of products with multiple performance characteristics based on gamma processes. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, vol. 96, pp. 949–957.

7. Chetvertakova E.S., Chimitova E.V. Testing significance of random effects for the gamma degradation model. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2019, no. 49, pp. 92–100.

8. Chetvertakova E.S. Issledovanie degradatsionnykh gamma-modelei so sluchainym i fiksirovannym effektami [Study of fixed effect and random effect gamma degradation models]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2018, vol. 22, no. 6, pp. 120–128. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-6-120-128.

9. Pan D., Liu J.B., Cao J. Remaining useful life estimation using an inverse Gaussian degradation model. *Neurocomputing*, 2016, vol. 185, pp. 64–72.

10. Chimitova E.V., Chetvertakova E.S., Sergeeva S.A., Osinceva E.A. A comparative analysis of the Wiener, gamma and inverse gaussian degradation models. *Applied methods of statistical analysis*. Vol. 4. *Nonparametric methods in cybernetics and system analysis*. Novosibirsk, 2017, pp. 160–167.

11. Wang X., Xu D. An inverse Gaussian process model for degradation data. *Technometrics*, 2010, vol. 52, pp. 188–197.

12. Tsai C.-C., Tseng S.-T., Balakrishnan N. Mis-specification analyses of gamma and Wiener degradation processes. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2011, vol. 12, pp. 25–35.

13. *Wang X.* Wiener processes with random effects for degradation data. *Journal of Multivariate Analysis*, 2010, vol. 101, no. 2, pp. 340–351.

14. Chetvertakova E.S., Chimitova E.V. The wiener degradation model with random effects in reliability metrology. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI.* Glasgow, World Scientific, 2018, pp. 162–169.

15. Hausman J.A. Specification tests in econometrics. *Econometrica*, 1978, vol. 46, pp. 1251–1271.

16. Giantomassi A., Ferracuti F., Benini A., Ippoliti G., Longhi S., Petrucci A. Hidden Markov model for health estimation and prognosis of turbofan engines. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (AMSE)*, Washington, DC, USA, 2011, pp. 1–9.

17. Kulagin V., Kuz'michev V.S. *Teoriya, raschet i proektirovanie aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok*. V 2 kn. Kn. 2. *Osnovy teorii GTD. Sovmestnaya rabota uzlov vypolnennogo dvigatelya i ego* kharakteristiki [Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants. In 2 vol. Vol. 2. Fundamentals of the theory of gas turbine engines. Joint work of the components of the completed engine and its characteristics]. 4th ed. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2018. 280 p.

Для цитирования:

Четвертакова Е.С., Чимитова Е.В. Проверка значимости случайного эффекта для винеровской деградационной модели // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 3 (83). – С. 129–142. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-129-142.

For citation:

Chetvertakova E.S., Chimitova E.V. Proverka znachimosti sluchainogo effekta dlya vinerovskoi degradatsionnoi modeli [Testing significance of random effects for the wiener degradation model]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 129–142. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-129-142.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 83, № 3, 2021, с. 143–153

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 83, No. 3, 2021, pp. 143–153

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 62-503.56 DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-143-153

Optimization of DC motor speed control based on fuzzy logic-PID controller*

A.F. SHEET

Iraq, Mosul, 18 Al. Menasa Street, Northern Technichal University

dr.amerfarhan@ntu.edu.iq

In this paper the PID controller and the Fuzzy Logic Controller (FLC) are used to control the speed of separately excited DC motors. The proportional, integral and derivate (KP, KI, KD) gains of the PID controller are adjusted according to Fuzzy Logic rules. The FLC cotroller is designed according to fuzzy rules so that the system is fundamentally robust. Twenty-five fuzzy rules for self-tuning of each parameter of the PID controller are considered. The FLC has two inputs; the first one is the motor speed error (the difference between the reference and actual speed) and the second one is a change in the speed error (speed error derivative). The output of the FLC, i.e. the parameters of the PID controller, are used to control the speed of the separately excited DC Motor. This study shows that the precisiom feature of the PID controllers and the flexiblity feature of the fuzzy controller are presented in the fuzzy self-tuning PID controller. The fuzzy self – tuning approach implemented on the conventional PID structure improved the dynamic and static response of the system. The salient features of both conventional and fuzzy self-tuning controller outputs are explored by simulation using MATLAB. The simulation results demonstrate that the proposed self-tuned PID controller i.plementd a good dynamic behavior of the DC motor i.e. perfect speed tracking with a settling time, minimum overshoot and minimum steady state errorws.

Keywords: Fuzzy Logic, Electric motors, DC machine, Differential gain, Power System, PID controller, Optimization technique, and Self-tuning

INTRODUCTION

Electric motors play an important role in all areas of life, providing us with the mechanical capacity we need in many industries. It is also an indispensable part of our everyday life as most household appliances rely on electric motors. DC motors have a number of advantages that are not available in other engine types: they generate a high initial torque that makes them suitable in many applications and provide a wide range of speed. Their control methods are easy and low cost if compared with AC motors. In addition to these advantages, they are free from

* *Статья получена 18 января 2021 г.*

some disadvantages, as they require a constant source of power, as well as their need for early adopters to determine the primary impulse current. Many applications need to set the motor speed at a certain speed level, as well as obtain good response characteristics to speed and on this basis the need to build a control system to do this work emerged [1–3]. Many of its control systems used the proportional control – the differential – the differential (PID), the Fuzzy logic controller, and the Neural Networks Controller. The PID Controller is one of the most widely used in industrial applications. Some sources indicate that the control ratio of PID is more than 95 % in industrial applications. It is characterized by great durability. The dominant control combines the advantages of the dominant (PD) and control (PI) techniques, improving the response of the case and reducing the error of the fixation case to zero [4–6]. (K_p, K_i, K_d) and a lack of sufficient flexibility to adapt when the system is exposed to some external influences and its performance is affected when it is used to control the speed of motors due to the nonlinear characteristics of the motor, including the characteristics of saturation and friction. Due to the difficulty of dealing with a system that possesses nonlinear characteristics because it is not possible to create and deal with a mathematical model. Mamdani (1974) applied the logic of control systems. The advantage of using logic is its ability to control nonlinear systems that cannot be described as simple mathematical equations or to be described as a difficult process [7]. A reasonable technology was found to replace the traditional control technique (PID), which often requires a mathematical, not linear and complex, model. Reasonable logic has successful applications, especially in control systems, compared to the traditional control, which has great flexibility in design. The dominant control gives the designer the ability to control nonlinear systems, and the common logic uses the language knowledge (IF,…, THEN), which is based on human experience. From this point of view, this control was used to synthesize (PID) to suit all operating system conditions [8–11].

1. PID-CONTROLLER

The dominant (PID) is one of the most traditional dominants used in industrial control processes. The PID is also one of the basic control techniques as it provides an easy and efficient solution to many real-time control problems. The PID controller has three types of gain, which can be set to obtain an acceptable response in output. These types are K_p, K_i, and K_d (2) [12–15].

where: KP: Proportional gain. KI: Complementary gain. K_d : Differential gain. The differential integrative proportional control equation is:

$$UPID = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot e(t) + K_d \left(\frac{de(t)}{dt} \right). \tag{1}$$

The three gain values can be tuned by trial and error, or using some of the available control rules such as the Zecler-Nikles method. Individual effects of the three gain values on the closed loop system performance can be summarized in Table 1 [16].

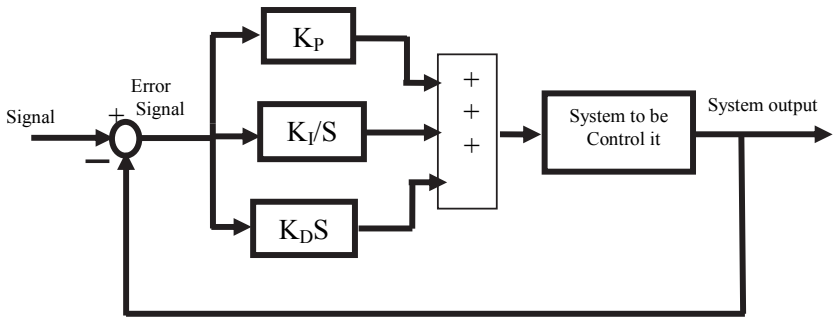


Fig. 1. The mass plan of the differential integral proportional controller

Table 1

The effect of the gain values (K_p, K_d, K_i) on the system response

Increase the value Element	Boarding Time (Tr)	Stability Time (Ts)	Evidence status (ess)	Overflow limit (over-shoot)	Stability
Proportional (K_p)	Less	Increases slightly	Less	Increase	Its effect is negative
Integrative (K_i)	Slightly less	Increase	Much less	Increase	Its effect is negative
Differential (K_d)	Slightly less	Decrease	Its effect is small	Decrease	Improves stability

2. FUZZY CONTROLLER

In 1974, the world introduced the Fuzzy Logic Controller (Fuzzy Logic Controller), whose logic was based on logic, as these controllers demonstrated their superior performance over traditional control systems because they do not rely on the mathematical equations of the process, (Transfer Function) of the control system, known or unknown, but depends on the human experience of the rules in the form of (If,…, Then). The set of rules that describe the performance of the system is called the rule base of the controlled ruler [17, 18].

FUZZY CONTROLLER STRUCTURE

The controlled rule consists of four basic parts as shown in Figure (2) [19, 20]:

1. Fuzzifier. The process of marginal input values is converted to values based on the input functions of each entry.
2. Fuzzy Inference Engine. This section analyzes the polarized laws and finds the set of output output based on the values of the pointed inputs.
3. Knowledge Base. This section includes the rule of law and the database.

4. Defuzzifier. The unit of conversion of the output of the bounded inference device to a limit value by performing one of the methods of de-fouling.

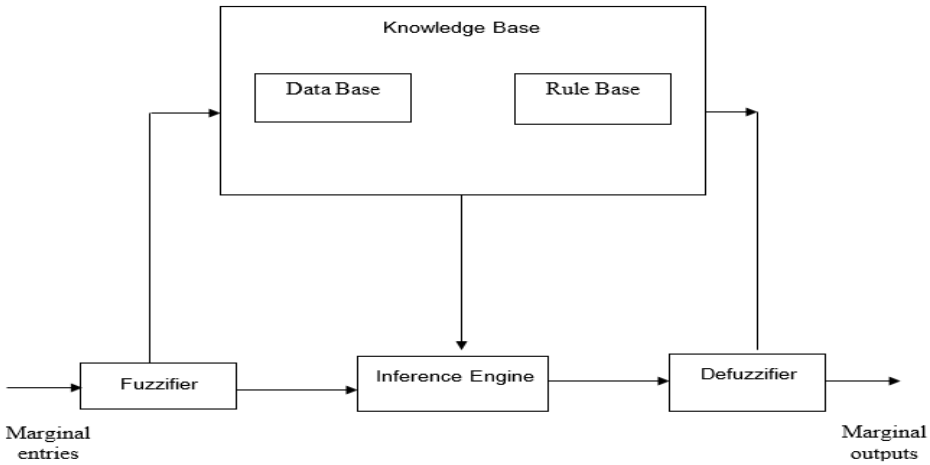


Fig. 2. Fuzzy dominant parts and structure

3. SELF-TUNING OF THE FUZZY SELF TUNING PID CONTROLLER

This control creates a relationship between the dominant control inputs and the gain coefficients of the PID based on the logic theory of the reasonableness in order to provide the best performance of the system response [21]. In this research, the proposed controlled control consists of two inputs, the error signal (e), the speed of reference and the speed of the motor) and the signal of change in the error (de), and consists of three outputs (K_{p1}, K_{i1}, and K_{d1}). Though the error signal and error change of the controlled control work on the tuning of the PID (which is the initial values), K_p, K_i, and K_d) are calculated by the Zikler-Niklas Table. Figure (3) illustrates this relationship the N dominant triple (PID Controller) and the controlling Almillb (Fuzzy Controller) [22].

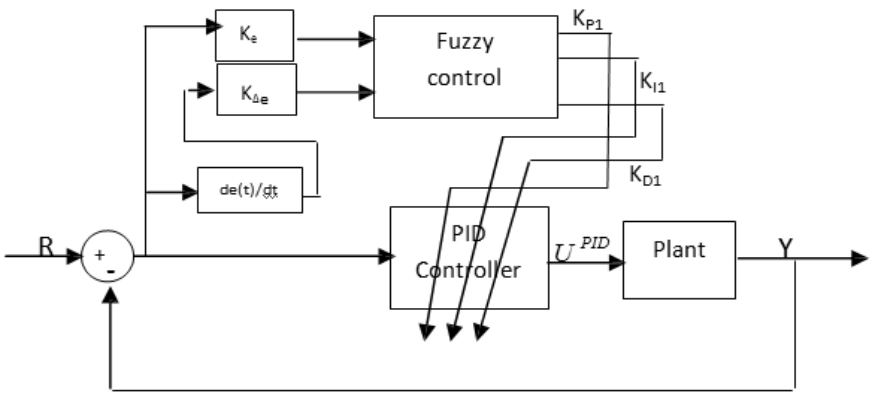


Fig. 3. Controlled and finite control of triple control coefficients

Now the equation of the triple controller (PID) after the hybridization process with the fuzzy logic controller (Fuzzy logic controller) takes the form:

$$UPID = K_{p2} \cdot e(t) + K_{i2} \cdot e(t) + K_{d2}\left(\frac{de(t)}{dt}\right), \tag{2}$$

where (K_{p2}, K_{i2}, K_{d2}) are the new gain coefficients after the link between PID and fuzzy controller:

$$K_{p2} = K_{p1} \cdot K_p, \qquad K_{i2} = K_{i1} \cdot K_i, \qquad K_{d2} = K_{d1} \cdot K_d.$$

where $K_p, K_i, K_d, K_{p1}, K_{i1}, K_d$ are outputs of the fuzzy control that synthesize parameters (PID).

4. POWER SYSTEM

The power system consists of the DCMotor, the Buck Converter and the control system. The DC motor is of a separate type. The engine consists of a fixed part and the other moving part. The moving part contains the product files where the product voltage is changed by the changer circuit to obtain the required speed [23]. The Buck Converter is the modulator with which the Vo output voltage can be obtained less than the input voltage Vs [24]. This type of transformer is simple to install and work and can change the output voltage from a few voltages close to zero to the voltages in the changer [17, 25]. The control system consists of the PID and the Fuzzy logic control, which generates pulses based on the speed of the tube. These pulses are driven by the buck converter circuit to obtain the voltages that are placed on the product circuit. Figure (4) shows the mass diagram of the circuit in the Matlab program.

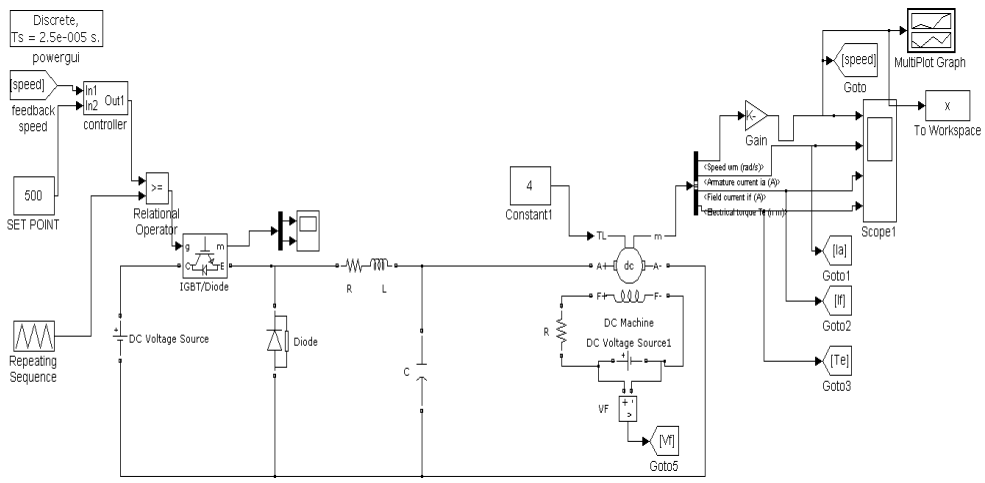


Fig. 4. The mass diagram of the circuit in the Matlab program

5. SIMULATION RESULTS

In this research, a differential integrative proportional control is designed based on the Zicler-Nikles scale. The gain values, which are considered as the initial value, are calculated as the tuning process of the controlled controller to obtain the best response to the speed of the engine which is $K_p = 10.363$, $K_i = 471.07$, $K_d = 0.057$. The results of the comparison between the traditional triple control where the values of the gain elements were found by the Zikler-Nichols table and the self-tuning determinant of the gain elements of the triangular rule.

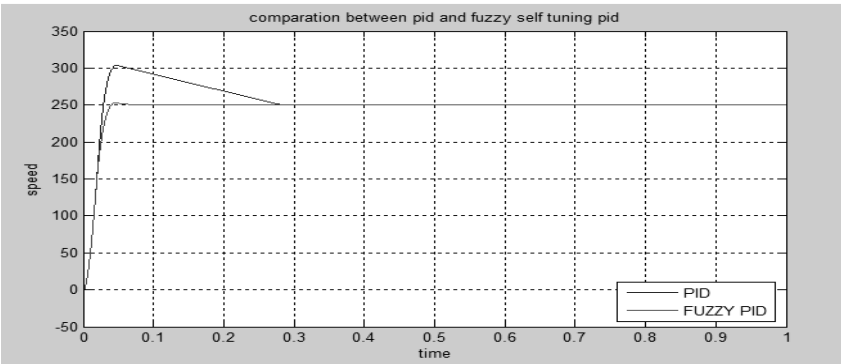


Fig. 5. Motor speed response of the traditional triangular control and the triangular control

Table 2

The motor speed response elements of the traditional triangular control and triangular control

Speed reference 250 rpm	Over shoot, %	Error steady state, %	Setting time (sec)	Rise time (sec)
PID Controller	21.56	0	0.28	0.018
Fuzzy PID Controller	1.2	0	0.078	0.023

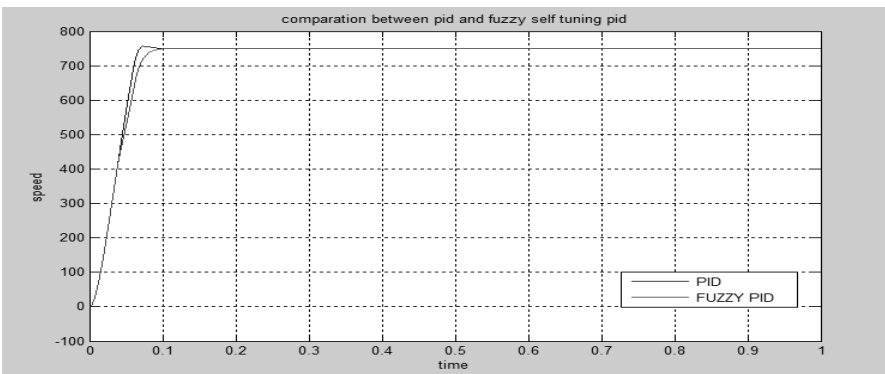


Fig. 6. Motor speed response of the traditional triangular control and triangular control

Table 3

Motor speed response elements of the traditional triangular control and triangular control

Speed reference 750 rpm	Over shoot, %	Error steady state, %	Setting time (sec)	Rise time (sec)
PID Controller	0.83	0	0.12	0.045
Fuzzy PID Controller	0	0	0.1	0.052

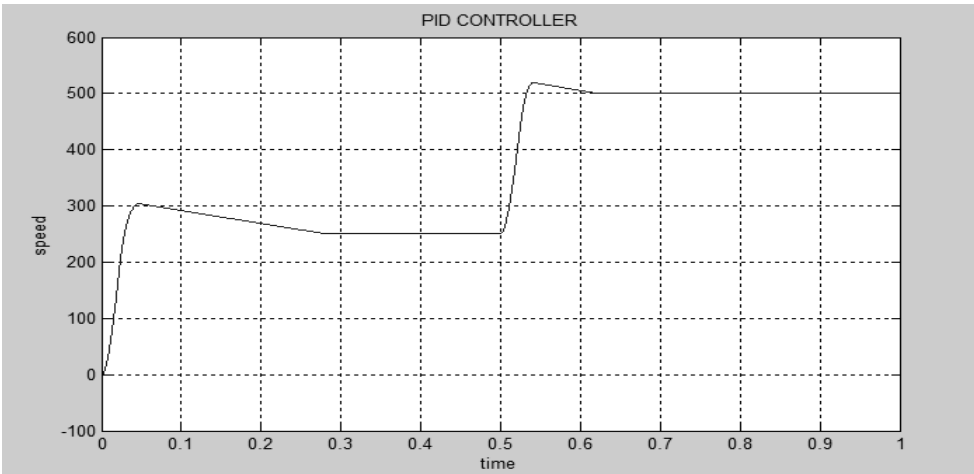


Fig. 7. Motor speed response to the traditional triangular control (PID) where the reference speed has been changed from 250 to 500

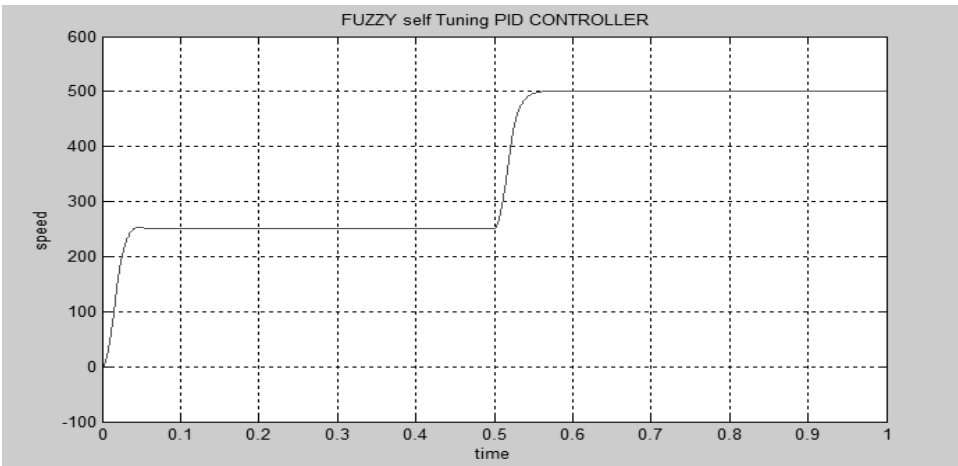


Fig. 8. Speed response of the motor for the PID Fuzzy where the reference speed has been changed from 250 to 500

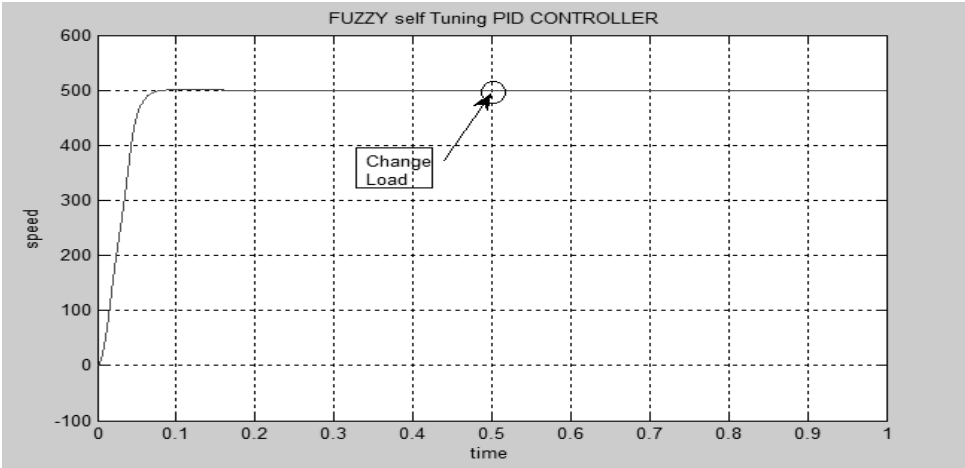


Fig. 9. Motor speed response of the trigonometric control shows the fuzzy control of the load

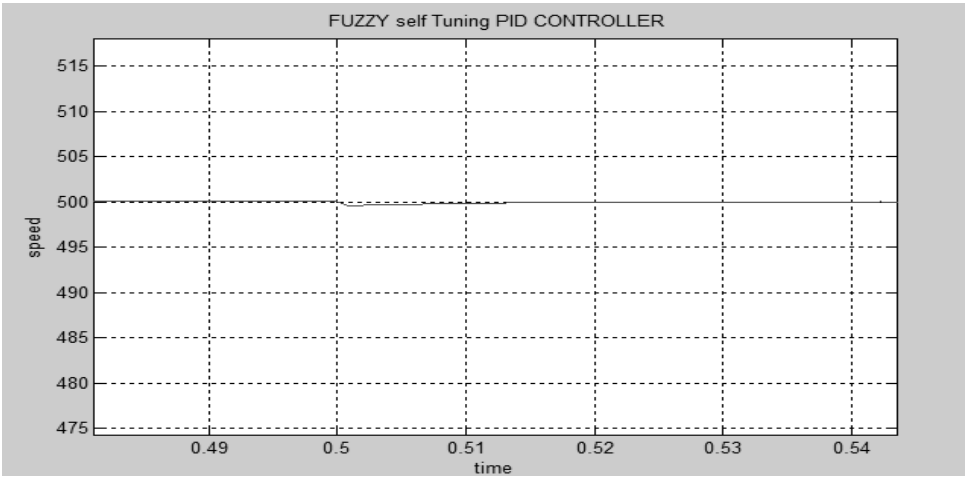


Fig. 10. The amplitude of the motor speed response of the trigonometric control with the fuzzy controlled control of a time load of 0.5sec

CONCLUSIONS

This research is designed to studiy the behavior of the control system of the triple (PID) type of controlling to control the speed of the DC motor type of separate excitation.Theses dominant features have many advantages, namely, it is solid, easy to understand and simple but it also has some problems, e.g. gain coefficients for obtaining good properties because each drive point has different coefficients that perform well for that point only. In this research, the Zicler-Nichols method was used to find the coefficients of the gain. The coefficients were found at a work point of 1000 rpm. Above, it was noted that the more (250). We notice a response to the speed of the motor to be compared to the response of the motor speed (750), where we note a good response to the proximity of the point of finding parameters to solve this problem. A Fuzzy PID is designed, where the logic is applied to the

tuning of the gain coefficients so that it produces good performance of the motor speed in all cases. This was proved by the results where the overshoot ratio was reduced to 250, which is far from the point of finding gain transactions in the manner of Z Layer of 21.56 % to 1.2 % through the Almillb logic the same operating conditions as well as the time of stability had reduced timesettling of 0.28 sec to 0.078 sec. The triple controlled control with the traditional triangular control was also tested with a change of the reference speed from 250 to 500 and a sudden load on the motor where the results showed the superiority and durability of the triangular controlled modulator in the logic of the traditional triangular control.

REFERENCES

1. Alsayed Y.M., Maamoun A., Shaltout A. High performance control of PMSM drive system implementation based on DSP real-time controller. *Proceedings of the 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, Aswan, Egypt, Febraury 2019, pp. 225–230.

2. Steffi Mary S., Mohammed Shaffi J. A review paper on speed control of DC Motor & Virtual Instrumentation. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2018 vol. 6 (2), pp. 1654–1657. – DOI: 10.15680/IJIRCCE.2018.0602091.

3. Zhang J., Wang N., Wang S. A developed method of tuning PID controllers with fuzzy rules for integrating process. *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Boston, 2004, vol. 2, pp. 1109–1114.

4. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design and technology. *IEEE Transactionon Control System Technology*, 2005, vol. 13, no. 4, pp. 559–576.

5. Li H.X., Tso S.K. Quantitative design and analysis of fuzzy proportional-integral-derivative control – a step towards autotuning. *International Journal of System Science*, 2000, vol. 31, no. 5, pp. 545–553.

6. Sooraksa P., Pattaradej T., Chen G. Design and implementation of fuzzy P2ID controller for handlebar control of a bicycle robot. *Integrated Computer-Aided Engineering*,, 2002, vol. 9, no. 4, pp. 319–331.

7. Tang W., Chen C., Lu R. de. A modified fuzzy PI controller for a flexible-joint robot arm with uncertainties. *Fuzzy Set and System*, 2001, vol. 118, pp. 109–119.

8. Fan L., Meng Joo E. Design for auto-tuning PID controller based on genetic algorithms. *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2009),* Xi'an, China, 2009, pp. 1924–1928. DOI: 10.1109/ICIEA.2009.5138538.

9. Sabri S.S. *Optimal fuzzy controller design for (Cuk) converter circuit using genetic algorithm*. M.Sc thesis. University of Mosul. Mosul, Iraq, 2008.

10. Kumar R., Girdhar V. High performance fuzzy adaptive control for D.C. motor. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 2012, vol. 1, iss. 8,

11. Namazov M., Basturk O. DC motor position control using fuzzy proportional-derivative controllers with different defuzzification methods. *Turkish Journal of Fuzzy Systems*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 36–54.

12. Bansal U.K., Narvey R. Speed control of DC motor using fuzzy PID controller. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 2010, vol. 3, no. 9, pp. 1209–1220.

13. Grimholt C., Skogestad S. Optimal PID Control of double integrating processes. *IFAC PapersOnLine*, 2016, vol. 49 (7), pp. 127–132.

14. Suman S.K., Giri V.K. Investigation and implementation of genetic algorithm for speed control of DC motor based on PID controller. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 100 (6), pp. 1428–1433.

15. Gubara W., Elnain M., Babiker S.F. Comparative study on the speed of DC motor using PID and FLC. *IEEE Conference of Basic Sciences and Engineering Studies (SGCAC)*. Khartoum, Sudan, 2016, pp. 24–29.

16. Suman S.K., Giri V.K. Speed control of DC motor using optimization techniques based PID controller. *IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH)*, Coimbatore, India, 2016, pp. 581–587.

17. Pimentel J.C.G., Gad E. *An algebraic approach for the stability analysis of BLDC motor controllers*. arXiv:2007.01387. 2020, pp. 1–12.

18. Lotfy A., Kaveh M., Mosavi M.R., Rahmati A.R. An enhanced fuzzy controller based on improved genetic algorithm for speed control of DC motors. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2020, vol. 105, pp. 141–155. DOI: 10.1007/s10470-020-01599-9.

19. Mohamed M.E.A., Yanling G., Osman B.A.r., Mohamed A.A. Design of speed control system of DC motor based on PID tuning with fuzzy define weighting point. *2019 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, Khartoum, Sudan, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCCEEE46830.2019.9071374.

20. Gupta S.K., P. Varshney. Fractional Fuzzy PID controller for speed control of DC Motor. 2013 Third International Conference on Advances in Computing and Communications, Kochi, Kerala, India, 2013, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICACC.2013.7.

21. Yanling G., Mohamed M.E.A. Study on the extent of the impact of data set type on the performance of ANFIS for controlling the speed of DC motor. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 2019, vol. 51, no. 1, pp. 83–102.

22. Mohamed M.E.A., Guo Y. Separately excited DC motor speed tracking control using adaptive neuro-fuzzy inference system based on genetic algorithm particle swarm optimization and fuzzy auto-tuning PID. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 300, no. 4, p. 042114.

23. Zhao H., Wang Y., Guo C., Luo P., Zhao D. Research on self-adaptive fuzzy speed control strategy of brushless DC motor for stronger robustness. *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Nanchang, China, 2019, pp. 2483–2488. DOI: 10.1109/CCDC.2019.8832713.

24. Tarannum T. Intelligent speed control of DC motor using ANFIS D controller. *2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT)*, Dhaka, Bangladesh, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICASERT.2019.8934620.

25. Rauf P., Jamil M., Gilani S.O., Rind S.J. Comparison of nonlinear controllers for speed control of DC motor. *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, Vancouver, BC, 2018, pp. 389–394. DOI:10.1109/IEMCON.2018.8614853.

For citation:

Sheet A.F. Optimization of DC motor speed control based on fuzzy logic-PID controller. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 143–153. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-143-153.

Амер Фархан Шит, доктор электронной техники, ассистанский профессор кафедры инженерного медицинского приборостроения Северного технического университета. Имеет 17 научных статей, патентную научную книгу. E-mail: dr.amerfarhan@ntu.edu.iq

Amer Farhan Sheet, Doctor of electronic engineering. Asistanc Professor Of Engineering Medical Instrumentation Department Of Northern Technical University. He has 17 scientific articles, patent scientific book. E-mail: dr.amerfarhan@ntu.edu.iq

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-143-153

Оптимизация управления скоростью двигателя постоянного тока на основе ПИД-регулятора с нечеткой логикой*

А.Ф. ШИТ

Ирак, Мосул, ул. Ал. Менаса, 18, Северный технический университет

dr.amerfarhan@ntu.edu.iq

Аннотация

В этой статье ПИД-регулятор и контроллер нечеткой логики (FLC) используются для управления скоростью двигателей постоянного тока с независимым возбуждением. Пропорциональные, интегральные и производные (K_p, K_i, K_d) коэффициенты усиления ПИД-регулятора регулируются в соответствии с правилами нечеткой логики. FLC разработан в соответствии с нечеткими правилами, поэтому система является принципиально устойчивой. Рассмотрены более двух десятков нечетких правил самонастройки каждого параметра ПИД-регулятора. FLC имеет два входа: первый – это ошибка скорости двигателя (разница между опорной и фактической скоростью), а второй – изменение погрешности скорости (производная погрешности скорости). Выход FLC, т. е. параметры ПИД-регулятора, используется для управления скоростью отдельно возбужденного двигателя постоянного тока. Это исследование показывает, что точная функция ПИД-регуляторов и гибкость нечеткого регулятора представлены в нечетком самонастраивающемся ПИД-регуляторе. Подход нечеткой самонастройки, реализованный на традиционной структуре ПИД-регулятора, улучшил динамический и статический отклик системы. Существенные особенности как обычных, так и нечетких выходов самонастраивающегося контроллера исследуются путем моделирования с использованием MATLAB. Результаты моделирования показывают, что предлагаемый самонастраивающийся ПИД-регулятор реализует хорошее динамическое поведение двигателя постоянного тока, то есть идеальное отслеживание скорости с временем установления, минимальным перерегулированием и минимальной ошибкой в установившемся состоянии.

Ключевые слова: нечеткая логика, электродвигатели, машина постоянного тока, дифференциальное усиление, система питания, ПИД-регулятор, метод оптимизации и самонастройка

ISSN 2782-2001, http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data processing systems
Vol. 83, No 3, 2021, pp. 143–153

* *Статья получена 18 January 2021 г.*

Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телевещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000 года. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). В 2021 году был переименован в «Системы анализа и обработки данных». Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Системы анализа и обработки данных» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы;

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям);

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения;

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление;

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей;

05.13.17 – Теоретические основы информатики;

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Разделы журнала: информатика, вычислительная техника и управление; приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.

Рекомендуемый объем статьи 10–16 страниц. Статьи объемом, не превышающим 8 страниц, могут быть размещены в разделе «Краткие сообщения». Возможна публикация дискуссионного материала в разделе «Дискуссии». В информационном разделе возможно размещение сообщений о состоявшихся и планируемых конференциях, семинарах и симпозиумах, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Website: http://journals.nstu.ru/vestnik

Условия приема статей

В редакцию журнала представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.
2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора, ORCID) – печатная версия, два экземпляра.
3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», подготовленное в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, один экземпляр.
4. Лицензионный договор, заполненный и подписанный, отправляется со всем пакетом документов; сканированный заполненный договор записывается на диск.
5. Электронная версия статьи, контактной информации, описания статьи для базы данных РИНЦ и сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.
6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригинала **– А4**. Шрифт **– Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3 верхнее поле – 4,0

правое поле – 3,3 нижнее поле – 3,9.

текстовое поле 22 × 14,4

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов, с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см, межстрочный интервал с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение**, **Постановка задачи**, **Методы анализа**, **Основной результат**, **Выводы** или **Заключение**), набираются прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис*. и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в описании не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку упоминания их в тексте. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные подписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте набираются курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0C. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы – курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha .$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул указывать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \qquad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются вверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: Файл / Параметры страницы / Разметка; установить **разные четные и нечетные** и **первая отличается**.

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8. Номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы пустая строка размером 10. Порядковый номер – с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий; e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском языках**.

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК, и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте http://journal.nstu.ru/vestnik.