

ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

12+



**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСКИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

ТОМ 22, № 1

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Сургут
2023**

Учредитель и издатель
 Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
 «Сургутский государственный университет»

Главный редактор
 Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор

Заместитель главного редактора
 Тараканов Дмитрий Викторович, к. т. н., доцент

Ответственный секретарь
 Брагинский Михаил Яковлевич, к. т. н., доцент

Члены редакционной коллегии:
 Советов Б. Я., академик РАН и РАО, д. т. н., профессор
 Юсупов Р. М., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор
 Абрамов О. В., д. т. н., профессор
 Анохин А. Н., д. т. н., профессор
 Антонов А. В., д. т. н., профессор
 Бурханов Р. А., д. филос. н., профессор
 Бушмелева К. И., д. т. н., профессор
 Гетман А.Ф., д. т. н., профессор
 Григорьев Л. И., д. т. н., профессор
 Дрекс Ю. Г., д. т. н., профессор
 Ельников А. В., д. ф.-м. н., профессор
 Инютин С. А., д. т. н., профессор
 Каштанов В. А., д. ф.-м. н., профессор
 Керимов Т. Х., д. филос. н., профессор
 Леонов Д. Г., д. т. н., профессор
 Малышев Д. С., д. ф.-м. н., профессор
 Мельников А. В., д. т. н., профессор
 Певзнер Л. Д., д. т. н., профессор
 Увайсов С. У., д. т. н., профессор
 Цибульский В. Р., д. т. н., профессор
 Юрков Н. К., д. т. н., профессор

Выпускающий редактор
 Хасанова А. Ш.
Редактор
 Манаева Л. И.
Верстка
 Мельниковой Е. А.
Переводчик
 Петрова А. В.

Рисунок на обложке:
 Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
 © Галкин В. А., Гореликов А. В.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук». С 29.03.2022 издание принимает к публикации статьи по следующим научным специальностям: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации
 Эл № ФС77-83015 от 31.03.2022.
 Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:
 БУ ВО «Сургутский государственный университет»,
 628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1
 Тел.: +7 (3462) 76-29-88, факс: +7 (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Сайт: vestcyber.ru

Founder and Publisher
Surgut State University

Chief Editor

Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Sciences (Engineering)

Vice Chief Editor

Dmitry V. Tarakanov, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor

Executive Editor

Mikhail Ya. Braginsky, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor

Editorial Board:

Prof. Sovetov B. Ya., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), the Russian Academy of Education (RAE)

Prof. Yusupov R. M., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS)

Prof. Abramov O. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Anokhin A. N., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Antonov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Bushmeleva K. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Getman A. F., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Drevs Yu. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Elnikov A. V., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Inyutin S. A., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Leonov D. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Malyshev D. S., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Melnikov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Pevzner L. D., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Yurkov N. K., Doctor of Sciences (Engineering)

Publishing Editor

Khasanova A. Sh.

Editor

Manaeva L. I.

Layout

Melnikova E. A.

Translator

Petrova A. V.

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere

© Galkin V. A., Gorelikov A. B.

Since 29.05.2017 the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals Published in the RF by the Higher Attestation Commission, which publishes main scientific results of doctor's and candidate's theses.

Since March 29, 2022, the journal is included in the List on the following subject groups:

- 2.3.1. System Analysis, Data Management and Processing; 1.2.2. Mathematical Modeling, Calculus and Program Complexes; 2.2.2. Electronic Component Base of Micro- and Nanoelectronics, Quantum Devices.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Mass media registration certificate El No. FS77-83015 dated on 31.03.2022.

Published since 2002. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

Surgut State University, Russia 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, Surgut, Lenina pr., 1
Tel.: +7 (3462) 76-29-88, fax: +7 (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Web: vestcyber.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В. Обоснование электронной компонентной базы для автогенераторов при навигационном обеспечении беспилотных летательных аппаратов	6
Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Моделирование процесса обучения операторов	16
Козлова М. А., Шаманский В. А. Поиск экстремального содержания компонента в реагирующей системе с помощью графа химических реакций	21
Матюхина А. В., Тищенко В. В. Анализ развития растений с помощью методов компьютерного зрения	29
Носков С. И., Бычков Ю. А., Перфильева К. С. Разработка регрессионной модели пассажирооборота воздушного транспорта Российской Федерации двумя альтернативными методами	36
Шершинева Е. О., Веремчук Н. С., Тихомиров В. С. О разработке приложения для интеграции данных из информационной системы вуза в Google Calendar	43
Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Интеллектуальная модель максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции	52

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Золотарева Н. С. Методы масштабирования чисел в модулярной арифметике: обзор, разработка и оценка сложности алгоритмов	59
Назин А. Г. Об одном подходе к построению профиля рельефной поверхности	73

CONTENTS

ENGINEERING

<i>Bogoslovsky A. V., Razinkov S. N., Syomka E. V.</i> Validation of the Electronic Component Base for Self-Excited Oscillators in Navigating Unmanned Aerial Vehicles	6
<i>Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V.</i> Simulation of Operators Training	16
<i>Kozlova M. A., Shamansky V. A.</i> Searching for an Extreme Component Content in a Reacting System Using Graph of Chemical Reactions	21
<i>Matokhina A. V., Tishchenko V. V.</i> Analysis of Plants' Growth Using Computer Vision Methods	29
<i>Noskov S. I., Bychkov Yu. A., Perfilyeva K. S.</i> Developing a Regression Model of Air Transport Passenger Turnover in the Russian Federation with Two Alternative Methods	36
<i>Shershneva E. O., Veremchuk N. S., Tikhomirov V. S.</i> On Developing an Application for Integration of Data from a University Information System into Google Calendar	43
<i>Engel E. A., Engel N. E.</i> Intelligent Model for Maximizing the Generated Power of a Reconfigurable Solar Power Plant	52

PHYSICS AND MATHEMATICS

<i>Zolotareva N. S.</i> Numeral Scaling Methods in Modular Arithmetic: Review, Development and Estimation of the Algorithms Complexity	59
<i>Nazin A. G.</i> On One Approach to Building a Profile of a Relief Surface	73

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 629.7.015.7
DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-6-15

ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ДЛЯ АВТОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ НАВИГАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Андрей Вячеславович Богословский¹, Сергей Николаевич Разиньков²,
Элеонора Викторовна Сёмка³**

^{1, 2, 3} Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия

¹ bogosandrej@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6469-3366>

² razinkovsergey@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>

³ semka_elya@mail.ru [✉], <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Аннотация. Проведен анализ задач навигационного обеспечения воздушных объектов. Выполнен синтез маршрута полета беспилотного летательного аппарата с выбором курсовых углов полета в поворотных пунктах по результатам пеленгования сигналов неподвижного наземного источника. По результатам летных экспериментов, оценены среднеквадратические ошибки определения местоположения излучателей при многократной оценке угловых координат в пространственно-разнесенных точках приемниками-пеленгаторами, размещенными на беспилотных летательных аппаратах «Орлан-10», «Феникс» и «Грант-М». Исследованы способы коррекции автономного полета при возрастающей и убывающей точности оценки направлений прихода сигналов, позволяющие минимизировать ошибки местоопределения за фиксированное время наблюдения.

Предложена схема автогенератора на полевом транзисторе для резервного командного средства управления с автоматическим регулированием курсового угла. Обосновано правило построения модели автогенератора, удовлетворяющего требованиям по минимуму среднеквадратичного отклонения, рассчитанного с помощью электрической схемы и заданного курсового угла при ограничении на физическую реализуемость параметров макета заданной структуры. Сформулированы рекомендации по реализации электронной схемы и определены режимы самовозбуждения автогенератора.

Ключевые слова: критерий синтеза маршрута, беспилотный летательный аппарат, автономный полет, автогенератор, электронная компонентная база, полевой транзистор

Для цитирования: Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В. Обоснование электронной компонентной базы для автогенераторов при навигационном обеспечении беспилотных летательных аппаратов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 6–15. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-6-15.

Original article

VALIDATION OF THE ELECTRONIC COMPONENT BASE FOR SELF-EXCITED OSCILLATORS IN NAVIGATING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Andrey V. Bogoslovsky¹, Sergey N. Razinkov², Eleonora V. Syomka³

^{1, 2, 3} Military Educational and Scientific Center of Air Forces

“N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy”, Voronezh, Russia

¹ bogosandrej@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6469-3366>

² razinkovsergey@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>

³ semka_elya@mail.ru [✉], <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Abstract. The study analyzes the tasks of air objects navigation support. The authors conducted a synthesis of a flight route of an unmanned aerial vehicle with the choice of heading angles of flight at turning points using the direction finding signals received from a stationary ground source. The root-mean-square errors are estimated based on the flying tests. These errors determine a location of emitters during multiple estimation of angular coordinates at points separated in space by direction-finding receivers placed on board of unmanned aerial vehicles “Orlan-10”, “Phoenix”, and “Grant-M”. Methods for correcting autonomous flight with increasing and decreasing accuracy in estimating signal arrival directions are studied, which make it possible to minimize positioning errors for a fixed observation time.

The study proposes a scheme of a self-excited oscillator on a field-effect transistor for backup command control with automatic heading angle control. A rule is substantiated for constructing a model of a self-excited oscillator that meets the requirements for a minimum standard deviation calculated using an electrical circuit and a given heading angle with a restriction on the physical feasibility of the layout parameters of a given structure. Recommendations for the implementation of the electronic circuit are formulated and the modes of self-excitation of the oscillator are determined.

Keywords: route synthesis criterion, unmanned aerial vehicle, autonomous flight, self-excited oscillator, electronic component base, field-effect transistor

For citation: Bogoslovsky A. V., Razinkov S. N., Syomka E. V. Validation of the Electronic Component Base for Self-Excited Oscillators in Navigating Unmanned Aerial Vehicles. *Proceedings in Cybernetics*. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 6–15. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-6-15.

ВВЕДЕНИЕ

Техническую основу навигационного обеспечения беспилотных летательных аппаратов (БЛА), совершающих автономный полет по заданной программе или командам, поступающим с наземного пункта управления (НПУ) по информационно-управляющим каналам, составляют комплекты аппаратуры глобальных систем спутниковой навигации (ГССН). Координатная информация поступает на бортовые приемники от спутниковых группировок ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), BEIDOU/COMPASS (Китай), GALILEO (ЕС), NAVIC (Индия), QZSS (Япония) [1].

Наиболее высокие показатели надежности навигационного обеспечения достигнуты для навигационных систем, в которых передача псевдодиапазонных сигналов со спутников ГССН на борт БЛА выполняется без привлечения наземных ретрансляторов. Улучшение точности ГССН достигается за счет интеграции данных, поступающих от внешних навигационных источников, в процедурах определения местоположения и параметров траекторий полета в системах дифференциальной коррекции [2]. Вместе с тем при потере сигналов ГССН условие автономного полета не выполняется.

Пространственная ориентация БЛА устанавливается в микронавигационных и управляющих модулях, реализующих робастные

алгоритмы рекуррентной линейной фильтрации Калмана и интегрирования кинематических уравнений Эйлера [3].

Задачи автономного пилотирования беспилотных авиационных комплексов эффективно решаются с применением платформ АВАКС-ГеоСервис АП-5 (Россия) на операционной системе QNX с линиями связи на основе интерфейса RS-485, RUAV STA3x с графической средой программирования Simulink, SWIFT AI с FPV (First Person View) трансляцией видеоизображения в режиме реального времени.

В интересах автономной навигации используются:

а) инерциальные измерительные блоки IMU с акселерометрами, магнитометрическими и барометрическими датчиками;

б) интегрированные навигационные системы INS, сочетающие спутниковые данные о местоположении с данными инерциальных измерительных устройств;

в) системы определения курса и пространственного положения AHRS, построенные на базе микроэлектромеханических систем.

Использование инерциальных навигационных систем в БЛА малой и средней дальности ограничивается жесткими массогабаритными требованиями к бортовой радиоэлектронной аппаратуре, а также наличием ошибок определения координат при автономной работе.

Ошибка счисления координат системами высокой точности при прямолинейном полете в течение одного часа составляет порядка двух километров, что не позволяет обеспечить высокоточное определение координат объектов [4].

Возможности повышения точности позиционирования БЛА за счет использования систем оптической коррекции типа «Отблеск-У» по спутниковым снимкам затруднено, поскольку оптико-электронные системы способны эффективно функционировать только в светлое время суток при весьма жестких ограничениях по погодным условиям. Радиотехнические системы коррекции, в основе работы которых лежит сопоставление текущих изображений профиля подстилающей поверхности с эталонными картами, не могут применяться при полетах над равнинной местностью. Зависимости уровней информационных сигналов рельефометрических систем от сезонных флуктуаций электрофизических параметров радиоканалов также могут являться источниками ошибок навигационного обеспечения.

Таким образом, остаются открытыми вопросы реализации функции автономного полета БЛА при коррекции маршрута с применением комбинированных систем управления [5, 6].

Цель предлагаемой работы – разработка способов автономного поддержания траектории движения БЛА самолетного типа при высокоточном выходе в позиционный район.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В [6–9] представлены алгоритмы коррекции траектории полета БЛА при приеме и обработке излучений наземных источников и сборе данных о позиционировании в динамике движения. На основе линейной фильтрации параметров траекторий [5, 7, 8] в системе координат, связанной с излучающим объектом, реализованы процедуры определения направлений движения БЛА в поворотных пунктах маршрута. Построен алгоритм оптимизации маршрута полета БЛА самолетного типа по критерию минимума дисперсии местоопределения наземного источника радиоизлучений (ИРИ) по результатам пеленгования в пространственно-разнесенных точках.

1. Алгоритм коррекции полета беспилотного летательного аппарата при пеленговании источника радиоизлучения в поворотных пунктах маршрута.

Критерий оптимизации маршрута БЛА для достижения наилучшей точности местоопределения ИРИ имеет вид:

$$\begin{cases} \hat{\gamma}_n = \arg \min_{\gamma_n} \sigma_R^2; & n = 1, 2, 3, \dots, \\ \gamma_n \neq \pi m, & m = 0, 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (1)$$

где $\hat{\gamma}_n$ – направления движения с лучшей точностью местоопределения, γ_n – курсовой угол в текущий момент времени, σ_R^2 – дисперсия оценки местоположения излучателя. Второе уравнение в (1) исключает полет БЛА непосредственно на ИРИ [9].

Дисперсия оценки местоположения излучателя имеет вид [8]:

$$\sigma_R^2 = \frac{(\sigma_{\varphi n}^2 R_n^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2 (2R_n^2 + L^2 - 2R_n L \cos \gamma_n)) \times (R_n^2 + L^2 - 2R_n L \cos \gamma_n)}{L^2 \sin^2 \gamma_n}, \quad (2)$$

где R_n и R_{n+1} – наклонные дальности, L – дистанция между точками пеленгования, $\sigma_{\varphi n}$ и $\sigma_{\varphi(n+1)}$ – среднеквадратические ошибки (СКО) пеленгования сигналов.

Согласно уравнению, при обращении первой производной (2) в нуль получим минимальную дисперсию местоопределения объекта для курсового угла $\hat{\gamma}_n$:

$$\cos^2 \gamma_n - \beta_n \cos \gamma_n + 1 = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

где

$$\beta_n = \frac{(\sigma_{\varphi n}^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2) \alpha_n^4 + (2\sigma_{\varphi n}^2 + 5\sigma_{\varphi(n+1)}^2) \alpha_n^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2}{(\sigma_{\varphi n}^2 + 2\sigma_{\varphi(n+1)}^2) \alpha_n^3 + 2\sigma_{\varphi(n+1)}^2 \alpha_n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Решение (3) получим в виде:

$$\gamma_n = \pm \arccos \left(\frac{\beta_n - \sqrt{\beta_n^2 - 4}}{2} \right) + 2\pi m, \quad n = 1, 2, 3, \dots, m = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

На рис. 1а, 1б сплошной линией приведены маршруты БЛА, рассчитанные при $\sigma_R^2 = 1^\circ$, пунктиром обозначены траектории для $\sigma_R^2 = 3^\circ$.

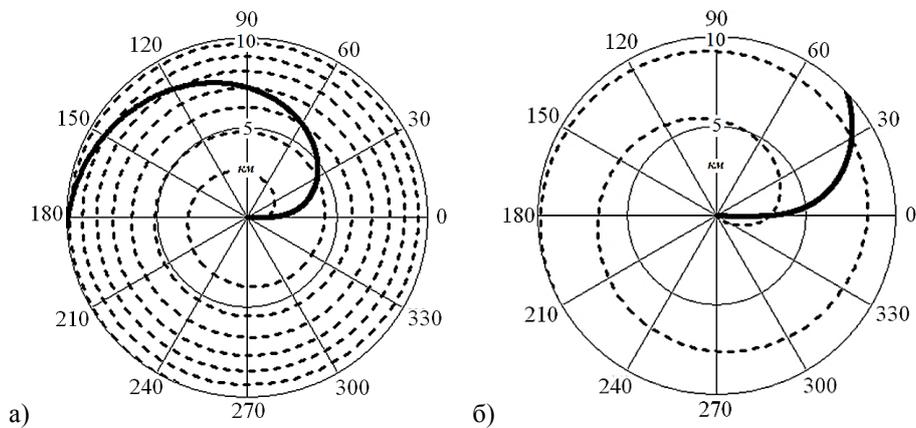


Рис. 1. Траектории полета БЛА в заданное положение:

а) $L = 1$ км; б) $L = 2$ км

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Анализ траекторий движения БЛА позволяет сделать вывод, что повышение СКО пеленгования с 1 до 3° приводит к увеличению длины маршрута полета не менее чем в 6 раз. Рост дистанции между точками пеленгования с 1 до 3 км повышает точность оценки угловых координат и сокращает дальность полета в 2 раза.

Результаты расчетов подтверждены экспериментальными данными, полученными в серии летных экспериментов с обнаружителями-пеленгаторами, применяемыми в качестве целевых нагрузок БЛА «Орлан-10» (ООО «СТЦ», г. Санкт-Петербург). На рис. 2а изображены БЛА на этапе запуска, на рис. 2б

показаны автоматизированные рабочие места (АРМ) их операторов на НПУ.

Пеленгование ИРИ осуществлялось в режиме сканирования диапазона частот от 30 до 3 000 МГц при полете БЛА по траекториям, заданным критерием (1), на высотах 400 м и 1 000 м. Курсовая скорость составляла порядка 100 км/ч.

В качестве ИРИ использовались имитаторы источников непрерывного излучения (ИНИ) с фиксированной частотой (ФЧ), радиостанции Р-845, Midland СТ-400. Продолжительность сеансов связи радиостанции составляла 90 секунд с паузой до 7 минут.



Рис. 2. Летный эксперимент запуска БЛА «Орлан-10»:

а) БЛА «Орлан-10» на этапе запуска; б) АРМ оператора на НПУ

Примечание: составлено авторами.

Значения СКО определения местоположения передатчиков сигналов с борта БЛА

«Орлан-10» (в процентах от дальности) приведены в табл. 1.

Таблица 1

СКО местоопределения ИРИ

Тип ИРИ	Диапазон, МГц	СКО (% от дальности)	
		400 м	1 000 м
Имитатор ИНИ на ФЧ 68 МГц	30 ... 100	7,9	8,2
Имитатор радиостанции на ФЧ 68 МГц		8,9	9,3
Имитатор ИНИ на ФЧ 160 МГц	100 ... 200	5,5	5,7
Имитатор ИНИ на ФЧ 301 МГц	200 ... 400	2,5	2,8
Радиостанция Р-845 на частоте 254,3 МГц		8,7	9,0
Имитатор ИНИ на ФЧ 440 МГц	400 ... 700	2,4	2,8
Две радиостанции Midland СТ-400 на ФЧ 459 МГц		9,3	9,4
Имитатор ИНИ на ФЧ 870 МГц	700 ... 3 000	2,2	3,6

Примечание: составлено авторами по [6].

Установлено, что точность местоопределения передатчиков сигналов составляет до 9,4 % от дальности [6].

В целях оценки эксплуатационных характеристик аппаратуры были проведены тождественные эксперименты при ее размеще-

нии на БЛА «Феникс» (ООО «НПП «НТТ», г. Санкт-Петербург), БЛА «Грант-М» (ООО «НПКЦ «НОВИК-91», г. Егорьевск).

На рис. 3–4 представлены: а) указанные образцы БЛА на стартовых позициях, б) АРМ их операторов на НПУ.



Рис. 3. Летный эксперимент запуска БЛА «Феникс»:
 а) БЛА «Феникс» на этапе запуска; б) АРМ оператора на НПУ
 Примечание: составлено авторами.



Рис. 4. Летный эксперимент запуска БЛА «Грант-М»:
 а) БЛА «Грант-М» на этапе запуска; б) АРМ оператора на НПУ
 Примечание: составлено авторами.

По результатам летных экспериментов установлено, что БЛА «Орлан-10» обладает наиболее высокими показателями надежности. При этом целевые нагрузки наибольшей массы способны нести БЛА «Феникс» и «Грант-М». Минимальное время достижения (набора) рабочего эшелона высоты зафиксировано для БЛА «Грант-М», что способствует успешному выполнению задач в условиях пересеченной местности и высотной городской застройки.

Вместе с тем при наличии активных преднамеренных помех регистрировались отказы основных и резервных систем навигации для всех образцов БЛА. Наиболее благоприятным вариантом возвращения носителя становилось немедленное снижение планированием. Продолжение полета до выработки топлива с ожиданием восстановления приема сигналов ГССН существенно усложняло процесс своевременного обнаружения и эвакуации из-за большой длины маршрута неконтролируемого полета, который мог составлять сотни километров. Поэтому для повышения надежности функционирования беспилотных комплексов, наряду с повышением помехоустойчивости навигационной аппаратуры ГССН, необходимо применять альтернативные способы навигационного обеспечения БЛА.

2. Обоснование принципов применения и электронной компонентной базы для построения автогенератора при обеспечении автономного полета беспилотного летательного аппарата.

Обеспечить автономное движение по определенным траекториям предлагается с применением системы управления на основе автогенератора. Номиналы управляющих токов и напряжений могут быть рассчитаны с применением электрической схемы на полевом транзисторе (рис. 5) [10].

Источник питания тока E_C и источник смещения затвора E_3 определяют режим работы схемы. Индуктивно связанные L_C и L_k образуют положительную обратную связь в цепи затвора. Через R_k обозначено внутреннее сопротивление катушки индуктивности – сопротивление потерь. Тогда основные выражения для автогенератора будут иметь вид:

$$\begin{aligned} i_{CT} &= Su_3, \quad u_3 = M \frac{di_L}{dt}, \\ i_{CT} &= SM \frac{di_L}{dt}, \quad u_3 = R_k i_L + L_k \frac{di_L}{dt}, \\ i_C &= C_k \frac{du_C}{dt} = R_k i_k + L_k \frac{d^2 i_L}{dt^2}, \\ i_{CT} &= i_L + i_C = \\ &= i_L + R_k C_k \frac{di_L}{dt} + L_k C_k \frac{d^2 i_L}{dt^2} = SM \frac{di_L}{dt^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где u_C – напряжение на конденсаторе контура, i_C – ток в конденсаторе и i_{CT} – ток стока – зависят от времени, S – крутизна полевого транзистора, M – взаимная индуктивность.

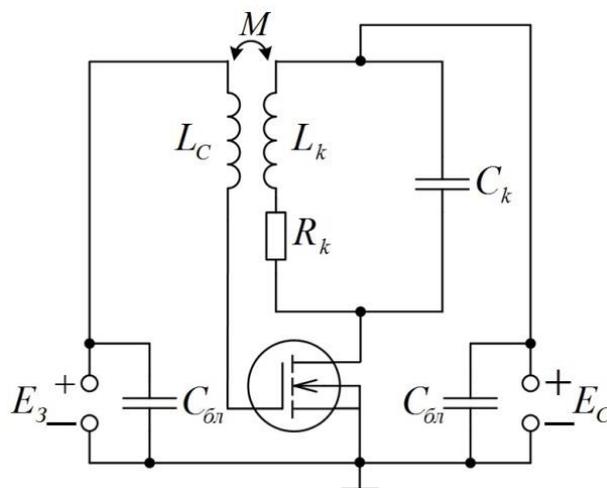


Рис. 5. Схема автогенератора

Примечание: составлено авторами по [10].

После несложных алгебраических преобразований, с учетом обозначений для резонансной частоты $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}}$ и коэффициента затухания контура $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R_k}{L_k} - \frac{SM}{L_k C_k} \right)$ выражение для i_{CT} примет вид:

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + 2\alpha \frac{di_L}{dt} + \omega_0^2 i_L = 0. \quad (7)$$

Решение (7) получим в виде $i_L = I_{mL} e^{\alpha t} \sin \omega t$, где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2}$ – частота колебаний, оно найдено с использованием метода Рунге – Кутты.

При расчете маршрута значения R_n и L в выражении (2) заменялись на значения r_{An} и l_{An} автогенератора с учетом перехода из декартовых координат в полярные, описываемые выражениями:

$$r_{An} = \sqrt{\left(\frac{di_{Li_n}}{dt} \right)^2 + i_{Li_n}^2},$$

$$l_{An} = \sqrt{\left(\frac{di_{L1_1}}{dt} - \frac{di_{L2_2}}{dt} \right)^2 + (i_{L2_n} - i_{L1_n})^2},$$

где текущему значению токов на фазовой кривой i_{Li_n} ставятся в соответствие положения поворотных пунктов маршрута l_{An} на траектории полета БЛА.

Критерий построения схемы автогенератора задается системой уравнений:

$$\begin{cases} (R_k, C_k, L_k, L_C, M, S) = \arg \min \hat{\delta}; \\ R_k \in \mathbf{R}; C_k \in \mathbf{C}; L_k, L_C \in \mathbf{L}; M \in \mathbf{M}; S \in \mathbf{S}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\hat{\delta} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\gamma_n - \hat{\gamma}_{An})^2} / N$ – среднеквадратическое отклонение курсового угла, $\hat{\gamma}_{An} = f\left(\frac{di}{dt}, i\right)$ – значения курсового угла, полученные с помощью автогенератора.

Первое уравнение является целевой функцией, обеспечивающей минимум среднеквадратического отклонения, рассчитанного с использованием автогенератора курсового угла, второе – является внешне системным ограничением как условие физической реализуемости автогенератора. Расчет траекторий по критерию (7) достигается решением системы уравнений относительно множества физически реализуемых параметров автогенератора заданной структуры.

В результате расчетов получено временное распределение тока в индуктивности, отображающее процесс возникновения колебаний (рис. 6а). Гармоническим колебаниям в системе соответствует замкнутая фазовая траектория на фазовой плоскости. На рис. 6б приведен фазовый портрет автогенератора, который соответствует траектории полета БЛА (рис. 6в) при возрастающей точности оценки направления прихода сигналов.

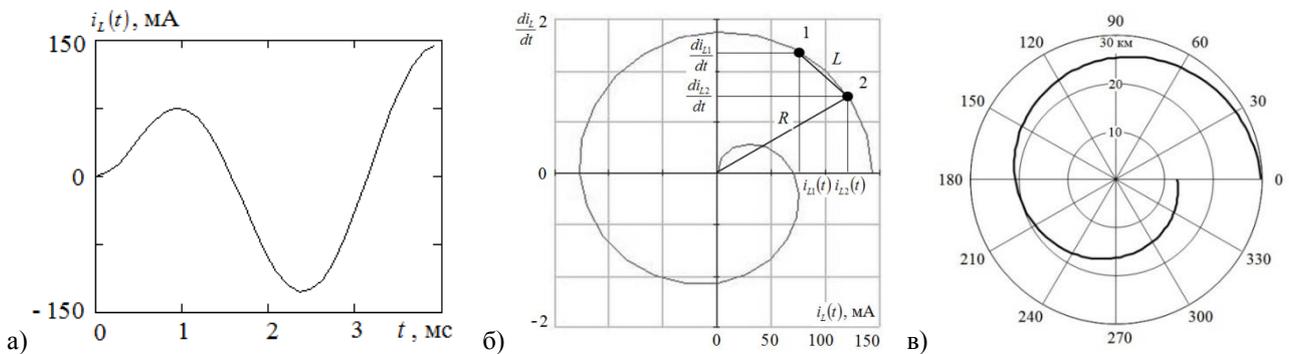


Рис. 6. Распределение тока в индуктивности в процессе возникновения колебаний:

а) возрастающее временное распределение тока в индуктивности; б) фазовый портрет, возникающих колебаний в автогенераторе; в) траектория движения БЛА при высокоточном пеленговании

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 7 приведены: а) временное распределение тока в индуктивности, б) фазовый портрет при затухании колебаний в автогене-

раторе, в) маршрут полета БЛА при убывающей точности оценки направления прихода сигналов.

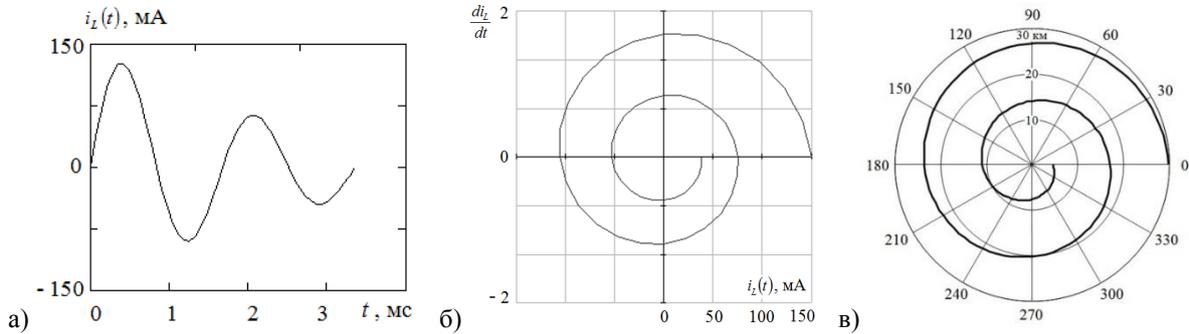


Рис. 7. Распределение тока в индуктивности при затухании колебаний в автогенераторе колебаний:
 а) убывающее временное распределение тока в индуктивности; б) фазовый портрет при затухании колебаний в автогенераторе; в) траектория движения БЛА при низкой точности пеленгования
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Для разработки рекомендаций по применению автогенераторов в качестве датчиков движения по спирали проведены лабораторные исследования схем их реализации.

На рис. 8 изображены: а) временная развертка переходного процесса установления колебаний в автогенераторе, б) фазовый портрет.

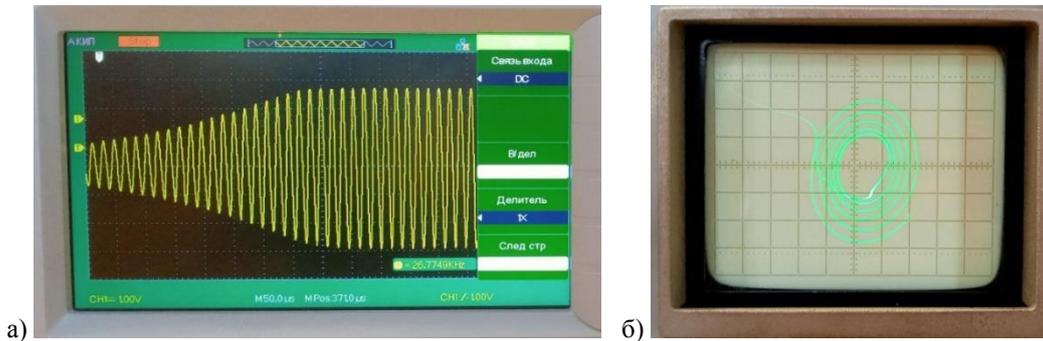


Рис. 8. Лабораторные исследования по реализации схемы автогенератора:
 а) временная развертка переходного процесса установления колебаний в автогенераторе; б) фазовый портрет
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Установлено, что E_3 может использоваться в качестве управляющего напряжения, которым изменяются условия самовозбуждения и вид фазовых диаграмм. При сборке электронной схемы необходимо как можно ближе располагать C_{01} к истоку для исключения прохождения высокочастотных токов через источник питания. В работе использовались керамические конденсаторы емкостью 0,22 мкФ.

Для преодоления температурной зависимости частоты генерируемых колебаний, прогнозируемых сложностей перестройки одновременно двух и более контуров в многоконтур-

ных схемах, выборе и стабилизации рабочей точки рекомендуется использовать емкостную трехточечную схему Клаппа. Из-за уменьшения коэффициента включения коллекторной цепи в колебательный контур в ней используется контур с высокой добротностью и возможна отдельная регулировка коэффициентов положительной обратной связи и включения. Высокую стабильность первой гармоники схема показала в диапазоне 1 ... 10 МГц. На частотах не более 900 МГц в целях минимизации компонентов целесообразно использовать схему Хартли [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве активного элемента предложено использовать МОП-транзисторы отечественного производства типа 2П301А, 2П301Б, 2П301В (АО «НПП «Завод Искра», г. Ульяновск). При расчете схем следует учитывать, что максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность в электрических режимах эксплуатации указанных транзисторов не превышает 200 мВт. Факт генерации без использования осциллографа можно определить по измерениям тока стока.

Установлено, что фазовые свойства автогенератора с заданной точностью могут использоваться для восстановления траекторий движения БЛА. В зависимости от дисперсии ошибки оценки угловых координат ИРИ выбирается режим возбуждения автогенератора.

При уменьшении дисперсии ошибки оценки угловых координат ИРИ выбирается мягкий режим возбуждения автогенератора с расчетом управляющих токов, а с увеличением ошибок рекомендован жесткий режим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы основные задачи навигационного обеспечения воздушных объектов и проведен анализ принципиальных сложностей их решения в интересах автономного полета малогабаритных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа.

Построен алгоритм коррекции траектории полета беспилотных летательных аппаратов по результатам многократного пеленгования источника радиоизлучений в поворотных пунктах маршрута. На основе летных экспериментов с комплексами на БЛА «Орлан-10», «Феникс» и «Грант-М» оценены значения среднеквадратической ошибки местоопределения.

Проведен анализ схем автогенераторов, которые могут использоваться в качестве резервных средств автономного полета в условиях отсутствия радиокомандной коррекции маршрута. По результатам лабораторных испытаний обоснованы параметры схем автогенераторов.

Список источников

1. Кинкулин И. Е. Глобальные навигационные спутниковые системы // Алгоритмы функционирования аппаратуры потребителя. М. : Радиотехника, 2018. 325 с.
2. Карпик П. А., Сернов В. Г., Вдовин В. С. Система дифференциальной коррекции и мониторинга как основа перспективной национальной инфраструктуры навигации и позиционирования с повышенной точностью // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 9, № 2. С. 3–9.
3. Кузнецов А. Г., Измайлов Е. А., Портнов Б. И. Современные бесплатформенные инерциальные навигационные системы двух классов точности // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2014. № 8. С. 24–32.
4. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации. М. : Наука, 1979. 291 с.
5. Коренной А. В. Методы анализа и синтеза в прикладных задачах навигации, связи и управления. М. : Радиотехника, 2015. 162 с.
6. Разиньков С. Н., Богословский А. В., Гордиенко С. А. Экспериментальное определение местоположения источников радиоизлучений с применением высоко мобильного цифрового обнаружителя-пеленгатора // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2022. № 81. С. 21–31.
7. Осипов Е. Б. Способ вывода летательного аппарата на радиоизлучающий объект с использованием оптимальной обработки результатов много-

References

1. Kinkulin I. E. Globalnye navigatsionnye sputnikovye sistemy. Algoritmy funktsionirovaniia apparatury potrebitelia. Moscow : Radiotekhnika, 2018. 325 p. (In Russian).
2. Karpik P. A., Sernov V. G., Vdovin V. S. System for Differential Correction and Monitoring as the Base of the Next Generation National Infrastructure for Navigation and High-Precision Positioning. Interexpo Geo-Siberia. 2019. Vol. 9, No. 2. P. 3–9. (In Russian).
3. Kuznetsov A. G., Izmailov E. A., Portnov B. I. Modern Strapdown Inertial Navigation Systems of Two Accuracy Classes. Trudy MIREA. Navigatsiia i upravlenie letatelnyimi apparatami. 2014. No. 8. P. 24–32. (In Russian).
4. Bromberg P. V. Theory of Inertial Navigation Systems. Moscow : Nauka, 1979. 291 p. (In Russian).
5. Korennoi A. V. Metody analiza i sinteza v prikladnykh zadachakh navigatsii, sviazi i upravleniia. Moscow : Radiotekhnika, 2015. 162 p. (In Russian).
6. Razinkov S. N., Bogoslovsky A. V., Gordienko S. A. Experimental Determination of Radio Emission Sources Location Using Highly Mobile Digital Direction Finder Detector. Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University. 2022. No. 81. P. 21–31. (In Russian).
7. Osipov E. B. Sposob vyvoda letatel'nogo apparata na radioizluchaiushchii obekt s ispolzovaniem optimalnoi obrabotki rezultatov mnogokratnogo pelen-

- кратного пеленгования // Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия: Системы автоматизированного проектирования и системы автоматизации производства. 2003. № 3. С. 21–25.
8. Коренной А. В. Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов. Методы и алгоритмы. М. : Радиотехника, 2012. 112 с.
 9. Гулевич С. П., Александровский Б. В., Веселов Ю. Г. Обоснование основных требований к характеристикам движения беспилотных летательных аппаратов двойного назначения // Проблемы безопасности полетов. 2008. № 8. С. 25–39.
 10. Змий Б. Ф. Радиотехнические цепи и сигналы. Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. 336 с.
8. Korennoi A. V. Obnaruzhenie, raspoznavanie i opredelenie parametrov obrazov obektov. Metody i algoritmy. Moscow : Radiotekhnika, 2012. 112 p. (In Russian).
 9. Gulevich S. P., Aleksandrovsky B. V., Veselov Yu. G. Obosnovanie osnovnykh trebovaniy k kharakteristikam dvizhenii bespilotnykh letatelnykh apparatov dvoynogo naznachenii. Problemy bezopasnosti poletov. 2008. No. 8. P. 25–39. (In Russian).
 10. Zmiy B. F. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly. Voronezh : Military Educational and Scientific Center of Air Forces “N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy”, 2017. 336 p. (In Russian).

Информация об авторах

А. В. Богословский – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры радиоэлектроники.

С. Н. Разиньков – доктор физико-математических наук, доцент, профессор.

Э. В. Сёмка – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the authors

A. V. Bogoslovsky – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Radioelectronics.

S. N. Razinkov – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor.

E. V. Syomka – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor.

Научная статья
УДК 004.8
DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-16-20

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ

Михаил Яковлевич Брагинский^{1✉}, **Дмитрий Викторович Тараканов**²

^{1, 2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ mick17@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>

² sprtdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

Аннотация. Данная работа продолжает исследования авторов в области построения компьютерных тренажеров операторов технологических объектов управления. Предлагаемая концепция иерархического (двухуровневого) математического моделирования оперативного персонала, имитирующая динамические свойства человека и реализующая логический вывод принятия решения, позволяет оценивать качество и корректировать траектории обучения при реализации как индивидуального, так и коллективного обучения операторов. Для построения логико-динамической модели процесса обучения использовался аппарат нечеткой логики и E-сетей (расширение сетей Петри).

Ключевые слова: сети Петри, E-сети, обучение операторов, человеко-машинная система, компьютерные тренажеры

Для цитирования: Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Моделирование процесса обучения операторов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 16–20. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-16-20.

Original article

SIMULATION OF OPERATORS TRAINING

Mikhail Ya. Braginsky^{1✉}, **Dmitry V. Tarakanov**²

^{1, 2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ mick17@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>

² sprtdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

Abstract. The article continues the authors' research on constructing computer simulators for operators of technological control objects. The concept of hierarchical (two-level) mathematical stimulation of operation staff is proposed, which imitates the dynamic features of a man and implements the logical conclusion of decision-making. This resulted in a quality assessment and training correction in implementing both individual and collective operator training. The apparatus of fuzzy logic and E-nets (extended Petri nets) is used when constructing a logical and dynamic model for training purpose.

Keywords: Petri nets, E-nets, operator training, man-machine system, computer simulators

For citation: Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V. Simulation of Operators Training. Proceedings in Cybernetics. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 16–20. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-16-20.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эффективности и безопасности функционирования человеко-машинных систем необходимо уделить особое внимание уровню подготовки операторов технологическими объектами управления (ТОУ). Для этого широко используют как электронные информационно-образовательные среды, так и специализированные компьютерные тре-

нажеры [1–4]. При проектировании систем обучения центральными вопросами являются выбор образовательной траектории, использование адекватных заданий с учетом индивидуальных особенностей человека-оператора, его исходного уровня знаний, квалификации. Кроме того, важными компонентами обучения являются математическая модель технического объекта управления и построение адекватной

модели поведения человека-оператора (или группы операторов). Таким образом, целью данной работы является концепция построения логико-динамической модели процесса обучения персонала АСУ ТП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для построения логико-динамической модели предлагается использование E-сетевого аппарата (модификацию сетей Петри [5–8]), который позволяет моделировать параллельные логико-динамические процессы обучения, визуализировать структуру и поведение исследуемой системы. Для формирования заданий, выбора обучающих траекторий, оценки результатов обучения и коррекции образовательной траектории в системе используется математический аппарат нечеткой логики.

Структурная схема системы обучения операторов содержит следующие основные компоненты модели: нечеткий генератор сценариев обучения, базу заданий, E-сетевую логико-динамическую модель обучения оперативного персонала (операторов ТОО), логико-динамическую модель ТОО, иерархическую модель оператора (группы операторов) (рис. 1).

Нечеткий генератор сценариев обучения содержит перечень результатов обучения, вариацию траекторий обучения, базу заданий. На основании квалификации обучаемого и результатов входного тестирования происходит выбор заданий. Вышеуказанная процедура происходит на базе нечеткого вывода. E-сетевая схема моделирования отражает логику и динамику процесса обучения как одного, так и коллектива операторов.



Рис. 1. Структурная схема системы обучения операторов ТОО

Примечание: составлено авторами.

Для имитации работы ТОО используется логико-динамическая модель. Например, в работах [3, 9, 10] для теплоэнергетических систем используется E-сетевая аналитико-имитационная модель, которая легко «сопрягается» с динамической моделью обучения персонала (операторов ТОО). В качестве дополнительной компоненты системы обучения операторов ТОО предлагается использование иерархической (двухуровневой) математической модели человека-оператора, реализующей логический вывод принятия решения и имитирующей динамические свойства человека. Данная компонента может быть построена с помощью искусственной нейронной сети и позволит получить точные характеристики обучающегося, например, быстроты реакции в тех или иных задачах оперативного управле-

ния. При построении математической модели системы обучения операторов ТОО используются следующие группы переменных:

Y – переменные, характеризующие технологические параметры;

R – переменные, описывающие состояние органов управления АСУ ТП;

Z – переменные, описывающие воздействие внешней среды на объект управления;

H – нечеткий уровень сложности задания;

P1 – номер траектории обучения;

P2 – этап обучения;

D – пакет заданий;

E – оценка обучения каждого этапа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим схему моделирования процесса обучения операторов АСУ ТП (рис. 2).

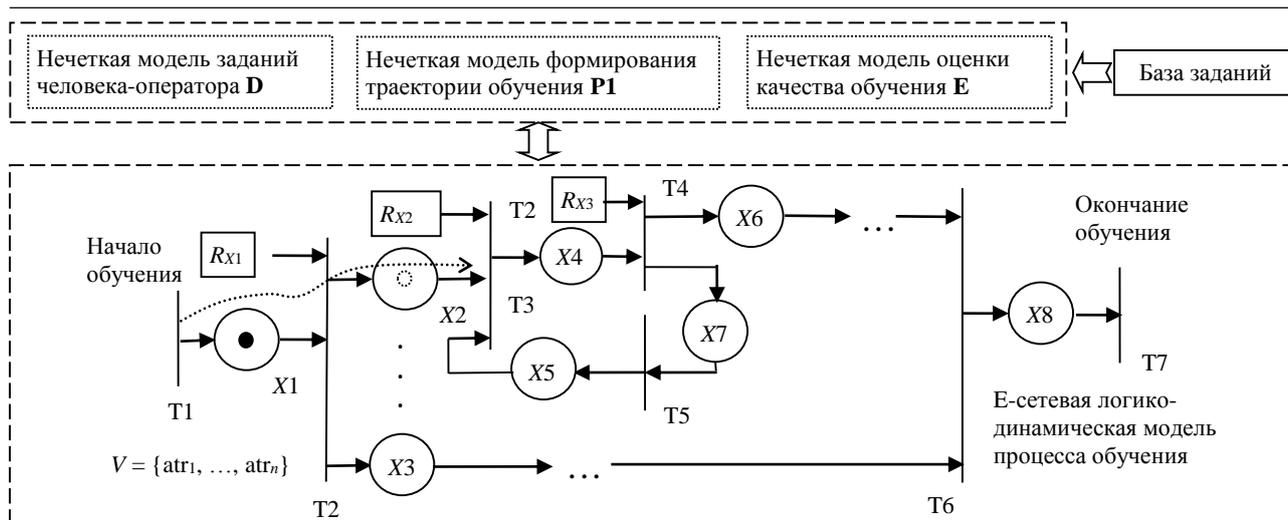


Рис. 2. Е-сетевая модель обучения оператора
 Примечание: составлено авторами.

В представленной модели начальная маркировка Е-сетевой модели $M_0 = \{1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ соответствует начальному этапу обучения. Фишка сети $V_0 = \{atr_1, \dots, atr_n\}$ содержит следующие атрибуты: ФИО обучающегося, квалификация, номер этапа обучения, результат каждого этапа обучения, итоговая оценка обучения. Кроме того, в качестве дополнительных атрибутов кортежа фишки Е-сети может быть задан набор индивидуальных физиологических параметров человека-оператора [4]. Переход T2 соответствует процедуре входного тестирования обучающегося, и его срабатывание соответствует времени выполнения задания.

В зависимости от уровня знаний и требуемых результатов обучения выбирается необходимая образовательная траектория, что соответствует в Е-сетевой модели изменению маркировки сети, например, $M_1 = \{0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$. Переход T3 соответствует начальному этапу обучения для первой образовательной траектории. Пакет заданий D в моделируемой системе зависит от выбранной траектории обучения, уровня сложности и номера этапа обучения. Вектор-строка D состоит из N элементов (D_1, D_2, \dots, D_N) , в соответствии с которыми i -й обучающийся оператор получает в процессе обучения для исполнения индивидуальное задание D_i . Дальнейшие переходы (T4, T5, ...) Е-сети моделируют этапы обучения, например, T5 реализует процедуру повторения пройденного материала, переход

T6 – итоговое тестирование (рис. 1). По окончании обучения итоговые результаты и рекомендации фиксируются в атрибутах V_0 . Представленная модель позволяет моделировать процесс обучения нескольких операторов.

Для учета в математической модели уровня сложности заданий, времени выполнения и пр. предлагается использовать математический аппарат нечеткой логики [11, 12]. Это позволяет учесть ряд субъективных факторов при формализации процесса обучения человека-оператора. Значение контролируемых переменных рассматриваемой модели целесообразно представить в виде лингвистических переменных.

Для учета взаимосвязей между входными параметрами модели обучения необходимо сформировать базу продукционных нечетких правил Rule: $X \rightarrow Y$.

Перечень входных данных определяется лингвистическими переменными, такими как «сложность задания», «время выполнения», «качество выполнения» и т. д. Кроме этого, задается терм-множество, например: $R^1 = \{R_1^1 = \text{«низкий уровень сложности задания»}, R_1^2 = \text{«средний уровень сложности задания»}, R_1^3 = \text{«высокий уровень сложности задания»}\}$, нечеткое множество на X , описывающее ограничения на значения нечеткой переменной, т. е. $\mu_R(x)$ – функцией принадлежности. Для построения более точной

модели целесообразно использовать модальность высказывания, например, «очень быстрое время выполнения».

На рис. 3 представлены функции принадлежности в графической форме, где $\mu_{R_i^1}(H)$

соответствует функции принадлежности с низким уровнем сложности задания, $\mu_{R_2^1}(H)$ и $\mu_{R_3^1}(H)$ – функции принадлежности со средним и высоким уровнем сложности задания.

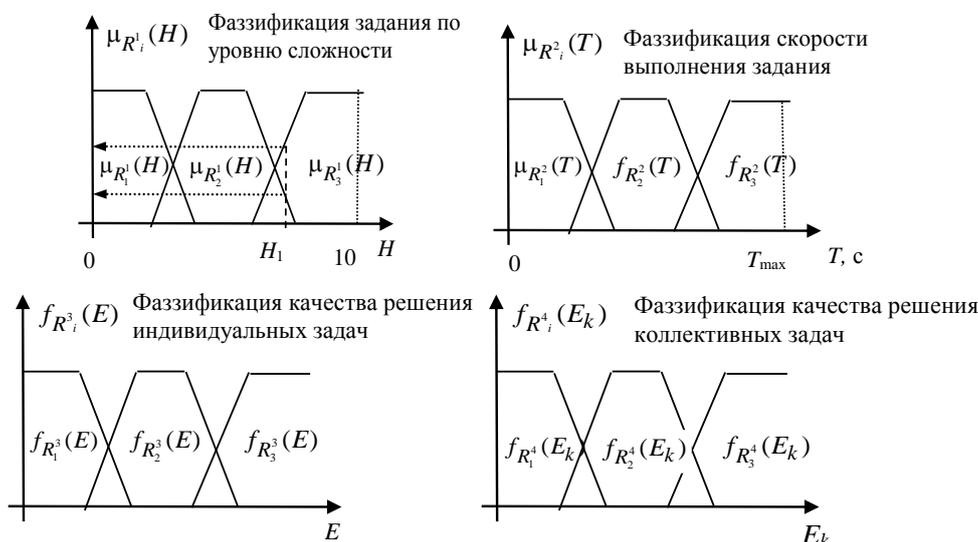


Рис. 3. Функции принадлежности нечетких переменных модели
 Примечание: составлено авторами.

Формирование оценки обучения и корректировки траектории обучения формализуется с помощью правила вида: Rule_i: if $H_1 = R_1^1 \wedge T_1 = R_2^2 \wedge \dots$, then $y_1 = B_1 \wedge y_2 = B_2$.

На основании нечетких продукционных правил осуществляется активизация функций принадлежности $\mu(y)$ и выполняется процедура дефаззификации как вычисление «центра массы». Результаты нечеткого вывода записываются в качестве значения атрибута фишки (маркера) E-сетевой схемы и далее заносятся в нечеткий генератор сценариев обучения (см. рис. 1).

Например, Rule₁: ЕСЛИ «уровень начальных знаний обучающегося низкий» И «скорость выполнения задания низкая», ТО «уровень квалификации обучающегося низкий» И «необходимо выбрать базовую траекторию обучения».

Список источников

1. Благодарный Н. С., Кобозев В. Ю., Колмогоров А. Г. и др. Компьютерные тренажеры-имитаторы для обучения персонала безаварийной экс-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования была разработана концепция адаптивной системы обучения операторов ТОУ, которая включает E-сетевую логико-динамическую модель процесса обучения, модель нечеткого генератора сценария обучения, логико-динамическую модель ТОУ и иерархическую (двухуровневую) математическую модель человека-оператора.

Нейросетевой модуль идентификации оператора с адаптивной E-сетевой математической моделью обучения может быть использован при разработке курса обучения операторов ТОУ и построении компьютерных тренажеров для обеспечения надежности человеко-машинных систем и решения ключевой задачи повышения качества обучения операторов АСУ ТП с учетом их индивидуальных особенностей.

References

1. Blagodarnyi N. S., Kobozev V. Yu., Kolmogorov A. G. et al. Computer Training Simulators-Imitators for Educating the Staff on Accidentless Usage of

- плутации энерготехнологических котлов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2015. Т. 1, № 1. С. 7–14.
- Литвинов В. А. Компьютерные тренажеры как средство эффективного формирования компетенций обучающихся // Вестник Барнаульского юридического института МВД России. 2020. № 1. С. 210–212.
 - Арапова Е. А., Крамаров С. О., Сахарова Л. В. Разработка концепции интеллектуальной платформы для реализации индивидуальной траектории обучения с учетом базового уровня знаний и психотипа обучающегося // Вестник кибернетики. 2022. № 1. С. 6–15.
 - Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Построение многофункционального тренажера по управлению теплоэнергетической системой // Вестник кибернетики. 2018. № 2. С. 161–168.
 - Gilbert D., Heiner M., Ghanbar L. et al. Spatial Quorum Sensing Modelling Using Coloured Hybrid Petri Nets and Simulative Model Checking. BMC Bioinformatics. 2019. Vol. 20 (Suppl. 4). P. 173.
 - Bevilacqua M., Ciarapica F. E., Giovanni M. Timed Coloured Petri Nets for Modelling and Managing Processes and Projects. Procedia CIRP. No. 67. P. 58–62.
 - Liu F., Heiner M., Gilbert D. Coloured Petri Nets for Multilevel, Multiscale and Multidimensional Modelling of Biological Systems. Briefings in Bioinformatics. 2019. Vol. 20, No. 3. P. 877–886.
 - Blondin M., Finkel A., Haase C. et. al. The Logical View on Continuous Petri Nets. ACM Transactions on Computational Logic. 2017. Vol. 18, No. 3. P. 1–28.
 - Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Концепция построения аналитико-имитационных моделей человеко-машинных систем управления с помощью E-сетей // Вестник кибернетики. 2020. № 2. С. 50–57.
 - Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Моделирование взаимодействия коллектива операторов в процессе управления технической системой // Вестник кибернетики. 2018. № 4. С. 100–106.
 - Романенко Н. Д. Нечеткая логика в проектировании методической системы обучения математике в учреждениях высшего образования // Перспективы науки – 2016 : материалы IV междунар. заоч. конкурса науч.-исслед. работ, Казань, 10 октября 2016 г. Т. 2. Казань : Рокета Союз, 2016. С. 237–242.
 - Фрейман В. И. Применение методов нечеткой логики для дешифрации и оценивания результатов обучения, представленных в компетентностном формате // Technical Progress of Mankind in the Context of Continuous Extension of the Society's Material Needs. 2015. С. 13–17.
 - Energo-technological Boilers. Collection of Scientific Works of the Angar State Engineering University. 2015. Vol. 1, No. 1. P. 7–14. (In Russian).
 - Litvinov V. A. Kompiuternye trenazhery kak sredstvo effektivnogo formirovaniia kompetentsii obuchaiushchikhsia. Vestnik Barnaulskogo iuridicheskogo instituta MVD Rossii. 2020. No. 1. P. 210–212. (In Russian).
 - Arapova E. A., Kramarov S. O., Sakharova L. V. Concept Development of an Intelligent Platform Aimed at Implementing an Individual Learning Path according to the Student's Basic Level of Knowledge and Psychological Type. Proceedings in Cybernetics. 2022. No. 1. P. 6–15. (In Russian).
 - Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V. Construction of Multifunctional Simulator for Controlling Heat and Power System. Proceedings in Cybernetics. 2018. No. 2. P. 161–168. (In Russian).
 - Gilbert D., Heiner M., Ghanbar L. et al. Spatial Quorum Sensing Modelling Using Coloured Hybrid Petri Nets and Simulative Model Checking. BMC Bioinformatics. 2019. Vol. 20 (Suppl. 4). P. 173.
 - Bevilacqua M., Ciarapica F. E., Giovanni M. Timed Coloured Petri Nets for Modelling and Managing Processes and Projects. Procedia CIRP. No. 67. P. 58–62.
 - Liu F., Heiner M., Gilbert D. Coloured Petri Nets for Multilevel, Multiscale and Multidimensional Modelling of Biological Systems. Briefings in Bioinformatics. 2019. Vol. 20, No. 3. P. 877–886.
 - Blondin M., Finkel A., Haase C. et. al. The Logical View on Continuous Petri Nets. ACM Transactions on Computational Logic. 2017. Vol. 18, No. 3. P. 1–28.
 - Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V. Concept Development of Analytical and Simulation Models for Human-Machine Control Systems Using E-Networks. Proceedings in Cybernetics. 2020. No. 2. P. 50–57. (In Russian).
 - Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V. Simulation of Human Operators Group Interaction during the Control of Industrial System. Proceedings in Cybernetics. 2018. No. 4. P. 100–106. (In Russian).
 - Romanenko N. D. Nchetkaia logika v proektirovanii metodicheskoi sistemy obucheniia matematike v uchrezhdeniakh vysshego obrazovaniia. Perspektivy nauki – 2016 : Proceedings of the IV International Offline Competition of Research Works, Kazan, October 10, 2016. Vol. 2. Kazan : Roketa Soiuz, 2016. P. 237–242. (In Russian).
 - Freyman V. I. Application of Fuzzy Logic Methods for Decryption and Assessment of Learning Outcomes Presented in the Competence-Based Format. Technical Progress of Mankind in the Context of Continuous Extension of the Society's Material Needs. 2015. P. 13–17. (In Russian).

Информация об авторах

М. Я. Брагинский – кандидат технических наук, доцент.

Д. В. Тараканов – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

M. Ya. Braginsky – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor.

D. V. Tarakanov – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor.

Научная статья

УДК 519.17 + 544.4

DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-21-28

ПОИСК ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ КОМПОНЕНТА В РЕАГИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ ГРАФА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Мария Александровна Козлова^{1✉}, Виталий Алексеевич Шаманский²

^{1, 2} Институт систем энергетики имени Л. А. Мелентьева Сибирского отделения

Российской академии наук, Иркутск, Россия

¹ kma95@isem.irk.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8860-6768>

² vita@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4515-3444>

Аннотация. Представлена методика расчета максимального количества вещества в закрытой системе с помощью поэтапного графа химических реакций. На основе веществ, которые могут присутствовать в реагирующей системе, генерируется список возможных одно- и двухчастичных обратимых реакций. Далее, исходя из задачи исследования и условий в реагирующей системе, список сокращается. Полученному списку реакций соответствует матрица инцидентности, на основе которой удобно анализировать граф с помощью ЭВМ. Поиск максимального количества интересующего компонента производится на сравнении весов ребер графа на каждом этапе его промежуточных реакций. Веса графа рассчитываются на основе кинетических коэффициентов реакций и определяют доминирующую реакцию. Расчет количества проводится исходя из предположения о том, что доминирующая реакция является равновесной. Проведен расчет максимального количества гидропероксильного радикала HO₂ в реагирующей системе, состоящей из водорода H и кислорода O.

Ключевые слова: граф химических реакций, термодинамика, химическая кинетика

Финансирование: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00406) с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Для цитирования: Козлова М. А., Шаманский В. А. Поиск экстремального содержания компонента в реагирующей системе с помощью графа химических реакций // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 21–28. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-21-28.

Original article

SEARCHING FOR AN EXTREME COMPONENT CONTENT IN A REACTING SYSTEM USING GRAPH OF CHEMICAL REACTIONS

Mariya A. Kozlova^{1✉}, Vitaly A. Shamansky²

^{1, 2} Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

Irkutsk, Russia

¹ kma95@isem.irk.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8860-6768>

² vita@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4515-3444>

Abstract. The article presents a technique for calculating a maximum amount of a substance in a closed system using a step-by-step graph of chemical reactions. A list of probable one- and two-particle reversible reactions is generated based on the substances that may be a part of the reacting system. The list is narrowed down according to the research objectives and conditions of the reacting system. The obtained list corresponds to the incidence matrix, which is suitable for analyzing the graph via a computer. The search for the maximum amount of the component in question is conducted through the comparison of weights of the graph's edges at each stage of its intermediate reactions. The graph's weights are calculated based on the kinetic coefficients of reactions. They also determine the dominant reaction. The amount is calculated under the premise that the dominant reaction is equilibrium. The maximum amount of hydroperoxyl radical HO₂ in a hydrogen H and oxygen O reacting system is calculated.

Keywords: graph of chemical reactions, thermodynamics, chemical kinetics

Funding: the research was funded by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-29-00406 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.TsKP.21.0038).

For citation: Kozlova M. A., Shamansky V. A. Searching for an Extreme Component Content in a Reacting System Using Graph of Chemical Reactions. *Proceedings in Cybernetics*. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 21–28. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-21-28.

ВВЕДЕНИЕ

Верхняя оценка значений экстремальных количеств чаще оказывается важной для изучения, например, экологических свойств реагирующей системы, когда рассматривается содержание каких-либо вредных микрокомпонентов.

В обзорных работах [1–3] дано представление о применении теории графов в химии. Механизмы сложных химических реакций часто описывают с помощью двудольных графов Вольперта [2]: один вид вершин соответствует элементарным реакциям, другой – веществам. В работе [4] на основе графа Темкина рассмотрен механизм синтеза винилхлорида, в [5, 6] – так называемый «скелетный механизм»: производится выбор «важных» компонентов, которые действуют как центры, через которые определяются кратчайшие пути потоков элементов от исходных реагентов к конечным продуктам.

В работе [7] представлена методика построения гиперграфа химических реакций для реагирующей системы. Правильно заданный список веществ – важное условие правильности самой модели, что показано в работе [8]: введение N в расчеты приводило к улучшению точности прогнозирования скорости пламени.

Анализ химического графа на основе соответствующей ему матрицы инцидентности позволяет рассмотреть механизмы образования конечных веществ на основе промежуточных реакций и позволяет ответить на вопрос об экстремальном количестве какого-либо компонента в процессе ее движения к равновесию. Для адекватной оценки количеств компонентов в реагирующей системе необходимо согласование кинетического механизма с термодинамическим состоянием системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом данного исследования является закрытая реагирующая газовая система, к которой применимо уравнение идеального

газа. Брутто-реакцию в газовой фазе можно представить как последовательность элементарных одно- и двухкомпонентных реакций, поскольку одновременное столкновение в газовой фазе более двух частиц крайне маловероятно. Каждому списку компонентов s с вектором их количеств x соответствует матрица A стехиометрических индексов составляющих их элементов, такая, что выполняется их баланс: $Ax = b$, где b – вектор количеств элементов в системе.

Список элементарных реакций генерируется автоматически на основе веществ, которые могут присутствовать в данной газовой фазе. Полученному набору элементарных реакций соответствует матрица инцидентности. Полный список элементарных реакций может быть сокращен по каким-либо критериям, например, возможности протекания элементарной реакции при данных условиях либо возможности протекания реакции вообще.

Следующим этапом является построение поэтапного гиперграфа, для чего необходимо задать список исходных компонентов в системе. Вершины и ребра графа характеризуются весами, которые содержат кинетические и термодинамические коэффициенты.

Чтобы найти максимально возможное количество интересующего компонента в системе, предлагается перебор возможных путей его образования и последующее сравнение ребер гиперграфа на каждом этапе. Элементарные реакции на каждом этапе полагаются равновесными. Из закона действующих масс вычисляются количества компонентов. Анализ каждого этапа проходит последовательно, начиная с первого. Вычисленные количества веществ суммируются.

Список реакций.

На основе заранее заданного списка веществ в реагирующей системе и предположения о том, что взаимодействия являются одно- и двухкомпонентными, формируется

список возможных элементарных реакций. Для системы веществ $s = \{H_2, O_2, H_2O, H_2O_2, OH, HO_2, H\}$ и общей брутто-реакции $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ список элементарных реакций будет следующим [7]:

1. $H_2 \leftrightarrow H + H.$
2. $H_2O \leftrightarrow H + OH.$
3. $H_2 + O_2 \leftrightarrow H_2O_2.$
4. $H_2O_2 \leftrightarrow OH + OH.$
5. $H_2O_2 \leftrightarrow H + HO_2.$
6. $HO_2 \leftrightarrow H + O_2.$
7. $H_2 + O_2 \leftrightarrow OH + OH.$
8. $H_2 + O_2 \leftrightarrow H + HO_2.$
9. $H_2 + H_2O_2 \leftrightarrow H_2O + H_2O.$
10. $H_2 + OH \leftrightarrow H + H_2O.$
11. $H_2 + HO_2 \leftrightarrow H_2O + OH.$

12. $H_2 + HO_2 \leftrightarrow H + H_2O_2.$
13. $H_2O + O_2 \leftrightarrow HO_2 + OH.$
14. $H_2O_2 + O_2 \leftrightarrow HO_2 + HO_2.$
15. $H_2O + OH \leftrightarrow H + H_2O_2.$
16. $H_2O + HO_2 \leftrightarrow H_2O_2 + OH.$
17. $OH + OH \leftrightarrow H + HO_2.$

Полученный список реакций чаще всего является избыточным. Его можно сократить на основании предварительной информации о специфике реагирующей системы и каждой элементарной реакции.

В данной работе критерием сокращения списка реакций являлось наличие их кинетических коэффициентов в базе данных [9]. Были удалены реакции 3, 5, 9, 11, 15. На рис. 1 представлен сокращенный список реакций в виде поэтапного графа для системы с исходными компонентами O_2 и H_2 : всего 3 этапа.

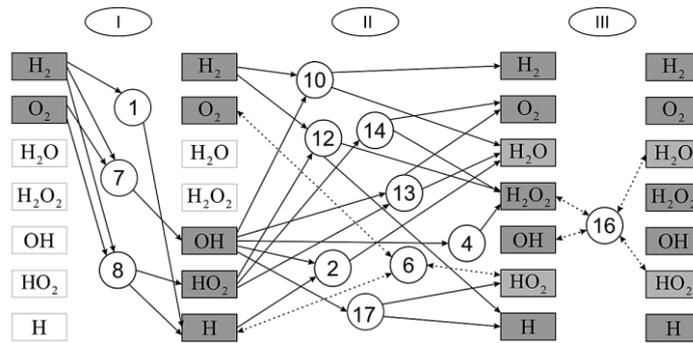


Рис. 1. Поэтапный граф элементарных химических реакций
Примечание: составлено авторами по [7].

Серым обозначены вещества, которые присутствуют в системе на данном этапе. Данный граф является одним из вариантов в [7] всех теоретически возможных вариантов связности графа, а всего таких вариантов – 112 637. Ему соответствует матрица инцидентности (1):

$$\begin{matrix}
 & 1 & 2 & 4 & 6 & 7 & 8 & 10 & 12 & 13 & 14 & 16 & 17 \\
 H_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 O_2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 H_2O & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 H_2O_2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\
 OH & 0 & -1 & -2 & 0 & -2 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 2 \\
 HO_2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -2 & 1 & -1 \\
 H & -2 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1
 \end{matrix} \cdot (1)$$

Строки в (1) соответствуют веществам, столбцы – реакциям, а элементами являются коэффициенты соответствующих веществ в соответствующих реакциях.

Веса вершин и дуг химического графа.

Выражение для химического потенциала идеального газа:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln(px_i), \quad (2)$$

где μ_i^0 – стандартный химический потенциал i -го вещества (в данной работе рассчитывался по [10]), Дж·моль⁻¹;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура, К;

$p = \frac{P}{P_0}$ – отношение давления в системе к нормальному давлению;

x_i – мольная доля i -го вещества.

При этом для каждой элементарной реакции выполняется условие:

$$\Delta G_r = \sum v_{ir} \mu_i \leq 0,$$

где $r = 1 \dots K$, K – число элементарных реакций в системе;

ΔG_r – локальное изменение энергии Гиббса в процессе реакции;

v_{ir} – стехиометрические коэффициенты i -го вещества в r -й реакции, имеющие отрицательные значения для продуктов реакции.

Знаки коэффициентов выбираются так, чтобы выполнялось условие $\Delta G_r \leq 0$, т. е. для каждой реакции устанавливается, какие вещества являются исходными компонентами, а какие – продуктами реакции.

Уравнение для скорости прямой (+) и обратной (–) реакции:

$$\omega_C^\pm = k_C^\pm \prod_{i=1}^{m^\pm} C_i^\pm, \quad (3)$$

где C_i^\pm – мольные концентрации реагентов (+) и продуктов (–), моль/л;

k_C^\pm – кинетические коэффициенты химических реакций;

m^\pm – число реагентов/продуктов реакции.

Показатель m^\pm равен 1, если происходит диссоциация, и 2, если в реакции взаимодействуют две частицы.

В базе National Institute of Standards and Technology (NIST) [9] константа реакции рассчитывается при давлении в 1 атм следующим образом:

$$k_C^\pm = k_C^\pm(T) = A \times \left(\frac{T}{298} \right)^n e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (4)$$

где A , E_a и n – коэффициенты из базы данных. Размерность константы скорости реакции зависит от порядка реакции. В наших расчетах все реакции только 2-го порядка в соответствии с базой данных NIST. Для реакции 2-го порядка константа скорости реакции имеет размерность $\text{см}^3/(\text{молекула} \cdot \text{с})$. Для согласо-

вания размерностей необходимо произвести перерасчет в $\text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$ путем умножения константы скорости реакции на коэффициент $N_A \times 10^{-6}$, где N_A – число Авогадро.

Поскольку в выражении для химического потенциала (2) участвуют мольные доли, выразим мольные концентрации C^\pm через мольные доли:

$$C^\pm = \frac{n^\pm}{V} = \frac{x^\pm \sigma}{V}, \quad (5)$$

где n^\pm – количество, моль;

x^\pm – мольная доля;

σ – число всех молей в системе, в которой производили измерения констант, моль;

V – объем этой системы, м^3 .

Из уравнения идеального газа:

$$\frac{\sigma}{V} = \frac{P_0}{RT} = \frac{P}{pRT}, \quad (6)$$

где P – давление, для которого производятся расчеты, Па;

P_0 – нормальное давление, 10^5 Па.

Уравнение для скорости реакции запишется следующим образом:

$$\omega_C = \omega_C^+ - \omega_C^- = k_C^+ \prod_{i=1}^{m^+} C_i^+ - k_C^- \prod_{j=1}^{m^-} C_j^-. \quad (7)$$

Обозначим $k_n^\pm = k_C^\pm V^{1-m^\pm}$ и, используя (5), перейдем от концентраций к количествам, тогда уравнение (7) будет выглядеть следующим образом:

$$\omega_n = k_n^+ \prod_{i=1}^{m^+} n_i^+ - k_n^- \prod_{j=1}^{m^-} n_j^-. \quad (8)$$

При установлении состояния равновесия скорости прямой и обратной реакций выравниваются, поэтому $\omega_n^+ = \omega_n^-$, или с учетом того, что $n^\pm = x^\pm \sigma$:

$$k_n^+ \prod_{i=1}^{m^+} n_i^+ = k_n^- \prod_{j=1}^{m^-} n_j^- \Rightarrow \frac{k_n^+}{k_n^-} = \frac{\prod_{j=1}^{m^-} n_j^-}{\prod_{i=1}^{m^+} n_i^+} = \sigma^{m^- - m^+} \frac{\prod_{j=1}^{m^-} x_j^-}{\prod_{i=1}^{m^+} x_i^+}. \quad (9)$$

С другой стороны, условие равновесия реакции:

$$\Delta G = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^{m^+} \nu_i^+ \mu_i^+ = \sum_{j=1}^{m^-} \nu_j^- \mu_j^-, \quad (10)$$

где μ_i^+ и μ_j^- – химические потенциалы реагентов и продуктов реакции соответственно, Дж/моль. Поскольку реакции двухчастичные, то $\nu_i^\pm = 1$. Объединяя выражения (2), (9) и (10), получаем:

$$k_n^\pm \left(\frac{P}{\sigma} \right)^{-m^\pm} \exp \left(- \sum_{i=1}^{m^\pm} \frac{\mu_i^{\pm,0}}{RT} \right) = \varphi(T, P) = \sigma \left(\frac{P}{P} \right)^{1-m^\pm} \tilde{\varphi}(T), \quad (11)$$

где введены функция $\varphi(T, P)$ и кинетический коэффициент $\tilde{\varphi}(T) = k_c^\pm (RT)^{1-m^\pm} \exp \left(- \sum_{i=1}^{m^\pm} \frac{\mu_i^{\pm,0}}{RT} \right)$.

Функция $\varphi(T, P)$, как видно из (11), может быть определена по концентрационным константам скоростей как прямой, так и обратной реакции. Для практических целей удобно выбирать ту из них, которая, на взгляд исследователя, имеет более достоверный характер.

Выразив k_n^\pm из (11), подставив в (8) и учитывая, что $\exp \left(\sum_{i=1}^{m^\pm} \frac{\mu_i^{\pm,0}}{RT} \right) \prod_{i=1}^{m^\pm} n_i^\pm = \exp \left(\sum_{i=1}^{m^\pm} \frac{\mu_i^\pm}{RT} \right)$, получим:

$$\omega_n = (P_0 \sigma)^{1-m^\pm} \tilde{\varphi}(T) \left[\exp \left(\sum_{i=1}^{m^+} \frac{\mu^+}{RT} \right) - \exp \left(\sum_{j=1}^{m^-} \frac{\mu^-}{RT} \right) \right]. \quad (12)$$

Выражение 12 аналогично выражению, данному в [11], с отличием в коэффициенте $(P_0 \sigma)^{1-m^\pm}$, который учитывает условия в реагирующей системе. В соответствии с (12) каждой дуге можно придать вес $\rho_r = (P_0 \sigma)^{1-m^\pm} \tilde{\varphi}_r(T)$, а каждой вершине – вес

$v_{ih} = \exp \left(\frac{\mu_{ih}}{RT} \right)$, где h – номер этапа химического графа на рис. 1, начиная с нуля. Скорость r -й реакции определится выражением:

$$\omega_r = \rho_r \left(\prod_{i=1}^{m^+} v_{ip}^+ - \prod_{j=1}^{m^-} v_{jp}^- \right), \quad (13)$$

при этом $v_{kp}^- = v_{kp+1}^+$.

Алгоритм расчета максимального количества.

Для определения реакции, определяющей максимальное образование интересующего вещества, необходимо рассмотреть все пути, приводящие от начальных вершин к нужной вершине. Рассмотрим алгоритм на примере поиска максимального количества гидропероксильного радикала HO_2 для системы реакций, изображенной на рис. 1. Примем температуру в системе 1500 К, давление 10^5 Па, исходные количества водорода H_2 и кислорода O_2 по 1 моль.

1. Находим первый кратчайший путь к образованию HO_2 . Рассмотрим 1-й этап графа G . При этом реакции 1, 7 и 8 имеют общую вершину. Необходимо иметь в виду, что когда потоки нескольких реакций идут в одну вершину, то одна из реакций может «передать» другие и развернуть их в сторону изначальных исходных компонентов.

2. По формуле $\rho_r = (P_0 \sigma)^{1-m^\pm} \tilde{\varphi}_r(T)$ считываем веса дуг 1, 7 и 8-й реакции графа G : $\rho_1 = 1,27 \times 10^4$, $\rho_7 = 1,45 \times 10^{12}$ и $\rho_8 = 2,22 \times 10^{11}$ моль/с соответственно. Следовательно, реакция 7 приходит в равновесие намного быстрее остальных двух реакций. Их влиянием можно пренебречь.

3. Количество продуктов r -й реакции находим из выражения:

$$\frac{\prod_{j=1}^{m^-} n_j^{eq,-}}{\prod_{i=1}^{m^+} n_i^{eq,+}} = e^{\frac{\Delta G_r}{RT}} \sigma^{m^- - m^+} = K, \quad (14)$$

где $n^{eq,+} = n^{0,+} - n^{eq,-}$; ΔG_r – энергия Гиббса r -й реакции, рассчитанная по [10]. Решаем

уравнение (14) относительно $n^{eq,-} \geq 0$, что и будет равновесным количеством вещества. Считая, что $n^{eq,-} \ll 1$ решение $n^{eq,-} = m^{-1} \sqrt{(n^{0,+})^{m+1} K}$. На следующем этапе цикл повторяем. На данном этапе находим равновесное количество для OH: $n_7^{OH} = \sqrt{n_7^{O_2} n_7^{H_2} K_7} \approx 2,66 \times 10^{-1}$, при $n_7^{O_2} = n_7^{H_2} = 1$.

4. На втором этапе с образованными на первом этапе веществами возможна реакция 17, по ней и рассчитываем количество HO₂: $n_{17}^{HO_2} = \sqrt{n_7^{OH} n_7^{OH} K_{17}} \approx 3,48 \times 10^{-4}$.

5. Далее, реакцию 7 убираем из списка реакций (т. е. убираем дугу 7 на графе G) и вновь находим кратчайший путь к вершине HO₂. Реакцией с максимальным весом оказывается реакция 8. Расчет по ней дает значение $n_8^{HO_2} = \sqrt{n_8^{O_2} n_8^{H_2} K_8} \approx 1,79 \times 10^{-4}$, при $n_8^{O_2} = n_8^{H_2} = 1$. Если запретить реакции 12 и 14

(поскольку они расходуют HO₂), останется реакция 6, вклад которой в общее количество HO₂: $n_6^{HO_2} = \sqrt{n_6^{O_2} n_6^H K_6} \approx 9,64 \times 10^{-2}$, при $n_6^H = n_6^H = n_8^{HO_2}$ и $n_6^{O_2} = n_8^{O_2} - n_8^{HO_2} \approx 9,99$. В сумме $n^{HO_2} \approx 9,66 \times 10^{-2}$.

6. Убираем реакции 7 и 8 и видим, что остается только реакция 1. Она инициирует реакцию 6. Сначала рассчитаем количество H: $n_1^H = \sqrt{\sigma n^{H_2} K_1} \approx 2,47 \times 10^{-5}$, $n^{H_2} = 1$. На следующем этапе расчет по реакции 6 дает $n_6^{HO_2} = \sqrt{n_6^{O_2} n_6^H K_6} \approx 4,28 \times 10^{-2}$, где $n_6^H = n_1^H$, $n_6^{O_2} = 1$.

7. Теперь убираем из графа реакцию 8. Прямая связность графа G после этого нарушается, следовательно, других путей к вершине HO₂ нет. Таким образом, $n^{HO_2} \approx 9,66 \times 10^{-2}$, полученное на шаге 4.

В табл. 1 приведены справочные данные, которые были применены в расчетах.

Таблица 1

Справочные данные для расчета максимального количества

Номер реакции	Константа скорости реакции, м ³ /(моль·с)	Константа равновесия K
1: H ₂ → H + H	1,08 × 10 ⁻⁴	6,13 × 10 ⁻¹⁰
6: H + O ₂ → HO ₂	1,00 × 10 ⁻¹⁴	52,5
7: H ₂ + O ₂ → OH + OH	26,6	7,08 × 10 ⁻²
8: H ₂ + O ₂ → H + HO ₂	4,08	3,22 × 10 ⁻⁸
17: OH + OH → H + HO ₂	0,20	4,55 × 10 ⁻⁷

Примечание: составлено авторами по [9, 10].

На рис. 2 представлены результаты расчета теоретически возможному содержанию интересующего вещества. как через максимальные веса дуг, так и по

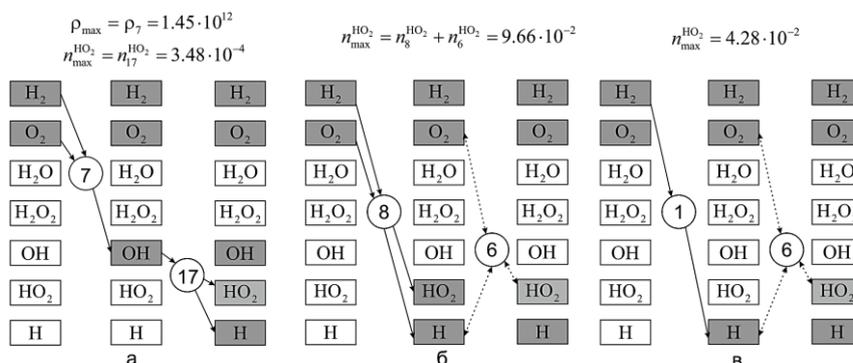


Рис. 2. Варианты образования HO₂:

а) расчет через максимальные веса дуг; б) расчет без учета весов дуг; в) расчет с исключением реакций 7 и 8

Примечание: составлено авторами.

Таким образом, максимально возможное количество $n^{\text{HO}_2} = 9,66 \times 10^{-2}$ возможно, если запретить реакции 1 и 7. Данное значение требует обоснования и сравнения с результатами других исследователей, что и планируется сделать в дальнейшем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представленная методика была реализована в среде MATLAB. Полученное значение количества $n^{\text{HO}_2} = 9,66 \times 10^{-2}$ возможно при запрете реакций $\text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H}$ и $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$. Запрет данных реакций приводит к тому, что не образуется главный продукт брутто-реакции – вода. Другое максимально возможное значение – $n_{\text{max}}^{\text{HO}_2} = 3,48 \times 10^{-4}$ получено при сравнении дуг гиперграфа. Это значение более вероятно из-за возможности образования воды. Значение, полученное в [12], составляет $4,8 \times 10^{-3}$ моль. Такое значение возможно при протекании реакции $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{HO}_2$, предшествует которой реакция (3), а она была исключена из наших расчетов как маловероятная. Максимальное количество гидропероксильного радикала, рассчитанное по методу экстремаль-

ных промежуточных состояний [13], равно 0,81 моль, что значительно выше оценок, полученных на базе кинетического анализа.

Поэтапный химический граф, представленный в данной работе, дает возможность визуализации и анализа механизма химических реакций в многокомпонентной химической системе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поиск максимального количества компонента сводится к последовательному сравнению весов ребер поэтапного графа и решению систем квадратичных алгебраических уравнений. На основе матрицы инцидентности такой поиск достаточно легко алгоритмизируется. Каждый этап графа соответствует состоянию стационара. Следует учитывать и то, что на каждом шаге в зависимости от условий протекания брутто-реакции направление элементарных реакций может изменяться, и, соответственно, изменяется структура графа. Такой анализ химического поэтапного графа составляет отдельную задачу как в плане математического формализма, так и в плане алгоритмической реализации, а также является следующим этапом данного исследования.

Список источников

1. Антипина Е. В. Применение теории графов при решении задач моделирования химических реакций // NovaInfo. 2022. № 130. С. 4–5.
2. Кинг Р. Химические приложения топологии и теории графов. М.: Мир, 1987. 560 с.
3. Feinberg M. Foundations of Chemical Reaction Network Theory. Cham, Switzerland: Springer, 2019. 473 p.
4. Спивак С. И., Исмагилова А. С., Гибеева Р. А. Теоретико-графовый метод анализа информативности кинетических экспериментов при определении параметров // Вестник Башкирского университета. 2014. Т. 19, № 4. С. 1126–1130.
5. Gao X., Yang S., Sun W. A Global Pathway Selection Algorithm for the Reduction of Detailed Chemical Kinetic Mechanisms. Combust Flame. 2016. Vol. 167. P. 238–247.
6. Wang Q.-D. Skeletal Mechanism Generation for High-Temperature Combustion of H₂/CO/C₁–C₄ Hydrocarbons. Energy Fuels. 2013. Vol. 27, No. 7. P. 4021–4030.
7. Козлова М. А., Шаманский В. А. Построение графа химических реакций для анализа реагирующих систем // Информационные и математиче-

References

1. Antipina E. V. Application of Graph Theory in Solving Problems of Modeling Chemical Reactions. NovaInfo. 2022. No. 130. P. 4–5. (In Russian).
2. King R. B. Chemical Applications of Topology and Graph Theory. Moscow: Mir, 1987. 560 p. (In Russian).
3. Feinberg M. Foundations of Chemical Reaction Network Theory. Cham, Switzerland: Springer, 2019. 473 p.
4. Spivak S. I., Ismagilova A. S., Gibaeva R. A. Graph-Theoretical Method of Informativity Analysis of Kinetic Experiments Determining Parameters. Vestnik of Bashkir University. 2014. Vol. 19, No. 4. P. 1126–1130. (In Russian).
5. Gao X., Yang S., Sun W. A Global Pathway Selection Algorithm for the Reduction of Detailed Chemical Kinetic Mechanisms. Combust Flame. 2016. Vol. 167. P. 238–247.
6. Wang Q.-D. Skeletal Mechanism Generation for High-Temperature Combustion of H₂/CO/C₁–C₄ Hydrocarbons. Energy Fuels. 2013. Vol. 27, No. 7. P. 4021–4030.
7. Kozlova M. A., Shamansky V. A. Application of Graphs for the Analysis of the Mechanism of Chemical Kinetics. Information and Mathematical Technologies

- ские технологии в науке и управлении. 2022. № 4. С. 108–118. DOI 10.38028/ESI.2022.28.4.008.
8. Chen Y., Chen J.-Y. Towards Improved Automatic Chemical Kinetic Model Reduction Regarding Ignition Delays and Flame Speeds. *Combust Flame*. 2018. Vol. 190. P. 293–301.
 9. NIST Chemical Kinetics Database. URL: <https://kinetics.nist.gov/kinetics/> (дата обращения: 11.12.2022).
 10. Гурвич Л. В., Вейц И. В., Медведев В. А. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М.: Наука, 1978. Т. 1. 496 с.
 11. Горбань А. Н. Обход равновесия: уравнения химической кинетики и их термодинамический анализ. Новосибирск: Наука, 1984. 227 с.
 12. Chiavazzo E., Karlin I. V., Frouzakis C. E., Boulouchos K. Method of Invariant Grid for Model Reduction of Hydrogen Combustion. 2007. DOI 10.48550/arXiv.0712.2386.
 13. Горбань А. Н., Каганович Б. М., Филиппов С. П. Термодинамические равновесия и экстремумы: Анализ областей достижимости и частичных равновесий в физико-химических и технических системах. Новосибирск: Наука, 2001. 296 с.
8. Chen Y., Chen J.-Y. Towards Improved Automatic Chemical Kinetic Model Reduction Regarding Ignition Delays and Flame Speeds. *Combust Flame*. 2018. Vol. 190. P. 293–301.
 9. NIST Chemical Kinetics Database. URL: <https://kinetics.nist.gov/kinetics/> (accessed: 11.12.2022).
 10. Gurvich L. V., Veits I. V., Medvedev V. A. *Termodinamicheskie svoistva individualnykh veshchestv*. Moscow: Nauka, 1978. Vol. 1. 496 p. (In Russian).
 11. Gorban A. N. *Obkhod ravnovesiia: uravneniia khimicheskoi kinetiki i ikh termodinamicheskii analiz*. Novosibirsk: Nauka, 1984. 227 p. (In Russian).
 12. Chiavazzo E., Karlin I. V., Frouzakis C. E., Boulouchos K. Method of Invariant Grid for Model Reduction of Hydrogen Combustion. 2007. DOI 10.48550/arXiv.0712.2386.
 13. Gorban A. N., Kaganovich B. M., Filippov S. P. *Termodinamicheskie ravnovesiia i eks-tremumy: Analiz oblastei dostizhimosti i chastichnykh ravnovesii v fiziko-khimicheskikh i tekhnicheskikh sistemakh*. Novosibirsk: Nauka, 2001. 296 p. (In Russian).

Информация об авторах

М. А. Козлова – аспирант, инженер-исследователь.
В. А. Шаманский – кандидат химических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

M. A. Kozlova – Postgraduate, Research Engineer.
V. A. Shamansky – Candidate of Sciences (Chemistry), Senior Researcher.

Научная статья
УДК 004.85:58
DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-29-35

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Анна Владимировна Матохина¹, Всеволод Витальевич Тищенко²✉

^{1, 2} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ matokhina.a.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9828-7051>

² vsevolutionlord@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6104-8145>

Аннотация. Представлено описание разработки сервиса для мониторинга развития растений в комнатной теплице с использованием моделей компьютерного зрения, сбора визуальных данных с использованием платы esp32-cam и камеры OV5640 и извлечения отдельных растений из получаемых изображений с помощью модели детектирования YOLO v4. Трекинг высаженных растений выполнен с помощью библиотеки DeepSORT. Исходя из определяемой культуры оценивается возраст для вычисления скорости развития высаженных растений, а также оповещения пользователя о достижении заданных показателей. Методы компьютерного зрения реализованы с помощью фреймворка TensorFlow 2, полученная точность классификации – 99 %, коэффициент детерминации модели Random Forest для регрессии возраста растения – 0,94.

Ключевые слова: сельское хозяйство, комнатная теплица, мониторинг, нейронные сети

Для цитирования: Матохина А. В., Тищенко В. В. Анализ развития растений с помощью методов компьютерного зрения // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 29–35. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-29-35.

Original article

ANALYSIS OF PLANTS' GROWTH USING COMPUTER VISION METHODS

Anna V. Matokhina¹, Vsevolod V. Tishchenko²✉

^{1, 2} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ matokhina.a.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9828-7051>

² vsevolutionlord@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6104-8145>

Abstract. The study describes the development of a service for monitoring plants' growth in an indoor greenhouse using computer vision models, visual data collection with the esp32-cam card, the OV5640 camera, and the YOLO v4 detection model for extracting individual plants from the images. The plants tracking was performed by the DeepSORT library. The study determined the age of plants according to their type in order to identify their growth rate and notify the user when the parameters achieved. The computer vision methods are implemented through the TensorFlow 2 framework, with 99 % of classification accuracy, and Random Forest coefficient of determination of 0.94 for the regression of a plant's age.

Keywords: agriculture, indoor greenhouse, monitoring, neural networks

For citation: Matokhina A. V., Tishchenko V. V. Analysis of Plants' Growth Using Computer Vision Methods. Proceedings in Cybernetics. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 29–35. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-29-35.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема развития сельского хозяйства актуальна для множества стран. В 2018 г. численность городского населения в мире составляла 4,2 млрд (55 %), а к 2050 г., по про-

гнозам, эта доля в связи с оттоком сельского населения увеличится до 68 % [1]. Создание городских ферм позволит увеличить производство свежих овощей, что важно особенно для стран с большой плотностью населения.

Первая городская ферма была построена еще в 2002 г. в Китае, а на сегодняшний день их более 200 и это число постоянно увеличивается [2].

С каждым годом появляются новые технологические решения, основанные на парадигме интернета вещей, в том числе и в сельском хозяйстве. При увеличении объемов выращивания растений у фермера возрастает сложность анализа и прогноза их развития, учета непредвиденных критических ситуаций.

Параметры окружающей среды могут быть собраны с помощью датчиков влажности, температуры, освещенности, состава воздуха и воды, а культуру, возраст, наличие повреждений у растения возможно оценивать по визуальным данным, что и является целью новейших разработок – разработка методов компьютерного зрения для автоматизированного анализа развития растения или их группы в теплице. Отслеживание возраста позволяет прогнозировать и оптимизировать время, затрачиваемое на выращивание, определять отклонения. В работе О. Danylytsiv и соавт., посвященной мониторингу развития растений в комнатной теплице, описаны типы нейронных сетей, виды обучения и полюсы их применения, приведен пример оценки по изображениям состояния листьев растения [3].

В статье Ю. А. Прошкина и соавт. описаны способы сегментации урожая и поврежденных зон растений с помощью выделения каналов изображений в различных цветовых моделях [4]. Существует ряд работ, в которых сегментация пораженных областей выполнена с помощью методов машинного обучения [5, 6].

Нейронные сети позволяют с высокой точностью определять культуру, идентифицировать болезни растений [7], классифицировать отдельные пораженные болезнью листья [8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Получаемые с помощью камеры изображения содержат несколько растений, поэтому на первом этапе для проведения анализа необходимо их разделение с помощью моделей детектирования. На втором этапе для каждой области выполняется классификация культур растений с помощью моделей компьютерного

зрения. На следующем этапе выполняется регрессия визуального возраста растения. Так как культуры отличаются, для каждой создается отдельная модель прогнозирования. Из изображения выделяется область, содержащая диапазон цветов растения, площадь которой является предиктором возраста растения.

Под визуальным возрастом понимается вид среднестатистического растения к определенному моменту выращивания, которое имеет среднее время выращивания в выборке. Соответственно, отношение визуального возраста растения к полученному на изображении показывает отклонение развития реального растения от среднестатистического.

Выращивание состоит из двух фаз – темной и светлой. В первой осуществляется замачивание и проращивание семян, во второй растения выставляют на свет, где и возможен анализ визуального возраста. Время выращивания растения измеряется в часах с начала его выставления на свет до готовности.

В качестве датасета использовали изображения, полученные из теплицы с помощью камеры OV5640 на 200 градусов. В теплице выращивались саженцы, листовой салат и различные культуры микрозелени. Объем собранных данных составляет 3 277 изображений.

Для формирования обучающей выборки для детектирования разметка изображений выполнена с помощью программы LabelImg. Все области разделены на 3 класса: «пустая область», «одно растение», «группа растений». Число выделенных изображений класса «группа растений» равно 7 271 (рис. 1). Среди них выделено 9 культур: базилик, горох, горчица, капуста мизуна, маш, подсолнечник, редис, редька, листовой салат.

Число изображений для каждого класса существенно различается, для компенсации этого при обучении используются весовые коэффициенты, для увеличения объема выборки – методы искажения изображений. Для регрессии возраста растения при формировании датасета определяется среднестатистическое растение, и относительно его изображения идет подбор возраста остальных растений. В результате формируется список изображений соответствующего возраста.



Рис. 1. Разметка изображений

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Детектирование растений реализовано с использованием фреймворка TensorFlow 2, а также встроенного в него Keras. Данный

выбор обусловлен большим функционалом, простотой реализации Keras и низкоуровневостью TensorFlow [9]. Сравнение моделей детектирования показано на рис. 2.

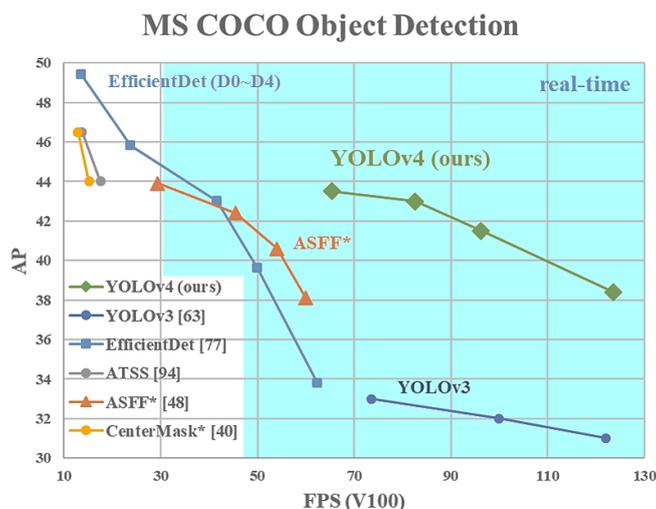


Рис. 2. Сравнительный график моделей детектирования

Примечание: составлено по [10].

В данном решении использована модель YOLO v4, предварительно обученная на датасете COCO 2017, обладающая оптимальными показателями точности и скорости. Итоговая точность mAP модели составила 99 % при значении функции потерь ниже 1.

Если необходим не только общий анализ посадок, но и оценка каждого растения в отдельности, то требуется добавление трекинга с помощью библиотеки DeepSORT для отслеживания объектов при их перемещении

с использованием расстояния Махаланобиса и фильтра Калмана [11].

Для классификации культур растений используются предобученные модели из набора Keras Applications [12]. Среди них выбраны структуры VGG19, MobileNetV2, InceptionResNetV2. Сверточная нейронная сеть VGG19 обладает относительно высокой точностью, однако из-за большой глубины и веса имеет медленную скорость обучения. MobileNetV2 является сверточной нейронной

сеть, которая имеет существенно меньшее число параметров при примерно той же точности. InceptionResNetV2 является одной из самых точных сверточных нейронных сетей, которая объединяет в себе архитектуры Inception и Residual.

Классификация выполняется заранее предобученными моделями, полносвязные и входной слой заменяются. Это позволяет задавать любой размер входных изображений и число возможных классов. При этом «замо-

раживаются» сверточные слои и обучаются только внешние, что позволяет сохранить целостность основной части и минимизировать переобучение. Для повышения точности применяется Fine tuning.

При высокой точности всех моделей наибольшим значением метрики Matthews correlation и меньшими потерями обладает модель InceptionResNetV2, однако и наибольшим весом. Сравнение обученных моделей на тестовых данных показано табл. 1.

Таблица 1

Сравнение эффективности моделей на тестовых данных

Модель	Вес модели	Val. loss	Val. accuracy	Val. Matthews correlation
VGG19	230 Мб	0,1381	0,9710	0,9663
MobileNetV2	30 Мб	0,1439	0,9517	0,9485
InceptionResNetV2	625 Мб	0,0502	0,9931	0,9920

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Для оценки эффективности моделей выполнена визуализация распределения классов с использованием алгоритма t-SNE для уменьшения размерности векторов признаков, извлекаемых из изображений путем применения промежуточных слоев нейронной

сети (рис. 3). В результате получен массив точек в пространстве, цвет которых указывает на принадлежность объекта к классу. Лучшее разделение выполнено моделью InceptionResNetV2.

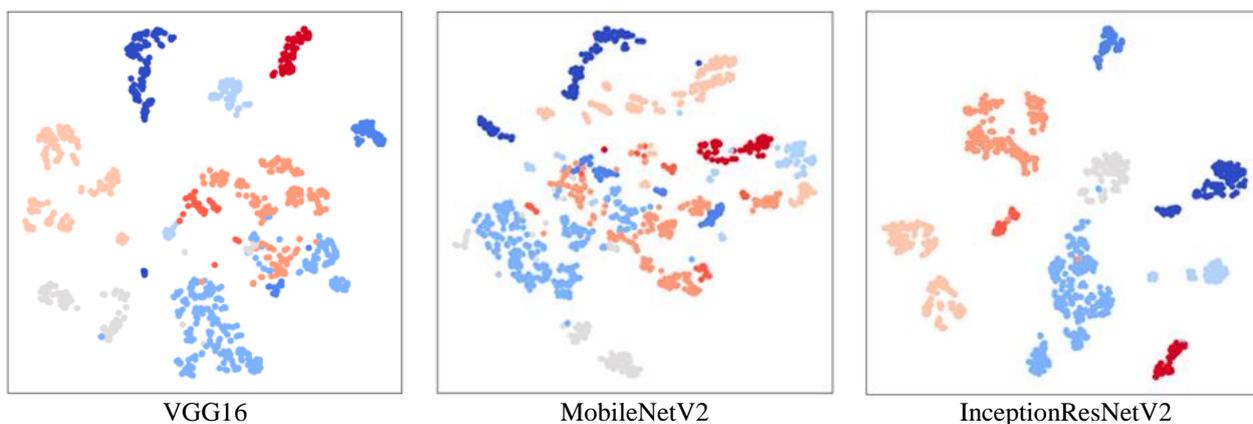


Рис. 3. Сравнение диаграмм t-SNE моделей классификации растений

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Для примера прогноза возраста взят полученный набор изображений микрозелени гороха. Из исходных изображений извлекается область, содержащая растение. В качестве цветовой модели используется HSV, где Hue –

цветовой тон, Saturation – насыщенность, Value – яркость. Это позволяет задавать диапазон цвета, в котором будет ограничена область, содержащая растения (рис. 4).

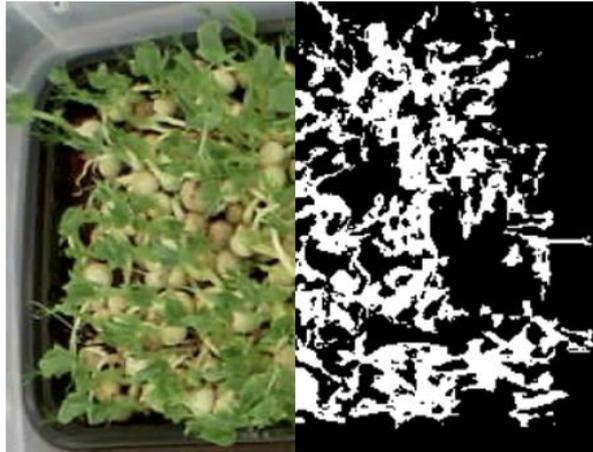


Рис. 4. Выделение области растения

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Площадь полученной области коррелирует со временем выращивания растения. Для осуществления регрессии использованы модели

Linear Regression, Random Forest, XGBoost. Сравнительный график спрогнозированных и тестовых значений показан на рис. 5.

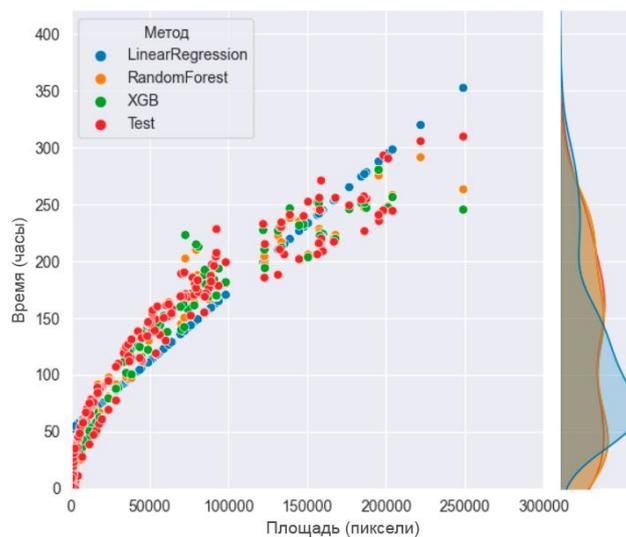


Рис. 5. Сравнение спрогнозированных значений различных моделей

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Разброс времени, определяемого для конкретной площади, возрастает при его увеличении, что может быть компенсировано использованием линейной регрессии или усред-

нением обучающих данных. Наименьшими ошибками и наибольшим коэффициентом детерминации обладает модель Random Forest (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение моделей регрессии возраста растений

Модель	MAE	MSE	R ²
Linear Regression	0,0806	0,0087	0,8738
Random Forest	0,0453	0,0038	0,9451
XGBoost	0,0474	0,0045	0,9380

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен общий алгоритм анализа растений в комнатной теплице для обеспечения мониторинга и контроля их развития. Лучшей моделью классификации является InceptionResNetV2, однако она также обладает и большим весом – 625 Мб. Наиболее легкой моделью является MobileNetV2 – 10 Мб с точностью, по тестовым данным, – 0,95. Визуальный возраст является

универсальным параметром развития растений. Его уменьшение относительно действительного может свидетельствовать о заболевании, а увеличение – об улучшении параметров окружающей среды. Наилучшие показатели для решения задачи регрессии возраста растения получены с помощью модели Random Forest.

Список источников

1. Bačić S., Tomić H., Andlar G., Roić M. Towards Integrated Land Management: The Role of Green Infrastructure. *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2022. No. 10. P. 513. DOI 10.3390/ijgi11100513.
2. Kozai T., Niu G., Takagaki M. *PFAL Business and R&D in Asia and North America: Status and Perspectives. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production.* 2nd Ed. 2020. P. 35–76.
3. Danyltsiv O., Khomiak A., Nazarevych O. Usage of Artificial Intelligence Systems and Working with the Neural Network in Assessing the Condition of Plants in Smart Greenhouses. 3rd International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science, June 5, 2021, Lviv-Shatsk, Ukraine. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2917/paper20.pdf> (дата обращения: 20.01.2023).
4. Прошкин Ю. А., Смирнов А. А., Соколов А. В. и др. Оптический мониторинг овощных культур на основе цифровой обработки RGB изображений // *Инновации в сельском хозяйстве.* 2019. № 4. С. 266–278.
5. Kerkecha M., Hafiane A., Canalsb R. Vine Disease Detection in UAV multispectral Images Using Optimized Image Registration and Deep Learning Segmentation Approach. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2020. Vol. 174. P. 105446. URL: <https://hal.science/hal-03299578/document> (дата обращения: 20.01.2023).
6. Harakannavara S. S., Rudagib J. M., Puranikmathb V. I. et. al. Plant Leaf Disease Detection Using Computer Vision and Machine Learning Algorithms. *Global Transitions Proceedings.* 2022. Vol. 3, No. 1. P. 305–310. DOI 10.1016/j.gltp.2022.03.016.
7. Al-Gunaid M. A., Shcherbakov M. V., Tishchenko V. V. et. al. The System of Intelligent Identification of Harmful Objects in the Field of Agriculture. *CIT&DS 2021. Communications in Computer and Information Science.* 2021. Vol. 1448. P. 177–189. DOI 10.1007/978-3-030-87034-8_14.
8. Брыкин В. В., Брагинский М. Я., Тараканова И. О. и др. Анализ состояния растений с применением технологий искусственного интеллекта // *Вестник кибернетики.* 2022. № 4. С. 6–13.
9. TensorFlow Core. URL: <https://www.tensorflow.org/overview> (дата обращения: 20.01.2023).

References

1. Bačić S., Tomić H., Andlar G., Roić M. Towards Integrated Land Management: The Role of Green Infrastructure. *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2022. No. 10. P. 513. DOI 10.3390/ijgi11100513.
2. Kozai T., Niu G., Takagaki M. *PFAL Business and R&D in Asia and North America: Status and Perspectives. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production.* 2nd Ed. 2020. P. 35–76.
3. Danyltsiv O., Khomiak A., Nazarevych O. Usage of Artificial Intelligence Systems and Working with the Neural Network in Assessing the Condition of Plants in Smart Greenhouses. 3rd International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science, June 5, 2021, Lviv-Shatsk, Ukraine. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2917/paper20.pdf> (accessed: 20.01.2023). (In Russian).
4. Proshkin Yu. A., Smirnov A. A., Sokolov A. V. et al. Optical Monitoring of Vegetable Crops Based on the Digital Processing of RGB Images. *Innovatsii v selskom khoziaistve.* 2019. No. 4. P. 266–278. (In Russian).
5. Kerkecha M., Hafiane A., Canalsb R. Vine Disease Detection in UAV multispectral Images Using Optimized Image Registration and Deep Learning Segmentation Approach. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2020. Vol. 174. P. 105446. URL: <https://hal.science/hal-03299578/document> (accessed: 20.01.2023). (In Russian).
6. Harakannavara S. S., Rudagib J. M., Puranikmathb V. I. et. al. Plant Leaf Disease Detection Using Computer Vision and Machine Learning Algorithms. *Global Transitions Proceedings.* 2022. Vol. 3, No. 1. P. 305–310. DOI 10.1016/j.gltp.2022.03.016.
7. Al-Gunaid M. A., Shcherbakov M. V., Tishchenko V. V. et. al. The System of Intelligent Identification of Harmful Objects in the Field of Agriculture. *CIT&DS 2021. Communications in Computer and Information Science.* 2021. Vol. 1448. P. 177–189. DOI 10.1007/978-3-030-87034-8_14.
8. Brykin V. V., Braginsky M. Ya., Tarakanova I. O. et al. Analysis of Plants Health Using Artificial Intelligence Technologies. *Proceedings in Cybernetics.* 2022. No. 4. P. 6–13. (In Russian).

10. Bochkovskiy A., Wang C., Liao H. M. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. arXiv. 2020. URL: <https://arxiv.org/pdf/2004.10934.pdf> (дата обращения: 20.01.2023).
11. Pereira R., Carvalho G., Garrote L., Nunes U. J. Sort and Deep-SORT Based Multi-Object Tracking for Mobile Robotics: Evaluation with New Data Association Metrics. Appl Sci. 2022. Vol. 12, No. 3. P. 1319. DOI 10.3390/app12031319.
12. Keras Applications. URL: <https://keras.io/api/applications/> (дата обращения: 20.01.2023).
9. TensorFlow Core. URL: <https://www.tensorflow.org/overview> (accessed: 20.01.2023). (In Russian).
10. Bochkovskiy A., Wang C., Liao H. M. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. arXiv. 2020. URL: <https://arxiv.org/pdf/2004.10934.pdf> (дата обращения: 20.01.2023).
11. Pereira R., Carvalho G., Garrote L., Nunes U. J. Sort and Deep-SORT Based Multi-Object Tracking for Mobile Robotics: Evaluation with New Data Association Metrics. Appl Sci. 2022. Vol. 12, No. 3. P. 1319. DOI 10.3390/app12031319.
12. Keras Applications. URL: <https://keras.io/api/applications/> (accessed: 20.01.2023).

Информация об авторах

А. В. Матохина – кандидат технических наук.

В. В. Тищенко – магистрант.

Information about the authors

A. V. Matokhina – Candidate of Sciences (Engineering).

V. V. Tishchenko – Master's Degree Student.

Научная статья
УДК 519.23 + 656.7
DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-36-42

РАЗРАБОТКА РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ПАССАЖИРООБОРОТА ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ДВУМЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ МЕТОДАМИ

Сергей Иванович Носков¹, Юрий Александрович Бычков^{2✉},
Карина Сергеевна Перфильева³

^{1, 2, 3} Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

¹ sergey.noskov.57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>

² bychkov_ya@internet.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7243-8445>

³ 552649-171233@mail.ru

Аннотация. Описана математическая модель регрессионного типа пассажирооборота воздушного транспорта Российской Федерации. В качестве независимых переменных используются: средняя стоимость полета в салоне экономического класса самолета в расчете на 1 000 км, среднемесячная номинальная начисленная заработная плата работников по полному кругу организаций, средний тариф на проезд в плацкартном вагоне скорого нефирменного поезда дальнего следования в расчете на 100 км пути, численность трудоспособного населения. Идентификация параметров модели производится с помощью двух альтернативных методов регрессионного анализа – смешанного оценивания и максимальной согласованности между расчетными и фактическими значениями выходной переменной. Построенные варианты модели вполне соответствуют содержательному смыслу входящих в их состав независимых переменных и обладают высокой точностью. Выбор одной из них для решения стоящих перед исследователем задач должен определяться их характером, а именно, либо стремлением минимизировать расхождения между прогнозными и реальными значениями пассажирооборота в будущем периоде, либо желанием с возможно большей точностью выявить будущие тенденции в динамике этого показателя.

Ключевые слова: регрессионный анализ, метод смешанного оценивания, непрерывная форма метода максимальной согласованности, авиационные перевозки

Для цитирования: Носков С. И., Бычков Ю. А., Перфильева К. С. Разработка регрессионной модели пассажирооборота воздушного транспорта Российской Федерации двумя альтернативными методами // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 36–42. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-36-42.

Original article

DEVELOPING A REGRESSION MODEL OF AIR TRANSPORT PASSENGER TURNOVER IN THE RUSSIAN FEDERATION WITH TWO ALTERNATIVE METHODS

Sergey I. Noskov¹, Yuri A. Bychkov^{2✉}, Karina S. Perfilyeva³

^{1, 2, 3} Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

¹ sergey.noskov.57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>

² bychkov_ya@internet.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7243-8445>

³ 552649-171233@mail.ru

Abstract. The article describes a regressive mathematical model of passenger turnover in the air transport of the Russian Federation. The following are used as independent variables: the average flight cost in the economy class of an aircraft per 1,000 km, the average monthly nominal accrued wages of employees in a full range of organizations, the average fare for travel in a second-class carriage of an express unbranded long-distance train per 100 km of track, the working population. Model parameters are identified using two

alternative methods of regression analysis: mixed estimation and maximum consistency between the calculated and actual values of the output variable. The constructed versions of the model fully correspond to the content meaning of the independent variables included in their composition and have high accuracy. To solve the problems, the researcher should select one of them according to their features, namely, either the tendency to minimize the discrepancies between the predicted and actual values of passenger traffic in the future or the desire to identify future trends in the indicator's dynamics, possibly, with the greater accuracy.

Keywords: regression analysis, mixed estimation method, continuous form of the maximum consistency method, air transportation

For citation: Noskov S. I., Bychkov Yu. A., Perfilyeva K. S. *Developing a Regression Model of Air Transport Passenger Turnover in the Russian Federation with Two Alternative Methods. Proceedings in Cybernetics. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 36–42. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-36-42.*

ВВЕДЕНИЕ

В современной России весьма велика роль транспорта во всех направлениях его функционирования, включая перевозку пассажиров. Комплексному анализу этого аспекта математическими методами посвящено значительное количество исследований. Так, цель работы [1] состоит в создании математической многокритериальной модели пассажирских перевозок, ее программной реализации и проведении практических расчетов по оптимизации выбора эффективного транспорта для определенного региона транспортной сети. В работах [2, 3] значительное внимание уделяется применению математических методов для моделирования пассажиропотоков. В статье [4] с помощью средств моделирования решена техническая задача определения частоты и формы колебаний кузова, которые оказывают негативное воздействие на организм человека.

При перевозке пассажиров особенно велико значение авиационного транспорта. Именно он обеспечивает более половины пассажирооборота в стране [5]. Современная ситуация на рынке отечественных авиаперевозок определяется максимально интенсивным влиянием факторов, формирующихся в большей степени под воздействием внешних обстоятельств. Данной проблематике также уделяется большое внимание. Так, работы [6–9] посвящены построению эконометрических моделей для описания зависимости между объемами пассажирских авиаперевозок в РФ и такими существенными факторами, как население городов и расстояний между ними, взаимосвязи выручки и пассажиропотока. В результате проведенного авторами анализа установ-

лено, что объем пассажирских перевозок не описывается классической гравитационной моделью, а расстояния между городами не влияют на объем перевозок. Также научный интерес вызывают работы [10–11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поставим задачу моделирования пассажирооборота воздушного транспорта Российской Федерации в зависимости от совокупности влияющих на него факторов. Введем следующие обозначения:

y – пассажирооборот воздушного транспорта, млрд пасс.-км.;

x_1 – средняя стоимость полета в салоне экономического класса самолета в расчете на 1 000 км пути, руб.;

x_2 – среднемесячная номинальная начисленная заработная плата работников по полному кругу организаций, руб.;

x_3 – средний тариф на проезд в плацкартном вагоне скорого нефирменного поезда дальнего следования в расчете на 100 км пути, руб.;

x_4 – численность трудоспособного населения, млн чел.

Приведем краткое обоснование набора независимых переменных. Показатель средней стоимости полета в салоне экономического класса самолета оказывает существенное отрицательное влияние на динамику пассажирооборота воздушного транспорта. Действительно, рост цен на авиабилеты неизбежно приводит к выбору потенциальными пассажирами поездок на альтернативных по отношению к воздушным видам транспорта, возможно, более дешевых. Среднемесячная

номинальная начисленная заработная плата работников по полному кругу организаций, напротив, на динамику зависимой переменной влияет положительно, поскольку с увеличением доходов возрастает спрос на более быстрый и комфортный вид транспорта. Включение в модель независимой переменной x_3 объясняется тем обстоятельством, что далеко не во всех городах России есть аэропорты. Часть населения, в том числе сельского, вынуждена добираться до ближайшего аэропорта на железнодорожном транспорте. Прямое влияние численности трудоспособного населения в стране на пассажирооборот воздушного транспорта не требует развернутых пояснений.

Модель будем строить в форме линейного регрессионного уравнения (модели) со свободным членом [12]:

$$y_k = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где y – зависимая, а x_i – i -я независимая переменные, α_i – i -й подлежащий оцениванию параметр, ε_k – ошибки аппроксимации, k – номер наблюдения, n – число наблюдений (длина выборки).

В качестве информационной базы модели используем данные официальной статистики за 2002–2019 гг. [13], приведенные в табл.

Таблица

Исходные данные

t	y	x_1	x_2	x_3	x_4
2002	64,70	2 244,16	4 360	38,43	88,94
2003	71,10	2 695,73	5 499	41,10	89,85
2004	83,00	2 922,86	6 740	43,93	90,10
2005	85,80	3 507,76	8 555	50,29	90,16
2006	93,90	3 998,90	10 634	56,07	90,06
2007	111,00	4 492,63	13 593	64,03	89,75
2008	122,60	5 890,42	17 290	76,57	89,34
2009	112,50	6 619,40	18 638	90,96	87,98
2010	147,10	6 651,53	20 952	101,13	87,85
2011	166,80	4 181,41	23 369	103,00	87,06
2012	195,80	4 681,25	26 629	110,99	86,14
2013	225,20	4 695,30	29 792	135,99	85,16
2014	241,40	4 774,78	32 495	154,99	85,42
2015	226,80	5 446,44	34 030	170,62	84,20
2016	215,60	5 384,34	36 709	161,77	83,22
2017	259,40	5 158,16	39 167	173,75	82,26
2018	286,90	5 150,01	43 724	169,11	81,36
2019	323,00	5 638,98	47 867	181,86	82,68

Примечание: составлено по [13].

Таким образом, в модели (1) $m = 4, n = 18$.

Идентификацию параметров $\alpha_i, i = 0, m$ будем производить с помощью метода смешанного оценивания (МСО) [14] и непрерывной формы метода максимальной согласованности (ММС). Рассмотрим их краткое описание.

МСО объединяет в себе некоторые важные свойства методов наименьших модулей (МНМ) и антиробастного оценивания (МАО), а именно их реакцию на выбросы – наблюдения, не согласующиеся с выборкой в целом. Первый их, по существу, игнорирует, второй, напротив,

к ним тяготеет. При этом вся выборка с номерами наблюдений из множества $N = \{1, 2, \dots, n\}$ разбивается на два непересекающиеся подмножества N_1 и N_2 :

$$N = N_1 \cup N_2, N_1 \cap N_2 = \emptyset.$$

При этом на множестве номеров наблюдений N_1 МСО «работает» как МНМ, а на N_2 – как МАО.

Существуют различные способы такого разбиения, один из которых основан на исполь-

зовании так называемого критерия смещения, что позволяет добиться определенной предсказательности множеств N_1 и N_2 по отношению к проявлению свойств МНМ и МАО.

Формально реализация МСО приводит к решению следующей задачи линейного программирования (ЛП):

$$\begin{aligned} \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + u_k - v_k &= y_k, k \in N, \\ u_k + v_k - r &\leq 0, k \in N_2, \\ u_k &\geq 0, v_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \\ \sum_{k \in N_1} (u_k + v_k) / s + r &\rightarrow \min, \end{aligned}$$

где s – мощность множества N_1 .

Суть ММС заключается в максимизации согласованности в поведении расчетных \hat{y}_k и фактических y_k значений выходной переменной или, другими словами, в возможно более полном отражении в модели тенденций в функционировании объекта исследования, проявляемых на предыстории (здесь $\hat{y}_k = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki}$). Поясним суть такой согласованности на примере. Пусть для произвольных номеров наблюдений s и h обрабатываемой выборки справедливо неравенство:

$$(y_s - y_h)(\hat{y}_s - \hat{y}_h) < 0.$$

Это означает, что на паре номеров наблюдений (s, h) модель (1) плохо «объясняет» исследуемый процесс (т. е. поведение фактических и расчетных значений выходной переменной не согласовано на этой паре), что не может быть компенсировано малостью величин $|\varepsilon_s|$ и $|\varepsilon_h|$.

ММС разработан для дискретной и непрерывной форм такой согласованности. Непрерывная форма ММС заключается в решении задачи оптимизации [12]:

$$L = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=k+1}^n l_{ks} \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$\text{где } l_{ks} = \begin{cases} |\hat{y}_k - \hat{y}_s|, & (k_k - y_s)(\hat{y}_k - \hat{y}_s) < 0 \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Задача (2) сводится к следующей задаче линейного программирования (ЛП):

$$r \sum_{k=1}^n (u_k + v_k) + (1-r) \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=k+1}^n l_{ks} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + u_k - v_k, k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$\omega_{ks} \sum_{i=1}^m \alpha_i (x_{ki} - x_{si}) + l_{ks} \geq 0, k = \overline{1, n-1}, s = \overline{k+1, n}, \quad (5)$$

$$u_k \geq 0, v_k \geq 0, k = \overline{1, n}, l_{ks} \geq 0, k = \overline{1, n-1}, s = \overline{k+1, n}. \quad (6)$$

Здесь $r \in (0, 1]$ – заранее назначенное число, устанавливающее сравнительный приоритет (компромисс) в целевой функции (3) между функцией потерь, соответствующей МНМ и уровнем рассогласованности между расчетными и фактическими значениями зависимой переменной. Числа $\omega_{ks}, k = \overline{1, n-1}, s = \overline{k+1, n}$ в ограничениях (5) задаются по правилу:

$$\omega_{ks} = \begin{cases} 1, & y_k - y_s > 0 \\ -1, & y_k - y_s < 0 \\ 0, & y_k - y_s = 0. \end{cases}$$

Неизвестные переменные u_k и v_k в задаче ЛП представляют собой положительные и отрицательные части ошибок аппроксимации ε_k :

$$u_k = \begin{cases} y_k - \alpha_0 - \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki}, & y_k > \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$v_k = \begin{cases} \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} - y_k, & y_k < \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

При этом $u_k v_k = 0$ для всех k .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Построим линейную регрессионную модель пассажирооборота воздушного транспорта России с указанными выше независимыми переменными методом смешанного оценивания, используя специализированное программное обеспечение [15]:

$$\begin{aligned} y &= -177,579 - 0,008x_1 + 0,007x_2 - \\ &\quad - 0,021x_3 + 2,669x_4, \\ E &= 3,81 \%. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь E – средняя относительная ошибка аппроксимации, рассчитываемая по формуле:

$$E = 100 \% \sum_{k=1}^n \left| \frac{\hat{y}_k - y_k}{y_k} \right| / n.$$

Использование программного комплекса [16] реализации непрерывной формы метода максимальной согласованности привело к построению следующей модели пассажирооборота:

$$y = -960,896 - 0,014x_1 + 0,007x_2 + 0,535x_3 + 11,23x_4, \quad (8)$$

$E = 5,08 \%$.

Проведем краткий анализ моделей (7) и (8). Прежде всего следует отметить совпадение в них знаков оценок параметров и их соответствие содержательному смыслу независимых переменных. При этом, разумеется, свободный член никакой смысловой нагрузки не несет и выполняет сглаживающую функцию, препятствуя принудительному прохождению гиперплоскости регрессии через начало координат. Обе модели достаточно точно описывают исследуемый объект, на что указывают низкие значения ошибок аппроксимации (рис.). Обращает на себя внимание следующее обстоя-

тельство. Если коэффициенты при переменных x_1 , x_2 и x_3 в моделях (7) и (8) достаточно близки, то значимость переменной x_4 в модели (8) более чем в три раза выше, чем в модели (7). Следовательно, именно таким образом достигается большая согласованность расчетных и фактических значений зависимой переменной.

Поскольку, как правило, регрессионные модели чаще всего применяются при прогнозировании будущего состояния объекта, возникает вопрос о том, какую из них – (7) или (8), – предпочесть в каждом конкретном случае. Ответ на него может быть следующим. Если исследователь стремится минимизировать расхождения между прогнозными и реальными значениями пассажирооборота, то предпочтение следует отдать модели (7). Если же главным при прогнозировании является с возможно большей точностью выявить будущие тенденции в динамике этого показателя, то лучше воспользоваться моделью (8).

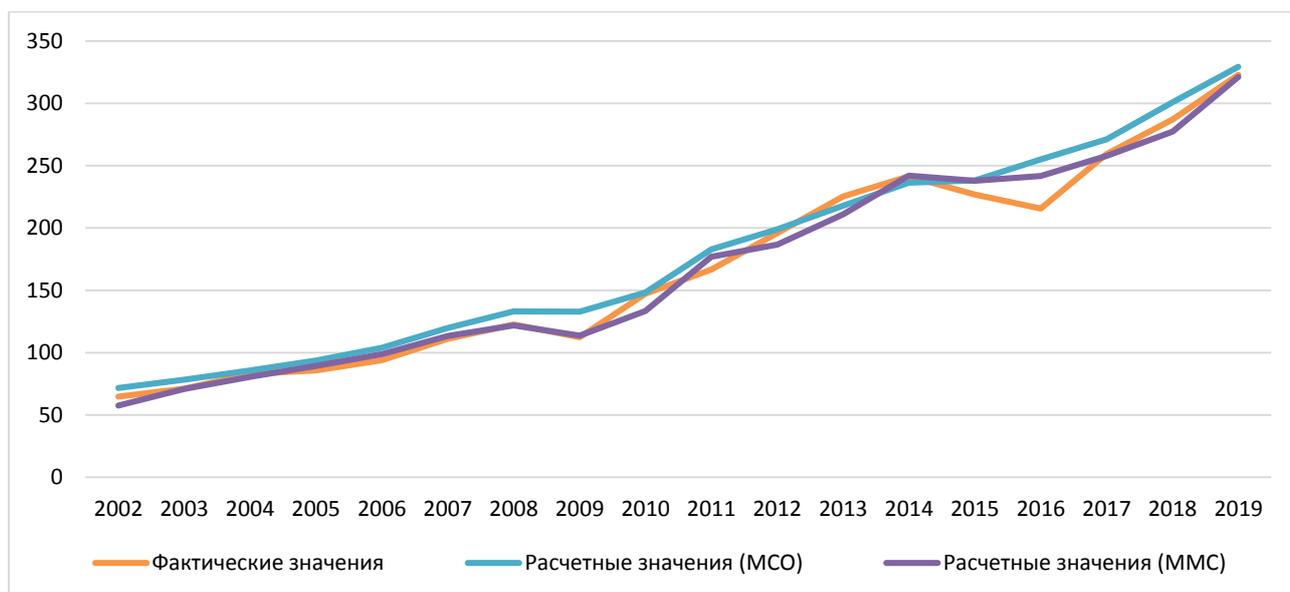


Рисунок. Фактические и расчетные значения зависимой переменной
Примечание: составлено авторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сформулирована задача моделирования пассажирооборота воздушного транспорта Российской Федерации в зависимости от совокупности влияющих на него факторов с помощью двух альтернативных методов регрессионного анализа – смешанного оценивания параметров и максимальной согласо-

ванности между расчетными и фактическими значениями выходной переменной. Построенные варианты модели вполне соответствуют содержательному смыслу входящих в их состав независимых переменных и обладают высокой точностью. Выбор одной из них для решения стоящих перед исследователем задач должен определяться их характером.

Список источников

1. Прытов А. А. Моделирование и оптимизация пассажирских перевозок в условиях неопределенности // *Инновации в гражданской авиации*. 2017. Т. 2, № 1. С. 57–63.
2. Антонова В. М., Гречишкина Н. А., Кузнецов Н. А. Анализ результатов моделирования пассажиропотока станции метро в программе AnyLogic // *Теория и методы обработки информации*. 2018. № 1. С. 35–39.
3. Данилов А. И., Чижиков В. П. Определение количества людей на станциях метрополитена методом моделирования пассажиропотоков // *Метро и тоннели*. 2022. № 2. С. 28–30.
4. Лукашова Е. В., Лукашов Н. А. Оценка качества перевозок пассажиров с использованием методов математического моделирования // *Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем : сб. науч. тр. 3-й Всерос. науч.-технич. конф., Курск, 28 мая 2021 г. Курск : Юго-Запад. гос. ун-т, 2021. С. 224–226.*
5. *Транспорт в России // Федеральная служба государственной статистики*. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13229> (дата обращения: 15.02.2023).
6. Варюхина Е. В., Клочков В. В. Экономические механизмы управления безопасностью полетов и авиационной техники // *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2011) : материалы пятой междунар. конф. Москва, 3–5 октября 2011 г. М. : Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2011. С. 155–157.*
7. Денежкина К. Л., Радковская Е. В. Перспективы восстановления работы аэропортов // *Перспективы науки*. 2022. № 7. С. 40–44.
8. Рязанов В. А. Пассажиропоток аэропортов России как индикатор социально-экономической динамики регионов страны // *Региональные исследования*. 2013. № 4. С. 74–79.
9. Мартыненко А. В., Фарносова Я. А., Шерышова А. Е. Математическое моделирование пассажирских авиаперевозок // *Инновационный транспорт*. 2016. № 4. С. 9–14.
10. Банщикова А. А., Базилевский М. П., Тихомиров В. А. Прогнозирование объема пропуска перевозимых на нетяговом подвижном составе крупнотоннажных контейнеров в экспортно-импортном сообщении в направлении РФ – КНР // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2017. № 2. С. 185–190.
11. Базилевский М. П., Гэфан Г. Д. Проблема автокорреляции остатков регрессии на примере моделирования грузооборота железнодорожного транспорта по данным временных рядов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016. № 1. С. 141–147.
12. Носков С. И., Бычков Ю. А. Модификация непрерывной формы метода максимальной согласованности при построении линейной регрессии //

References

1. Prytov A. A. Simulation and Optimization of Passenger Transportation in a Context of Uncertainty. *Innovation in Civil Aviation*. 2017. Vol. 2, No. 1. P. 57–63. (In Russian).
2. Antonova V. M., Grechishkina N. A., Kuznetsov N. A. Analysis of the Modelling Results for Passenger Traffic at an Underground Station Using AnyLogic. *Information Processes*. 2018. No. 1. P. 35–39. (In Russian).
3. Danilov A. I., Chizhikov V. P. Opredelenie kolichestva liudei na stantsiiakh metropolitena metodom modelirovaniia passazhiropotokov. *Metro i tonneli*. 2022. No. 2. P. 28–30. (In Russian).
4. Lukashova E. V., Lukashov N. A. Otsenka kachestva perevozok passazhirov s ispolzovaniem metodov matematicheskogo modelirovaniia. *Upravlenie kachestvom na etapakh zhiznennogo tsikla tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh sistem : Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and Engineering Conference, Kursk, May 28, 2021. Kursk : Southwest State University, 2021. P. 224–226. (In Russian).*
5. *Transport v Rossii. Federal State Statistics Service*. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13229> (accessed: 15.02.2023). (In Russian).
6. Varyukhina E. V., Klochkov V. V. Ekonomicheskie mekhanizmy upravleniia bezopasnostiu poletov i aviatsionnoi tekhniki. *Management of Large-Scale Systems Development (MLSD'2011) : Proceedings of the Fifth International Conference, Moscow, October 3–5, 2011. Moscow : V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2011. P. 155–157. (In Russian).*
7. Denezhkina K. L., Radkovskaya E. V. Perspektivy vosstanovleiiia raboty aeroportov. *Science Prospects*. 2022. No. 7. P. 40–44. (In Russian).
8. Ryazanov V. A. Passenger Air Traffic of Russian Regional Airports as an Indicator of Regional Socio-Economic Dynamics. *Regionalnye issledovaniia*. 2013. No. 4. P. 74–79. (In Russian).
9. Martynenko A. V., Farnosova Ya. A., Sheryshova A. E. Mathematic Modeling of Passenger Air Transport Innovative Transport. *Innotrans*. 2016. No. 4. P. 9–14. (In Russian).
10. Banshchikova A. A., Bazilevsky M. P., Tikhomirov V. A. The Forecasting of Pass Volume of Large Containers Carried on Non-Tractive Rolling Stock in the Export-Import Communication in Towards from Russian Federation to China. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2017. No. 2. P. 185–190. (In Russian).
11. Bazilevsky M. P., Gefan G. D. The Problem of Autocorrelation in Regression Residuals by Example of Modeling Rail Freight Based on Time Series Data. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2016. No. 1. P. 141–147. (In Russian).
12. Noskov S. I., Bychkov Yu. A. Modification of the Continuous Form of the Maximum Consistency Method in Constructing Linear Regression. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2022.

- Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 5. С. 88–94. DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-88-95.
13. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 15.02.2023).
 14. Носков С. И. О методе смешанного оценивания параметров линейной регрессии // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2019. № 1. С. 41–45.
 15. Носков С. И., Перфильева К. С. Программа оценки точности прогноза по регрессионной модели при использовании четырех альтернативных методов идентификации ее параметров. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2022618046 от 28.04.2022. Заявка № 2022616576 от 12.04.2022 ; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения».
 16. Носков С. И., Бычков Ю. А. Программа оптимизации непрерывного критерия согласованности поведения при построении регрессионных моделей. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2022618082 от 28.04.2022. Заявка № 2022617381 от 19.04.2022 ; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения».
- No. 5. P. 88–94. DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-88-95. (In Russian).
 13. Federal State Statistics Service. URL: <https://rosstat.gov.ru> (accessed: 15.02.2023). (In Russian).
 14. Noskov S. I. About the Method of Mixed Estimation of Parameters of Linear Regression. Information Technology and Mathematical Modeling in the Management of Complex Systems. 2019. No. 1. P. 41–45. (In Russian).
 15. Noskov S. I., Perfilyeva K. S. The Program for Assessing the Accuracy of the Forecast for the Regression Model Using four Alternative Methods for Identifying Its Parameters. Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2022618046 Russian Federation of April 28, 2022. Claim No. 2022616576 of April 12, 2022 ; Applicant Irkutsk State Transport University. (In Russian).
 16. Noskov S. I., Bychkov Yu. A. The Program for Optimizing the Continuous Criterion for the Consistency of Behavior in the Construction of Regression Models : Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2022618082 Russian Federation of April 28, 2022. Claim No. 2022617381 of April 19, 2022 ; Applicant Irkutsk State Transport University. (In Russian).

Информация об авторах

С. И. Носков – доктор технических наук, профессор.
Ю. А. Бычков – аспирант.
К. С. Перфильева – аспирант.

Information about the authors

S. I. Noskov – Doctor of Sciences (Engineering), Professor.
Yu. A. Bychkov – Postgraduate.
K. S. Perfilyeva – Postgraduate.

Научная статья

УДК 004.45

DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-43-51

О РАЗРАБОТКЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ ИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ВУЗА В GOOGLE CALENDAR

Елена Олеговна Шершнева^{1✉}, Наталья Сергеевна Веремчук²,
Василий Сергеевич Тихомиров³

^{1, 2, 3} Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия

¹ helen_volf@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4893-3806>

² n-veremchuk@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2709-9755>

³ tihomirov.vasili@bk.ru

Аннотация. Представлено описание технологии интеграции данных о расписании с действующего веб-расширения информационной системы сопровождения учебного процесса вуза в Google Calendar. Создано программное обеспечение «Преобразователь расписания» с использованием высокоуровневого языка программирования С# в виде консольного и веб-приложения, в котором поддерживаются режимы выгрузки расписания на определенную неделю либо в диапазоне указываемых дат. В процессе реализации проведено исследование структуры ical-файлов, с помощью которых поддерживается импорт сведений в наиболее распространенные календари – Google Calendar и Яндекс Календарь. Созданное приложение может применяться для расширения функционала информационных систем сопровождения учебного процесса за счет возможностей выгрузки данных в удобный для пользователя формат.

Ключевые слова: информационная система, API, iCal, Google Calendar

Для цитирования: Шершнева Е. О., Веремчук Н. С., Тихомиров В. С. О разработке приложения для интеграции данных из информационной системы вуза в Google Calendar // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 43–51. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-43-51.

Original article

ON DEVELOPING AN APPLICATION FOR INTEGRATION OF DATA FROM A UNIVERSITY INFORMATION SYSTEM INTO GOOGLE CALENDAR

Elena O. Shershneva^{1✉}, Natalya S. Veremchuk², Vasily S. Tikhomirov³

^{1, 2, 3} The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

¹ helen_volf@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4893-3806>

² n-veremchuk@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2709-9755>

³ tihomirov.vasili@bk.ru

Abstract. The study describes a technology for integrating schedule data from a web-extension of the information system supporting the educational process into Google Calendar. Using the high-level programming language C#, the Schedule Transformer software was developed as a console and web-application that implements the function of uploading a week's schedule or that of a certain date range. A study of the structure of ical-files, which support data import in the most popular calendars (Google Calendar and Yandex Calendar), was conducted during implementation. The application can be used to broaden the functional possibilities of information systems aimed at supporting educational process via the ability to upload data in a user-friendly format.

Keywords: information system, API, iCal, Google Calendar

For citation: Shershneva E. O., Veremchuk N. S., Tikhomirov V. S. On Developing an Application for Integration of Data from a University Information System into Google Calendar. Proceedings in Cybernetics. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 43–51. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-43-51.

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы, согласно тренду на цифровизацию, в вузах активно разрабатываются и функционируют подсистемы поддержки образовательного процесса [1, 2]. Информационная система (ИС), как правило, охватывает все основные бизнес-процессы вуза и представляет собой совокупность программных комплексов, с помощью которых в зависимости от статуса пользователя накапливается, обрабатывается и отображается информация. ИС состоит из автоматизированных рабочих мест для сотрудников вуза и системы веб-приложений, которые доступны через интернет [3, 4].

Обычно структура портала вуза имеет открытую часть, доступную для всех посетителей, и закрытую – только для сотрудников вуза после соответствующей авторизации. К открытой части принадлежат порталы, сайты сотрудников, кафедр, факультетов, предназначенные для просмотра, поиска информации и обеспечения обратной связи, например, в виде сообщений или запросов. В закрытой части, доступ к которой осуществляется с помощью логина и пароля, сотрудник может анализировать информацию и осуществлять ввод данных в зависимости от статуса и обязанностей. Доступ для студентов к информации об успеваемости, расписании и прочее предоставляется, как правило, через личный кабинет также с помощью логина и пароля.

С учетом разделения полномочий и специфики задач пользователя ИС делятся на Windows- и веб-клиентов. Для первых программное обеспечение устанавливается на рабочих местах, для вторых доступ к ИС осуществляется через веб-интерфейс.

Среди пользователей ИС можно выделить следующие категории:

- сотрудники вуза, использующие ИС в соответствии с должностными обязанностями (Windows-клиенты);
- сотрудники вуза, использующие ИС для введения, изменения информации, формирования различных форм отчетности (веб-клиенты);
- студенты вуза (веб-клиенты);
- внешние пользователи (веб-клиенты).

Для реализации образовательной деятельности ИС вуза должна содержать комплекс

инструментальных средств, позволяющих преподавателям и сотрудникам предоставлять необходимые в профессиональной деятельности сведения и материалы, проводить аттестацию обучающихся и др. [5], а также обеспечивать студентов материалами, подготовленными в других программных средах, например, Moodle, для организации доступного и качественного обучения в смешанных форматах [6].

В закрытой части ИС доступна постоянно пополняемая нормативная база документов, на основе которых регламентируется деятельность вуза. В аналитической части ИС поддерживается функционал по подготовке отчетности.

Обычно часть необходимой информации отсутствует или информация представлена в неудобной для пользователя форме без возможности интеграции с другими приложениями, например, личным календарем с более широким функционалом [7, 8].

Анализ ИС сопровождения учебного процесса Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) показал отсутствие возможности для пользователя выгрузки данных о расписании в более удобный формат, сведений о занятиях в файлы, пригодные для импорта в популярные календари, взаимодействия студентов с ИС других университетов на сайте, т. е. личного кабинета студента.

По результатам проведенного анализа ИС, представлено описание технологии интеграции данных, содержащих информацию о расписании обучающихся, с действующего веб-расширения информационной системы вуза в Google Calendar. Создано программное обеспечение «Преобразователь расписания» с использованием высокоуровневого языка программирования C# в виде консольного и веб-приложения, в котором поддерживаются режимы выгрузки расписания на определенную неделю либо в диапазоне указываемых дат. В процессе реализации проведено исследование структуры ical-файлов, с помощью которых поддерживается импорт сведений в наиболее распространенные календари – Google Calendar и Яндекс Календарь. Созданное приложение может использоваться для расширения функционала ИС сопровождения

учебного процесса за счет возможностей загрузки данных в удобный для пользователя формат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для получения данных с сайта СибАДИ установлено, что при переходе на страницу с расписанием производится запрос к открытому API по URL: <https://umu.sibadi.org/api/>, точнее по ссылке <https://umu.sibadi.org/api/Rasp?idGroup=13410&sdate=2022-09-11>.

Запрос предполагает использование метода GET, а также конечной точки API – Rasp с параметрами idGroup, который принимает Id группы (на примере группы ПИБ-20Э2 Id группы имеет значение 13410) и sdate (текущая дата, начиная с которой будет получено расписание, в примере – sdate=2022-09-11). В результате запроса получен ответ в формате JSON со структурой, представленной на рис. 1.

```

1 - [{"data": {
2 -   "isCyclicalSchedule": false,
3 -   "rasp": [
4 -     {
5 -       "код": 13407940,
6 -       "дата": "2022-09-12T00:00:00",
7 -       "начало": "08-20",
8 -       "датаНачала": "2022-09-12T08:20:00",
9 -       "датаОкончания": "2022-09-12T09:50:00",
10 -      "конец": "09-50",
11 -      "деньНедели": 1,
12 -      "день_недели": "Понедельник",
13 -      "почта": "",
14 -      "день": "1 Понедельник",
15 -      "код_Семестра": 1,
16 -      "типНедели": 3,
17 -      "номерПодгруппы": 0,
18 -      "дисциплина": "лаб Разработка и интеграция мобильных приложений, п/г 2",
19 -      "преподаватель": "Шершнева Е.О.",
20 -      "аудитория": "2.456",
21 -      "учебныйГод": "2022-2023",
22 -      "группа": "ПИБ-20Э2",
23 -      "custom1": "Шершнева Е.О.\n2.456",
24 -      "часы": "08-20\n09-50",
25 -      "неделяНачала": -100,
26 -      "неделяОкончания": -100,
27 -      "замена": false,
28 -      "кодПреподавателя": 1179,
29 -      "кодГруппы": 13410,
30 -      "фиоПреподавателя": "Шершнева Е.О.",
31 -      "элементЦиклРасписания": false,
32 -      "тема": "",
33 -      "номерЗанятия": 1
34 -     }
35 -   ],
36 -   {
37 -     "код": 13407941,

```

Рис. 1. Структура ответа на запрос расписания от API

Примечание: скриншот авторов.

Для интеграции данных ИС в календарь потребуются свойства: датаНачала; датаОкончания; дисциплина; преподаватель; аудитория.

Параметры idGroup и sdate выбираются из запроса с использованием метода GET к API по URL: <https://umu.sibadi.org/api/rasp/GroupList?year=2022-2023>, который возвращает список групп за 2022–2023 учебный год. При формировании запросов в разрабатываемом

приложении для группы применяются свойства name и id.

Описание структуры файла ICal (.ics/.ical).

В наиболее распространенные сервисы Google Calendar и Яндекс Календарь возможен импорт файлов с расширениями .ics/.ical. Для реализации намеченных целей реализован экспорт данных расписания из ИС в эти форматы.

При экспорте для двух событий Event 1 и Event 2 файл .ics должен иметь соответствующую структуру, при этом указывают

название события, время и дату его начала и окончания (рис. 2).

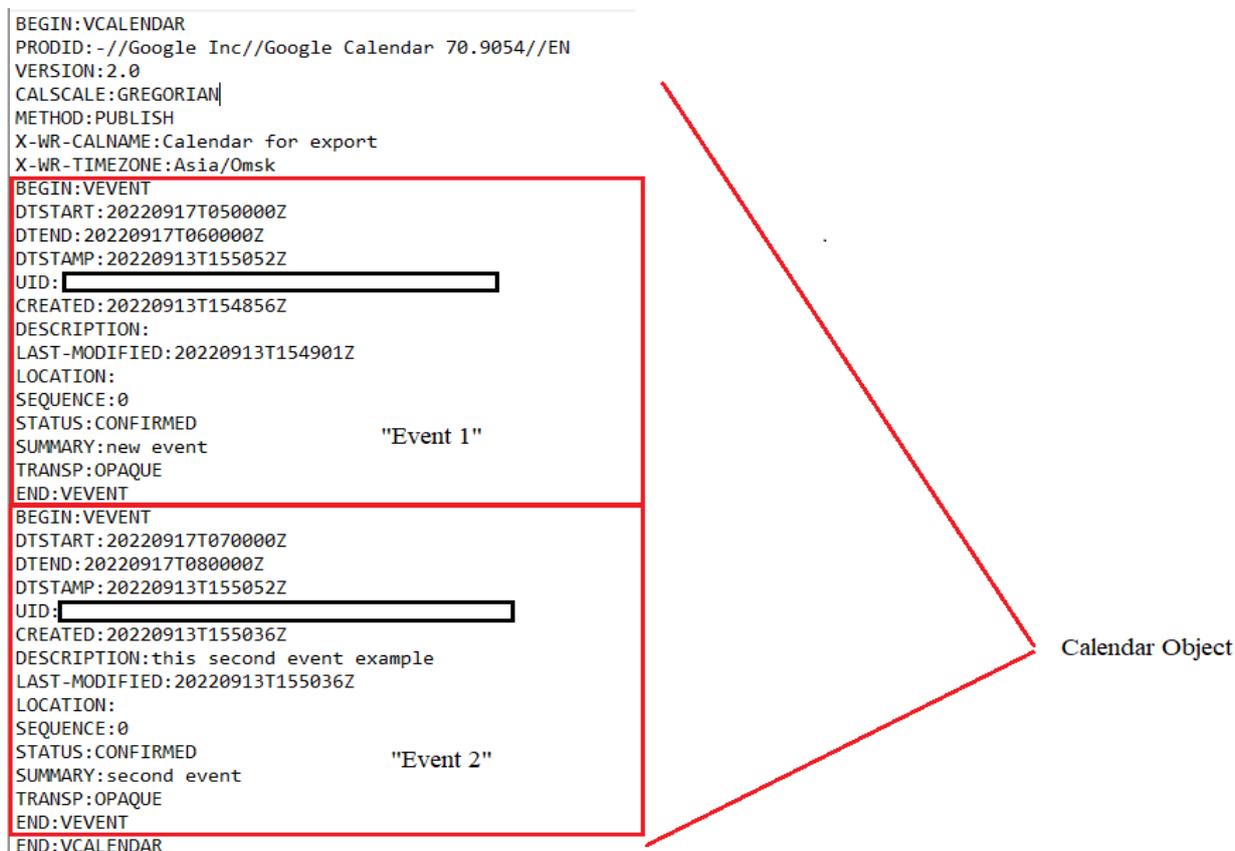


Рис. 2. Структура файла .ics из Google Calendar

Примечание: скриншот авторов.

В файле формата .ics можно выделить две основные части, связанные с характеристиками самого календаря и событий, представленных в нем.

1) Характеристика календаря:

- BEGIN:VCALENDAR – начало сущности в виде календаря;
- PRODID:-//GoogleInc//GoogleCalendar70.9054//EN/ – указание идентификатора продукта/программы, создавшей этот файл;
- VERSION:2.0 – значение версии календаря (должно быть 2.0);
- CALSCALE:GREGORIAN – тип календаря;
- METHOD:PUBLISH – PUBLISH используется для добавления календаря в один или несколько приложений календарей;
- X-WR-CALNAME:Calendar for export – название календаря;

- X-WR-TIMEZONE:Asia/Omsk – определение часового пояса.

2) Характеристика событий в календаре:

- BEGIN:VEVENT – начало сущности в виде события в календаре;
- DTSTART:20220917T050000Z – дата и время начала события;
- DTEND:20220917T060000Z – дата и время конца события;
- DTSTAMP:20220913T155052Z – дата и время, когда экземпляр события был создан;
- UID: – уникальный идентификатор для события;
- CREATED:20220913T154856Z – дата и время, когда информация в календаре была создана;
- DESCRIPTION: – описание события;
- LAST-MODIFIED:20220913T154901Z – дата и время последнего изменения;

- LOCATION: – месторасположение события;
- SEQUENCE:0 – свойство, которое увеличивается при изменениях (по умолчанию 0);
- STATUS:CONFIRMED – свойство, означающее, что событие определено;
- SUMMARY:new event – информация, которая выводится непосредственно в название события в календаре;
- TRANSP:OPAQUE – свойство отражает занят/свободен человек в момент этого события, по умолчанию OPAQUE – значит занят;
- END:VEVENT – окончание события.

При создании файла ICal с расписанием следует выбрать и заполнить соответствующие поля. Для календаря это:

- BEGIN:VCALENDAR;
- PRODID: ://Sibadi_ScheduleCreator;
- VERSION:2.0;
- CALSCALE:GREGORIAN;
- METHOD:PUBLISH;

- X-WR-TIMEZONE:Asia/Omsk.
Для событий это:
- BEGIN:VEVENT;
- DTSTART: Дата и время начала занятия;
- DTEND: Дата и время конца занятия;
- DTSTAMP: Дата и время когда было создано событие в приложении;
- SUMMARY: (название аудитории) Название пары;
- TRANSP:OPAQUE;
- END:VEVENT.

Проектирование приложения.

По результатам опроса студентов выявлено, что выгрузка расписания необходима, в основном, на текущую, следующую неделю или же в определенном диапазоне дат. С учетом этого в разработанном приложении реализован этот функционал. Информационная модель «Преобразователя расписания» представлена на рис. 3.

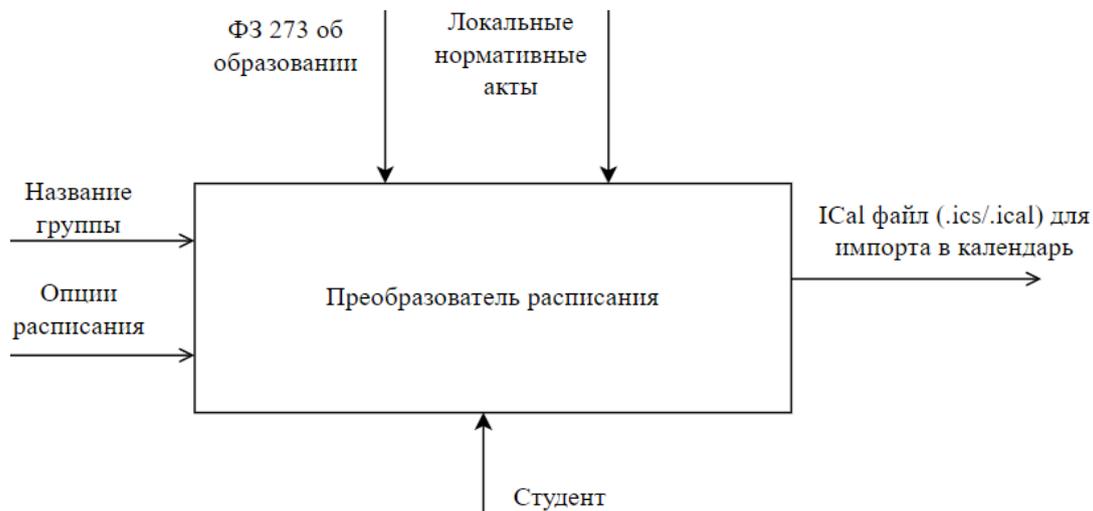


Рис. 3. Информационная модель «Преобразователя расписания»

Примечание: скриншот авторов.

Входные данные:

- название группы, например, ПИБ-20Э2 или СУЗ-19С1.
- опции расписания (в приложении предоставляется возможность выбора расписания на текущую неделю/следующую/из диапазона дат).

Выходные данные:

- файл ICal (.icv/.ical) для импорта в календарь.

Механизмы:

- студент.

Управление:

- ФЗ 273 «Об образовании в Российской Федерации»;
- Локальные нормативные акты.

Диаграмма активности, описывающая логику взаимодействия между студентом и приложением «Преобразователь расписания», представлена на рис. 4.

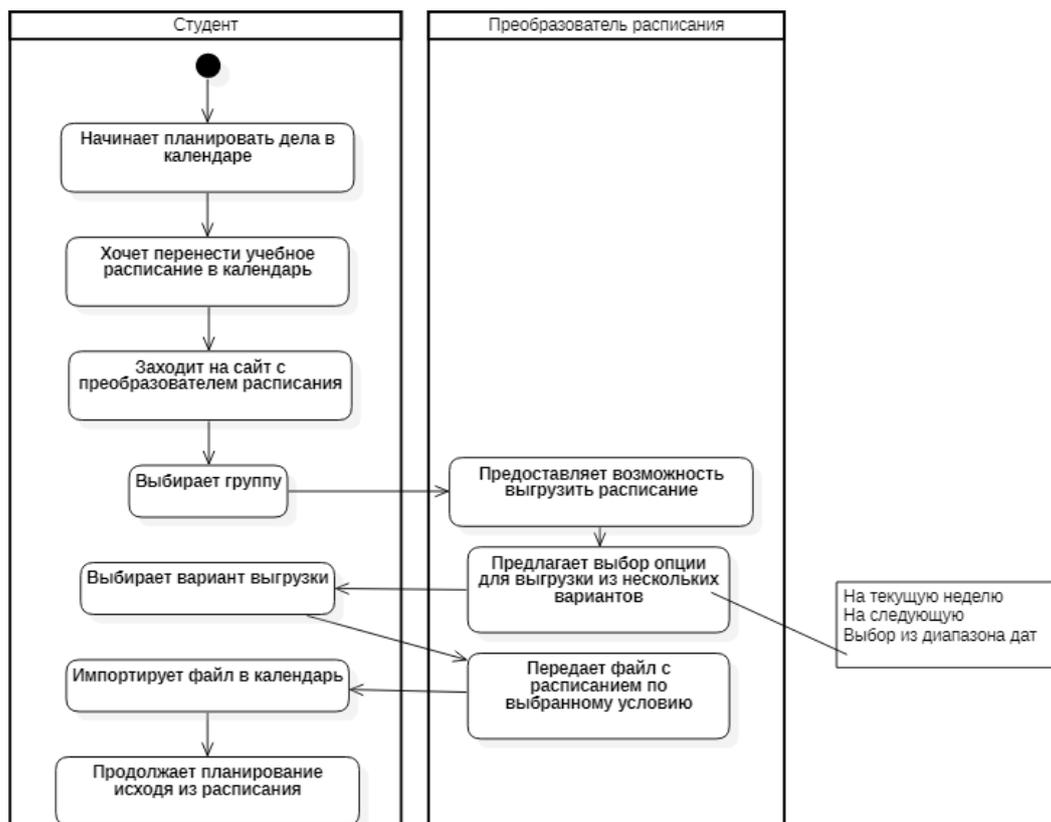


Рис. 4. Диаграмма активности
 Примечание: скриншот авторов.

Разработка приложения.

С учетом описания открытого API сайта с расписанием, структуры файлов для импорта в календари (.ics/.ical), информационной модели и диаграммы активности для разработки приложения принято решение об использовании высокоуровневого языка программирования C# [9, 10].

Созданное приложение содержит три части:

1. Библиотеку классов для работы и создания текста для формата файла ICal (ICalDotNet).
2. Библиотеку классов (сервисов) для преобразования ответа от API университета и ис-

пользования логики библиотеки ICalDotNet (ScheduleApplication).

3. Внешнюю оболочку (консольное приложение – ConsoleApp, а также веб-сайт WebApp).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим работу приложения на примере реализации с ConsoleApp. При первичном запуске приложения запрашивается название группы. На следующем этапе производится выбор опции для создания файла импорта, например, на текущую неделю (рис. 5).

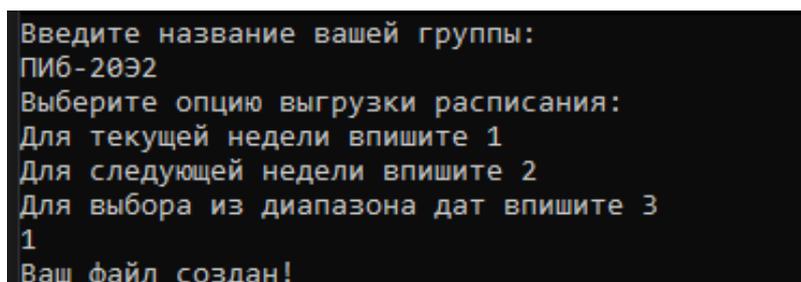


Рис. 5. Окно консольного приложения
 Примечание: скриншот авторов.

В результате формируется файл на рабочем столе в формате ICal, который может быть импортирован в календарь. Часть содержания файла для группы ПИБ-20Э2 на неделю с 19.09.2022 по 24.09.2022 представлена на рис. 6.

В Google Calendar после импорта расписание имеет вид, как показано на рис. 7.

Тестирование разработанного приложения осуществлялось с использованием сервисов Google Calendar и Яндекс Календарь.

```
BEGIN:VCALENDAR
PRODID: :-/Sibadi_ScheduleCreator
VERSION:2.0
BEGIN:VEVENT
DTSTAMP:20220922T213722Z
DTSTART:20220919T082000
DTEND:20220919T095000
SUMMARY:(2.456) лаб Проектирование информационных систем, п/г 1
END:VEVENT
BEGIN:VEVENT
DTSTAMP:20220922T213722Z
DTSTART:20220919T100000
DTEND:20220919T113000
SUMMARY:(2.451) лек Имитационное моделирование
END:VEVENT
```

Рис. 6. Содержание файла из приложения
Примечание: скриншот авторов.

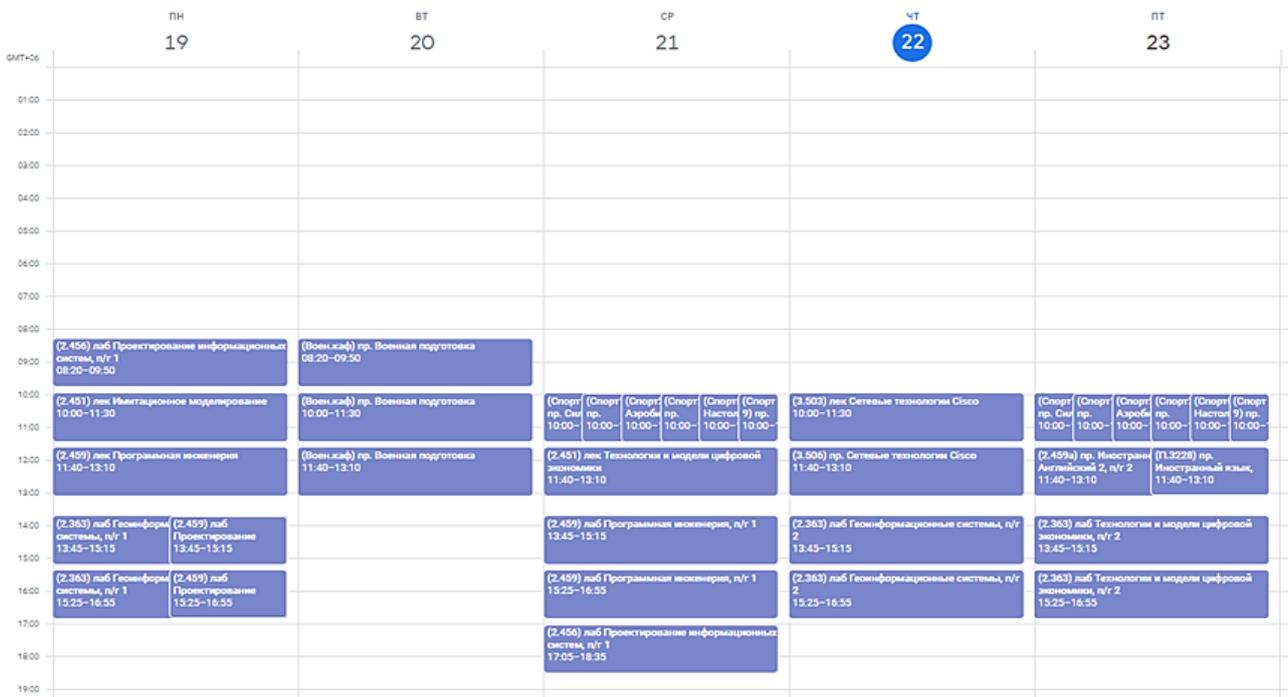


Рис. 7. Расписание в Google Calendar
Примечание: скриншот авторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология интеграции данных, содержащих информацию о расписании

обучающихся, с действующего веб-расширения информационной системы СИБАДИ в Google Calendar. Выполнено проектирова-

ние приложения. Создано программное обеспечение «Преобразователь расписания», в котором поддерживаются режимы выгрузки расписания на определенную неделю либо в диапазоне указываемых дат. При разработке программного обеспечения использовался высокоуровневый язык программирования C#. Программная реализация осуществлена в виде консольного и веб-приложения. В процессе реализации проведено исследование

структуры ical-файлов, с помощью которых поддерживается импорт сведений в наиболее распространенные календари. Экспериментально проверена интеграция данных с сервисами Google Calendar и Яндекс Календарь. Созданное приложение может использоваться для расширения функционала информационных систем сопровождения учебного процесса за счет возможностей выгрузки данных в удобный для пользователя формат.

Список источников

1. Буданцев Д. В. Цифровизация в сфере образования: обзор российских научных публикаций // Молодой ученый. 2020. № 27. С. 120–127.
2. Зенков А. Р. Цифровизация образования: направления, возможности, риски // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Проблемы высшего образования. 2020. № 1. С. 52–55.
3. Шакирьянов Э. Д., Чудинов В. В. Информационная система поддержки процесса разработки основных образовательных программ // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. 2019. № 4. С. 181–188.
4. Суходолова Е. М. Информационная система как основа эффективного управления вузом // Мир науки, культуры, образования. 2021. № 2. С. 353–356.
5. Mironova L. I., Alekhin V. N., Al-Mahfadi M. A. A. et al. Improving the University's Information and Educational Environment in the Context of the Country's Economy Digitalization. Russian Journal of Construction Science and Technology. 2021. Vol. 7, No. 1. P. 5–15.
6. Шефер О. Р., Лебедева Т. Н., Носова Л. С. Автоматизированная информационная система образования в вузе: состояние и перспективы // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2020. № 6. С. 27–32.
7. Барышева Е. Н., Дунаев В. В. Разработка функции экспорта расписания занятий вуза в международный формат данных icalendar // Вестник Самарского государственного университета. Экономика и управление. 2016. № 3. С. 102–107.
8. Донецков А. М. Вывод информации о расписании учебных занятий вуза в программе «Расписание» // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2010. Т. 6, № 1. С. 296–305.
9. Шилдт Г. C# 4.0: полное руководство / пер. с англ. М. : И. Д. Вильямс, 2020. 1056 с.
10. Каргин Н. С., Гурин Н. И. Извлечение основного содержимого из веб-страниц на основе анализа

References

1. Budantsev D. V. Digitalization in Education: A Review of Russian Scientific Publications. Molodoi uchenyi. 2020. No. 27. P. 120–127. (In Russian).
2. Zenkov A. R. Tsifrovizatsiia obrazovaniia: napravleniia, vozmozhnosti, riski. Proceedings of Voronezh State University. Series: Problems of Higher Education. 2020. No. 1. P. 52–55. (In Russian).
3. Shakiryaynov E. D., Chudinov V. V. Information System to Support the Development of the Main Professional Educational Programs. Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovanie, ekonomika. Serii: Ekonomika. 2019. No. 4. P. 181–188. (In Russian).
4. Sukhodolova E. M. Information System as the Basis for Effective University Management. Mir nauki, kultura, obrazovaniia. 2021. No. 2. P. 353–356. (In Russian).
5. Mironova L. I., Alekhin V. N., Al-Mahfadi M. A. A. et al. Improving the University's Information and Educational Environment in the Context of the Country's Economy Digitalization. Russian Journal of Construction Science and Technology. 2021. Vol. 7, No. 1. P. 5–15.
6. Shefer O. R., Lebedeva T. N., Nosova L. S. Automated Information System of Higher Education: Status and Prospects. Scientific and Technical Information Processing. 2020. No. 6. P. 27–32. (In Russian).
7. Barysheva E. N., Dunaev V. V. Development Export Function of a University Timetable According to the International Data Format Icalendar. Vestnik of Samara University. Economics and Management. 2016. No. 3. P. 102–107. (In Russian).
8. Donetskov A. M. Vyvod informatsii o raspisanii uchebnykh zaniatii vuza v programme "Raspisanie". Modern Information Technologies and IT-Education. 2010. Vol. 6, No. 1. P. 296–305. (In Russian).
9. Schildt G. C# 4.0: The Complete Reference. Trans. from English. Moscow : I. D. Williams, 2020. 1056 p. (In Russian).
10. Kargin N. S., Gurin N. I. Extracting the Main Content from Web Pages by Analysing the Visual Characteristics of the Elements and Converting to the JSON Format. Trudy BGTU. Serii: 3: Fiziko-matemati-

визуальных характеристик элементов и преобразования в JSON формат // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. 2021. № 1. С. 54–60.

cheskie nauki i informatika. 2021. No. 1. P. 54–60. (In Russian).

Информация об авторах

Е. О. Шершнева – кандидат технических наук, доцент.

Н. С. Веремчук – кандидат физико-математических наук, доцент.

В. С. Тихомиров – студент.

Information about the authors

E. O. Shershneva – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor.

N. S. Veremchuk – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor.

V. S. Tikhomirov – Student.

Научная статья
УДК 004.89:621.311
DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-52-58

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МАКСИМИЗАЦИИ ГЕНЕРИРУЕМОЙ МОЩНОСТИ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Екатерина Александровна Энгель^{1✉}, Никита Евгеньевич Энгель²

^{1, 2} Хакасский государственный университет имени Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия

¹ ekaterina.en@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3023-0195>

² nikita.en@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7216-6398>

Аннотация. Задача слежения за точкой глобальной максимальной мощности реконфигурируемой солнечной электростанции при частичном затенении сопряжена с глобальной оптимизацией. Традиционные алгоритмы отслеживания точки максимальной мощности не обеспечивают глобальный максимум мощности солнечной электростанции в режиме реального времени из-за медленного процесса сходимости. Модель максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции разработана в виде модифицированной нечеткой глубокой нейросети на основе модифицированного оптимизатора квантовых многомерных частиц роя, которая включает в себя: сверточный блок, рекуррентные нейросети и нечеткие блоки. Обработывая сигналы датчиков и изображения массива солнечных панелей, настроенная модифицированная нечеткая глубокая нейросеть генерирует опорное напряжение и матрицу электрических взаимосвязей массива солнечных панелей параллельно-последовательного соединения, максимизирующие его мощность при неоднородной инсоляции, демонстрируя следующие преимущества в сравнении с моделью реконфигурируемой солнечной электростанции на основе оптимизатора роя частиц: робастность, лучшую эффективность и скорость слежения.

Ключевые слова: слежение за точкой максимальной мощности, нечеткая нейронная сеть, реконфигурируемая солнечная электростанция

Благодарности: исследование выполнено в рамках мероприятия «Интеллектуальные системы прогнозирования и максимизации выработки электроэнергии на основе модифицированной нечеткой нейросети» программы деятельности НОЦ мирового уровня «Енисейская Сибирь».

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Хакасия в рамках научного проекта № 19-48-190003.

Для цитирования: Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Интеллектуальная модель максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 52–58. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-52-58.

Original article

INTELLIGENT MODEL FOR MAXIMIZING THE GENERATED POWER OF A RECONFIGURABLE SOLAR POWER PLANT

Ekaterina A. Engel^{1✉}, Nikita E. Engel²

^{1, 2} Katanov State University of Khakassia, Abakan, Russia

¹ ekaterina.en@gmail.com ✉, <http://orcid.org/0000-0002-3023-0195>

² nikita.en@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-7216-6398>

Abstract. The global maximum power point tracking of a solar power plant in partial shading demands a global optimization. Standard algorithms for tracking of maximum power point do not provide for a maximum global power of a solar power plant during real time mode due to low convergence. A model of maximizing the generated power of a reconfigurable solar power plant was developed as a modified fuzzy deep neural network based on the modified quantum-behaved particle swarm optimizer. This neural network consists of the following: convolutional units, recurrent neural networks, and fuzzy units. By processing the sensor signals and images of the solar array, the set modified fuzzy deep neural network generates a reference voltage and an electrical interconnection matrix of the parallel-serial solar array, maximizing its power under non-uniform insolation.

The neural network demonstrates such advantages as robustness, better efficiency, and tracking speed in comparison with the model of a reconfigurable solar power plant based on the particle swarm optimization.

Keywords: maximum power point tracking, fuzzy neural net, reconfigurable solar plant

Acknowledgments: the study was conducted in the framework of the event “Intelligent Systems for Forecasting and Maximizing Power Generation Based on the Modified Fuzzy Neural Network” within the program of the World-Class Research and Educational Center “Yenisey Siberia”.

Funding: the study was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the Republic of Khakassia in the framework of the research project No. 19-48-190003.

For citation: Engel E. A., Engel N. E. Intelligent Model for Maximizing the Generated Power of a Reconfigurable Solar Power Plant. *Proceedings in Cybernetics*. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 52–58. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-52-58.

ВВЕДЕНИЕ

Потеря мощности солнечной электростанции при частичном затенении может варьироваться от 10 до 70 % [1]. Интеллектуальные модели, в том числе максимизации вырабатываемой электроэнергии, актуальны в соответствии с приоритетным направлением развития науки, технологий и техники в РФ – «Энергетической стратегией на период до 2035 года» [2]. Одним из технических вариантов максимизации генерируемой мощности фотоэлектрической системы при частичном затенении является изменение электрического соединения массива солнечных панелей (МСП) [3, 4]. Задача слежения за точкой глобальной максимальной мощности (GMPP) реконфигурируемого МСП при частичном затенении сопряжена с глобальной оптимизацией. Таким образом, традиционные алгоритмы отслеживания точки максимальной мощности, например, возмущения и наблюдения, не обеспечивают GMPP. Глобальные оптимизаторы, например, роевых частиц, не обеспечивают GMPP в режиме реального времени из-за медленного процесса сходимости, в то время как интеллектуальные системы эффективно отслеживают GMPP [5, 6].

Модифицированы методы, представленные в работах [7, 8] для решения задачи максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции и разработана соответствующая модель в виде модифицированной нечеткой глубокой нейросети (МНГН), включающей: сверточный блок, рекуррентные нейросети и нечеткие блоки. МНГН настроена на основе модифицированного оптимизатора квантовых многомерных частиц

роя (МОКМЧР). На основе обработки сигналов датчиков и изображения МСП настроенная МНГН генерирует опорное напряжение и матрицу электрических взаимосвязей МСП параллельно-последовательного соединения, максимизирующие мощность МСП при неоднородной инсоляции. Результаты моделирования продемонстрировали следующие преимущества созданной интеллектуальной модели максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции: робастность, лучшую эффективность и скорость слежения в сравнении с моделью реконфигурируемой солнечной электростанции на основе оптимизатора роевых частиц.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Создана и верифицирована модель максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции в виде МНГН при частичном затенении (рис. 1). Солнечная электростанция, генерирующая максимум 20 кВт при инсоляции 1 000 Вт/м, состоит из 81 солнечной панели (рис. 2).

Оптимальная архитектура МНГН создана на основе МОКМЧР, имеющего следующую фитнес-функцию:

$$f(x) = \frac{\sum_{t=1}^H (P_{\max}^t - P^{X,t}) / P_{\max}^t}{H},$$

где P_{\max}^t – максимальная мощность МСП;

H – количество примеров;

$P^{X,t}$ – мощность, вырабатываемая реконфигурируемым МСП на основе МНГН с архитектурой X . Размерность частицы X была закодирована как $d = (d_{h_1}, d_{h_2}, d_{h_3}, d_{q_1}, d_{q_2}, d_{q_3}) \in$

$\in \{d_{\min} = (1, 1, 1, 1, 1), d_{\max} = (7, 7, 7, 3, 3, 3)\}$.
 Количество всех $d - 9$ 261.

МОКМЧР (критерии останова: $\{T, \varepsilon_C, \dots\}$; S – количество частиц) генерирует оптимальную архитектуру МНГН за пять шагов:

Шаг 1. For $\forall X \in \{1, S\}$ do:

Генерировать $d_{X,q}(1) = \text{abs}(N(0, 1)), d_{X,q}(t) = \text{abs}(N(0, 1))$ – текущая закодированная размерность позиции X .

Инициализация $\tilde{d}_X(0) = d_X(1), \tilde{d}_X(t)$ – лучшая закодированная размерность пространства для позиции X .

For $\forall d \in \{d_{\min}, d_{\max}\}$ do:

Генерация $x_X^d(1)$ методом Нгуена – Видроу $x_{X,j}^{d_X(t)}(t) \in (X_{\min}, X_{\max})$ – j -го компонента позиции частицы X (представляющего собой j -й параметр архитектуры МНГН $j \in [1, D(d_{h,q})]$, $D(d_{h,q}) = 8291 + (6634 + d_{q_1}) \times d_{h_1} + \sum_{j=2}^3 d_{h_j} \times (d_{q_j} + 6567)$) в закодированной размерности пространства $d_X(t)$.

Инициализация $y^d(t) = x_X^d(1), gbest^d(t) = x_X^d(1)$, где $gbest_j^d(t)$ – j -й компонент лучшего глобального положения роя в закодированной размерности пространства d . End For. End For.

Шаг 2. For $\forall t \in \{1, T\}$ do: For $\forall X \in \{1, S\}$ do:

If $f(x_X^{d_X(t)}(t)) < f(y_X^{d_X(t-1)}(t-1))$ then Do:

$$y_X^{d_X(t)}(t) = x_X^{d_X(t)}(t)$$

If $f(x_X^{d_X(t)}(t)) > f(y_X^{\tilde{d}_X(t-1)}(t-1))$ then $d_X(t) = d_X(t-1)$ else $d_X(t) = d_X(t)$ End If. else $y_X^{d_X(t)}(t) = y_X^{d_X(t)}(t-1)$ End If.

If $f(x_X^{d_X(t)}(t)) < \min(f(y_X^{d_X(t)}(t-1)), \min_{1 \leq p < X}(f(x_p^{d_X(t)}(t))))$ then Do: $g(d_X(t)) = X$, где $g(d)$ представляет собой индекс глобально лучшей частицы роя в закодированной размерности пространства $d_X(t)$.

If $f(x_X^{d_X(t)}(t)) < f(gbest^{dbest}(t-1))$ then $dbest = d_X(t)$, где $dbest$ – закодированная размерность пространства лучшего глобального положения роя

End If. End If.

В других закодированных размерностях пространства $\forall d \in \{d_{\min}, d_{\max}\} - d_X(t)$ do обновить $y_{X,j}^d(t) = y_{X,j}^d(t-1), gbest_j^d(t) = gbest_j^d(t-1)$. End For.

If $(I > IterNo$ OR $f(x_{g(d_X(t))}^{dbest}) < \varepsilon_C)$ then Stop. End If.

Шаг 3. $E = f(x_{g(d_X(t))}^{d_X(t)})$. While $(I < IterNo$ OR $E > \varepsilon_C)$ $\Delta W_I = [J_I^T J_I + \mu \times X]^{-1} J_I^T E$, J_I – матрица Якоби, μ – параметр обучаемости.

Шаг 4. Вычисление $W_I = W_I + \Delta W_I, x_{g(d_X(t))}^{d_X(t)}, E' = (f(x_{g(d_X(t))}^{d_X(t)}))$.

If $E' < E$ then $W_I = W_I + \Delta W_I; \mu = \mu\beta; E' = E$; Перейти к шагу 3 else $\mu = \mu/\beta$; Перейти к шагу 4 end If.

Шаг 5. For $\forall X \in \{1, S\}$ do: For $\forall j \in \{1, d_X(t)\}$ do: Генерировать u и k по нормальному закону распределения $U(0,1)$; γ и G имеют распределение Лапласа; if $k \geq 0,5$ then $\alpha = 2$ else $\alpha = 1$; β – коэффициент сжатия-расширения;

$$x_{X,j}^{d_X(t)}(t+1) = \frac{G \times y_{X,t}^{d_X(t)}(t) + \gamma \times gbest_j^{dbest}(t)}{G + \gamma} + (-1)^\alpha \beta \times \ln\left(\frac{1}{u}\right) \times \left| \frac{\sum_{i=1}^S y_{g(d),i}^{d_X(t)}(t)}{S} - x_{X,j}^{d_X(t)}(t) \right|$$

$$x_{X,j}^{d_X(t)}(t+1) \leftarrow \begin{cases} x_{X,j}^{d_X(t)}(t+1) & \text{if } X_{\min} \leq x_{X,j}^{d_X(t)}(t+1) \leq X_{\max} \\ U(X_{\min}, X_{\max}) & \text{else} \end{cases}$$

В других закодированных размерностях пространства $\forall d \in \{d_{\min}, d_{\max}\} - d_X(t)$ do обновить $x_{X,j}^d(t+1) = x_{X,j}^d(t)$. End For.

Вычислить:

$$d_{X,q}(t+1) = \frac{G \times d_{X,q}(t) + \gamma \times dbest}{G + \gamma} + (-1)^\alpha \beta \times \left| \frac{\sum_{i=1}^S \tilde{d}_{g(d),t}^d(t)}{S} - d_{X,q}(t) \right| \times \ln\left(\frac{1}{u}\right),$$

$$d_{X,q}(t+1) = \left. \begin{array}{l} d_{X,q}(t+1) \text{ if } D_{\min,q} \leq d_{X,q}(t+1) \leq D_{\max,q} \\ d_{X,q}(t) \text{ else} \end{array} \right\},$$

End For. End For.

МОКМЧР обеспечивает поиск роем квантовых частиц как позиционного (т. е. весовых коэффициентов МНГН) оптимума – *gbest*, так и его размерности – *dbest* (т. е. структуры МНГН: количество скрытых слоев и нейронов на них) с использованием разработанной иерархической кодировки размерности пространства частиц. МОКМЧР автоматически обеспечивает глобальное лучшее закодированное измерение *dbest* и создание в нем оптимальной архитектуры МНГН – *gbest*.

МНГН для решения задачи максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции создается на наборе данных вида:

$$Z^i = (x^i = (V^i, P^i, I^i); M^i; Ir^i; P_{\max}^i; V_{\max}^i; Im^i), \quad (1)$$

где V^i, P^i, I^i – текущие напряжение, мощность и сила тока МСП;

Ir_k – инсоляция;

Im^i – изображение МСП;

M^i – матрица электрических взаимосвязей МСП параллельно-последовательного соединения;

P_{\max}^i – максимальная мощность МСП;

V_{\max}^i – управляющий сигнал, обеспечивающий P_{\max}^i ;
 $i \in [1, 904]$.

Набор данных M, P_{\max}, V_{\max} был получен в результате оптимизации на основе роевых частиц реконфигурируемого МСП.

Параметры архитектуры МНГН (веса сверточного блока, количество скрытых нейронов рекуррентных нейросетей – $d_{h_i} \in [1, 7]$, их веса, количество временных задержек – $d_{q_j} \in [1, 3], j \in [1, 3]$) кодируются частицей X .

Разработана иерархическая кодировка размерности пространства положения частиц – $d = (d_{h_1}, d_{h_2}, d_{h_3}, d_{q_1}, d_{q_2}, d_{q_3}) \in \{d_{\min} = (1, 1, 1, 1, 1, 1), d_{\max} = (7, 7, 7, 3, 3, 3)\}$.

Модель максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции в виде МНГН в условиях частичного затенения создается за 4 шага:

Шаг 1. Сверточный блок $s^i = C(Im^i)$ последовательно соединяется с рекуррентной нейросетью $Y^i = y(C(Im^i))$. Im^i и M^i – входной и выходной сигнал соответственно.

Шаг 2. Сгенерированы нечеткие множества A_j : A_1 – режим малой реконфигурации, A_2 – режим большой реконфигурации с функциями принадлежности μ_j :

$$\mu_1(s_j) = \frac{\sum_{c=1, r=1}^{9,9} |Y_{c,r}^i - Y_{c,r}^{i-1}|}{81},$$

$$\mu_2(s^i) = 1 - \mu_1(s^i),$$

где $j = \overline{1...2}$.

Шаг 3. Оптимальная архитектура МНГН – *gbest*, включающей $y(C(Im^i))$ и рекуррентные нейросети $F_j(\mu_j(s^i), Y^i, x^i), j = \overline{1...2}$, создается в виде МОКМЧР на наборе данных вида (1).

Функционирование модели максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции в виде МНГН отражает рис. 1 и нечеткие правила:

$$\begin{aligned} \Pi_j : IF(Im^i, s^i) \text{ is } A_j \text{ THEN } u^i &= \\ &= F_j(\mu_j(s^i), Y^i, x^i), j = \overline{1...2}. \end{aligned}$$

Нейросеть $Y^i = y(C(Im^i))$ генерирует матрицу электрических взаимосвязей МСП параллельно-последовательного соединения и функции принадлежности μ . Функция $ind(\mu_j) = \{j | \forall k \neq j, \mu_j \geq \mu_k\}$ активирует z -й режим реконфигурации солнечной электростанции. МНГН $F_z(\mu_z(s^i), Y^i, x^i)$ выдает опорное напряжение u^i .

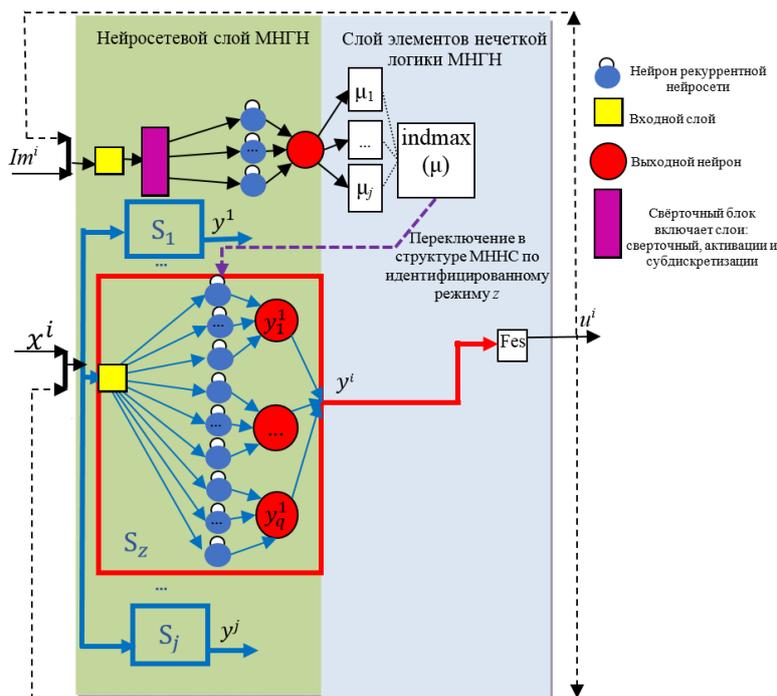


Рис. 1. Интеллектуальная модель максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе МОКМЧР на обучающей выборке вида (1) ($i \in [1, 903]$) сгенерирована оптимальная МНГН – $gbest$, закодированная размерность пространства которой – $D(dbest = d_{h=(5,5,5), q=(2,2,2)}) = 74\ 316$. $y(C(Im^i))$ содержит пять скрытых нейронов (2 временных задержки). $F_k(\mu_k(s), Y, x)$ содержит пять

скрытых нейронов (2 временных задержки), $j = \overline{1...2}$.

Результаты тестового моделирования максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции на основе МНГН отражают рис. 2–3 для примера $i = 904, t^i = (9:20am12/03/18...9:21am12/03/18)$.

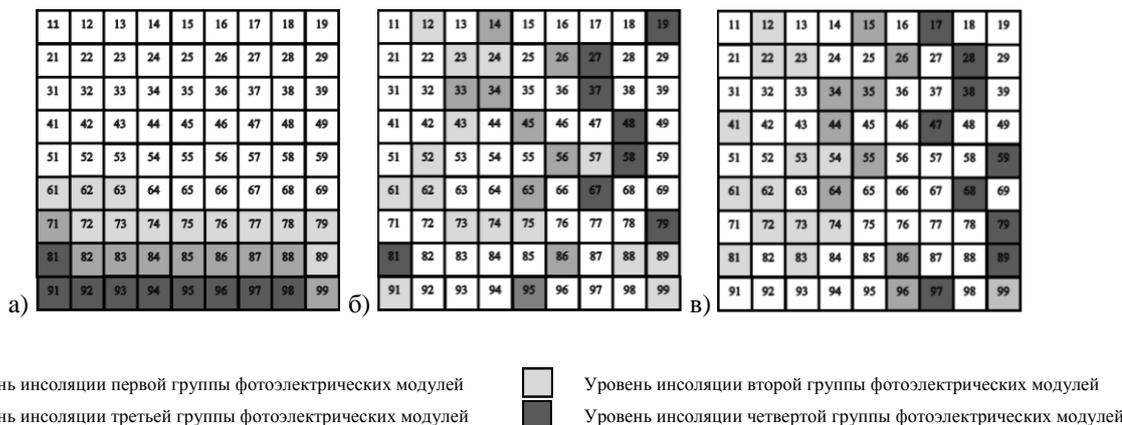


Рис. 2. Схема конфигурации, обеспечиваемая:

- а) массивом параллельно-последовательного соединения;
- б) интеллектуальной моделью максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции;
- в) моделью реконфигурируемой солнечной электростанции на основе оптимизатора роевых частиц

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Каждая солнечная панель остается в той же группе фотоэлектрических модулей (рис. 2), несмотря на динамику инсоляции этих групп в течение времени t^i для примера $i = 904$.

Разработанная интеллектуальная модель максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции более робастна и обеспечивает выработку большего количества энергии в сравнении с моделью реконфигурируемой солнечной

электростанции на основе оптимизатора роевых частиц (рис. 3). На рис. 3 видно, что модель реконфигурируемой солнечной электростанции на основе оптимизатора роевых частиц, в случае даже небольшой и плавной динамики частичного затенения, не обеспечивает GMPP, так как активирует процедуру инициализации при изменении инсоляции и не завершает процесс оптимизации в режиме реального времени.

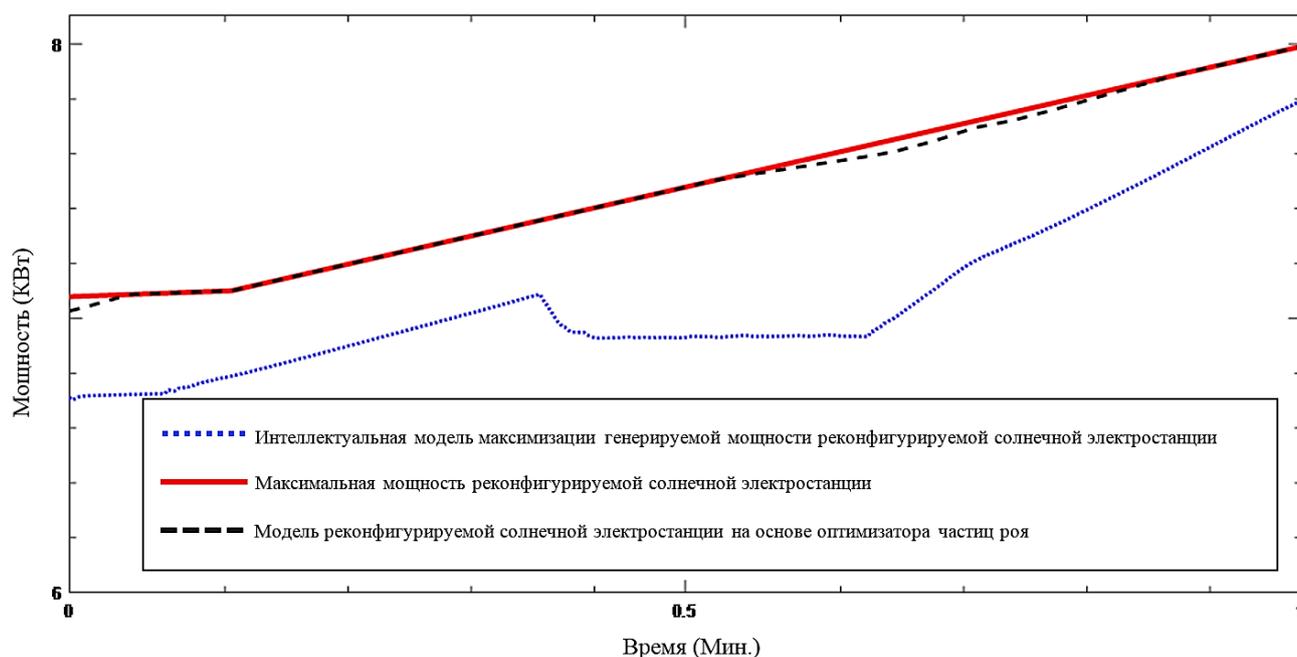


Рис. 3. Графики генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Результаты моделирования продемонстрировали следующие преимущества созданной интеллектуальной модели максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции: робастность, лучшую эффективность и скорость слежения в сравнении с моделью реконфигурируемой солнечной электростанции на основе оптимизатора роевых частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана модель максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции в виде модифицированной нечеткой глубокой нейросети, которая включает в себя: сверточный блок, рекуррентные сети и нечеткие блоки. Модифи-

цированная нечеткая глубокая нейросеть настроена на основе модифицированного оптимизатора квантовых многомерных частиц роя, обеспечивающего создание оптимальной архитектуры МНГН с использованием разработанной иерархической кодировки размерности пространства положения частиц. Обработывая сигналы датчиков и изображения МСП, настроенная модифицированная нечеткая глубокая нейросеть генерирует опорное напряжение и матрицу электрических взаимосвязей МСП параллельно-последовательного соединения, обеспечивающие глобальный максимум мощности при неоднородной инсоляции.

Результаты моделирования продемонстрировали следующие преимущества созданной

интеллектуальной модели максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции: робастность, лучшую эффективность и скорость слежения

в сравнении с моделью реконфигурируемой солнечной электростанции на основе оптимизатора частиц роя.

Список источников

1. Osmani K., Haddad A., Jaber H. et. al. Mitigating the Effects of Partial Shading on PV System's Performance through PV Array Reconfiguration: A Review. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022. Vol. 31. P. 101280.
2. Проект энергостратегии Российской Федерации на период до 2035 года // М-во энергетики Рос. Федерации : офиц. сайт. URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/1920/104837> (дата обращения: 15.11.2022).
3. Lakshika K. A. H., Boralessa M. A. K. S., Perera M. K. et. al. Reconfigurable Solar Photovoltaic Systems: A review. *Heliyon*. 2020. Vol. 6, No. 11. P. E05530.
4. Baka M., Manganiello P., Soudris D., Catthoor F. A Cost-Benefit Analysis for Reconfigurable PV Modules under Shading. *Solar Energy*. 2019. Vol. 178. P. 69–78.
5. Ajmal A. M., Ramachandaramurthy V. K., Tomar A. et. al. Optimal Dynamic Reconfiguration of Large-Scale PV Plant under Partial Shading Conditions Based on Two Reconfigurable Stages. *Int Trans Electr Energ Syst*. 2021. Vol. 31, No. 10. P. e12746.
6. Ibrahim S. A., Nasr A., Enany M. A. Maximum Power Point Tracking Using ANFIS for a Reconfigurable PV-Based Battery Charger under Non-Uniform Operating Conditions. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 114457–114467.
7. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Система слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрического массива на основе модифицированной нечеткой нейросети // *Вестник кибернетики*. 2019. № 3. С. 14–25.
8. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Интеллектуальная система слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрического массива // *Вестник Кибернетики*. 2020. № 4. С. 21–27.

Информация об авторах

Е. А. Энгель – кандидат технических наук, доцент.
Н. Е. Энгель – бакалавр.

References

1. Osmani K., Haddad A., Jaber H. et. al. Mitigating the Effects of Partial Shading on PV System's Performance through PV Array Reconfiguration: A Review. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022. Vol. 31. P. 101280.
2. Draft of the Energy Strategy in the Russian Federation up to 2035. Ministry of Energy of Russian Federation : official web-site. URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/1920/104837> (accessed: 15.11.2022). (In Russian).
3. Lakshika K. A. H., Boralessa M. A. K. S., Perera M. K. et. al. Reconfigurable Solar Photovoltaic Systems: A review. *Heliyon*. 2020. Vol. 6, No. 11. P. E05530.
4. Baka M., Manganiello P., Soudris D., Catthoor F. A Cost-Benefit Analysis for Reconfigurable PV Modules under Shading. *Solar Energy*. 2019. Vol. 178. P. 69–78.
5. Ajmal A. M., Ramachandaramurthy V. K., Tomar A. et. al. Optimal Dynamic Reconfiguration of Large-Scale PV Plant under Partial Shading Conditions Based on Two Reconfigurable Stages. *Int Trans Electr Energ Syst*. 2021. Vol. 31, No. 10. P. e12746.
6. Ibrahim S. A., Nasr A., Enany M. A. Maximum Power Point Tracking Using ANFIS for a Reconfigurable PV-Based Battery Charger under Non-Uniform Operating Conditions. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 114457–114467.
7. Engel E. A., Engel N. E. Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking System Based on Modified Fuzzy Neural Network. *Proceedings in Cybernetics*. 2019. No. 3. P. 14–25. (In Russian).
8. Engel E. A., Engel N. E. The Intelligent Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking System. *Proceedings in Cybernetics 2020*. No. 4. P. 21–27. (In Russian).

Information about the authors

E. A. Engel – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor.
N. E. Engel – Bachelor's Degree Student.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 519.6
DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-59-72

МЕТОДЫ МАСШТАБИРОВАНИЯ ЧИСЕЛ В МОДУЛЯРНОЙ АРИФМЕТИКЕ: ОБЗОР, РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ АЛГОРИТМОВ

Наталья Сергеевна Золотарева

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
zolotareva_ns@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9751-4232>

Аннотация. Представлено математическое описание двух методов масштабирования чисел в модулярной системе счисления: основанного на интервальной оценке и с использованием итерационного алгоритма масштабирования числа X коэффициентом K , включающего в себя этап расширения системы оснований и непосредственно этап масштабирования. Приведены примеры и представлены результаты работы алгоритмов программ, разработанных на языке Python, моделирующих выполнение алгоритмов на электронно-вычислительной машине. Выполнены оценки сложности алгоритмов для их сравнения и выявления оптимальных.

Ключевые слова: модулярная арифметика, немодульные операции, модульные операции, масштабирование чисел, расширение системы оснований, ранг числа

Для цитирования: Золотарева Н. С. Методы масштабирования чисел в модулярной арифметике: обзор, разработка и оценка сложности алгоритмов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 59–72. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-59-72.

Original article

NUMERAL SCALING METHODS IN MODULAR ARITHMETIC: REVIEW, DEVELOPMENT AND ESTIMATION OF THE ALGORITHMS COMPLEXITY

Natalya S. Zolotareva

Surgut State University, Surgut, Russia
zolotareva_ns@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9751-4232>

Abstract. The study describes two methods of numeral scaling in a modular number system: one which is based on the interval estimation and the other one which uses iterative algorithm of scaling number X by the coefficient K and includes both the stage of base system expansion and the scaling stage itself. The authors demonstrate the examples and results of algorithms operation provided by the programs developed via Python that simulate algorithms execution on a computer. Estimates of the algorithms complexity were defined in order to compare them and to detect the most appropriate ones.

Keywords: modular arithmetic, non-modular operations, modular operations, numeral scaling, base system expansion, number rank

For citation: Zolotareva N. S. Numeral Scaling Methods in Modular Arithmetic: Review, Development and Estimation of the Algorithms Complexity. Proceedings in Cybernetics. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 59–72. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-59-72.

ВВЕДЕНИЕ

Модулярная арифметика представляет средства для эффективного выполнения модульных операций сложения, вычитания и умножения целых чисел. Действия над числами можно

проводить независимо в параллельных каналах, операции выполняются одновременно, тем самым повышается скорость их выполнения. Однако существуют такие операции, как масштабирование чисел, расширение

системы оснований, вычисление ранга и др., которые препятствуют более широкому внедрению модулярной арифметики. Эта группа операций носит название немодульных операций. Немодульные операции, это операции, в которых необходимо знать информацию обо всем числе, и приходится восстанавливать позиционное представление числа [1–3].

Модулярная система счисления (МСС) характеризуется набором n взаимно простых модулей $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$. В модулярной арифметике любое целое положительное число X представимо как $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_i – наименьшие неотрицательные остатки от деления числа X на модули p_i , то есть $x_i = |X|_{p_i} = X \pmod{p_i}$, $i = 1, 2, \dots, n$. В рамках модулярной арифметики существует уникальное представление всех целых чисел в диапазоне $0 \leq X < P$, где $P = p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n$ – вычислительный диапазон МСС [4].

Если числа X, Y в МСС представимы в виде $X = (x_1, x_2, \dots, x_n), Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, то выполнение операций сложения, вычитания и умножения реализуется по формуле:

$$\begin{aligned} X * Y &= (x_1, x_2, \dots, x_n) * \\ & * (y_1, y_2, \dots, y_n) = ((x_1 * y_1) \pmod{p_1}, \\ & (x_2 * y_2) \pmod{p_2}, \dots, (x_n * y_n) \pmod{p_n}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $*$ обозначает одну из операций: сложение, вычитание или умножение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На первом этапе осуществлен анализ теоретических и практических разработок отечественных и зарубежных специалистов, связанных с выполнением операции масштабирования в МСС [5–9]. В работе приведено математическое описание и примеры расчета двух методов: метода с использованием интервальных оценок и метода с применением расширения системы оснований. Стоит отметить, что при рассмотрении первого метода дополнительно необходимо рассмотреть процедуру вычисления ранга числа [1, 10], а при рассмотрении второго метода используется операция расширения системы оснований [11, 12].

На втором этапе были разработаны программы на языке Python, моделирующие выполнение алгоритмов на ЭВМ. На третьем этапе произведено сравнение алгоритмов между собой с оценкой их сложности для выявления оптимальных.

Метод с использованием интервальных оценок.

Пусть МСС задана набором положительных попарно взаимно простых чисел p_1, p_2, \dots, p_n числом $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Пусть C_X – точное значение отношения $\frac{X}{P}$, где $P = p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n$ и представляет собой в общем случае правильную бесконечную дробь.

Определение: под интервальной позиционной характеристикой (ИПХ) модулярного числа X понимается замкнутый вещественный интервал $I_{\frac{X}{P}} = [S_{low}, S_{upp}]$, представленный парой направленно округленных чисел-границ, отвечающих условию $S_{low} \leq C_X \leq S_{upp}$ [1, 13].

Границы, задающие ИПХ, определяются с помощью направленных округлений: нижняя граница округляется до ближайшего машинного числа с недостатком, а верхняя – с избытком:

$$S_{low} = \nabla \sum_{i=1}^n (|x_i \times m_i|_{p_i} \nabla p_i), \quad (2)$$

где S_{low} – интервальная оценка суммы

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{|x_i \times m_i|_{p_i}}{p_i} \text{ с округлением «вниз»}.$$

$$S_{upp} = \Delta \sum_{i=1}^n (|x_i \times m_i|_{p_i} \Delta p_i), \quad (3)$$

где S_{upp} – интервальная оценка суммы

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{|x_i \times m_i|_{p_i}}{p_i} \text{ с округлением «вверх»}.$$

Символы ∇ и ∇ означают суммирование и деление с плавающей точкой, выполняемые округлением «вниз», аналогично Δ и Δ означают операции с округлением «вверх» [5].

ИПХ $I_{\frac{X}{P}}$ модулярного числа X позволяет единообразным способом учесть погрешность

округлений, неизбежно возникающие при сопоставлении точному значению $C_X = \frac{X}{P}$ представления с ограниченной разрядностью: C_X заключается в гарантированно содержащие это значение границы, направленно округленные до разрядности машинного представления [13].

Рассмотрим метод масштабирования с использованием интервальных оценок [5]. Данный метод масштабирует число X с коэффициентом K , взаимно простым с P . В результате возвращается частное $Y = \left\lfloor \frac{X}{K} \right\rfloor$, представленное остатками $y_i = |Y|_{p_i}$. В процессе вычислений используются только стандартные операции с плавающей точкой и целочисленные операции по модулям p_1, p_2, \dots, p_n и K . Заранее вычисляются следующие константы: $|P_i^{-1}|_{p_i}$, $|p_i|_K$, $|K^{-1}|_{p_i}$ для $i = 1, 2, \dots, n$, а также $|P|_K$ [5].

Для вычисления k дробные части S_{low} и S_{upp} отбрасываются:

$$k_{low} = [S_{low}], k_{upp} = [S_{upp}]. \quad (4)$$

При этом важны два случая:

1) $k_{low} = k_{upp}$ свидетельствует о том, что S_{low} и S_{upp} вычислены с достаточной точностью. Тогда $k = k_{low} = k_{upp}$.

2) $k_{low} \neq k_{upp}$ свидетельствует о том, что точность вычисления S_{low} и S_{upp} недостаточна для однозначного определения k . В этом случае вычисляется ранг $r(X)$ – характеристика, показывающая сколько раз диапазон системы превышен при переходе от представления X в МСС к его позиционному представлению. Ранг связан с искомым k следующим соотношением:

$$k = r(X) - \sum_{i=1}^n \left\lfloor \frac{x_i \times m_i}{p_i} \right\rfloor. \quad (5)$$

Вычисление ранга числа.

Если в МСС заданы два числа $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ с соответ-

ствующими рангами r_X и r_Y , то ранг r_{X+Y} суммы двух чисел $X+Y$ определяется по формуле [1]:

$$r_{X+Y} = r_X + r_Y - \sum_{i=1}^n \left\lfloor \frac{x_i + y_i}{p_i} \right\rfloor \times m_i. \quad (6)$$

Определим минимальные числа M_i :

$$\begin{aligned} M_1 &= (1, 1, \dots, 1), \\ M_2 &= (0, p_1, p_1, \dots, p_1), \\ M_3 &= (0, 0, p_1 \times p_2 \pmod{p_3}, \\ & p_1 \times p_2 \pmod{p_4}, \dots, p_1 \times p_2 \pmod{p_n}), \\ M_4 &= (0, 0, 0, p_1 \times p_2 \times p_3 \pmod{p_4}, \\ & p_1 \times p_2 \times p_3 \pmod{p_5}, \dots, \\ & p_1 \times p_2 \times p_3 \pmod{p_n}) \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (7)$$

Далее нужно определить ранги r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 минимальных чисел M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 по формуле:

$$X = \sum_{i=1}^n x_n \times B_i - r_X \times P. \quad (8)$$

Для этого нужно определить ортогональные базисы по формуле:

$$B_i = \frac{m_i \times P}{p_i} = m_i \times P_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

где m_i – целые положительные числа, которые называются весами базиса. Их определяют из сравнений:

$$P_i \times m_i \equiv 1 \pmod{p_i}. \quad (10)$$

$$P_i = \frac{P}{p_i}. \quad (11)$$

Далее к числу X нужно прибавить число M_i столько раз, сколько потребуется для того, чтобы цифра числа X по основанию p_i стала равной нулю. В результате получим число $(0, 0, 0, \dots, 0)$, равное P , ранг которого равен -1 . С другой стороны, расчетный ранг этого числа равен $r_X + \omega_n$, где ω_n – известная нам величина. Откуда вытекает, что:

$$r_x = -\omega_n - 1. \quad (12)$$

$$m_3 = (-1)^n \times F_{n-1} \times 1(\text{mod } p_3), \quad (14)$$

Если k известно, то искомый остаток $|X|_k$ вычисляется по формуле:

$$|X|_k = \left| \left(\sum_{i=1}^n |P_i|_k |x_i \times m_i|_k \right) - |k|P|_k \right|_k. \quad (13)$$

Пример 1. Пусть задана МСС $p_1 = 32765$, $p_2 = 32767$, $p_3 = 32768$, $p_4 = 32769$, $p_5 = 32771$ и число $X = (36, 4, 0, 4, 36)$. Мощность диапазона модулярной системы счисления равна $P = p_1 \times p_2 \times p_3 \times p_4 \times p_5 = 37778931511113441116160$. Необходимо промасштабировать коэффициентом $K = 33053$.

Для заданных модулей и коэффициента масштабирования заранее рассчитываются: $|P|_K = |37778931511113441116160 \times 33053|_K = 13863$.

Применяя формулу (11), вычислим P_i :

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{P}{p_1} = \frac{37778931511113441116160}{32765} = \\ &= 1153027056649273344, \\ P_2 &= \frac{P}{p_2} = \frac{37778931511113441116160}{32767} = \\ &= 1152956679314964480, \\ P_3 &= \frac{P}{p_3} = \frac{37778931511113441116160}{32768} = \\ &= 1152921493869428745, \\ P_4 &= \frac{P}{p_4} = \frac{37778931511113441116160}{32769} = \\ &= 1152886310571376640, \\ P_5 &= \frac{P}{p_5} = \frac{37778931511113441116160}{32771} = \\ &= 1152815950416936960. \end{aligned}$$

Веса базисов вычислим по формуле (10). Для нашего случая:

$$115292149386948745 \times m_3 \equiv 1(\text{mod } 32768).$$

Вычислить m_3 можно, применив метод цепных дробей. Приведем описание:

$$P_3 \times m_3 \equiv 1(\text{mod } p_3),$$

где $F_0 = q_0$, $F_1 = q_0 \times q_1 + 1$, ..., $F_n = q_n \times F_{n-1} + F_{n-2}$,

$$\begin{aligned} \frac{p_3}{P_3} &= \frac{32768}{1152921493869428745} = [q_0, q_1, \\ & q_2, q_3, q_4] = [0, 35184371761152, 3640, 1, 8], \\ & \frac{1}{35184371761152 + \frac{1}{3640 + \frac{1}{1 + \frac{1}{8}}}}. \end{aligned}$$

Поскольку последний элемент q_4 и индекс равен 4, то $n = 4$.

Тогда:

$$\begin{aligned} m_3 &= (-1)^n \times F_{n-1} \times 1(\text{mod } p_1) = (-1)^4 F_{4-1} \times \\ & \times 1(\text{mod } 32768) = 1 \times F_3 \times 1(\text{mod } 32768) = \\ & = 1 \times 3641 \times 1(\text{mod } 32768) = 3641, \\ F_3 &= q_3 \times F_{3-1} + F_{3-2} = q_3 \times F_3 + F_1 = \\ & = q_3(q_2(q_0 \times q_1 + 1) + q_0) + q_0 \times q_1 + 1 = \\ & = 1(35184371761152 + 1) + 0 + 0 \times \\ & \times 35184371761152 + 1 = 3641, \\ 1152921493869428745 \times m_3 &\equiv 3641(\text{mod } 32768), \\ m_3 &= 3641(\text{mod } 32768) = 3641. \end{aligned}$$

Аналогично вычислим m_1 , m_2 , m_4 , m_5 , получим:

$$m_1 = 9784, m_2 = 30719, m_4 = 2048, m_5 = 19344.$$

Определим ортогональные базисы по формуле (9):

$$\begin{aligned} B_1 &= m_1 \times P_1 = 9784 \times 1153027056649273344 = \\ & = 11281216722256490397696, \\ B_2 &= m_2 \times P_2 = 30719 \times 1152956679314964480 = \\ & = 3541767631876393861120, \\ B_3 &= m_3 \times P_3 = 3641 \times 1152921493869428745 = \\ & = 4197787159178590060545, \\ B_4 &= m_4 \times P_4 = 2048 \times 1152886310571376640 = \\ & = 2361111164050179358720, \\ B_5 &= m_5 \times P_5 = 19344 \times 1152815950416936960 = \\ & = 22300071744865228554240. \end{aligned}$$

Вычислим $|P_i|_K$:

$$\begin{aligned} |P_1|_K &= |1153027056649273344|_{33053} = 5380, \\ |P_2|_K &= |1152956679314964480|_{33053} = 9347, \\ |P_3|_K &= |1152921493869428745|_{33053} = 3697, \\ |P_4|_K &= |1152886310571376640|_{33053} = 28267, \\ |P_5|_K &= |1152815950416936960|_{33053} = 9714. \end{aligned}$$

Вычислим $|K^{-1}|_{p_i}$:

$$\begin{aligned} |K^{-1}|_{p_1} &= |33053^{-1}|_{32765} = 4892, \\ |K^{-1}|_{p_2} &= |33053^{-1}|_{32767} = 22112, \\ |K^{-1}|_{p_3} &= |33053^{-1}|_{32768} = 18741, \\ |K^{-1}|_{p_4} &= |33053^{-1}|_{32769} = 11423, \\ |K^{-1}|_{p_5} &= |33053^{-1}|_{32771} = 4997. \end{aligned}$$

Вычислим $c_i = |x_i \times m_i|_{p_i}$:

$$\begin{aligned} X &= (x_1, x_2, x_3, x_4) = (36, 4, 0, 4, 36), \\ c_1 &= |x_1 \times m_1|_{p_1} = |36 \times 9784|_{32765} = 24574, \\ c_2 &= |x_2 \times m_2|_{p_2} = |4 \times 30719|_{32767} = 24575, \\ c_3 &= |x_3 \times m_3|_{p_3} = |0 \times 3641|_{32768} = 0, \\ c_4 &= |x_4 \times m_4|_{p_4} = |4 \times 2048|_{32769} = 8192, \\ c_5 &= |x_5 \times m_5|_{p_5} = |36 \times 19344|_{32771} = 8193. \end{aligned}$$

Тогда, применяя формулу (4):

$$\begin{aligned} k_{low} &= [\nabla(24574 \nabla 32765 + 24575 \nabla 32767 + \\ &+ 0 \nabla 32768 + 8192 \nabla 32769 + 8193 \nabla 32771)] = \\ &= [\nabla(0, 75 + 0, 74 + 0 + 0, 24 + 0, 25)] = [\nabla 1, 98] = 1, \\ k_{upp} &= [\Delta(24574 \Delta 32765 + 24575 \Delta 32767 + \\ &+ 0 \Delta 32768 + 8192 \Delta 32769 + 8193 \Delta 32771)] = \\ &= [\Delta(0, 75 + 0, 75 + 0 + 0, 25 + 0, 25)] = [\Delta 2] = 2. \end{aligned}$$

Поскольку $k_{low} \neq k_{upp}$, это свидетельствует о том, что точность вычисления S_{low} и S_{upp} недостаточна для однозначного определения k . В этом случае вычисляется ранг $r(X)$ [5].

Вычислим минимальные числа M_i по формуле (7):

$$\begin{aligned} M_1 &= (1, 1, 1, 1, 1), \\ M_2 &= (0, 32765, 32765, 32765, 32765), \\ M_3 &= (0, 0, 32765 \times 32767 \pmod{32768}, \\ &32765 \times 32767 \pmod{32769}, \\ &32765 \times 32767 \pmod{32771}) = (0, 0, 3, 8, 24), \\ M_4 &= (0, 0, 0, 32765 \times 32767 \times 32768 \pmod{32769}, \\ &32765 \times 32767 \times 32768 \pmod{32771}) = \\ &= (0, 0, 0, 32761, 32699), \\ M_5 &= (0, 0, 0, 0, 32765 \times 32767 \times 32768 \times \\ &\times 32769 \pmod{32771}) = (0, 0, 0, 0, 144). \end{aligned}$$

Определим ранги r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 минимальных чисел M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 по формуле (8):

$$\begin{aligned} M_1 &= (1, 1, 1, 1, 1) = 1 \times B_1 + 1 \times B_2 + 1 \times B_3 + 1 \times B_4 + \\ &+ 1 \times B_5 = 1 \times 11281216722256490397696 + \\ &+ 1 \times 35417676231876393861120 + \\ &+ 1 \times 4197797159178590060545 + \\ &+ 1 \times 2361111164050179358720 + \\ &+ 1 \times 22300071744865228554240 = \\ &= 75557863022226882232321 \\ &\pmod{37778931511113441116160} = 1, \end{aligned}$$

тогда $1 = 75557863022226882232321 - r_1 \times 37778931511113441116160$, выражаем r_1 :

$$\begin{aligned} r_1 \times 37778931511113441116160 &= \\ &= 75557863022226882232320, \\ r_1 &= 2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= (0, 32765, 32765, 32765, 32765) = 0 \times B_1 + \\ &+ 32765 \times B_2 + 32765 \times B_3 + 32765 \times B_4 + \\ &+ 32765 \times B_5 = 0 \times 11281216722256490397696 + \\ &+ 32765 \times 35417676231876393861120 + \\ &+ 32765 \times 4197787159178590060545 + \\ &+ 32765 \times 2361111164050179358720 + \\ &+ 32765 \times 22300071744865228554240 = \\ &= (0 + 1160460161737430044859596800 + \\ &+ 7306618507205509213579673600) \pmod{P} = \\ &= 2106024316018529888461488125 \\ &\pmod{37778931511113441116160} = 32765, \end{aligned}$$

тогда $32765 = 2106024316018529888461488125 - r_2 \times 37778931511113441116160$, выражаем r_2 :

$$\begin{aligned} r_2 \times 37778931511113441116160 &= \\ &= 2106024316018529888461455360, \\ r_2 &= 55746. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_3 &= (0, 0, 3, 8, 24) = 0 \times B_1 + 0 \times B_2 + \\ &+ 3 \times B_3 + 8 \times B_4 + 24 \times B_5 = \\ &= 0 \times 11281216722256490397696 + \\ &+ 0 \times 35417676231876393861120 + \\ &+ 24 \times 22300071744865228554240 = \\ &= (0 + 0 + 12593361477535770181635 + \\ &+ 18888889312401434869760 + \\ &+ 535201721876765485301760) \bmod P = \\ &= 566683972666702690353155 \\ &(\bmod 37778931511113441116160) = \\ &= 1073610755, \end{aligned}$$

тогда $1073610755 = 566683972666702690353155 - r_3 \times 37778931511113441116160$, выражаем r_3 :

$$\begin{aligned} r_3 \times 37778931511113441116160 &= \\ &= 566683972666701616742400, \\ r_3 &= 15. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_4 &= (0, 0, 0, 32761, 32699) = 0 \times B_1 + 0 \times B_2 + \\ &+ 0 \times B_3 + 32761 \times B_4 + 32699 \times B_5 = \\ &= (0 \times 11281216722256490397696 + \\ &+ 0 \times 35417676231876393861120 + \\ &+ 0 \times 4197787159178590060545 + \\ &+ 32761 \times 2361111164050179358720 + \\ &+ 32699 \times 22300071744865228554240) \bmod P = \\ &= (0 + 0 + 0 + 77352362845447925971025920 + \\ &+ 729190045985348108495093760) \bmod P = \\ &= 806542408830796034466119680 \\ &(\bmod 37778931511113441116160) = \\ &= 35180077219840, \end{aligned}$$

тогда $35180077219840 = 806542408830796034466119680 - r_4 \times 37778931511113441116160$, выражаем r_4 :

$$\begin{aligned} r_4 \times 37778931511113441116160 &= \\ &= 806542408830760854388899840, \\ r_4 &= 21349. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_5 &= (0, 0, 0, 0, 144) = 0 \times B_1 + 0 \times B_2 + \\ &+ 0 \times B_3 + 0 \times B_4 + 144 \times B_5 = \\ &= (0 \times 11281216722256490397696 + \\ &+ 0 \times 35417676231876393861120 + \\ &+ 0 \times 4197787159178590060545 + \\ &+ 0 \times 2361111164050179358720 + \\ &+ 144 \times 22300071744865228554240) \bmod P = \\ &= (0 + 0 + 0 + 0 + 3211210331260592911810560) \\ &\bmod P = 3211210331260592911810560 \\ &(\bmod 37778931511113441116160) = \\ &= 1152815950416936960, \end{aligned}$$

тогда $1152815950416936960 = 3211210331260592911810560 - r_5 \times 37778931511113441116160$, выражаем r_5 :

$$\begin{aligned} r_5 \times 37778931511113441116160 &= \\ &= 3211209178444642494873600, \\ r_5 &= 85. \end{aligned}$$

Далее найдем ранг числа $X = (36, 4, 0, 4, 36)$. Проведем обнуление остатка $x_1 = 3$ по первому модулю $p_1 = 32765$.

Сложим число X с M_1 :

$$\begin{aligned} X + M_1 &= (36, 4, 0, 4, 36) + (1, 1, 1, 1, 1) = \\ &= (37, 5, 1, 5, 37). \end{aligned}$$

Ранг суммы определяется по формуле (6):

$$\begin{aligned} r &= (r_A + 2) - \left\{ \left[\frac{36+1}{32765} \right] \times 9784 + \right. \\ &+ \left[\frac{4+1}{32767} \right] \times 30719 + \left[\frac{0+1}{32768} \right] \times 3641 + \\ &+ \left. \left[\frac{4+1}{32769} \right] \times 2048 + \left[\frac{36+1}{32771} \right] \times 19344 \right\} = \\ &= (r_A + 2) - (37 \times 9784 + 5 \times 30719 + 1 \times 3641 + \\ &+ 5 \times 2048 + 19344 \times 37) = r_A + 2 - 1245212 = \\ &= r_A - 1245210. \end{aligned}$$

Так как остаток $x_1 = 3$ числа $(36, 4, 0, 4, 36)$ не обнулится, сложим два числа:

$$\begin{aligned} (37, 5, 1, 5, 37) + (1, 1, 1, 1, 1) &= \\ &= (38, 6, 2, 6, 38). \end{aligned}$$

Ранг суммы двух чисел определим следующим образом:

$$\begin{aligned} r &= (r_A + 2) + r_1 - \left\{ \left[\frac{37+1}{32765} \right] \times 9784 + \right. \\ &+ \left[\frac{5+1}{32767} \right] \times 30719 + \left[\frac{1+1}{32768} \right] \times 3641 + \\ &+ \left. \left[\frac{5+1}{32769} \right] \times 2048 + \left[\frac{37+1}{32771} \right] \times 19344 \right\} = \\ &= r_A + 2 - 1245210 - (38 \times 9784 + 6 \times 30719 + \\ &+ 2 \times 3641 + 6 \times 2048 + 19344 \times 38) = \\ &= r_A + 2 - 1245210 - 1310748 = r_A - 2555956. \end{aligned}$$

Аналогично, продолжая обнуление остатка $x_1 = 3$, в конечном итоге получим число $(0, 32733, 32729, 32733, 32765)$, $r = r_A + 55674$.

Обнуление остатка $x_2 = 4$ по второму модулю $p_2 = 32767$ числа $(0, 32733, 32729, 32733, 32765)$.

Сложим два числа:

$$\begin{aligned} &(0, 32733, 32729, 32733, 32765) + M_2 = \\ &= (0, 32733, 32729, 32733, 32765) + \\ &+ (0, 32765, 32765, 32765, 32765) = \\ &= (0, 32731, 32726, 32739, 32759). \end{aligned}$$

Ранг суммы двух чисел определим следующим образом:

$$\begin{aligned} r &= (r_A + 55674) + 55746 - \left\{ \left[\frac{0+0}{32765} \right] \times 9784 + \right. \\ &+ \left[\frac{32733+32765}{32767} \right] \times 30719 + \\ &+ \left[\frac{32729+32765}{32768} \right] \times 3641 + \\ &+ \left[\frac{32733+32765}{32769} \right] \times 2048 + \\ &+ \left. \left[\frac{32765+32765}{32771} \right] \times 19344 \right\} = (r_A + 55674) + \\ &+ 55746 - (0 \times 9784 + 32731 \times 30719 + \\ &+ 32726 \times 3641 + 32729 \times 2048 + 32759 \times 19344) = \\ &= (r_A + 55674) + 55746 - 1825338043 = \\ &= r_A - 1825226623. \end{aligned}$$

Аналогично, продолжая обнуление остатка $x_2 = 4$, в конечном итоге получим число $(0, 0, 15, 40, 120)$, $r = r_A + 39$.

В конечном итоге необходимо провести обнуление всех остатков числа X .

Для остатка $x_3 = 0$ получим число $(0, 0, 0, 32761, 32699)$, $r = r_A + 21313$.

Для остатка $x_4 = 4$ получим число $(0, 0, 0, 0, 144)$, $r = r_A + 49$.

Для остатка $x_5 = 36$ получим число $(0, 0, 0, 0, 0)$, $r = r_A - 37$.

Применяя формулу (12), получим:

$$\begin{aligned} r_A - 37 &= -1, \\ r_A &= 36. \end{aligned}$$

Ранг связан с искомым k следующим соотношением (5):

$$\begin{aligned} k &= 36 - \left(\left[\frac{36 \times 9784}{32765} \right] + \left[\frac{4 \times 30719}{32767} \right] + \right. \\ &+ \left. \left[\frac{0 \times 3641}{32768} \right] + \left[\frac{4 \times 2048}{32769} \right] + \left[\frac{36 \times 19344}{32771} \right] \right) = \\ &= 36 - ([10, 75 + 3, 74 + 0 + 0, 24 + 21, 25]) = \\ &= 36 - 34 = 2. \end{aligned}$$

Следовательно, $k = 2$. Найдем $|X|_K$ по формуле (13):

$$\begin{aligned} |X|_K &= \left\| 5380 \times 24574 \right\|_{33053} + \\ &+ \left\| 9347 \times 24575 \right\|_{33053} + \left\| 3697 \times 0 \right\|_{33053} + \\ &+ \left\| 28267 \times 8192 \right\|_{33053} + \left\| 9714 \times 8193 \right\|_{33053} - \\ &- \left\| 2 \left\| 37778931511113441116160 \right\|_{33053} \right\|_{33053} \Big|_{33053} = \\ &= \left\| 29173 + 17228 + 0 + 26999 + 28231 - 8102 \right\|_{33053} = \\ &= \left\| 93529 \right\|_{33053} = 27423. \end{aligned}$$

Вычислим масштабированные остатки y_i в соответствии с формулой (15):

$$y_i = \left\| x_i - |X|_K \Big|_{p_i} \times |K^{-1}| \Big|_{p_i} \right\|_{p_i}. \quad (15)$$

$$y_1 = \left\| 36 - 27423 \right\|_{32765} \times \left\| 4892 \right\|_{32765} = 31646,$$

$$y_2 = \left\| 4 - 27423 \right\|_{32767} \times \left\| 22112 \right\|_{32767} = 31640,$$

$$y_3 = \left\| 0 - 27423 \right\|_{32768} \times 18741 \Big|_{32768} = 31637,$$

$$y_4 = \left\| 4 - 27423 \right\|_{32769} \times 11423 \Big|_{32769} = 31634,$$

$$y_5 = \left\| 36 - 27423 \right\|_{32771} \times 4997 \Big|_{32771} = 31628,$$

Таким образом, $Y = (31646, 31640, 31637, 31634, 31628) = 129941 = \left[\frac{4294967296}{33053} \right]$.

Метод с применением расширения системы оснований.

Для того, чтобы воспользоваться вторым методом, необходимо рассмотреть немодульную операцию расширения системы оснований [11, 12].

Задачу расширения системы оснований можно сформулировать следующим образом: найти остаточное представление числа по новому основанию (новым основаниям), если известно представление числа по другим основаниям, то есть найти остаток от деления на число, если известны остатки от деления на другие числа [14, 15].

Одним из путей решения поставленной задачи является перевод числа из МСС в обобщенную позиционную систему счисления (ОПСС) с дополнительным финальным шагом.

Расширение системы оснований с помощью характеристик ОПСС.

Пусть МСС состоит из оснований p_1, p_2, \dots, p_n . Объем диапазона этой системы будет равен $P = p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n$. Добавим к числу оснований МСС новое основание $p_{(n+1)}$. Объем диапазона этой системы равен $\rho = p_1 \times p_2 \times \dots \times p_{(n+1)}$. Тогда любое число X из диапазона $[0; \rho)$ в ОПСС представимо в виде [15]:

$$X = a_{n+1} \times p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n + a_n \times p_1 \times p_2 \times \dots \times p_{n-1} + \dots + a_3 \times p_1 \times p_2 + a_2 \times p_1 + a_1.$$

Если число X будет лежать в первоначальном диапазоне $[0; P)$, то в ОПСС цифра $a_{(n+1)} = 0$. Этот факт и используется для получения остатка от деления числа X на новое основание МСС $p_{(n+1)}$.

Пусть число X имело представление $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ по основаниям p_1, p_2, \dots, p_n . Добавим новое основание $p_{(n+1)}$, тогда число $x = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, |x|_{p_{n+1}})$ в системе осно-

ваний $p_1, p_2, \dots, p_n, p_{(n+1)}$, где $|x|_{p_{n+1}}$ – остаток от деления числа x на p_{n+1} , то есть искомая цифра по новому основанию.

Для определения этой цифры рассматриваем алгоритм перевода числа из МСС в ОПСС, включая проводимые операции неизвестную цифру $|x|_{p_{n+1}}$. При этом последовательно будем получать цифры ОПСС a_1, a_2, \dots, a_n и выражения для цифры $a_{(n+1)}$. Но так как по предположению число $X \in [0; P)$, то цифра $a_{(n+1)} = 0$. Из полученного соотношения и определяем искомую цифру $|x|_{p_{n+1}}$ [16].

Вернемся к операции масштабирования чисел с применением расширения системы оснований. Масштабирование модулярных чисел выполняется на основании общего алгоритма масштабирования: пусть K – коэффициент масштабирования; Y – результат масштабирования числа X коэффициентом K ; тогда результат масштабирования вычисляется по формуле:

$$Y = \frac{X - |X|_K}{K}, \tag{16}$$

где $|X|_K$ – остаток от деления числа X по модулю K [15].

Для случая масштабирования модулярных чисел коэффициентом, взаимно простым с основаниями МСС, используется итерационный алгоритм на основе алгоритма, предложенного сингапурскими и австралийскими учеными [7–9].

1. Определение $|X|_K$, или так называемый этап расширения системы оснований, – получение остатка $|x|_{p_{n+1}}$ от деления числа, представленного в МСС остатками x_1, x_2, \dots, x_n по модулям p_1, p_2, \dots, p_n , на число $p_{(n+1)} = K$.

2. Непосредственно масштабирование по каждому модулю выполняется по формуле (15):

$$y_i = \left\| x_i - |X|_{K|_{p_i}} \times |K^{-1}|_{p_i} \right\|_{p_i},$$

где $|K^{-1}|_{p_i}$ – мультипликативная инверсия по модулю p_i коэффициента K [9].

Пример 2. Пусть задана МСС $p_1 = 32765$, $p_2 = 32767$, $p_3 = 32768$, $p_4 = 32769$, $p_5 = 32771$ и число $X = (36, 4, 0, 4, 36)$. Мощность диапазона модулярной системы счисления равна $P = p_1 \times p_2 \times p_3 \times p_4 \times p_5 = 37778931511113441116160$. Необходимо промасштабировать коэффициентом $K = 33053$.

На первом этапе расширим систему оснований $p_1 = 32765$, $p_2 = 32767$, $p_3 = 32768$, $p_4 = 32769$, $p_5 = 32771$ числом $p_{(n+1)} = K = 33053$. Тогда число X в расширенной системе оснований будет иметь вид $X = (36, 4, 0, 4, 36, |x|_{33053})$.

Предварительно необходимо вычислить константы t_{kj} , используя формулу:

$$t_{kj} = \left| \frac{1}{pk} \right|_{p_j}, \quad (17)$$

$$t_{12} = \left| \frac{1}{p_1} \right|_{p_2} = \left| \frac{1}{32765} \right|_{32767} = 16383.$$

Опишем как вычислить $\left| \frac{1}{32765} \right|_{32767}$. Эта запись равносильна $\frac{1}{32765} \pmod{32767}$. Введем следующее обозначение:

$$\frac{1}{p_1} = x, \\ p_1 \times x \equiv 1 \pmod{p_2}.$$

То есть $p_1 \times x - 1 : m$.

Тогда:

$$\frac{1}{32765} = x.$$

Вычислим сравнение:

$$32765 \times x \equiv 1 \pmod{32767}.$$

Здесь можно воспользоваться алгоритмом цепных дробей.

$$1 + \frac{1}{16382 + \frac{1}{2}},$$

$$\frac{32767}{32765} = [q_0, q_1, q_2] = [1, 16382, 2], \\ n = 2, \text{ так как } q_2 \text{ последний элемент,}$$

$$x = (-1)^n \times F_{n-1} \times 1 \pmod{p_2} = \\ = (-1)^2 \times F_{2-1} \times 1 \pmod{32767} = \\ = 1 \times F_1 \times 1 \pmod{32767} = 16383 \pmod{32767} = \\ = 16383,$$

$$F_1 = q_0 \times q_1 + 1 = 1 \times 16382 + 1 = 16383.$$

Вернемся к нашему сравнению:

$$32765 \times x \equiv 1 \pmod{32767}.$$

Подставим $x = 16383$:

$$32765 \times 16383 \equiv 1 \pmod{32767}, \\ 536788995 \equiv 1 \pmod{32767}.$$

Действительно, $536788995 - 1 : 32767$.

То есть:

$$t_{12} = \left| \frac{1}{p_1} \right|_{p_2} = \left| \frac{1}{32765} \right|_{32767} = 16383.$$

Далее аналогично находим остальные константы t_{kj} .

$$t_{12} = \left| \frac{1}{32765} \right|_{32767} = 16383; t_{13} = \left| \frac{1}{32765} \right|_{32768} = 21845;$$

$$t_{14} = \left| \frac{1}{32765} \right|_{32769} = 8192; t_{15} = \left| \frac{1}{32765} \right|_{32771} = 27309;$$

$$t_{16} = \left| \frac{1}{32765} \right|_{33053} = 28118; t_{23} = \left| \frac{1}{32767} \right|_{32768} = 32767;$$

$$t_{24} = \left| \frac{1}{32767} \right|_{32769} = 16384; t_{25} = \left| \frac{1}{32767} \right|_{32771} = 24578;$$

$$t_{26} = \left| \frac{1}{32767} \right|_{33053} = 10748; t_{34} = \left| \frac{1}{32768} \right|_{32769} = 16384;$$

$$t_{35} = \left| \frac{1}{32768} \right|_{32771} = 21847; t_{36} = \left| \frac{1}{32768} \right|_{33053} = 14149;$$

$$t_{45} = \left| \frac{1}{32769} \right|_{32771} = 16385; t_{46} = \left| \frac{1}{32769} \right|_{33053} = 21531;$$

$$t_{56} = \left| \frac{1}{32771} \right|_{33053} = 28013.$$

Константы t_{kj} запишем в виде матрицы $k \times j$:

$$\begin{pmatrix} 0 & 16383 & 21845 & 8192 & 27309 & 28118 \\ 0 & 0 & 32767 & 16384 & 24578 & 10748 \\ 0 & 0 & 0 & 16384 & 21847 & 14149 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 16385 & 21531 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 28013 \end{pmatrix}.$$

Далее найдем $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ по формулам (18):

$$\begin{aligned} a_1 &\equiv \alpha_1 \pmod{p_1}, \\ a_2 &\equiv (\alpha_2 - a_1) \times t_{12} \pmod{p_2}, \\ a_3 &\equiv ((\alpha_3 - a_1) \times t_{13} - a_2) \times t_{23} \pmod{p_3}, \\ &\vdots \\ a_n &\equiv (((\dots((\alpha_n - a_1) \times t_{1n} - a_2) - \dots - a_{n-1}) \times t_{n-1n} \pmod{p_n}). \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} X &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, |x|_{p_{n+1}}) = \\ &= (36, 4, 0, 4, 36, |x|_{33053}), \end{aligned}$$

$$p_1 = 32765, p_2 = 32767, p_3 = 32768, p_4 = 32769, \\ p_5 = 32771, p_6 = 33053.$$

$$\begin{aligned} a_1 &\equiv \alpha_1 \pmod{p_1} = 36 \pmod{32765} = 36, \\ a_2 &\equiv (\alpha_2 - a_1) \times t_{12} \pmod{p_2} = (4 - 36) \times \\ &\times 16383 \pmod{32767} = -524256 \pmod{32767} = 16, \\ a_3 &\equiv ((\alpha_3 - a_1) \times t_{13} - a_2) \times t_{23} \pmod{p_3} = \\ &= ((0 - 36) \times 21845 - 16) \times 32767 \pmod{32768} = \\ &= -25769148412 \pmod{32768} = 4, \\ a_4 &\equiv (((\alpha_4 - a_1) \times t_{14} - a_2) \times t_{24}) - a_3) \times t_{34} \pmod{p_4} = \\ &= (((4 - 36) \times 8192 - 16) \times 16384 - 4) \times \\ &\times 16384 \pmod{32769} = -70373039210496 \\ &\pmod{32769} = 0, \\ a_5 &\equiv (((((\alpha_5 - a_1) \times t_{15} - a_2) \times t_{25}) - a_3) \times t_{35}) - a_4) \times \\ &\times t_{45} \pmod{p_5} = (((36 - 36) \times 27309 - 16) \times \\ &\times 24578 - 4) \times 21847 - 0) \times 16385 \pmod{32771} = \\ &= -140769703034940 \pmod{32771} = 0. \end{aligned}$$

Запишем результат в виде табл. 1.

Таблица 1

Промежуточные вычисления расширения системы оснований

Действия	Модули						Цифры ОПСС
	$p_1 = 32765$	$p_2 = 32767$	$p_3 = 32768$	$p_4 = 32769$	$p_5 = 32771$	$p_6 = 33053$	
$x - a_1$	36 36	4 36	0 36	4 36	36 36	$ x _{33053}$ 36	$a_1 = 36$
$x - a_1 \times t_{1j}$	0	32735 16383	32732 21845	32737 8192	0 27309	$ x _{33053} - 36$ 28118	
$x_1 - a_2$		16 16	12 16	8 16	0 16	$28118 x _{33053} +$ $+ 12395$ 16	$a_2 = 16$
$x_1 - a_2 \times t_{2j}$		0	32764 32767	32761 16384	32755 24578	$28118 x _{33053} +$ $+ 12379$ 10748	
$x_2 - a_3$			4 4	4 4	4 4	$8685 x _{33053} +$ $+ 11167$ 4	$a_3 = 4$
$x_2 - a_3 \times t_{3j}$			0	0 16384	0 21847	$8685 x _{33053} +$ $+ 11163$ 14149	
$x_3 - a_4$				0 0	0 0	$26064 x _{33053} +$ $+ 18053$ 0	$a_4 = 0$
$x_3 - a_4 \times t_{4j}$				0	0 16385	$26064 x _{33053} +$ $+ 18053$ 21531	
$x_4 - a_5$					0	$10150 x _{33053} +$ $+ 28916$ 0	$a_5 = 0$

Действия	Модули						Цифры ОПСС
	$p_1 = 32765$	$p_2 = 32767$	$p_3 = 32768$	$p_4 = 32769$	$p_5 = 32771$	$p_6 = 33053$	
$x_4 - a_5 \times t_{5j}$						$10150 x _{33053} +$ $+ 28916$ 28013	
x_5						$10044 x _{33053} +$ $+ 27090$	$a_6 =$ $= 10044 x _{33053} +$ $+ 27090$

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Поскольку $a_6 = 0$, то $10044|x|_{33053} + 27090 = 0$, $1044|x|_{33053} = -27090$, $|x|_{33053} = 27423$.

Расширенное представление числа $X = 4294967296 = (36, 4, 0, 4, 36, |x|_{33053}) = (36, 4, 0, 4, 36, 27423)$ по основаниям $p_1 = 32765$, $p_2 = 32767$, $p_3 = 32768$, $p_4 = 32769$, $p_5 = 32771$, $p_6 = 33053$.

Таким образом, $|X|_K = 27423$.

На втором этапе вычислим масштабированные остатки y_i в соответствии с формулой (15).

Для этого вычислим $|K^{-1}|_{p_i}$:

$$|K^{-1}|_{p_1} = |33053^{-1}|_{32765} = 4892,$$

$$|K^{-1}|_{p_2} = |33053^{-1}|_{32767} = 22112,$$

$$|K^{-1}|_{p_3} = |33053^{-1}|_{32768} = 18741,$$

$$|K^{-1}|_{p_4} = |33053^{-1}|_{32769} = 11423,$$

$$|K^{-1}|_{p_5} = |33053^{-1}|_{32771} = 4997.$$

Тогда:

$$y_1 = \left| \left| 36 - 27423 \right|_{32765} \times 4892 \right|_{32765} = 31646,$$

$$y_2 = \left| \left| 4 - 27423 \right|_{32767} \times 22112 \right|_{32767} = 31640,$$

$$y_3 = \left| \left| 0 - 27423 \right|_{32768} \times 18741 \right|_{32768} = 31637,$$

$$y_4 = \left| \left| 4 - 27423 \right|_{32769} \times 11423 \right|_{32769} = 31634,$$

$$y_5 = \left| \left| 36 - 27423 \right|_{32771} \times 4997 \right|_{32771} = 31628,$$

Таким образом, $Y = (31646, 31640, 31637, 31634, 31628) = 129941 = \left[\frac{4294967296}{33053} \right]$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На высокоуровневом языке программирования Python разработаны алгоритмы выполнения рассмотренных выше немодульных операций. Ниже приведены фрагменты алгоритмов и результаты их работы (рис. 1–3).

```

##### Масштабирование чисел в МСС #####
##### Метод с использованием интервальных оценок #####
Base = [32765, 32767, 32768, 32769, 32771] M = 37778931511113441116160
X = (36, 4, 0, 4, 36)
scale_factor = 33053
4294967296
----- масштабирование с использованием интервальных оценок -----
pk = 4051
basis = [1153027056649273344, 1152956679314964480, 1152921493869428745, 1152886310571376640, 1152815950416936960]
weights = [9784, 30719, 3641, 2048, 19344]
pik = [5380, 9347, 3697, 28267, 9714]
k_inv = [4892, 22112, 18741, 11423, 4997]
c = [24574, 24575, 0, 8192, 8193]
s_low = 1.98 k_low = 1
s_upp = 2.02 k_upp = 2
k = 2
x_k = 27423
(31646, 31640, 31637, 31634, 31628)

##### Метод, с применением расширения системы оснований #####
Base = [32765, 32767, 32768, 32769, 32771] M = 37778931511113441116160
X = (36, 4, 0, 4, 36)
scale_factor = 33053
4294967296
new_res = (36, 4, 0, 4, 36, 27423)
k_inv = [4892, 22112, 18741, 11423, 4997]
(31646, 31640, 31637, 31634, 31628)
129941
    
```

Рис. 1. Результаты работы алгоритма «Масштабирование чисел в МСС»

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

```
----- Определение ранга по алгоритму -----
M = [[1, 1, 1, 1, 1], [0, 32765, 32765, 32765, 32765], [0, 0, 3, 8, 24], [0, 0,
0, 32761, 32699], [0, 0, 0, 0, 144]]
M_rank = [2, 55746, 15, 21349, 85]
[0, 32733, 32729, 32733, 32765] 55674
[0, 0, 15, 40, 120] 39
[0, 0, 0, 32761, 32699] 21313
[0, 0, 0, 0, 144] 49
[0, 0, 0, 0, 0] -37
rank (по алгоритму) = 36
```

Рис. 2. Результаты работы алгоритма «Вычисление ранга числа»

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

```
##### Расширение системы оснований с помощью характеристик ОПС #####
Base = [32765, 32767, 32768, 32769, 32771] M = 37778931511113441116160
(36, 4, 0, 4, 36)
----- расширение системы оснований -----
t_matrix = [[0, 16383, 21845, 8192, 27309, 28118], [0, 0, 32767, 16384, 24578,
10748], [0, 0, 0, 32768, 21847, 14149], [0, 0, 0, 0, 16385, 21531], [0, 0, 0, 0,
0, 28013]]
A_matrix = [36, 16, 4, 0, 0, 27090]
28118 x + 12395
8685 x + 11167
26064 x + 18053
10150 x + 28916
10044 x + 27090
(36, 4, 0, 4, 36, 27423)
4294967296
```

Рис. 3. Результаты работы алгоритма «Расширение системы оснований с помощью характеристик ОПС»

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Сравнение математического описания и результатов разработанных алгоритмов показывают их совпадение, что подтверждает верность проведенных вычислений.

На третьем этапе была проведена оценка сложности разработанных алгоритмов.

Основным критерием эффективности методов выполнения немодульных операций в МСС является оценка асимптотической сложности – оценка сложности алгоритма с использованием предельного перехода при стремлении к бесконечности размерности входных данных.

В данной работе для обозначения оценки сложности алгоритмов используется O -нотация.

O -нотация определяет функцию, которая показывает, как будет изменяться вычислительная сложность алгоритма с изменением количества входных данных в худшем случае. Вычислительная сложность показывает, как изменится время исполнения и объем занятой памяти в зависимости от размера входных данных.

Введем обозначения: $O(n)$ – оценка количества операций, где n – количество модулярных оснований на входе алгоритма (m – максимальное основание МСС). В работе количество модулярных оснований равно 5, то есть $n = 5$, максимальное основание МСС $m = 32771$. Отразим это в табл. 2.

Таблица 2

Оценка сложности методов выполнения немодульных операций в МСС

Операции	Оценка количества	Общая сложность метода
Масштабирование чисел в МСС с использованием интервальных оценок		
Вычисление мультипликативной инверсии	$O(n)$ сложностью $O(\log^2(m))$	$O(n \times \log^2(m))$
Деление по модулю	$O(n)$	
Умножение	$O(n)$	
Сложение	$O(n)$	
Масштабирование чисел в МСС с применением расширения системы оснований		
Вычисление мультипликативной инверсии	$O(n^2)$ сложностью $O(\log^2(m))$	$O(n^2 \times \log^2(m))$
Деление по модулю	$O(n^2)$	
Умножение	$O(n^2)$	

Сложение	$O(n^2)$	
<i>Окончание табл. 2</i>		
Операции	Оценка количества	Общая сложность метода
Расширение системы оснований с помощью характеристик ОПСС		
Деление по модулю	$O(n^2)$	$O(n^2 \times \log^2(m))$
Умножение	$O(n^2)$	
Сложение	$O(n^2)$	
Вычисление мультипликативной инверсии	$O(n^2)$ сложностью $O(\log^2(m))$	
Вычисление ранга числа		
Умножение	$O(n)$	$O(n^2)$
Деление по модулю	$O(n^2)$	
Умножение	$O(n^2)$	
Сложение	$O(n^2)$	

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены алгоритмы масштабирования чисел в модулярной системе счисления. Алгоритмы используют произвольные наборы модулей, обеспечивающих вычисления в большом динамическом диапазоне. В качестве примера набора оснований МСС выбраны числа $p_1 = 32765$, $p_2 = 32767$, $p_3 = 32768$, $p_4 = 32769$, $p_5 = 32771$ с мощностью диапазона $P = 37778931511113441116160$. Вычислительный диапазон близок к значению $2^{75} = 37778931862957161709568$. Для интерпретации результатов исследования на практике взяты числа $A = 2^{32} = 4294967296 = (36, 4, 0, 4, 36)$, $B = 2^{30} = 1073741824 = (9, 1, 0, 1, 9)$.

Первый алгоритм масштабирования чисел в МСС применяется для коэффициентов масштабирования произвольного вида, взаимно простых с основаниями МСС. Отличие его от известных алгоритмов состоит в использовании новой процедуры определения остатка от деления масштабируемого числа на коэффициент масштабирования, основанной на принципах интервальной арифметики [5]. Второй метод с расширением системы модулярных оснований более традиционный. Сравнивая оценки сложности методов, делаем вывод, что метод с использованием интервальных оценок является более эффективным.

Список источников

1. Исупов К. С. Методика выполнения базовых немодульных операций в модулярной арифметике с применением интервальных позиционных характеристик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 3. С. 26–39.
2. Лавриненко А. Н., Червяков Н. И. Исследование немодульных операций в системе остаточных классов // Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2012. № 1, Вып. 21/1. С. 110–121.
3. Червяков Н. И., Авербух В. М., Бабенко М. Г. и др. Приближенный метод выполнения немодульных операций в системе остаточных классов // Фундаментальные исследования. 2012. № 6–1. С. 189–193.
4. Акушский И. Я., Юдицкий Д. И. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Советское радио, 1968. 439 с.
5. Исупов К. С., Князьков В. С., Куваев А. С. Эффективное масштабирование в системе остаточных классов с использованием интервальных оценок // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23, № 3. С. 39–57.

References

1. Isupov K. S. Methods of Basic Non-Modular Operations in Modular Arithmetic Using Interval Positional Characteristics. University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences. 2013. No. 3. P. 26–39. (In Russian).
2. Lavrienko A. N., Chervyakov N. I. Nomodal Operations Research in System of Residual Classes. Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya: Istoriia. Politologiya. Ekonomika. Informatika. 2012. No. 1, Is. 21/1. P. 110–121. (In Russian).
3. Chervyakov N. I., Averbukh V. M., Babenko M. G. et al. Approximate Method of Implementation Non-Modular Operations in the Residue Number System. Fundamental Research. 2012. No. 6–1. P. 189–193. (In Russian).
4. Akushsky I. Ya., Yuditsky D. I. Mashinnaiia arifmetika v ostatochnykh klassakh. Moscow: Sovetskoe radio, 1968. 439 p. (In Russian).
5. Isupov K. S., Knyazkov V. S., Kuvaev A. S. Efficient Scaling in RNS Using Interval Estimations. Computational Technologies. 2018. Vol. 23, No. 3. P. 39–57. (In Russian).
6. Chervyakov N. I., Lavrienko I. N., Lavrienko S. V. et al. Metody i algoritmy okrugleniia, masshtabirovaniia i

6. Червяков Н. И., Лавриненко И. Н., Лавриненко С. В. и др. Методы и алгоритмы округления, масштабирования и деления чисел в модулярной арифметике // 50 лет модулярной арифметике : Юбилейн. (V) междунар. науч.-техн. конф., Зеленоград, 23–25 ноября 2005 г. Зеленоград : Ангстрем, 2006. С. 291–310.
7. Chang C. H., Low J. Y. S. Simple, Fast, and Exact RNS Scaler for The Three-Moduli Set ($2n - 1$, $2n$, $2n + 1$). IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2011. Vol. 58, No. 11. P. 2686–2697.
8. Kong Y., Phillips B. Fast Scaling in the Residue Number System. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2009. Vol. 17, No. 3. P. 443–447.
9. Коржавина А. С., Князьков В. С. Метод умножения с масштабированием результата для высокоточных модулярно-позиционных интервально-логарифмических вычислений // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 187–204.
10. Исупов К. С., Завиялов А. А. Об эффективности нового алгоритма вычисления ранга в системе остаточных классов // Advanced Science. 2017. № 4. С. 21.
11. Гапочкин А. В., Барбарян В. Г., Калмыков М. И. и др. Применение операции расширения системы оснований модулярного кода для обнаружения и коррекции ошибки // Успехи современного естествознания. 2014. № 11–2. С. 56–58.
12. Коржавина А. С., Князьков В. С. Методы расширения базиса в системе остаточных классов: обзор и анализ вычислительной сложности // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 12. С. 37–42.
13. Исупов К. С. Метод выполнения немодульных операций в системе остаточных классов на основе интервальных позиционных характеристик // Фундаментальные исследования. 2013. № 4–3. С. 566–570.
14. Червяков Н. И. Методы масштабирования модулярных чисел, используемые при цифровой обработке сигналов // Инфокоммуникационные технологии. 2006. Т. 4, № 3. С. 15–24.
15. Червяков Н. И., Ляхов П. А., Копыткова Л. Б. и др. Обработка информации в системе остаточных классов (СОК). Ставрополь : Северо-Кавказ. федер. ун-т, 2016. 225 с.
16. Червяков Н. И. Нейронная сеть для расширения кортежа числовой системы вычетов : патент № 2256226 С2 Рос. Федерация, МПК G06N 3/04. № 2003124041/09 ; заявл. 30.07.2003 ; опубл. 10.07.2005 ; заявитель Ставропол. гос. ун-т. deleniia chisel v moduliarnoi arifmetike. 50 let moduliarnoi arifmetike : Proceedings of the Anniversary (V) International Scientific and Engineering Conference, Zelenograd, November 23–25, 2005. Zelenograd : Angstrom, 2006. P. 291–310. (In Russian).
7. Chang C. H., Low J. Y. S. Simple, Fast, and Exact RNS Scaler for The Three-Moduli Set ($2n - 1$, $2n$, $2n + 1$). IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2011. Vol. 58, No. 11. P. 2686–2697.
8. Kong Y., Phillips B. Fast Scaling in the Residue Number System. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2009. Vol. 17, No. 3. P. 443–447.
9. Korzhavina A. S., Knyazkov V. S. The Multiplication Method with Scaling the Result for High-Precision Residue Positional Interval Logarithmic Computations. Engineering Technologies and Systems. 2019. Vol. 29, No. 2. P. 187–204. (In Russian).
10. Isupov K. S., Zaviyalov A. A. Ob effektivnosti novogo algoritma vychisleniia ranga v sisteme ostatochnykh klassov. Advanced Science. 2017. No. 4. P. 21. (In Russian).
11. Gapochkin A. V., Barbaryan V. G., Kalmykov M. I. et al. Application Operations Expansion System Bases Modular Code for Detection and Correction Errors. Advances in Current Natural Sciences. 2014. No. 11–2. P. 56–58. (In Russian).
12. Korzhavina A. S., Knyazkov V. S. Base Extension in Residue Number Systems: A Review and Cost Analysis. Modern High Technologies. 2017. No. 12. P. 37–42. (In Russian).
13. Isupov K. S. Method for Implementation Non-Modular Operations in RNS Based on Interval Positional Characteristic. Fundamental Research. 2013. No. 4–3. P. 566–570. (In Russian).
14. Chervyakov N. I. Methods of Scaling Modular of the Numbers, Used at Digital Processing Signals. Infokommunikatsionnye tekhnologii. 2006. Vol. 4, No. 3. P. 15–24. (In Russian).
15. Chervyakov N. I., Lyakhov P. A., Kopytkova L. B. et al. Obrabotka informatsii v sisteme ostatochnykh klassov (SOK). Stavropol : North-Caucasus Federal University, 2016. 225 p. (In Russian).
16. Chervyakov N. I. Neuron Network for Broadening Tuple of Numeric Subtractions System : Patent No. 2256226 C2 Russian Federation, IPS G06N 3/04. No. 2003124041/09 ; Claim of July 30, 2003 ; Published on July 10, 2005 ; Proprietor Stavropol State University. (In Russian).

Информация об авторе

Н. С. Золотарева – аспирант.

Information about the author

N. S. Zolotareva – Postgraduate.

Научная статья
УДК 551.4:517.5
DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-73-79

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ ПРОФИЛЯ РЕЛЬЕФНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Антон Георгиевич Назин
Сургутский государственный университет
nazin_ag@surgu.ru

Аннотация. Предложен новый подход к построению профиля рельефной поверхности, заданной с помощью текстового описания. Метод основан на аппроксимации тригонометрическими полиномами базовых элементов рельефа и интерполяции обобщенными многочленами.

Ключевые слова: интерполяция, аппроксимация, рельеф

Для цитирования: Назин А. Г. Об одном подходе к построению профиля рельефной поверхности // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 73–79. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-73-79.

Original article

ON ONE APPROACH TO BUILDING A PROFILE OF A RELIEF SURFACE

Anton G. Nazin
Surgut State University, Surgut, Russia
nazin_ag@surgu.ru

Abstract. The article suggests a new approach to building a profile of a relief surface defined by text. The method is based on trigonometric polynomials for approximating basic terrain elements and generalized polynomials for interpolation.

Keywords: interpolation, approximation, relief

For citation: Nazin A. G. On One Approach to Building a Profile of a Relief Surface. Proceedings in Cybernetics. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 73–79. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-73-79.

ВВЕДЕНИЕ

Топографический профиль (профиль рельефной поверхности), как правило, создается в современных условиях двумя способами: по результатам конкретных (экспериментальных) значений замеров объекта геодезическими приборами [1] или с помощью топографических карт [2].

Подробный алгоритм построения профиля в заданном направлении по топографической карте описан в [3, 4]. Для получения плавной кривой профиля используются различные подходы: S-аппроксимации [5], структурно-параметрический подход [6], аппроксимация полиномами Чебышева [7].

На практике часто возникают случаи, когда необходимо построить профиль рельефа при полном отсутствии исходных данных в виде

топографических карт или результатов геодезических наблюдений.

Рассматривается случай, когда в роли исходных данных выступает простое текстовое описание участка карты, исходя из которого необходимо построить профиль рельефной поверхности в заданном направлении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Все многообразие неровностей, из которых складывается рельеф земной поверхности, можно свести к 5 элементарным формам [8]. Назовем их базовыми элементами рельефа:

1. Гора – значительное куполообразное или коническое возвышение с более или менее выраженным основанием – подошвой.

2. Котловина – замкнутая чашеобразная впадина обычно с пологими скатами.

3. Хребет – линейно вытянутое возвышение, постепенно понижающееся к одному или обоим своим концам.

4. Лощина – вытянутое углубление, понижающееся в одном направлении, имеет скаты с четко выраженным верхним перегибом – бровкой.

5. Седловина – понижение на гребне хребта между двумя смежными вершинами.

Все базовые элементы рельефа будут заданы с помощью кусочно-линейных функций с использованием следующих параметров:

H – средняя высота на местности относительно уровня моря (в метрах);

H_i – абсолютная высота или глубина i -го элемента рельефа относительно средней высоты местности (H) (экспериментальные наблюдения) (в метрах);

D_i – диаметр условной окружности, описанной около i -го элемента рельефа, лежащей в плоскости на уровне средней высоты местности (H) (в метрах);

d_i – диаметр вершины i -й «горы» или диаметр дна i -й «котловины» (в метрах);

L_i – расстояние от условного центра местности до края окружности, что описывает i -й элемент рельефа;

T_i – расстояние от центра условной окружности, что описывает i -й элемент рельефа до абсолютной глубины «лощины» или абсолютной высоты хребта;

K_i – угол наклона i -го склона элемента рельефа (в градусах);

$Q(x; y)$ – координаты центра условной окружности, описывающей элемент рельефа.

Таким образом, с учетом введенных обозначений получим следующие текстовые описания базовых элементов рельефа:

1. Элемент «Хребет». На юге от условного центра местности на расстоянии L_1 м находится хребет с абсолютной высотой H_1 м, координатами центра условной окружности $Q(x_1; y_1)$ диаметром D_1 м, углом наклона левого склона K_1 и углом наклона правого склона K_2 . Расстояние от центра условной окружности до точки абсолютной высоты T_1 м.

2. Элемент «Гора». На юге от условного центра на расстоянии в L_2 м находится гора с абсолютной высотой H_2 м, координатами центра условной окружности $Q(x_2; y_2)$ диа-

метром D_2 м, диаметром вершины d_1 м, углом наклона левого склона K_3 и углом наклона правого склона K_4 .

3. Элемент «Лощина». На севере от условного центра на расстоянии в L_3 м находится лощина с максимальной глубиной H_3 м, координатами центра условной окружности $Q(x_3; y_3)$ диаметром D_3 м. Точка абсолютной глубины находится в южном направлении в T_2 м от центра условной окружности, углом наклона левого склона K_5 и углом наклона правого склона K_6 .

4. Элемент «Котловина». Центр условной окружности находится ровно в условном центре карты, диаметр условной окружности D_4 м, диаметр дна d_2 м глубиной H_4 м и точкой абсолютной глубины дна (центра его окружности) по центру элемента рельефа, углом наклона левого склона K_7 и углом наклона правого склона K_8 .

5. Элемент «Седловина». На юге от условного центра карты на расстоянии в L_4 м находится седловина с максимальной высотой смежных вершин в H_5 м и с высотой понижения между ними H_6 м, координатами центра условной окружности $Q(x_5; y_5)$ диаметром D_5 м, точка 1 вершины находится в T_3 м от южного края окружности, а точка 2 вершины – в T_4 м от северного края. Точка низины находится посередине окружности, описывающей элемент рельефа. Углы наклонов скатов и склонов равны $K_9, K_{10}, K_{11}, K_{12}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Составим кусочно-линейные функции, описывающие каждый базовый элемент рельефа.

Элемент «Хребет»:

$$g1(x) = \begin{cases} K_1(x - x_1 + T_1) + H_1, & \text{при } x_1 - \frac{D_1}{2} \leq x \leq x_1 \\ K_2(x - x_1 + T_1) + H_1, & \text{при } x_1 \leq x \leq x_1 + \frac{D_1}{2} \end{cases} \quad (1)$$

Элемент «Гора»:

$$g2(x) = \begin{cases} K_3(x - x_2 + \frac{d_1}{2}) + H_2, & \text{при } x_2 - \frac{D_2}{2} \leq x \leq x_2 - \frac{d_1}{2} \\ H_2, & \text{при } x_2 - \frac{d_1}{2} \leq x \leq x_2 + \frac{d_1}{2} \\ K_4(x - x_2 - \frac{d_1}{2}) + H_2, & \text{при } x_2 + \frac{d_1}{2} \leq x \leq x_2 + \frac{D_2}{2} \end{cases} \quad (2)$$

Элемент «Лощина»:

$$g3(x) = \begin{cases} K_5(x - x_3 + T_2) + H_3, & \text{при } x_3 - \frac{D_3}{2} \leq x \leq x_3 - T_2 \\ K_6(x - x_3 + T_2) + H_3, & \text{при } x_3 - T_1 \leq x \leq x_3 + \frac{D_3}{2} \end{cases} \quad (3)$$

Элемент «Котловина»:

$$g4(x) = \begin{cases} K_7(x - x_4 + \frac{d_2}{2}) + H_4, & \text{при } x_4 - \frac{D_4}{2} \leq x \leq x_4 - \frac{d_2}{2} \\ H_4, & \text{при } x_4 - \frac{d_2}{2} \leq x \leq x_4 + \frac{d_2}{2} \\ K_8(x - x_4 - \frac{d_2}{2}) + H_4, & \text{при } x_4 + \frac{d_1}{2} \leq x \leq x_4 + \frac{D_4}{2} \end{cases} \quad (4)$$

Элемент «Седловина»:

$$g5(x) = \begin{cases} K_9(x - x_5 + \frac{D_5}{2} - T_3) + H_5, & \text{при } x_5 - \frac{D_5}{2} \leq x \leq x_5 - \frac{D_5}{2} + T_3 \\ K_{10}(x - x_5) + H_6, & \text{при } x_5 - \frac{D_5}{2} + T_3 \leq x \leq x_5 \\ K_{11}(x - x_5) + H_6, & \text{при } x_5 \leq x \leq x_5 + \frac{D_5}{2} - T_4 \\ K_{12}(x - x_5 - \frac{D_5}{2} + T_4) + H_5, & \text{при } x_5 + \frac{D_5}{2} - T_4 \leq x \leq x_5 + \frac{D_5}{2} \end{cases} \quad (5)$$

По формулам (1)–(5) построим графики кусочно-линейных функций, задающих базовые элементы рельефа (рис. 1–5).

Каждую кусочно-линейную функцию аппроксимируем тригонометрическим многочленом наилучшего среднеквадратичного приближения, являющимся n -частичной суммой ряда Фурье.

Для элемента «Хребет» определим нечетную функцию $\overline{g1}(x)$ на отрезке $[-D_1, D_1]$ следующим образом:

$$\overline{g1}(x) = \begin{cases} -g1(x), & -D_1 \leq x \leq 0 \\ g1(x), & 0 \leq x \leq D_1 \end{cases} \quad (7)$$

Разложим функцию $\overline{g1}(x)$ в ряд Фурье по синусам и возьмем первые 6 членов, получим многочлен наилучшего среднеквадратичного приближения 6-й степени следующего вида:

$$\varphi_1(x) = \sum_{n=1}^6 b_n \sin \frac{n\pi x}{D_1}, \quad (8)$$

где $b_n = \int_0^{D_1} g1(x) \sin \frac{n\pi x}{D_1} dx$.

Для элемента «Гора», получим:

$$\overline{g2}(x) = \begin{cases} -g2(x), & -D_2 \leq x \leq 0 \\ g2(x), & 0 \leq x \leq D_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\varphi_2(x) = \sum_{n=1}^6 b_n \sin \frac{n\pi x}{D_2},$$

где $b_n = \int_0^{D_2} g2(x) \sin \frac{n\pi x}{D_2} dx$.

Для элемента «Лощина» получим:

$$\overline{g3}(x) = \begin{cases} -g3(x), & -D_3 \leq x \leq 0 \\ g3(x), & 0 \leq x \leq D_3 \end{cases}$$

$$\varphi_3(x) = \sum_{n=1}^6 b_n \sin \frac{n\pi x}{D_3},$$

где $b_n = \int_0^{D_3} g3(x) \sin \frac{n\pi x}{D_3} dx$.

Для элемента «Котловина» получим:

$$\overline{g4}(x) = \begin{cases} -g4(x), & -D_4 \leq x \leq 0 \\ g4(x), & 0 \leq x \leq D_4 \end{cases}$$

$$\varphi_4(x) = \sum_{n=1}^6 b_n \sin \frac{n\pi x}{D_4},$$

где $b_n = \int_0^{D_4} g4(x) \sin \frac{n\pi x}{D_4} dx$.

Для элемента «Седловина» получим:

$$\overline{g5}(x) = \begin{cases} -g5(x), & -D_5 \leq x \leq 0 \\ g5(x), & 0 \leq x \leq D_5 \end{cases}$$

$$\varphi_5(x) = \sum_{n=1}^6 b_n \sin \frac{n\pi x}{D_5},$$

где $b_n = \int_0^{D_5} g5(x) \sin \frac{n\pi x}{D_5} dx$.

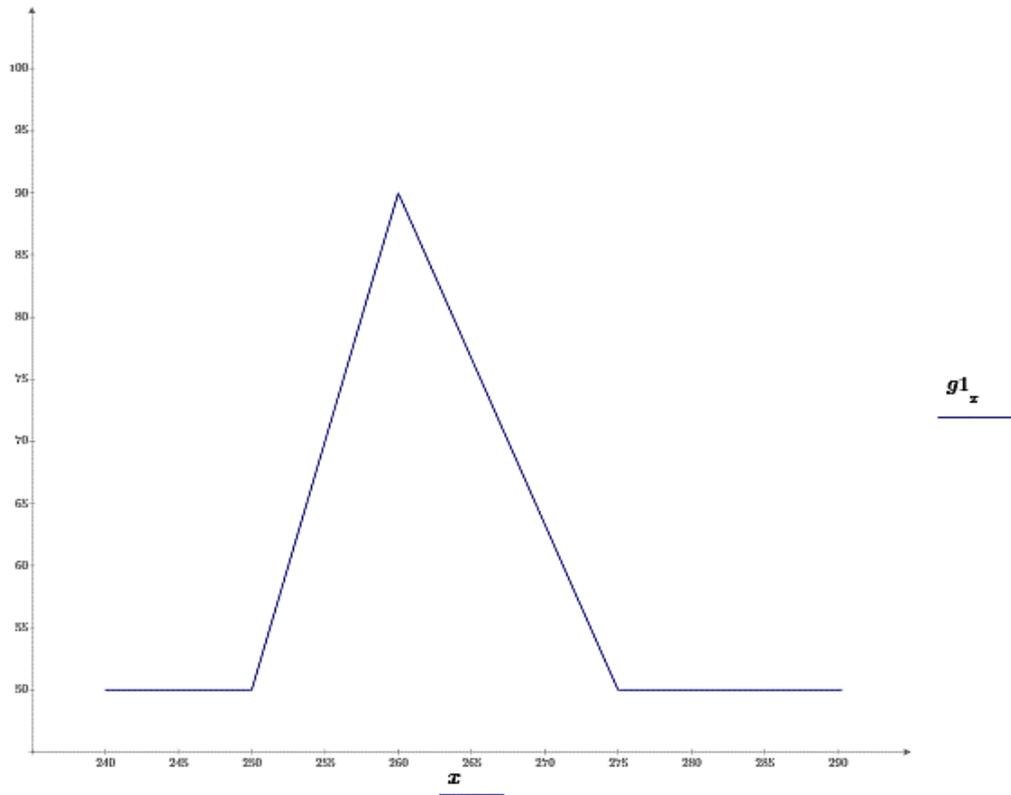


Рис. 1. Элемент «Хребет»
Примечание: составлено автором.

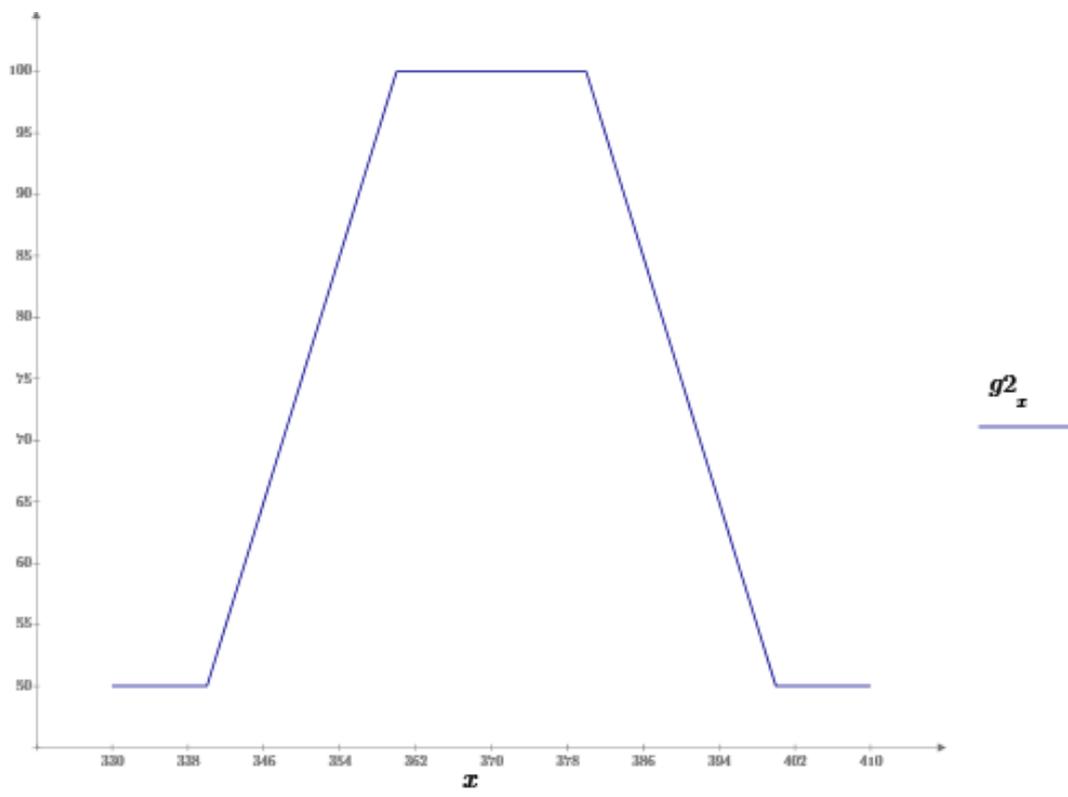


Рис. 2. Элемент «Гора»
Примечание: составлено автором.

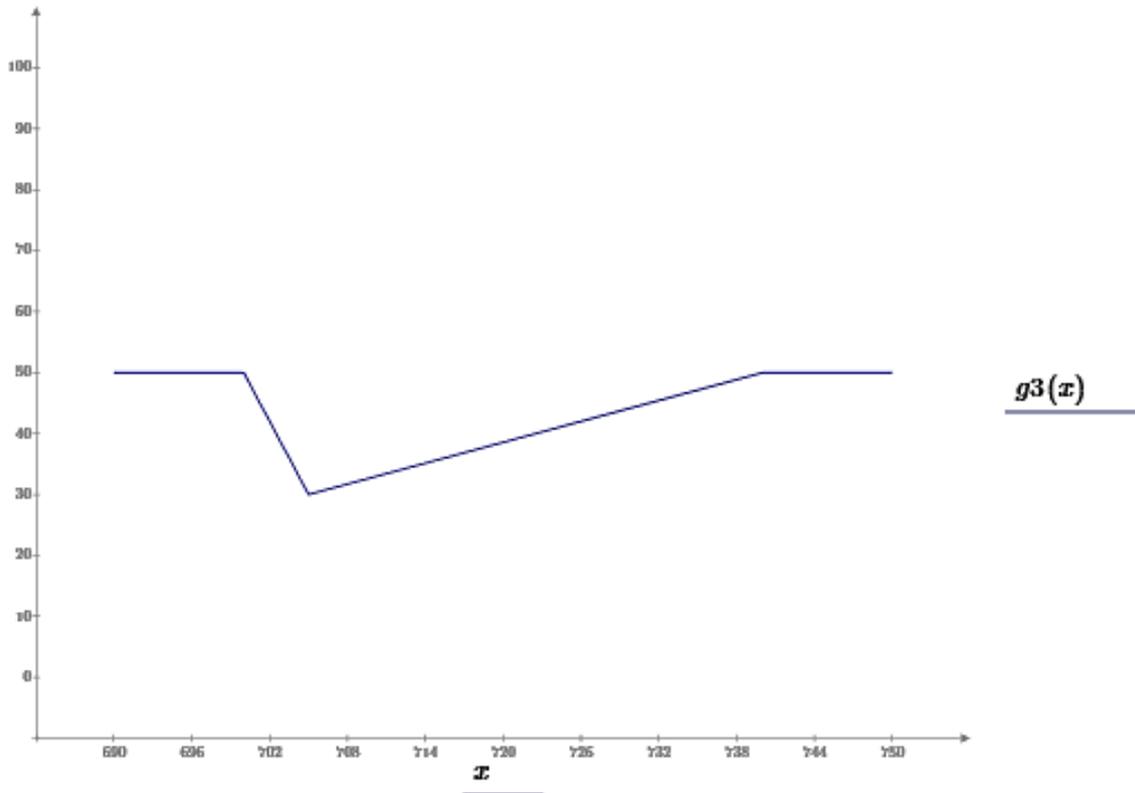


Рис. 3. Элемент «Лощина»
Примечание: составлено автором.

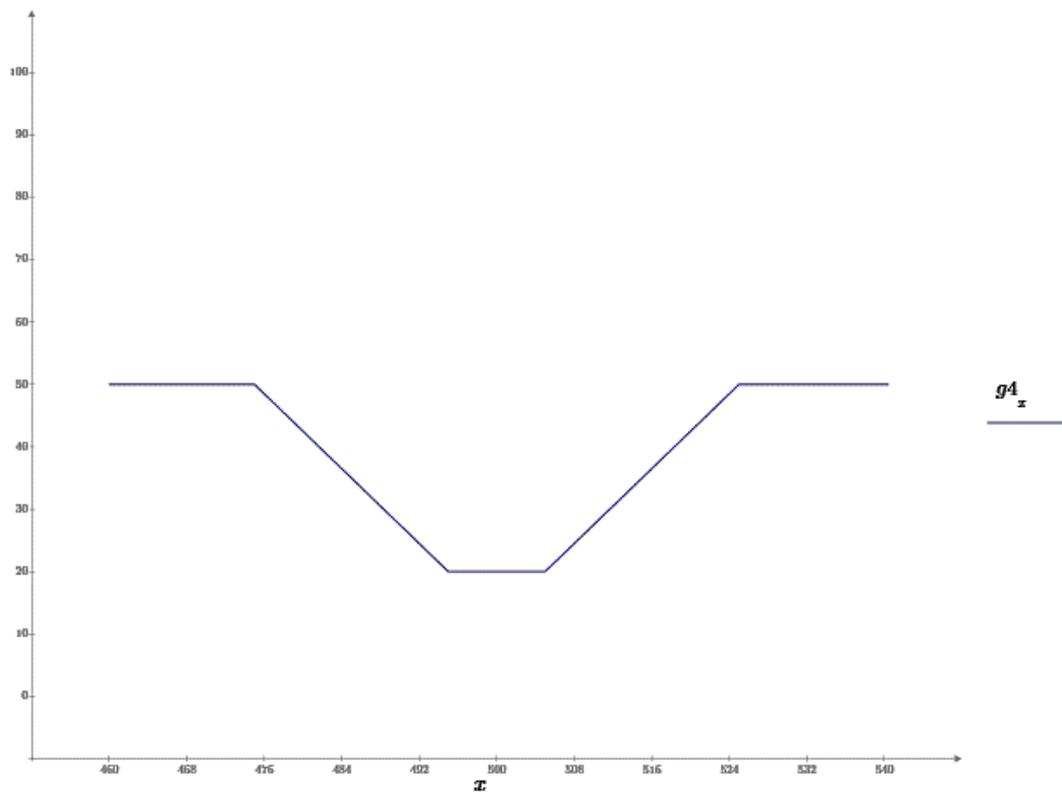


Рис. 4. Элемент «Котловина»
Примечание: составлено автором.

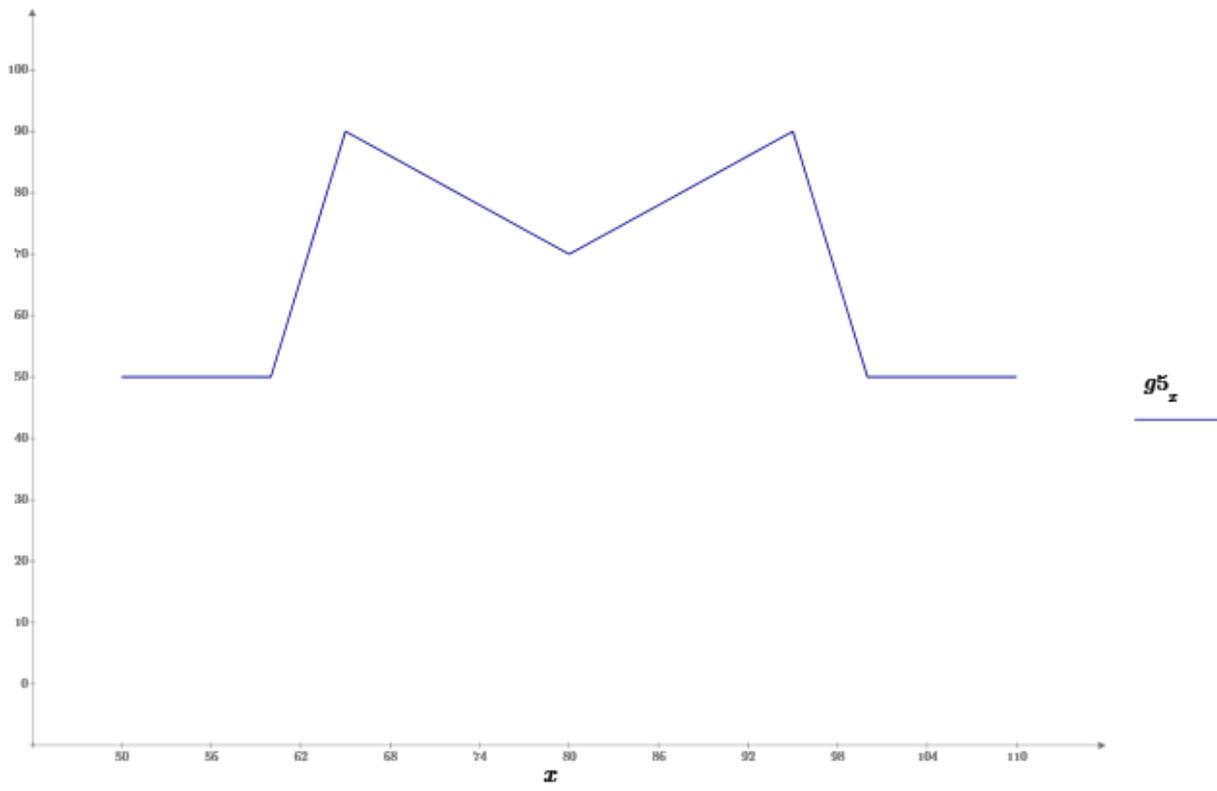


Рис. 5. Элемент «Седловина»
Примечание: составлено автором.

Таким образом, все базовые элементы рельефа будут заданы аналитически с помощью системы гладких ортогональных на отрезках $[-D_i, D_i]$, $i = \overline{1,5}$ функций $\varphi_1(x)$, $\varphi_2(x)$, $\varphi_3(x)$, $\varphi_4(x)$, $\varphi_5(x)$.

Рассмотрим некоторый участок земной поверхности, описанный с помощью базовых элементов рельефа. Зададим на нем направление, вдоль которого нужно построить профиль рельефа. Введем систему декартовых координат. Ось X направим вдоль направления искомого профиля, а ось Y – вертикально вверх. На этой координатной плоскости зададим точки, ограничивающие базовые элементы рельефа. Эти точки используем как узлы интерполяции, а сам профиль

строим с помощью интерполяции обобщенным многочленом:

$$\Phi(x) = a_1\varphi_1(x) + a_2\varphi_2(x) + a_3\varphi_3(x) + a_4\varphi_4(x) + a_5\varphi_5(x).$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ существующих публикаций позволяет сделать вывод о том, что данный подход к построению профиля рельефной поверхности предложен впервые. Результаты расчетов показали хорошую точность метода.

Дальнейшее направление исследований заключается в использовании других ортогональных полиномов, например, полиномов Лежандра.

Список источников

1. Уфимцев Г. Ф. Морфология рельефа : моногр. М. : Научный мир, 2004. 182 с.
2. Павская М. В. Использование топографических и тематических карт при построении ландшафтных профилей земной поверхности // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2016. № 46. С. 136–140.

References

1. Ufimtsev G. F. Morfologiya relefa : Monograph. Moscow : Nauchnyi mir, 2004. 182 p. (In Russian).
2. Pavskaya M. V. The Use of Topographic and Thematic Maps when Building Landscape Profiles of the Earth's Surface. Aktualnye problemy lesnogo kompleksa. 2016. No. 46. P. 136–140. (In Russian).

3. Гакаев Р. А. Изображение рельефа горизонталями и построение профиля по топографической карте // Педагогика высшей школы. 2016. № 2. URL: <https://moluch.ru/th/3/archive/32/1159/> (дата обращения: 06.03.2023).
4. Павлюк А. С., Баранов А. С., Сафронов С. В. Определение профиля земной поверхности // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы. 2012. С. 47–54.
5. Керимов И. А., Степанова И. Э., Раевский Д. Н. и др. Исследование метода S-аппроксимации для различных типов рельефа земной поверхности // Геология и геофизика юга России. 2018. № 4. С. 75–91.
6. Степанова И. Э., Сальников А. М., Батов А. В. и др. Применение структурно-параметрического подхода при аппроксимации рельефа земной поверхности // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого) : Материалы XV Международной научной конференции, Москва, 03–05 июня 2020 г. М., 2020. С. 441–444.
7. Коркин В. С. Аппроксимация профиля рельефа, заданного на нерегулярной сетке // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 1, № 4. С. 14–17.
8. Бубнов И. А., Богатов С. Ф., Дубов С. Д. и др. Военная топография. М. : Воениздат, 1977. 280 с.
3. Gakaev R. A. Izobrazhenie relefa gorizontaliami i postroenie profilia po topograficheskoi karte. Pedagogika vysshei shkoly. 2016. No. 2. URL: <https://moluch.ru/th/3/archive/32/1159/> (accessed: 06.03.2023). (In Russian).
4. Pavlyuk A. S., Baranov A. S., Safronov S. V. Opre-delenie profilia zemnoi poverkhnosti. Sovremennaia tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoianie i perspektivy. 2012. P. 47–54. (In Russian).
5. Kerimov I. A., Stepanova I. E., Raevsky D. N. et al. Study of the S-Approximation Method for Different Types of Landforms. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2018. No. 4. P. 75–91. (In Russian).
6. Stepanova I. E., Salnikov A. M., Batov A. V. et al. The Use of the Structural-Parametric Approach in Approximating the Relief of the Earth's Surface. Ustoichivost i kolebaniia nelineinykh sistem upravleniia (konferentsiia Piatnitskogo) : Proceedings of the XV International Scientific Conference, Moscow, June 3–5, 2020. Moscow, 2020. P. 441–444. (In Russian).
7. Korokin V. S. Approximation of the Relief Profile Preset in the Irregular Grid // Interexpo Geo-Siberia. 2012. Vol. 1, No. 4. P. 14–17. (In Russian).
8. Bubnov I. A., Bogatov S. F., Dubov S. D. et al. Voennaia topografiia. Moscow : Voenizdat, 1977. 280 p. (In Russian).

Информация об авторе

А. Г. Назин – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the author

A. G. Nazin – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания <https://www.vestcyber.ru> и в базе данных Научной электронной библиотеки на сайте elibrary.ru, сведения о публикуемых материалах включаются в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес учредителя и издателя:
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. +7 (3462) 76-29-29

Дата опубликования 02.05.2023. Формат 60 × 84/8
Уч.-изд. л. 8. Заказ № 136. Цена свободная