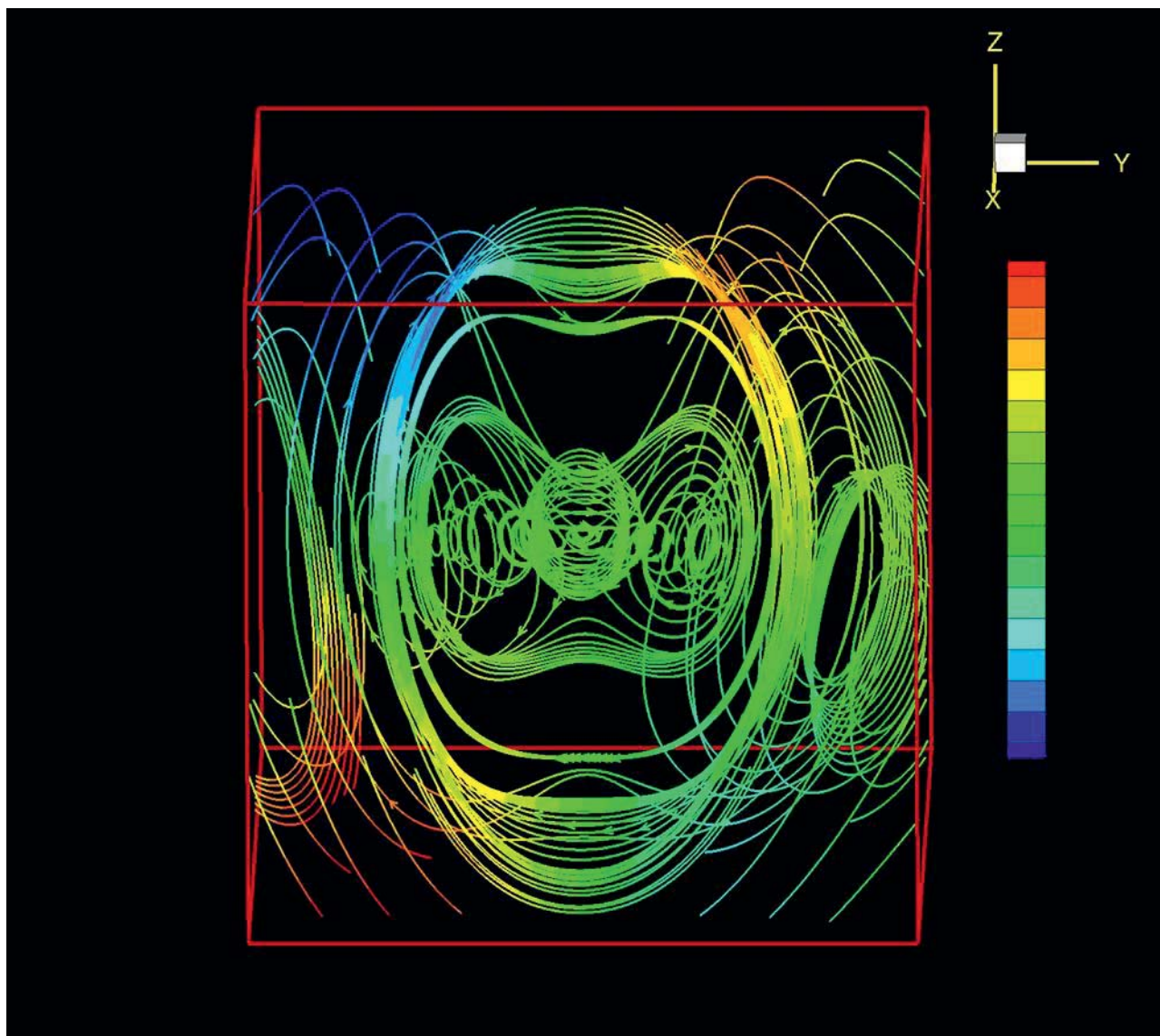




**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ**

**PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

12+



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

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ  
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

**ТОМ 23, № 2**

**Сургут  
2024**

**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  
Древс 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  
Крамаров С. О., д. ф.-м. 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**  
Зелексон Л. А.  
**Верстка**  
Чорненко С. И.  
**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), Docent

**Executive Editor**

Mikhail Ya. Braginsky, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

**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. Dreys 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. Kramarov S. O., Doctor of Sciences (Phys&Math)

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**

Zelexson L. A.

**Layout**

Chornenkiy S. I.

**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 of 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

**Антонюк П. В., Острейковский В. А.**

Анализ показателей надежности элементов системы верхнего привода при эксплуатации на месторождениях Западной Сибири ..... 6

**Базилевский М. П., Малыгин А. А., Шаманова А. Е.**

Метод оценивания логистических регрессий с помощью аппарата линейного программирования ..... 14

**Брыкин В. В., Брагинский М. Я., Тараканов Д. В., Назарова И. Л.**

Классификация состояния растений с использованием адаптивной нейро-нечеткой инференционной системы (ANFIS)..... 23

**Гончаров А. Р., Лысенкова С. А.**

Метод моделирования оценки слов респондентом для прогноза силы тональности элементов в тональном словаре ..... 31

**Гусев О. В.**

Решение прямой задачи кинематики для шестизвеного робота-манипулятора ..... 39

**Никитина С. А., Болтачева Е. Р.**

Разработка архитектуры нейронной сети для проведения сегментации пользователей при таргетированной рекламе..... 49

**Никулин А. О.**

Разработка методики выявления слепых зон при тестировании программного обеспечения ..... 57

**Святов К. В., Мошкин В. С., Щукарев И. А.**

Модуль информационной системы на основе наивного байесовского классификатора для автоматизации работы аптеки ..... 62

**Слотвицкая А. А., Мартынов Б. В., Прокопенко Е. С.**

Перспективность и эффективность no-code и low-code платформ для автоматизации бизнеса ..... 71

**Храмов В. В., Митясова О. Ю.**

Способ формирования ортогональных признаков распознавания объектов на плоских изображениях ..... 76

### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Алексеев М. М., Семенов О. Ю.**

Численное моделирование фронта пламени газозвоздушной стратифицированной смеси ..... 81

## CONTENTS

### ENGINEERING

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Antonyuk P. V., Ostreykovsky V. A.</b><br>Analysis of reliability indicators of top drive system elements operating in Western Siberia fields.....                    | 6  |
| <b>Bazilevsky M. P., Malygin A. A., Shamanova A. E.</b><br>Method for estimating logistic regressions using linear programming apparatus .....                           | 14 |
| <b>Brykin V. V., Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Nazarova I. L.</b><br>Classifying plants' health using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) .....        | 23 |
| <b>Goncharov A. R., Lysenkova S. A.</b><br>Modeling method for respondent's analysis of words for predicting sentiment analysis of sentiment dictionary's elements ..... | 31 |
| <b>Gusev O. V.</b><br>Solving the direct kinematic problem for a six-unit robot manipulator.....                                                                         | 39 |
| <b>Nikitina S. A., Boltacheva E. R.</b><br>Developing a neural network architecture to perform user segmentation with targeted advertising .....                         | 49 |
| <b>Nikulin A. O.</b><br>Development of a method for identifying blind spots in software testing.....                                                                     | 57 |
| <b>Svyatov K. V., Moshkin V. S., Shchukarev I. A.</b><br>Information system module based on naive Bayes classifier for pharmacy operation automation .....               | 62 |
| <b>Slotvitskaya A. A., Martynov B. V., Prokopenko E. S.</b><br>The prospects and efficiency of no-code and low-code platforms for business automation .....              | 71 |
| <b>Khramov V. V., Mityasova O. Yu.</b><br>Method for forming orthogonal features for object recognition in flat images .....                                             | 76 |

### PHYSICS AND MATHEMATICS

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Alekseev M. M., Semenov O. Yu.</b><br>Numerical modeling of the flame front of a gas-and-air stratified mixture ..... | 81 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

Научная статья

УДК 622.279.7: 656.13

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-1



### АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ВЕРХНЕГО ПРИВОДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Павел Викторович Антонюк<sup>1</sup>, Владислав Алексеевич Острейковский<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

<sup>1</sup>Pavel\_Antoniuk@mail.ru

<sup>2</sup>ova@surgu.ru

**Аннотация.** Для повышения дебита нефтяных и газовых скважин нефтегазодобывающие компании проводят работы по текущему и капитальному ремонту скважин с применением мобильных буровых комплексов, оснащенных системами верхнего привода (СВП). Собраны и проанализированы статистические данные по эксплуатации более 60 СВП на месторождениях Западной Сибири. Выполнен расчет основных показателей надежности СВП – вероятность безотказной работы и интенсивность отказов. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования системы технического обслуживания и ремонта бурового оборудования. Недостаточный уровень надежности элементов СВП в сочетании с экстремальными условиями эксплуатации на месторождениях Западной Сибири приводит к отказам и остановке всего технологического процесса ремонта скважин, что влечет за собой необходимость проведения ремонтно-восстановительных работ. Учитывая высокие требования к надежности бурового оборудования, эксплуатируемого на опасных производственных объектах, а также с целью непрерывности выполнения работ по текущему и капитальному ремонту скважин задачи повышения надежности СВП являются приоритетными для нефтегазодобывающих компаний.

**Ключевые слова:** система верхнего привода, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, надежность, мобильные буровые комплексы

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке РФФИ (объект 18-07-391).

**Для цитирования:** Антонюк П. В., Острейковский В. А. Анализ показателей надежности элементов системы верхнего привода при эксплуатации на месторождениях Западной Сибири // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 6–13. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-1.

Original article

### ANALYSIS OF RELIABILITY INDICATORS OF TOP DRIVE SYSTEM ELEMENTS OPERATING IN WESTERN SIBERIA FIELDS

Pavel V. Antonyuk<sup>1</sup>, Vladislav A. Ostreykovsky<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Surgut State University, Surgut, Russia

<sup>1</sup>Pavel\_Antoniuk@mail.ru

<sup>2</sup>ova@surgu.ru

**Abstract.** Oil and gas companies carry out routine and major repairs of wells using mobile drilling complexes equipped with top drive systems (TDS) in order to increase the flow rate of oil and gas wells. Statistical data on the operation of more than sixty TDSs in the fields of Western Siberia were collected and analyzed. The TDS's main reliability indicators, such as the probability of failure-free operation and the failure rate, were calculated. The findings can be used to improve drilling equipment maintenance and repair procedures.

The insufficient level of reliability of the TDS elements, along with intense operating conditions in the fields of Western Siberia, causes failures and halts the entire technological process of well repair, necessitating the need for repair and renewal operations. The first priority of oil and gas companies lies in increasing the TDS reliability based on the high requirements for the reliability of drilling equipment operated at hazardous production facilities, as well as driven by the purpose of continuous operation on routine and major repairs of wells.

**Keywords:** top drive system, probability of failure-free operation, failure rate, reliability, mobile drilling complexes

**Funding:** the study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (object 18-07-391).

**For citation:** Antonyuk P. V., Ostreykovsky V. A. Analysis of reliability indicators of top drive system elements operating in Western Siberia fields. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):6–13. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-1.

## ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно нефтегазодобывающие компании проводят работы по текущему и капитальному ремонту нефтяных и газовых скважин, расположенных на месторождениях Западной Сибири. Для ремонта скважин применяются мобильные буровые комплексы (МБК), дооснащенные системами верхнего привода (СВП). СВП расширяют технологические возможности, повышают скорость и безопасность проведения работ [1, 2] успешное производство данных систем освоено как отечественными предприятиями, так и иностранными, расположенными в США, Германии, Франции, Китае [1–5].

Ежегодно нефтегазодобывающие компании регистрируют значительное количество отказов СВП, приводящих к остановке всего технологического процесса ремонта скважин, значительным экономическим потерям, что влечет за собой необходимость проведения ремонтно-восстановительных работ как на месторождении нефти и газа, так и на территории баз производственного обслуживания [6].

С целью обеспечения требуемого уровня надежности СВП нефтегазодобывающим компаниям необходимо обеспечить сбор и анализ статистических данных фактической эксплуатации, что позволит обоснованно принимать управленческие решения, собрать и обработать статистические данные по простоям и отказам.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

От 30 до 50% простоев бригад по текущему и капитальному ремонту скважин вызва-

но отказами мобильного бурового комплекса, оставшиеся 50–70% простоев вызваны низкой организацией работ и метеоусловиями. В связи с суровыми условиями Западной Сибири в осенне-зимний период наблюдается значительное увеличение количества простоев.

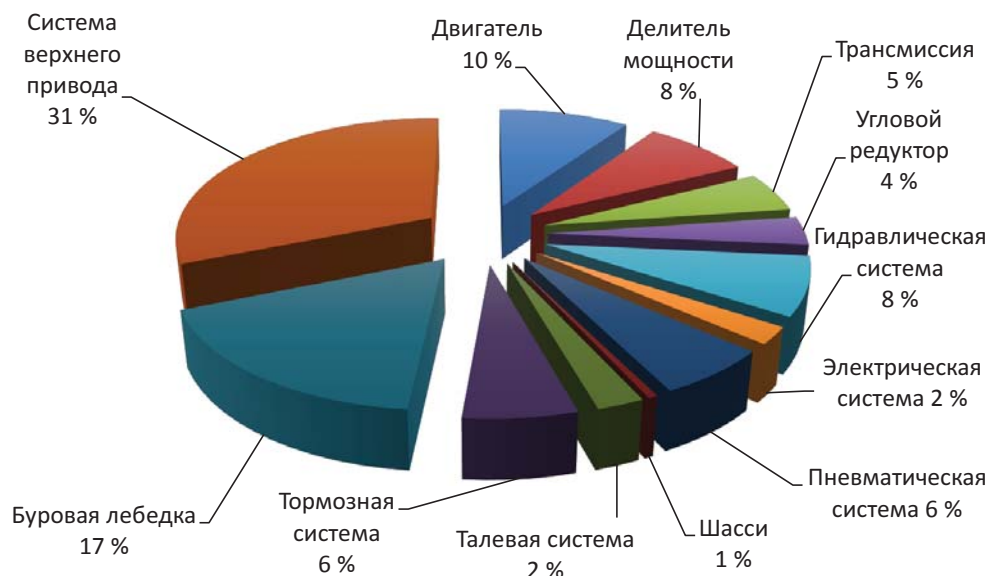
Наибольшее количество отказов элементов МБК регистрируется в системе верхнего привода – от 31 до 34%, буровой лебедке – от 17 до 26%, двигателе – от 7 до 10%, гидравлической системе – от 7 до 8% (рис. 1–2).

СВП эксплуатируются в суровых условиях Западной Сибири, а в сочетании с действующими нагрузками регистрируется значительное количество отказов.

Отказ элементов СВП в процессе ремонта нефтяных и газовых скважин зачастую приводит к остановке всего технологического процесса, а при отказе основной рабочей функции (вращение буровой колонны) даже в аварийных режимах может привести к потере дорогостоящего оборудования и скважины.

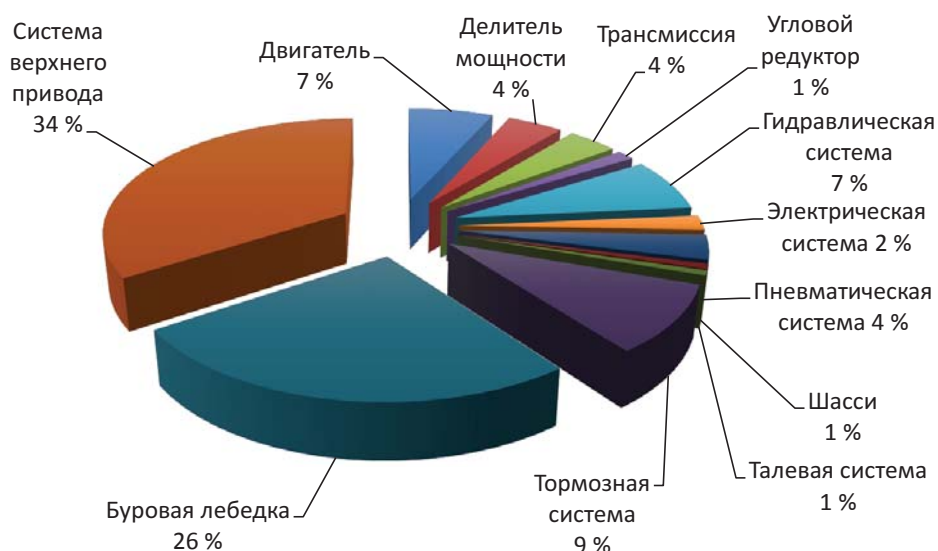
Загрязнение участков местности, человеческие жертвы, потеря дорогостоящего оборудования и, как следствие, значительные финансовые потери – вот характерные результаты отказов СВП, поэтому дальнейшее повышение надежности, безопасности эксплуатации СВП является одной из приоритетных задач эксплуатирующих компаний.

Около 65% всех случаев простоев вызвано отказами оборудования мобильных буровых комплексов, состоящих из подъемного агрегата, системы верхнего привода, установок



**Рис. 1. Относительные доли отказов подсистем МБК за 2013 г.**

Примечание: составлено авторами на основе уже ранее опубликованной работы [6].



**Рис. 2. Относительные доли отказов подсистем МБК за 2017 г.**

Примечание: составлено авторами на основе уже ранее опубликованной работы [6].

насосных буровых и вспомогательного оборудования; остальные причины вызваны низкой организацией работ и метеорологическими условиями. Также наблюдается рост количества простоев по причине отказа элементов ПА, СВП, УНБ, который объясняется выработкой ресурса, низким качеством выполнения ремонтно-восстановительных работ и запасных частей. Статистические данные по простоям МБК, вызванным отказами оборудования, и восстановлению его в работоспособное состояние представлены в таблице.

Анализ статистических данных причин простоев МБК, связанных с отказами его подсистем, позволяет качественно оценить степень надежности. Для более детальной оценки надежности МБК необходимо вычислить один из основных показателей надежности – вероятность безотказной работы, интенсивности отказов элементов (ПА, СВП, УНБ, вспомогательного оборудования) [7–15].

Под вероятностью безотказной работы (далее – ВБР) объекта понимается вероятность

Таблица

| № п/п | Наименование                     | Среднее время простоя в год, час | Среднее количество простоев в год, шт. | Среднее время восстановления, час |
|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| 1.    | Подъемный агрегат (ПА)           | 3 624                            | 330                                    | 11                                |
| 2.    | Система верхнего привода (СВП)   | 1 385                            | 104                                    | 13,3                              |
| 3.    | Установка насосная буровая (УНБ) | 23                               | 2                                      | 11,5                              |
| 4.    | Вспомогательное оборудование     | 222                              | 104                                    | 2,2                               |

Примечание: составлено авторами.

того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

ВБР является основной количественной характеристикой безотказности объекта на заданном временном интервале [8, 9, 13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета ВБР элементов 60 единиц СВП представлены на рис. 3–4.

У подшипников 32028X, В7032 наблюдается относительно равномерное и быстрое снижение ВБР практически с первых часов эксплуатации: до 20 000 часов,  $ВБР \geq 0,6$ , что говорит о низкой функциональной надежности анализируемых элементов. У гидробази-

са МФА, крана шарового, ролика конусного ходового, подшипника 29403, индуктивного датчика, подшипника роликового наблюдается ВБР на достаточно высоком уровне:  $ВБР \geq 0,82$  до 12 000 часов, но затем наблюдается резкое уменьшение, что говорит о достаточно высокой функциональной надежности, но только до 12 000 часов эксплуатации.

Труба грязевая обладает сравнительно низкой  $ВБР \geq 0,2$  до 6 000 часов эксплуатации, что возможно объяснить тяжелым режимом работы и низким качеством составных элементов.

Элементы СВП: гидравлический аксиально-поршневой насос, гидрораспределитель ДНА, подшипник 32224, гидротормоз

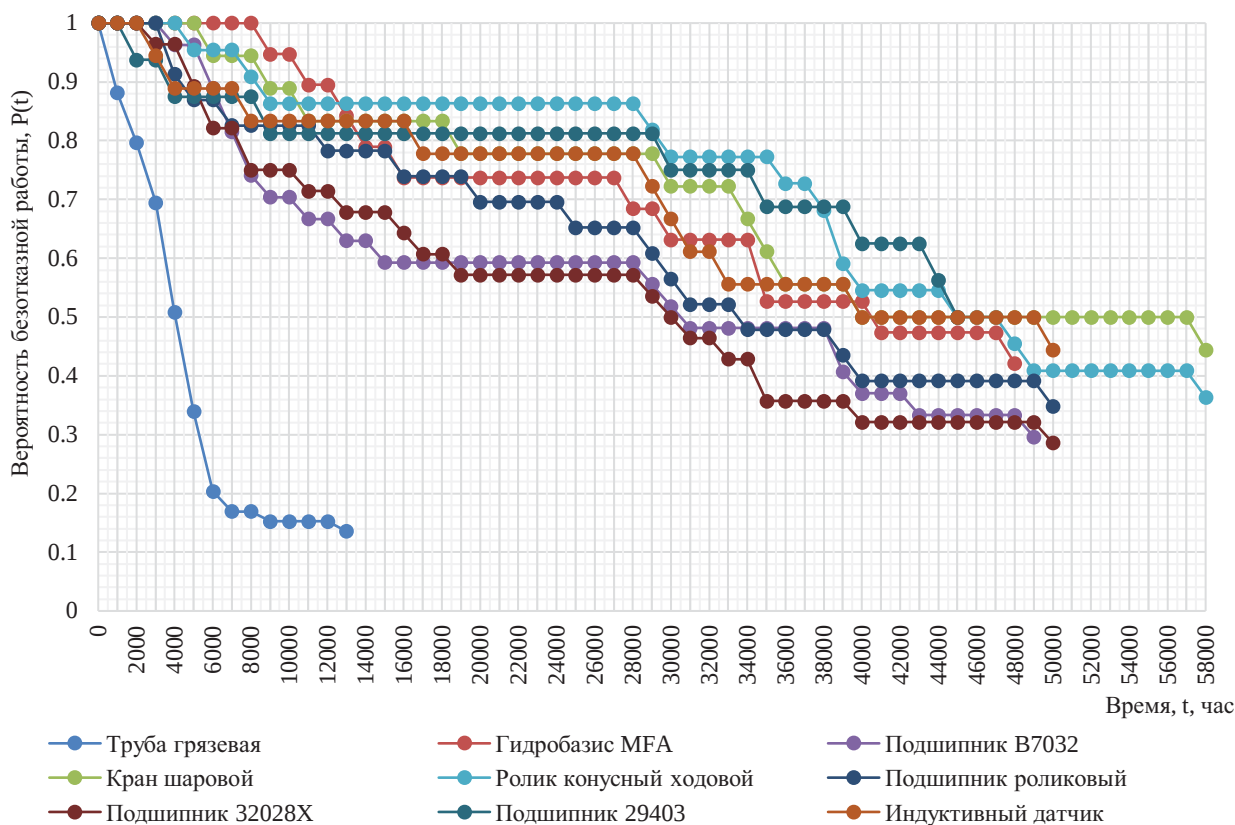


Рис. 3. ВБР элементов 60 единиц СВП

Примечание: составлено авторами.

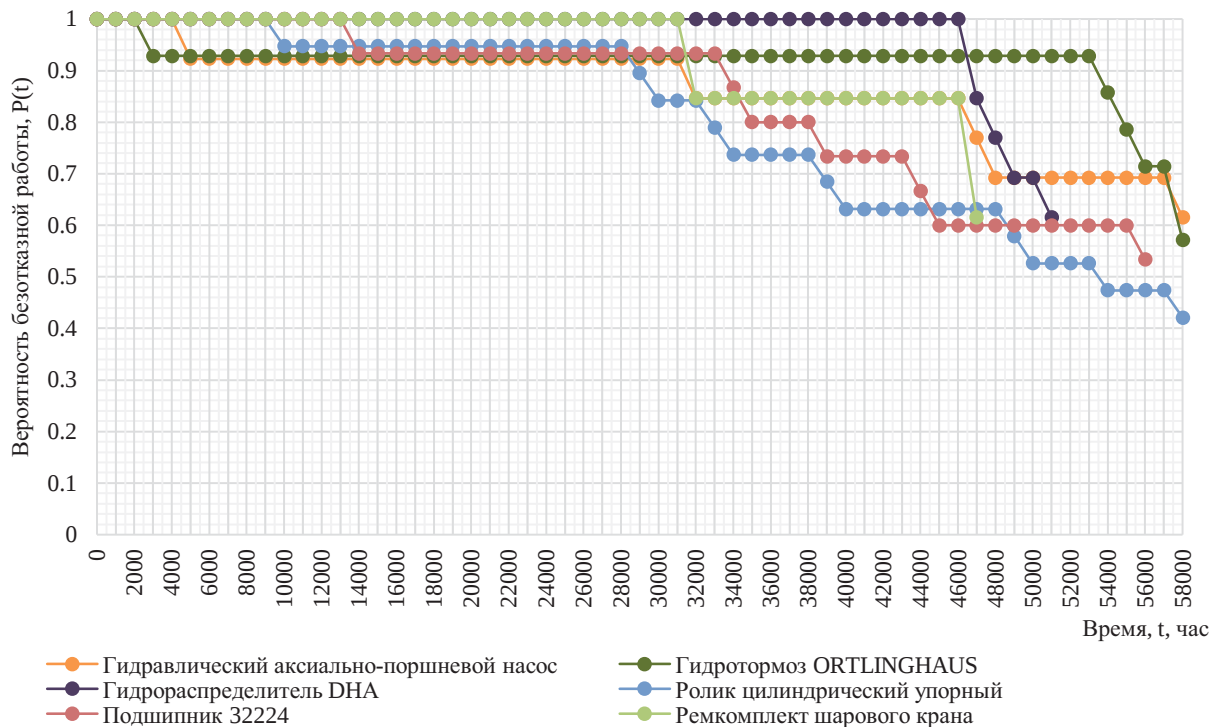


Рис. 4. ВБР элементов 60 единиц СВП

Примечание: составлено авторами.

ORTLINGHAUS, ролик цилиндрический упорный, ремкомплект шарового крана – обладают достаточно высокой надежностью вплоть до 28 000 часов эксплуатации с ВБР  $\geq 0,9$ , далее наблюдается снижение ВБР  $\geq 0,6$  до 46 000 часов эксплуатации, а у гидротормоза ORTLINGHAUS ВБР  $\geq 0,9$  наблюдается до 54 000 часов эксплуатации.

Выполнен расчет интенсивности отказов элементов 60 единиц СВП.

Интенсивность отказов (далее – ИО) – это отношение числа отказавших объектов в единицу времени к среднему числу объектов, продолжающих исправно работать в данный интервал времени.

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(\Delta t)}{N(t)\Delta t},$$

где  $\Delta n(\Delta t)$  – число отказов объекта за промежуток времени от  $(t - \Delta t/2)$ ;

$$N(t) = \frac{N_{i-1} + N_i}{2},$$

где  $N_{i-1}$  – число исправно работающих объектов в начале интервала времени  $\Delta t$ ;

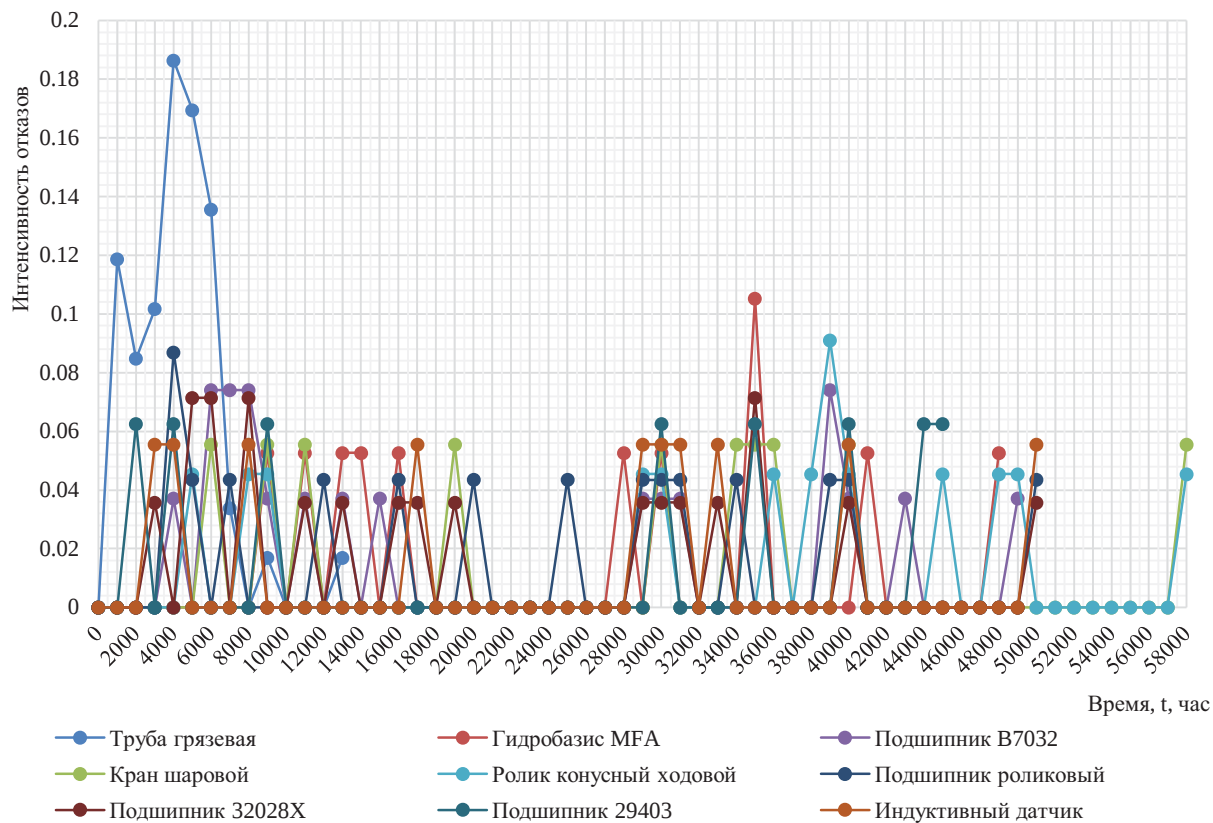
$N_i$  – число исправно работающих объектов в конце интервала времени  $\Delta t$ .

ИО часто называют  $\lambda$ -характеристикой. Она показывает, какая часть объектов выходит из строя в единицу времени по отношению к среднему числу исправно работающих объектов [4, 5].

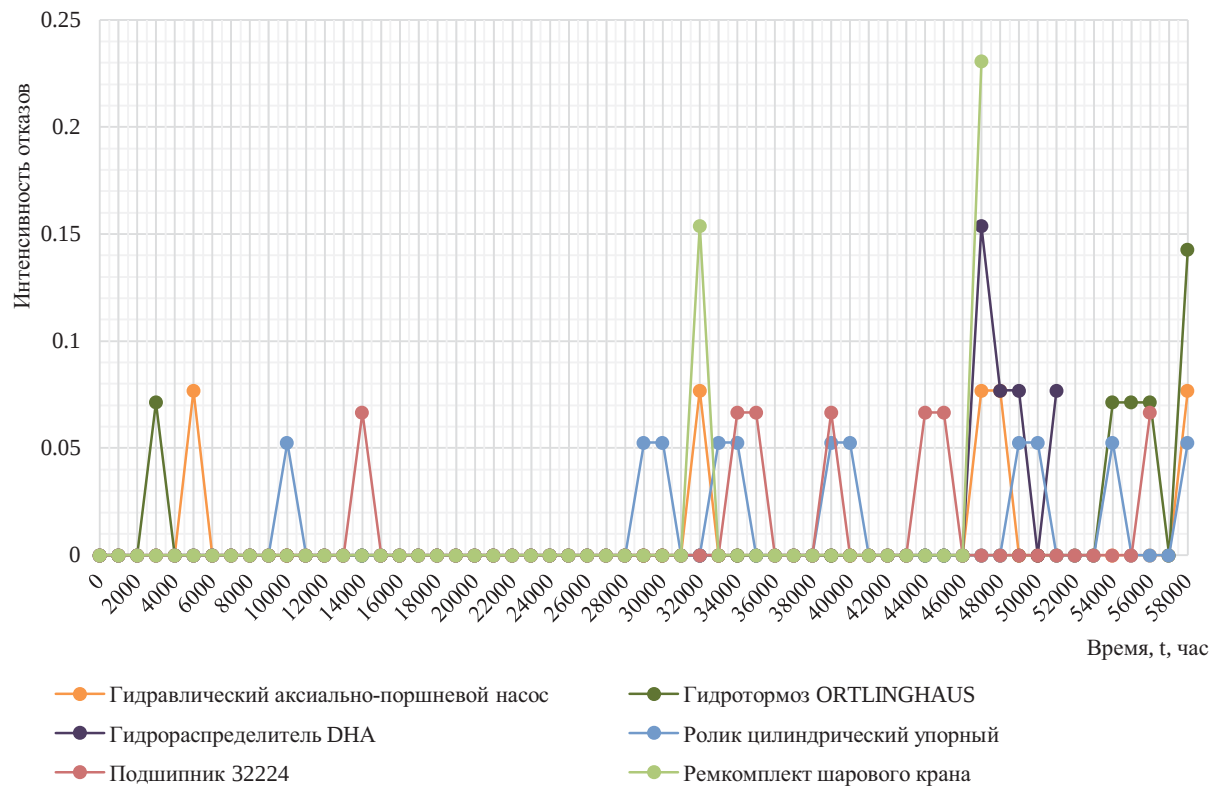
На основе собранных статистических данных фактической эксплуатации СВП на месторождениях Западной Сибири выполнен расчет интенсивности отказов, представленный в графическом виде на рис. 5–6.

У трубы грязевой наблюдается резкое увеличение ИО практически с первых часов эксплуатации: ИО  $\leq 0,2$  до 4 000 часов. Далее наблюдается резкое снижение, и к 8 000 часов ИО  $\leq 0,02$ ; в период с 8 000 до 13 000 часов ИО  $\leq 0,02$ . У подшипников 32028X, B7032 ИО не превышает 0,04 практически на всем интервале времени эксплуатации от начала до 50 000 часов, за исключением локального увеличения ИО до 0,08 в интервале времени от 4 000 до 10 000 и от 35 000 до 39 000 часов эксплуатации.

ИО гидробазиса MFA, крана шарового, ролика конусного ходового, индуктивного датчика, подшипника роликового не превышает 0,06, за исключением локаль-



**Рис. 5. ИО элементов СВП**  
Примечание: составлено авторами.



**Рис. 6. ИО элементов СВП**  
Примечание: составлено авторами.

ного увеличения ИО до 0,11 у гидробазиса MFA в периоде от 34 000 до 36 000 часов. ИО до 0,1 ролика конусного ходового в периоде от 39 000 до 41 000 часов и ИО до 0,09 подшипника роликового в период от 2 000 до 5 000 часов эксплуатации. ИО подшипника 29403 не превышает 0,07 от начала эксплуатации и до 46 000 часов эксплуатации.

ИО элементов СВП: гидравлического аксиально-поршневого насоса, гидрораспределителя DHA, подшипника 32224, гидротормоза ORTLINGHAUS, ролика цилиндрического упорного, ремкомплекта шарового крана – не превышает 0,08, за исключением локального роста ИО у ремкомплекта шарового крана до 0,15 в период от 32 000 до 33 000 часов, до 0,23 в период от 46 000 до 48 000 часов, у гидрораспределителя DHA до 0,15 в период от 46 000 до 48 000 часов и у гидротормоза ORTLINGHAUS до 0,15 в период от 57 000 до 58 000 часов эксплуатации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ вероятности и интенсивности отказов СВП и ее элементов позволит определить требуемое количество запасных частей и СВП и разработать мероприятия по устранению причин отказов, что повысит надежность и безопасность эксплуатации СВП, смонтированной на МБК. Сопоставление полученных данных по интенсивности отказов, вероятности безотказной работы и других показателей со стоимостью мероприятий по устранению как самих отказов, так и причин позволит рассчитывать риски. Полученные данные позволят выстроить оптимальную экономическую

модель работы и развития нефтегазодобывающего предприятия.

Среднее время восстановления в работоспособное состояние СВП составляет 13,3 часа, что является максимальным из сравниваемых групп оборудования и объясняется высокой конструктивной сложностью СВП и ее элементов. Высокая конструктивная сложность значительно повышает трудоемкость и увеличивает время восстановления в работоспособное состояние (от поиска причины неисправности, замены отказавшего элемента или узла до проведения пусконаладочных работ и ввода в эксплуатацию). На восстановление в работоспособное состояние ПА и УНБ в среднем тратится около 11 часов, на восстановление в работоспособное состояние ВО тратится около 2,2 часа. Такое относительно малое время объясняется наличием резервного оборудования, относительно низкой конструктивной сложностью и высоким уровнем надежности элементов.

Анализ исследуемых данных рис. 1–6 и таблицы позволит качественно оценить надежность элементов СВП, эксплуатируемых в составе МБК. Отличительной особенностью выполненных расчетов и полученных результатов является то, что для расчетов были использованы данные фактической эксплуатации СВП. Выполненный расчет предназначен для оценки функциональной надежности СВП, позволяющей обоснованно принимать управленческие и технические решения для обеспечения требуемого уровня функциональной надежности СВП, эксплуатируемых в районах Западной Сибири.

### Список источников

1. Зернов В. И., Чичуа Д. А. Бурение горизонтальных скважин в Западной Сибири // Исследования молодых ученых : материалы XI Междунар. науч. конф., 20–23 июня 2020 г., г. Казань. Казань : Молодой ученый, 2020. С. 16–19.
2. Петрухин В. В., Коротков С. А., Черский М. И. Анализ систем верхнего привода для бурения горизонтальных скважин // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации) : материалы десятой междунар. науч.-технич. конф., 24 ноября 2016 г., г. Тюмень. Т. 2. Тюмень :

### References

1. Zernov V. I., Chichua D. A. Burenie gorizontalnykh skvazhin v Zapadnoi Sibiri. In: *Proceedings of the 11th International Research Conference "Issledovaniia molodykh uchenykh"*, June 20–23, 2020, Kazan. Kazan: Molodoi uchenyi; 2020. p. 16–19. (In Russ.).
2. Petrukhin V. V., Korotkov S. A., Chersky M. I. Analiz sistem verkhnego privoda dlia bureniia gorizontalnykh skvazhin. In: *Proceedings of the Scientific and Engineering Conference "Geologiya i neftegazonosnostt Zapadno-Sibirskogo megabasseina"*, November 24,

- Тюменский индустриальный университет, 2016. С. 178–181.
3. TDS-9SA Буровая система верхнего привода. 302 с. URL: [https://electrorig.narod.ru/olderfiles/1/TOP\\_DRIVE\\_TDS\\_9SA\\_MANUAL\\_RUS.pdf](https://electrorig.narod.ru/olderfiles/1/TOP_DRIVE_TDS_9SA_MANUAL_RUS.pdf) (дата обращения: 08.05.2024).
  4. Сызранцева К. В., Ильиных В. Н., Колбасин Д. С. Оценка вероятности отказа редуктора системы верхнего привода буровой установки с учетом режима его эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2019. № 3. С. 127–134.
  5. Нефтегазодобывающее оборудование. URL: [http://elmech.ru/product-catalog?mode=folder&folder\\_id=61069215](http://elmech.ru/product-catalog?mode=folder&folder_id=61069215) (дата обращения: 08.05.2024).
  6. Антонюк П. В., Острейковский В. А., Антонюк А. В. Надежность элементов мобильного бурового комплекса по статистическим данным при эксплуатации в условиях Западной Сибири // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 4. С. 94–101.
  7. Куприенко Н. В., Пономарева О. А., Тихонов Д. В. Статистика. Методы анализа распределений. Выборочное наблюдение. 3-е изд. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 138 с.
  8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 10-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2006. 575 с.
  9. Острейковский В. А. Теория надежности. М.: Высш. шк., 2003. 463 с.
  10. РД 50-690-89. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным: методич. указания. М.: Изд-во стандартов, 1990. 132 с.
  11. Ткаченко Н. И., Башняк С. Е. Надежность технических систем и техногенный риск. пос. Персиановский: Донской ГАУ, 2015. 60 с.
  12. Молчанов Г. В., Молчанов А. Г. Машины и оборудование для добычи нефти и газа. М.: Недра, 1984. 464 с.
  13. Хэнли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
  14. Быков И. Ю., Цхадая Н. Д. Эксплуатационная надежность и работоспособность буровых машин. Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2004. 196 с.
  15. Антонюк П. В., Острейковский В. А. Разработка и апробация методики расчета необходимого числа резервных мобильных буровых комплексов и их оборудования при эксплуатации на месторождениях Западной Сибири // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2021. № 12. С. 27–34.
  - 2016, Tyumen. Vol. 2. Tyumen: Tyumen Industrial University; 2016. p. 178–181. (In Russ.).
  3. TDS-9SA Hydraulic top drive. 302 p. URL: [https://electrorig.narod.ru/olderfiles/1/TOP\\_DRIVE\\_TDS\\_9SA\\_MANUAL\\_RUS.pdf](https://electrorig.narod.ru/olderfiles/1/TOP_DRIVE_TDS_9SA_MANUAL_RUS.pdf) (accessed: 08.05.2024). (In Russ.).
  4. Syzrantseva K. V., Il'inykh V. N., Kolbasin D. S. Assessing the failure probability of gearhead of drilling rig top drive system taking into account the mode of its operation. *Oil and Gas Studies*. 2019;(3):127–134. (In Russ.).
  5. Neftgazodobyvaiushchee oborudovanie. URL: [http://elmech.ru/product-catalog?mode=folder&folder\\_id=61069215](http://elmech.ru/product-catalog?mode=folder&folder_id=61069215) (accessed: 08.05.2024). (In Russ.).
  6. Antonyuk P. V., Ostreykovsky V. A., Antonyuk A. V. Reliability of elements of a mobile drilling complex under statistical data when operating in conditions of Western Siberia. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2019;(4):94–101. (In Russ.).
  7. Kuprienko N. V., Ponomareva O. A., Tikhonov D. V. Statistika. Metody analiza raspredelenii. Vyborochnoe nabludenie. 3rd ed. St. Petersburg: Publishing House of Polytechnic University; 2009. 138 p. (In Russ.).
  8. Venttsel E. S. Teoriia veroiatnostei. 10th ed. Moscow: Higher School; 2006. 575 p. (In Russ.).
  9. Ostreykovsky V. A. Teoriia nadezhnosti. Moscow: Higher School; 2003. 463 p. (In Russ.).
  10. RD 50-690-89. Industrial product dependability. Methods for assessing reliability indicators based on experimental data. Methodical guidelines. Moscow: Publishing House of Standards; 1990. 132 p. (In Russ.).
  11. Tkachenko N. I., Bashnyak S. E. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyi risk. Persianovsky settlement: Don State Agrarian University; 2015. 60 p. (In Russ.).
  12. Molchanov G. V., Molchanov A. G. Mashiny i oborudovanie dlia dobychi nefi i gaza. Moscow: Nedra; 1984. 464 p. (In Russ.).
  13. Henley E. J., Kumamoto H. Reliability engineering and risk assessment. Moscow: Mashinostroenie; 1984. 528 p. (In Russ.).
  14. Bykov I. Yu., Tskhadaya N. D. Ekspluatatsionnaya nadezhnost i rabotosposobnost burovyykh mashin. Ukhta: Ukhta State Technical University; 2004. 196 p. (In Russ.).
  15. Antonyuk P. V., Ostreykovsky V. A. Development and testing of the methods for calculation of the necessary number of standby mobile drilling complexes and their equipment when operating in the fields of the Western Siberia. *Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex*. 2021;(12):27–34. (In Russ.).

### Информация об авторах

**П. В. Антонюк** – аспирант.

**В. А. Острейковский** – доктор технических наук, профессор.

### Information about the authors

**P. V. Antonyuk** – Postgraduate.

**V. A. Ostreykovsky** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor.

Научная статья

УДК 519.2:519.862.6:519.852

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-2



## МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ РЕГРЕССИЙ С ПОМОЩЬЮ АППАРАТА ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Михаил Павлович Базилевский<sup>1</sup>, Артём Александрович Малыгин<sup>2</sup>,  
Анна Евгеньевна Шаманова<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

<sup>1</sup>mik2178@yandex.ru<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-3253-5697>

<sup>2</sup>temamal2001@mail.ru

<sup>3</sup>anutashamanova056@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме оценивания логистических регрессий, в которых объясняемая переменная принимает только два значения – 0 и 1. Прогнозные значения объясняемой переменной оцененной логистической регрессии трактуются как вероятности возникновения некоторого события, поэтому такие модели находят широкое применение при решении задач классификации. Для оценивания логистических регрессий на практике в основном используется метод максимального правдоподобия, реализованный во многих современных статистических пакетах. Один из его недостатков, например, в том, что в случае полной разделимости объектов на два класса он не дает единственных оценок. В работе предложен новый метод оценивания логистических регрессий. Условно его можно разбить на два этапа. Первый этап состоит в решении специальным образом сформулированной задачи линейного программирования, благодаря чему находятся весовые коэффициенты линейной комбинации объясняющих переменных. По сути, уже на этом этапе осуществляется классификация. Второй этап состоит в калибровке масштаба вероятностей. На основе реальной выборки объема 100 проведены вычислительные эксперименты. Новый метод доказал свою работоспособность при полной разделимости объектов на два класса. К тому же по количеству корректно предсказанных случаев новый метод ни разу не уступил методу максимального правдоподобия, а в одном из экспериментов и вообще превзошел его.

**Ключевые слова:** задача классификации, модель бинарного выбора, логистическая регрессия, метод максимального правдоподобия, линейное программирование

**Для цитирования:** Базилевский М. П., Малыгин А. А., Шаманова А. Е. Метод оценивания логистических регрессий с помощью аппарата линейного программирования // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 14–22. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-2.

Original article

## METHOD FOR ESTIMATING LOGISTIC REGRESSIONS USING LINEAR PROGRAMMING APPARATUS

Mikhail P. Bazilevsky<sup>1</sup>, Artyom A. Malygin<sup>2</sup>, Anna E. Shamanova<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

<sup>1</sup>mik2178@yandex.ru<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-3253-5697>

<sup>2</sup>temamal2001@mail.ru

<sup>3</sup>anutashamanova056@mail.ru

**Abstract.** The article is devoted to the problem of estimating logistic regressions where the explanatory variable has only two values, 0 and 1. The predicted values of the explanatory variable of the estimated logistic regression are interpreted as the probabilities of the occurrence of some event. As a result, such models

are widely used to solve classification problems. In practice, the maximum likelihood estimation, which is implemented in many modern statistical packages, is mainly used to estimate logistic regressions. One of its disadvantages, for example, is that it does not provide unique estimates when grouping objects into two separate classes. The study proposes a new method for estimating logistic regressions. Conventionally, it can be divided into two stages. The first stage consists of solving a specially formulated linear programming problem. As a result, the weighting coefficients of the linear combination of explanatory variables are found. In fact, classification is already carried out at this stage. The second stage is to calibrate the probability scale. Computational experiments were carried out based on a real sample of volume 100. The new method has proven its efficiency when objects are completely separable into two classes. In addition, in terms of the number of correctly predicted cases, the new method was never inferior to the maximum likelihood estimation, and even surpassed the latter in one of the experiments.

**Keywords:** classification problem, binary choice model, logistic regression, maximum likelihood estimation, linear programming

**For citation:** Bazilevsky M. P., Malygin A. A., Shamanova A. E. Method for estimating logistic regressions using linear programming apparatus. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):14–22. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-2.

## ВВЕДЕНИЕ

В современных технологиях машинного обучения [1–3] актуальными и широко применяемыми считаются задачи классификации, решение которых заключается в построении алгоритмов, способных автоматически разделять некоторые имеющиеся объекты или ситуации на классы. Например, задача классификации спама в электронной почте, состоящая в автоматическом определении по таким факторам, как текст письма, адрес отправителя, наличие ссылок и т. д., является ли письмо спамом или нет. Задача классификации клиента в банке с целью выдачи ему кредита в зависимости от его дохода, семейного положения, кредитной истории, возраста и т. д. Важную роль задачи классификации играют в обеспечении информационной безопасности предприятий, поскольку правильная классификация киберугрозы является залогом успеха в ее противодействии [4].

Если для классификации имеется только два класса объектов, то целесообразно перейти к оцениванию модели бинарного выбора [5, 6] следующего вида:

$$y_i = G\left(\alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j x_{ij}\right) + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $n$  – объем выборки;

$l$  – число объясняющих переменных;

$x_{ij}$  –  $i$ -е значение  $j$ -й объясняющей переменной;  
 $y_i \in \{0, 1\}$  –  $i$ -е значение бинарной объясняемой переменной;

$\varepsilon_i$  –  $i$ -я ошибка аппроксимации;

$\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_l$  – неизвестные параметры;

$G(z)$  – некоторая вещественная функция от аргумента  $z$ .

При логистическом распределении функ-

ция  $G(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$  (сигмоида), поэтому модель (1) принимает вид:

$$y_i = \frac{1}{1 + \exp\left(-\left(\alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j x_{ij}\right)\right)} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Модель (2) называется логистической регрессией (логит-моделью).

Логистические регрессии применяются в различных сферах человеческой деятельности. Так, например, в [7] построена логистическая регрессия для прогнозирования летальности в отделении интенсивной терапии, в [8] – для вычисления повреждаемости твердого деформируемого тела, в [9] – для прогнозирования использования населением портала государственных услуг.

Поскольку все расчетные значения объясняемой переменной  $y$ , полученные с помощью оцененной логит-модели (2), всегда попадают в промежуток от 0 до 1, то их отождествляют с вероятностями. Если эта

вероятность больше 0,5, то объект или ситуация соответствует классу № 1, а если меньше 0,5 – классу № 2.

К сожалению, логистические регрессии являются нелинейными по неизвестным параметрам, поэтому для их оценивания нельзя использовать простые методы наименьших квадратов или модулей. Вместо них применяется метод максимального правдоподобия (ММП) [10, 11]. Алгоритмы ММП реализованы во многих современных статистических пакетах, например в Gretl. Однако в случае полной разделимости объектов или ситуаций на два класса ММП-оценки логистической регрессии не единственны. На устранение данного недостатка направлено данное исследование.

Цель работы состоит в разработке простого метода оценивания логистических регрессий, способного работать даже в условиях абсолютной классификации объектов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аппарат математического программирования [12, 13] активно применяется в настоящее время в научных исследованиях для решения самых разных прикладных задач. Также он находит применение в регрессионном анализе (см., например, [14–17]).

Сигмоида  $G(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$  устроена так, что при  $z = 0$  функция  $G = 1/2$ , поэтому классифицировать объекты в этой точке, вообще говоря, невозможно. Если  $z > 0$ , то  $G > 1/2$ , поэтому объекты относятся к первому классу. Если же  $z < 0$ , то  $G < 1/2$ , поэтому объекты относятся ко второму классу. Из этого следует, что для классификации требуется подобрать неизвестные параметры  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_l$  значений аргументов сигмоиды:

$$z_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

так, чтобы выполнялись следующие условия:

$$z_i > 0, \quad i \in I_1, \quad (4)$$

$$z_i < 0, \quad i \in I_0, \quad (5)$$

где  $I_0 = \{i \mid y_i = 0\}$ ,  $I_1 = \{i \mid y_i = 1\}$ .

Неравенства в условиях (4), (5) строгие, поэтому их нельзя задействовать в задаче линейного программирования (ЛП). Тогда придадим им нестрогий вид:

$$z_i \geq 0, \quad i \in I_1, \quad (6)$$

$$z_i \leq 0, \quad i \in I_0. \quad (7)$$

Условия (6), (7) означают, что если в результате оценивания  $z_i = 0$ , то классифицировать объект невозможно. Поэтому заменим их следующими соотношениями:

$$z_i \geq r, \quad i \in I_1, \quad (8)$$

$$z_i \leq -r, \quad i \in I_0, \quad (9)$$

где  $r$  – заданное исследователем положительное число.

Если область решений системы линейных неравенств (3), (8) и (9) непустое множество, то возможна полная разделимость объектов на два класса. На практике же такое может происходить нечасто, поэтому введем ошибки классификации:

$$u_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Если  $i$ -й объект классифицирован верно, то  $u_i = 0$ . Учитывая это, условия (8), (9) нужно переписать в виде:

$$z_i \geq r - u_i, \quad i \in I_1, \quad (11)$$

$$z_i \leq -r + u_i, \quad i \in I_0. \quad (12)$$

Сумма ошибок, естественным образом, должна быть минимальной, т. е.

$$\sum_{i=1}^n u_i \rightarrow \min. \quad (13)$$

Тогда решение задачи ЛП с целевой функцией (13) и линейными ограничениями (3), (10)–(12) позволяет найти такие значения параметров  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_p$  при которых сумма ошибок классификации минимальна.

Заметим, что подобную формулировку задачи ЛП можно встретить в других ранее опубликованных научных статьях, посвященных инструментам оценки кредитоспособности заемщиков. Так, в работе [18],

датированной 2012 г., при анализе методов классификации приведена следующая задача ЛП:

$$\begin{aligned} \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{ng+nb} &\rightarrow \min, \\ w_1 x_{i1} + w_2 x_{i2} + \dots + w_p x_{ip} &\geq c - a_i, \quad 1 \leq i \leq ng, \\ w_1 x_{i1} + w_2 x_{i2} + \dots + w_p x_{ip} &\leq c - a_i, \\ ng + 1 \leq i \leq ng + nb, \\ a_i &\geq 0, \quad 1 \leq i \leq ng + nb, \end{aligned}$$

где  $ng$  – количество «хороших» заемщиков;  
 $nb$  – количество «плохих» заемщиков;  
 $x_{ip}$  – ответ  $i$ -го заемщика на  $p$ -й вопрос анкеты;  
 $c$  – заданная граница, отделяющая «плохого» заемщика от «хорошего»;  
 $\alpha_i$  –  $i$ -я ошибка классификации;  
 $w_1, \dots, w_p$  – неизвестные веса.

Точно такую же постановку можно найти в зарубежной статье [19], опубликованной и вовсе в 2000 г. Там же отмечено, что модели ЛП для решения проблемы классификации были предложены еще в 1981 г. в работе [20]. Однако если в этой задаче взять  $c = 0$ , то ее решением всегда будут нулевые веса и нулевые ошибки классификации. В сформулированной нами задаче ЛП (3), (10)–(13) такая особенность за счет введения числа  $r$  исключена.

Вясним, как влияет выбор параметра  $r$  на результаты решения задачи ЛП (3), (10)–(13). Пусть при  $r = r^*$  эта задача имеет оптимальное решение  $a_0 = a_0^*, a_1 = a_1^*, \dots, a_l = a_l^*, u_1 = u_1^*, \dots, u_n = u_n^*, z_1 = z_1^*, \dots, z_n = z_n^*$ . Увеличим значение параметра  $r$  в  $k > 0$  раз, т.е. примем  $r = k \times r^*$ . Поделим все ограничения и целевую функцию в задаче ЛП на  $k$ . Тогда она принимает вид:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{u_i}{k} &\rightarrow \min, \\ \frac{z_i}{k} &= \frac{\alpha_0}{k} + \sum_{j=1}^l \frac{\alpha_j}{k} x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \\ \frac{z_i}{k} &\geq r^* - \frac{u_i}{k}, \quad i \in I_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{z_i}{k} &\leq -r^* + \frac{u_i}{k}, \quad i \in I_0, \\ \frac{u_i}{k} &\geq 0, \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Эта задача имеет оптимальное решение

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_0}{k} &= \alpha_0^*, \quad \frac{\alpha_1}{k} = \alpha_1^*, \quad \dots, \quad \frac{\alpha_l}{k} = \alpha_l^*, \quad \frac{u_1}{k} = u_1^*, \\ \dots, \quad \frac{u_n}{k} &= u_n^*, \quad \frac{z_1}{k} = z_1^*, \quad \dots, \quad \frac{z_n}{k} = z_n^*. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что при увеличении параметра  $r$  в  $k > 0$  раз оптимальные значения всех переменных увеличатся также в  $k$  раз. Таким образом, если упорядочить оптимальные значения переменных  $z_1, \dots, z_n$ , найденные при  $r = r^*$ , по возрастанию, то при  $r = k \times r^*$  эти значения увеличатся в  $k$  раз, но порядок их следования сохранится. Используем далее это свойство для проведения калибровки масштаба вероятностей.

После решения задачи ЛП (3), (10)–(13) вероятности отнесения объектов к одному из двух классов находятся по формуле:

$$y^* = \frac{1}{1 + \exp(-z^*)}.$$

Из-за того что значение параметра  $r$  в задаче ЛП выбирается произвольно, эти вероятности могут принимать непредсказуемые значения, например, они все могут быть очень близки к 0,5. В таком случае необходимо провести калибровку масштаба вероятностей, оценив неизвестный параметр  $\beta$  в следующей регрессионной модели:

$$y_i = \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot z_i^*)} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

К сожалению, регрессия (14) является нелинейной по неизвестному параметру. Поэтому калибровку масштаба вероятностей при  $\sum_{i=1}^n u_i \neq 0$  проще осуществить по следующему алгоритму.

**Шаг 1.** Назначить близкое к единице число  $\Delta$ . Например,  $\Delta = 0,99$ ,  $\Delta = 0,999$  или  $\Delta = 0,9999$ .

**Шаг 2.** Если  $|z_{\min}^*| < |z_{\max}^*|$ , где  $z_{\min}^* = \min\{z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*\}$ ,  $z_{\max}^* = \max\{z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*\}$ , то найти

неизвестный параметр  $\beta$  регрессии (14) из уравнения:

$$\Delta = \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot z_{\max})},$$

откуда

$$\beta = -\frac{1}{z_{\max}} \ln\left(\frac{1-\Delta}{\Delta}\right).$$

*Шаг 3.* Если  $|z_{\min}| > |z_{\max}|$ , то найти неизвестный параметр  $\beta$  из уравнения:

$$1 - \Delta = \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot z_{\min})},$$

откуда

$$\beta = -\frac{1}{z_{\min}} \ln\left(\frac{1-\Delta}{\Delta}\right).$$

Пусть при  $r = r^*$  оптимальные значения параметров  $z_i = z_i^*$ ,  $i = \overline{1, n}$ , а при  $r = k \times r^* - z_i = k \times z_i^*$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Если  $|z_{\min}| > |z_{\max}|$ , то при  $r = r^*$  величина

$$\beta = -\frac{1}{z_{\max}} \ln\left(\frac{1-\Delta}{\Delta}\right),$$

а при  $r = k \times r^* -$

$$\beta = -\frac{1}{k \cdot z_{\max}} \ln\left(\frac{1-\Delta}{\Delta}\right).$$

В обоих случаях уравнение

$$y^* = \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot z^*)}$$

будет одинаковым. Из этого следует, что для любого  $r$  калибровка масштаба вероятностей приводит к единственному уравнению.

Пусть при решении задачи ЛП (3), (10)–(13) значение целевой функции  $\sum_{i=1}^n u_i = 0$ , т.е. имеет место полная разделимость объектов на два класса. Очевидно, что в такой ситуации задача ЛП имеет не единственное решение, поэтому и калибровка масштаба вероятностей может давать разные результаты. Поэтому для такого случая вместо представленного трехшагового алгоритма следует решить задачу ЛП с целевой функцией:

$$r \rightarrow \max, \quad (15)$$

с линейными ограничениями (3) и

$$r \leq z_i \leq -\ln\left(\frac{1-\Delta}{\Delta}\right), i \in I_1, \quad (16)$$

$$-\ln\left(\frac{1-\Delta}{\Delta}\right) \leq z_i \leq -r, i \in I_0. \quad (17)$$

Особенность нового метода оценивания логистических регрессий с помощью аппарата ЛП в том, что вероятности  $y_i^*$ ,  $i = \overline{1, n}$ , всегда попадают в диапазон  $1 - \Delta \leq y_i^* \leq \Delta$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для демонстрации работы предложенного математического аппарата были использованы статистические данные из книги [21]. Бинарная переменная  $y$  равна 1, если сотрудник имеет право бесплатного доступа в Интернет, 0 – в противном случае. Объясняющие переменные:  $x_1$  – возраст сотрудника,  $x_2$  – стаж профессиональной деятельности,  $x_3$  – заработная плата,  $x_4$  – число случаев поступления полезной для фирмы информации от сотрудника,  $x_5$  – результат тестирования на предмет оценки навыков работы в Интернете. Общий объем выборки составил 100.

ММП-оценивание логистических регрессий проводилось с использованием эконометрического пакета Gretl, для решения задач ЛП применялся пакет LPSolve IDE.

*Эксперимент № 1* (использовались первые 20 наблюдений выборки).

Исходные статистические данные представлены в таблице.

В Gretl была зафиксирована ошибка «Получен идеальный прогноз: MLE не существует». Это связано с тем, что имеет место полная разделимость объектов на два класса, поэтому единственных ММП-оценок логистической регрессии не существует.

В LPSolve задача ЛП (3), (10)–(13) была решена при  $r = 0,01$ . Все ошибки классификации оказались равны 0. Поэтому для калибровки масштаба вероятностей была решена задача ЛП (3), (15)–(17) при  $\Delta = 0,999$ . Оцененная логистическая регрессия имеет вид:

$$y^* = \frac{1}{1 + \exp(9,1567 - 0,4132x_1 + 0,0292x_2 + 1,09x_3 - 0,2324x_4 - 0,1836x_5)}. \quad (18)$$

Таблица

Исходные данные и результаты оценивания логистической регрессии

| $y$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $y^*$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0   | 22    | 1     | 2,5   | 2     | 6     | 0,222 |
| 0   | 24    | 1     | 3     | 3     | 8     | 0,408 |
| 1   | 25    | 1     | 2,1   | 1     | 7     | 0,592 |
| 1   | 27    | 4     | 4,6   | 8     | 11    | 0,679 |
| 1   | 28    | 3     | 5,9   | 9     | 13    | 0,592 |
| 0   | 21    | 1     | 3,3   | 5     | 14    | 0,408 |
| 1   | 22    | 1     | 3,2   | 9     | 15    | 0,779 |
| 0   | 29    | 5     | 6     | 1     | 13    | 0,224 |
| 1   | 26    | 4     | 2,7   | 8     | 11    | 0,917 |
| 0   | 27    | 6     | 3,8   | 0     | 3     | 0,146 |
| 1   | 28    | 4     | 4,2   | 9     | 11    | 0,862 |
| 0   | 29    | 3     | 6,7   | 5     | 13    | 0,266 |
| 1   | 29    | 9     | 6,5   | 10    | 14    | 0,592 |
| 1   | 30    | 4     | 3,4   | 9     | 13    | 0,980 |
| 1   | 41    | 7     | 7,2   | 7     | 15    | 0,984 |
| 0   | 32    | 8     | 7,9   | 4     | 7     | 0,071 |
| 1   | 46    | 9     | 6,4   | 9     | 12    | 0,999 |
| 1   | 34    | 3     | 6,3   | 8     | 13    | 0,899 |
| 0   | 33    | 3     | 6,1   | 1     | 9     | 0,408 |
| 1   | 47    | 9     | 9,7   | 5     | 13    | 0,952 |

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

Найденные по модели (18) вероятности представлены в последнем столбце таблицы. Как видно, абсолютно все объекты классифицированы корректно.

Эксперимент № 2 (использовались все 100 наблюдений выборки).

Оцененная по этим данным в Gretl с помощью ММП логистическая регрессия имеет вид:

$$y^* = \frac{1}{1 + \exp(13,2023 - 0,4058x_1 + 0,3181x_2 + 1,3387x_3 - 1,4422x_4 - 0,2242x_5)}. \quad (19)$$

Модель (19) корректно классифицирует 96 объектов, за исключением наблюдений под номерами 3, 6, 28 и 48.

В LPSolve при  $r = 0,01$  была найдена следующая зависимость переменной  $z^*$  от объясняющих переменных:

$$z^* = -0,1013 + 0,002608x_1 - 0,002232x_2 - 0,00648x_3 + 0,00904x_4 + 0,00194x_5. \quad (20)$$

Для калибровки масштаба вероятностей было назначено  $\Delta = 0,999$ . Установлено, что  $z_{\min} = -0,08587$ ,  $z_{\max} = 0,081072$ . Поскольку  $|z_{\min}| > |z_{\max}|$ , то оценка параметра  $\beta$  определялась по формуле:

$$\beta = -\frac{1}{z_{\min}} \ln \left( \frac{\Delta}{1-\Delta} \right) = -\frac{1}{-0,08587} \ln \left( \frac{0,999}{1-0,999} \right) = 80,43.$$

С учетом (20) оцененная логистическая регрессия имеет вид:

$$y^* = \frac{1}{1 + \exp(8,1481 - 0,2098x_1 + 0,1795x_2 + 0,5212x_3 - 0,7271x_4 - 0,156x_5)}. \quad (21)$$

Модель (21) корректно классифицирует те же 96 объектов, что и модель (19). Но весовые коэффициенты этих регрессий различаются.

Та же самая модель (21) была получена при  $r = 100$ , что подтверждает корректность приведенных в данной работе математических выводов.

Эксперимент № 3 (использовались все 100 наблюдений выборки, но в первых пятидесяти из них значения объясняемой переменной были выбраны 0, а в последних пятидесяти – 1).

Оцененная по этим данным в Gretl с помощью ММП логистическая регрессия имеет вид:

$$y^* = \frac{1}{1 + \exp(-1,4623 + 0,0368x_1 - 0,0308x_2 - 0,0357x_3 - 0,0999x_4 + 0,121x_5)}. \quad (22)$$

Модель (22) корректно классифицирует 52 объекта.

Оцененная новым методом при  $r = 0,01$  и  $\Delta = 0,999$  логит-модель имеет вид:

$$y^* = \frac{1}{1 + \exp(-5,1974 + 0,1581x_1 - 0,4932x_2 + 0,0953x_3 - 0,4222x_4 + 0,5226x_5)} \quad (23)$$

Модель (23) корректно классифицирует 56 объектов. Таким образом, в этом эксперименте результаты классификации новым методом оказались лучше, чем при использовании ММП.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен новый метод оценивания неизвестных параметров логистических регрессий, в основе которого – решение специальным образом сформулированной задачи ЛП. В результате ее

решения определяются неизвестные весовые коэффициенты гиперплоскости, разделяющей объекты двух различных классов, т.е. осуществляется классификация. Показано, чем предложенная задача отличается от подобных задач ЛП. Доказана однородность сформулированной задачи ЛП. На основе этого разработан алгоритм калибровки масштаба вероятностей в логистической регрессии. На реальных данных проведены вычислительные эксперименты. Показано, что новый метод, в отличие от ММП, работает даже в случае полной разделимости объектов на два класса. По количеству корректно предсказанных случаев новый метод ни разу не уступил ММП, а в одном из экспериментов и вовсе превзошел его.

### Список источников

1. Géron A. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. Sebastopol, CA : O'Reilly Media, 2022. 861 p.
2. Kelleher J. D., Mac Namee B., D'arcy A. Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: Algorithms, worked examples, and case studies. Cambridge, Massachusetts : MIT press, 2020. 856 p.
3. Alpaydin E. Introduction to machine learning. Cambridge, Massachusetts : MIT press, 2020. 798 p.
4. Кажемский М. А., Шелухин О. И. Многоклассовая классификация сетевых атак на информационные ресурсы методами машинного обучения // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5, № 1. С. 107–115. DOI 10.31854/1813-324X-2019-5-1-107-115.
5. Горошко И. В., Гонов Ш. Х. Разработка алгоритма оценки результатов деятельности органов внутренних дел с использованием моделей бинарного выбора // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 2. С. 368–378.
6. Космыкова Т. Бинарные модели оценки риска банкротства предприятий // Наука и инновации. 2016. № 2. С. 47–50.
7. Лучинин А. С., Лянгузов А. В. Модель логистической регрессии для прогнозирования летальности в отделении интенсивной терапии: проблемы и решения // Качественная клиническая практика. 2022. № 2. С. 13–20.
8. Мармыш Д. Е. Применение логистической регрессии к вычислению повреждаемости твердого деформируемого тела // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 1. С. 46–53. DOI 10.46864/1995-0470-2020-1-54-46-53.

### References

1. Géron A. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. Sebastopol, CA: O'Reilly Media; 2022. 861 p.
2. Kelleher J. D., Mac Namee B., D'arcy A. Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: Algorithms, worked examples, and case studies. Cambridge, Massachusetts: MIT press; 2020. 856 p.
3. Alpaydin E. Introduction to machine learning. Cambridge, Massachusetts: MIT press; 2020. 798 p.
4. Kazhenskiy M., Sheluhin O. Multiclass classification of attacks to information resources with machine learning techniques. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(1):107–115. DOI 10.31854/1813-324X-2019-5-1-107-115. (In Russ.).
5. Goroshko I. V., Gonov S. H. Development of algorithm for assessment of results of activity of police departments with the use of binary choice models. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2018;6(2):368–378. (In Russ.).
6. Kosmykova T. Binary models of the business bankruptcy risk assessment. *The Science and Innovations*. 2016;(2):47–50. (In Russ.).
7. Luchinin A. S., Lyanguzov A. V. A logistic regression-based model to predict ICU mortality: Problems and solutions. *Good Clinical Practice*. 2022;(2):13–20. (In Russ.).
8. Marmysh D. E. Application of logistic regression in calculation of damageability of solid deformable body. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2021;(1):46–53. DOI 10.46864/1995-0470-2020-1-54-46-53. (In Russ.).

9. Кошевой О. С. Модель логистической регрессии для прогнозирования использования населением портала государственных услуг // Государственное управление. Электронный вестник. 2021. № 86. С. 42–56.
10. Копытцев В. А. Оценка надежности метода максимального правдоподобия при его использовании для решения систем уравнений с искажениями в правых частях // Математические вопросы криптографии. 2023. Т. 14, № 3. С. 107–117.
11. Ефремова И. Н., Ефремов В. В. Восстановление непрерывного изображения с использованием оценок максимального правдоподобия и интерполяции по атомарным функциям в соответствии с апертурой светочувствительного элемента датчика // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 84–98. DOI 10.21869/2223-1536-2022-12-1-84-98.
12. Иваньо Я. М. О некоторых методах математического моделирования в решении задач прогнозирования и планирования производства аграрной продукции // Актуальные вопросы аграрной науки. 2021. № 38. С. 49–57.
13. Lachhwani K. Application of neural network models for mathematical programming problems: A state of art review // Archives of Computational Methods in Engineering. 2020. Vol. 27. P. 171–182.
14. Базилевский М. П. Программа построения вполне интерпретируемых элементарных и неэлементарных квазилинейных регрессионных моделей // Труды Института системного программирования РАН. 2023. Т. 35, № 4. С. 129–144. DOI 10.15514/ISPRAS-2023-35(4)-7.
15. Базилевский М. П. Метод построения неэлементарных линейных регрессий на основе аппарата математического программирования // Проблемы управления. 2022. № 4. С. 3–14. DOI 10.25728/pu.2022.4.1.
16. Базилевский М. П. Отбор информативных регрессоров с учетом мультиколлинеарности между ними в регрессионных моделях как задача частично-булевого линейного программирования // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 2. С. 104–118.
17. Базилевский М. П. Построение вполне интерпретируемых линейных регрессионных моделей с помощью метода последовательного повышения абсолютных вкладов переменных в общую детерминацию // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 2. С. 5–16.
18. Никаненкова В. В. Кредитный скоринг как инструмент оценки кредитоспособности заемщиков // Вестник Адыгейского государственного университета, серия «Экономика». 2012. № 2. С. 32–38.
19. Thomas L. C. A survey of credit and behavioural scoring: Forecasting financial risk of lending to consumers // International Journal of Forecasting. 2000. Vol. 16, no. 2. P. 149–172.
9. Koshevoy O. S. Logistic regression model for predicting the use of the public services portal. *Public Administration. E-journal*. 2021;(86):42–56. (In Russ.).
10. Kopytsev V. A. Reliability estimate of the maximum likelihood method used for the solution of systems of equations with distorted right parts. *Mathematical Aspects of Cryptography*. 2023;14(3):107–117. (In Russ.).
11. Efremova I. N., Efremov V. V. Reconstruction of an analog image using maximum likelihood and interpolation by atomic functions according to the aperture of the photosensitive element of the sensor. *Proceedings of the Southwest State University. Series: IT Management, Computer Science, Computer Engineering. Medical Equipment Engineering*. 2022;12(1):84–98. DOI 10.21869/2223-1536-2022-12-1-84-98. (In Russ.).
12. Ivanyo Ya. M. On some methods of mathematical modeling in solving the problems of forecasting and planning agricultural production. *Actual Problems of Agricultural Science*. 2021;(38):49–57. (In Russ.).
13. Lachhwani K. Application of neural network models for mathematical programming problems: A state of art review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020;27:171–182.
14. Bazilevskiy M. P. Program for constructing quite interpretable elementary and non-elementary quasi-linear regression models. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2023;35(4):129–144. DOI 10.15514/ISPRAS-2023-35(4)-7. (In Russ.).
15. Bazilevskiy M. P. A method for constructing non-elementary linear regressions based on mathematical programming. *Control Sciences*. 2022;(4):3–14. DOI 10.25728/pu.2022.4.1. (In Russ.).
16. Bazilevskiy M. P. Subset selection in regression models with considering multicollinearity as a task of mixed 0-1 integer linear programming. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2018;6(2):104–118. (In Russ.).
17. Bazilevskiy M. P. Construction of quite interpretable linear regression models using the method of successive increase the absolute contributions of variables to the general determination. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2022;(2):5–16. (In Russ.).
18. Nikanenkova V. V. Credit scoring as a tool of an estimation of borrowers' creditworthiness. *The Bulletin of the Adyghe State University, Series "Economics"*. 2012;(2):32–38. (In Russ.).
19. Thomas L. C. A survey of credit and behavioural scoring: Forecasting financial risk of lending to consumers. *International Journal of Forecasting*. 2000;16(2):149–172.
20. Freed N., Glover F. Applications and Implementation: A linear programming approach to the discriminant problem. *Decision Sciences*. 1981;12(1):68–74.

20. Freed N., Glover F. Applications and Implementation: A linear programming approach to the discriminant problem // Decision Sciences. 1981. Vol. 12, no. 1. P. 68–74.
21. Исмагилов И. И., Кадочникова Е. И. Специальные модели эконометрики в среде Gretl. Казань : Казан. ун-т, 2018. 91 с.
21. Ismagilov I. I., Kadochnikova E. I. Spetsialnye modeli ekonometriki v srede Gretl. Kazan: Kazan University; 2018. 91 p. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

**М. П. Базилевский** – кандидат технических наук, доцент.

**А. А. Малыгин** – магистрант.

**А. Е. Шаманова** – магистрант.

### **Information about the authors**

**M. P. Bazilevsky** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

**A. A. Malygin** – Master's Degree Student.

**A. E. Shamanova** – Master's Degree Student.

Научная статья

УДК 004.032.26:58

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-3



## КЛАССИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ ИНФЕРЕНЦИОННОЙ СИСТЕМЫ (ANFIS)

Валентин Валерьевич Брыкин<sup>1</sup>✉, Михаил Яковлевич Брагинский<sup>2</sup>,  
Дмитрий Викторович Тараканов<sup>3</sup>, Инесса Леонидовна Назарова<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

<sup>1</sup>valentin.brykin@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6143-8992>

<sup>2</sup>braginskiy\_my@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>

<sup>3</sup>sprtdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

<sup>4</sup>nazarova\_il@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0340-2609>

**Аннотация.** В данной работе используется адаптивная нейро-нечеткая система ANFIS для классификации восьми болезней растений. В качестве входных данных системы применяются текстурные признаки Харалика, извлеченные из изображений растений. Обучение ANFIS проводилось с использованием гибридного алгоритма, сочетающего обратное распространение ошибки и градиентный спуск. Эффективность ANFIS оценивалась на тестовом наборе посредством вычисления точности, полноты и F1-меры. Полученные показатели подлежали сравнению с другими современными средствами классификации.

**Ключевые слова:** текстурные признаки Харалика, нейронная сеть, нейро-нечеткая система, логистическая регрессия, классификация цифровых изображений

**Для цитирования:** Брыкин В. В., Брагинский М. Я., Тараканов Д. В., Назарова И. Л. Классификация состояния растений с использованием адаптивной нейро-нечеткой инференционной системы (ANFIS) // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 23–30. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-3.

Original article

## CLASSIFYING PLANTS' HEALTH USING AN ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)

Valentin V. Brykin<sup>1</sup>✉, Mikhail Ya. Braginsky<sup>2</sup>, Dmitry V. Tarakanov<sup>3</sup>, Inessa L. Nazarova<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Surgut State University, Surgut, Russia

<sup>1</sup>valentin.brykin@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6143-8992>

<sup>2</sup>braginskiy\_my@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>

<sup>3</sup>sprtdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

<sup>4</sup>nazarova\_il@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0340-2609>

**Abstract.** The study classifies eight types of plants' diseases using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). Haralick texture features obtained from plants' images are applied as input data for a system. A hybrid algorithm consisting of a backward propagation of error and a gradient descent performed the ANFIS training. The ANFIS efficiency was assessed on a test set through calculating accuracy, comprehensiveness, and the F1 score. The indicators obtained by this method were compared with other modern classification methods.

**Keywords:** Haralick texture features, neural network, neural fuzzy system, logistic regression, classification of digital images

**For citation:** Brykin V. V., Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Nazarova I. L. Classifying plants' health using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):23–30. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-3.

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня цифровизация сельского хозяйства, где полевые условия контролируются с помощью автономных систем, набирает все большие обороты. При создании систем подобного рода необходимо решать задачи идентификации болезни растений, анализировать динамику их роста.

Задача выявления болезней растений, недостаток воды, микроэлементов на всех стадиях развития позволяет минимизировать экономические потери в агробизнесе. Таким образом, для решения вышеуказанной задачи необходимо использовать методы дистанционного мониторинга состояния растений, способных выявлять болезни растений с высокой точностью и скоростью.

Имеется большая потребность в новых технологиях, отслеживающих рост растений и прогнозирующих воздействие на него различных факторов. В большинстве случаев болезни можно проследить по состоянию побегов растения (стебля, листьев). Значит, идентификация растений, выявление болезней, анализ роста играют существенную роль в успешном выращивании агрономических культур.

Все операции, связанные с обработкой изображений, выполняются в цветовом пространстве RGB, являющемся одним из основных способов представления изображений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Текстурные признаки Харалика

Текстура наряду с цветом является самой важной особенностью, если необходимо обнаружить какой-либо объект. Это относится и к классификации состояния растений – любое заболевание отличается характерным распространением по организму и цветом. На основе расположения пикселей на изображении появляется возможность идентифицировать любой объект.

Существует множество способов текстурного анализа. Здесь используется метод текстурных признаков Харалика. Эти признаки рассчитываются на основе матрицы совпадения уровней серого (gray-level co-occurrence matrix, GLCM), являющейся оценкой плот-

ности распределения вероятностей второго порядка  $p_2(P, Q, Z, Y)$ , полученной по одному изображению в предположении, что плотность вероятности  $p_2$  зависит лишь от взаимного расположения  $P$  и  $Q$ . При этом  $Z$  является числом, обозначающим учет соседних пикселей, в том числе их расстояния от пикселя интереса.  $Y$  – значение ориентации пикселя интереса и соседних пикселей (в градусах) в интервале  $[0; 2\pi)$  с шагом  $\pi/4$ .

GLCM-матрица представляет собой текстурные свойства, но она неудобна при непосредственном анализе изображения [1–5]. Признаки Харалика, вычисляемые на ее основе, зарекомендовали себя куда лучше. В данной работе использовались 4 информативных признака, дающих наибольшую итоговую точность, из 14 возможных:

**Контраст.** Измеряет пространственную частоту изображения.

$$con = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij} (i - j)^2. \quad (1)$$

**Несходство.** Мера расстояния между парами пикселей в интересующей области.

$$dis = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |i - j| \times p(i, j)^2. \quad (2)$$

**Энергия** (второй угловой момент). Измеряет текстурную однородность изображения.

$$enr = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p(i, j)^2. \quad (3)$$

**Однородность** (обратный разностный момент). Измеряет однородность изображения, которая возрастает при уменьшении тона серого.

$$hom = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p(i, j)}{1 + (i - j)^2}. \quad (4)$$

### Система ANFIS

Адаптивная нейро-нечеткая инференционная система (ANFIS) – это гибридная интеллектуальная система, которая сочетает в себе принципы нечеткой логики и нейронных сетей. Она была разработана в 1993 г. Дж. С.Р. Янгом. ANFIS может быть использована для моделирования сложных нелинейных систем, классификации и прогнозирования [6–9].

Структура ANFIS обычно состоит из пяти слоев (рис. 1).

– Входной слой (Layer 1): получает входные данные и преобразует их в степени принадлежности к функциям принадлежности. В качестве такой функции используют, например, функцию Гаусса.

$$O_i^1 = \mu A_i(x_i) = e^{-\frac{1}{2}(\frac{x_i - c_i}{\sigma_i})^2}, \quad (5)$$

где  $c$  – центр функции принадлежности;

$\sigma$  – ширина функции принадлежности.

– Слой нечеткого вывода (Layer 2): вычисляет веса правил на основе степеней принадлежности входных данных.

$$O_i^2 = W_i = \mu A_1(x_1) * \mu A_2(x_2) * \dots * \mu A_i(x_i), \quad (6)$$

где  $W_i$  – вес  $i$ -го правила;

$\mu A_i(x_i)$  – степень принадлежности входного значения  $x_i$  функции принадлежности  $A_i$ .

– Нормализующий слой (Layer 3): нормализует веса правил.

$$O_i^3 = \bar{W}_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}. \quad (7)$$

– Слой дефаззификации (Layer 4): вычисляет произведение нормализованного правила на выходную функцию.

$$O_i^4 = \bar{W}_i * f_i = \bar{W}_i * (+ p_i x_1 + q_i x_2 + \dots + r_i), \quad (8)$$

где  $\bar{W}$  – результат уровня 3;

$f_i$  – выходное значение  $i$ -го правила;

$(p_i, q_i, r_i)$  – набор параметров следствия узла  $i$ .

– Слой вывода (Layer 5): вычисляет взвешенную сумму выходов всех правил.

$$O_i^5 = \sum_{i=1}^n \bar{W}_i * f_i = \frac{\sum_{i=1}^n W_i * f_i}{\sum_{i=1}^n W_i}. \quad (9)$$

### Алгоритм классификации

Определения текущего состояния растения основано на решении задачи классификации цифровых изображений на основе анализа текстуры и цвета. Алгоритм классификации основан на совместном применении текстурных признаков Харалика и современных инструментов классификации.

Схема алгоритма представлена на рис. 2.

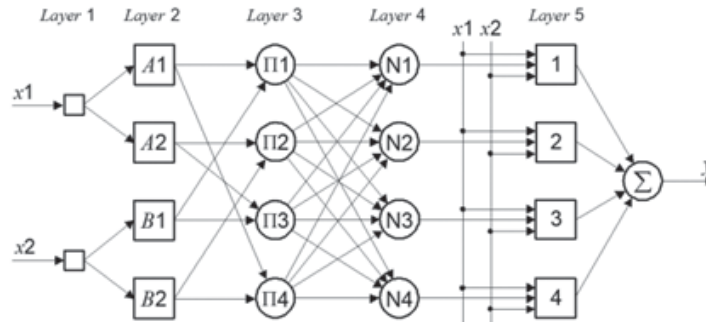


Рис. 1. Структура ANFIS

Примечание: составлено авторами.

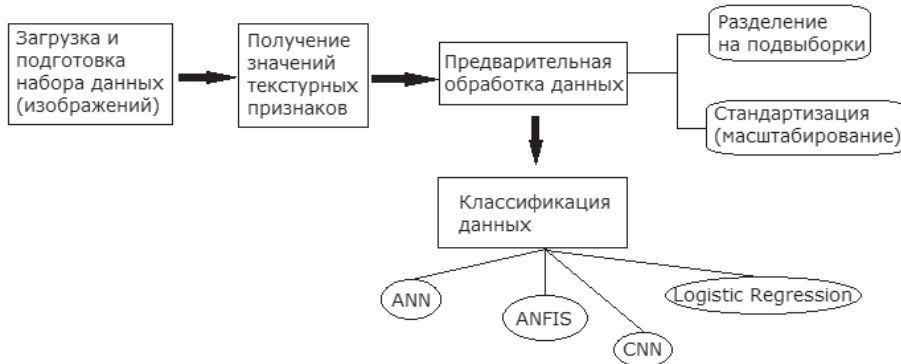


Рис. 2. Схема алгоритма классификации

Примечание: составлено авторами.

Как можно увидеть из рис. 2, после инициализации набора данных и его предварительной обработки из каждого изображения извлекаются текстурные признаки, которые передаются в качестве входных данных для классификационных методов.

### Загрузка и подготовка данных

Исходные данные приведены на рис. 3 и представляют собой набор цветных цифровых изображений, распределенных по директориям, имена которых соответствуют названиям классов. Изображения были предварительно подготовлены – приведены к единому размеру  $256 \times 256$  пикселей и распределены поровну на каждый класс (сбалансированы по 2200 единиц в каждом классе, суммарно 17600 фотографий). Таким образом, количество директорий совпадает с числом классов, равным 8.

Датасет на рис. 3 был загружен с общедоступного ресурса по исследованию данных Kaggle.

### Извлечение признаков

Так как исходное изображение представляет собой RGB-область размером  $128 \times 128$  пикселей исходного изображения, для каждого из трех его каналов (красная, зеленая и синяя компоненты) строится симметричная нормированная GLCM-матрица в 256 оттенках серого. Значит, для целого изображения будет вычислено 3 GLCM-матрицы оттенков серого. В свою очередь, каждая такая матрица порождает 4 значения признаков Харалика, описанных ранее. Таким образом, одно цветное изображение бу-

дет описано вектором-строкой из 12 коэффициентов-признаков Харалика.

Для удобства восприятия и дальнейших расчетов все коэффициенты – а это массив размером  $m \times k$  (где  $m = 17\,600$  – общее число изображений в наборе данных,  $k = 12 + 1 = 13$  – итоговое количество признаков Харалика и метка класса, закодированная способом «label encoding») – были записаны в CSV-файл средствами библиотеки Pandas языка Python (рис. 4).

Стоит также упомянуть другие модули и библиотеки Python, задействованные в данной работе:

**Os** – для работы с операционной и файловой системами (загрузка и инициализация набора данных);

**OpenCV** – для анализа изображений;

**NumPy** – для работы с многомерными массивами;

**Matplotlib** – для визуализации данных и вычислений;

**Anfis** – для нечетких вычислений;

**Scikit-Learn** – для операций машинного обучения.

### Предварительная обработка данных

Фактически датафрейм из рис. 5 представляет собой готовую для дальнейших вычислений и решения основной задачи базу данных признаков изображений. Входными данными для обучения нейронной сети будут являться значения признаков Харалика (все столбцы датафрейма, кроме последнего), выходными – последний столбец датафрейма с закодированными метками классов.



Рис. 3. Классы исходных данных  
Примечание: составлено авторами.

| features_db |             |             |             |             |          |          |          |     |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|-----|
|             | 0           | 1           | 2           | 3           | 4        | 5        | 6        | ... |
| 0           | 1553.198120 | 2060.362946 | 1171.758636 | 1393.249298 | 0.076277 | 0.076546 | 0.076015 | ... |
| 1           | 1490.319397 | 1115.246582 | 1598.354919 | 2341.404175 | 0.090693 | 0.090494 | 0.086959 | ... |
| 2           | 2588.799622 | 5389.672791 | 2168.333527 | 1171.598816 | 0.233439 | 0.234230 | 0.228993 | ... |
| 3           | 1630.973450 | 1723.165375 | 1520.119598 | 2698.978638 | 0.092927 | 0.092899 | 0.091825 | ... |
| 4           | 1620.140015 | 1768.595612 | 1494.767761 | 2675.156372 | 0.091095 | 0.091131 | 0.090237 | ... |
| ...         | ...         | ...         | ...         | ...         | ...      | ...      | ...      | ... |
| 17595       | 3346.186890 | 3439.760468 | 693.740204  | 844.401672  | 0.215740 | 0.216874 | 0.206939 | ... |
| 17596       | 1638.140228 | 2546.195953 | 436.153076  | 1110.063110 | 0.471450 | 0.473478 | 0.457407 | ... |
| 17597       | 811.761047  | 2261.653107 | 458.613220  | 1446.747620 | 0.235745 | 0.235558 | 0.230777 | ... |
| 17598       | 1385.866791 | 1878.329651 | 1318.927338 | 1372.675537 | 0.064252 | 0.064139 | 0.063280 | ... |
| 17599       | 1659.912781 | 3139.970367 | 585.401855  | 717.408020  | 0.347553 | 0.348532 | 0.339566 | ... |

17600 rows × 13 columns

**Рис. 4. Текстуры признаки Харалика для исходного датасета**

*Примечание:* составлено авторами.

```
# Разделение данных на обучающий и проверочный наборы
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3, random_state=42)

# Применение кластеризации FCM для инициализации функций принадлежности
fcm = FuzzyCMeans(n_clusters=8)
fcm.fit(X_train)

# Создание функций принадлежности ANFIS на основе кластеров FCM
num_features = X_train.shape[1]
input_mf = []
for i in range(num_features):
    centers = fcm.cluster_centers[:, i]
    stds = np.std(X_train[:, i])
    for j in range(3): # 3 функции принадлежности для каждого признака
        input_mf.append({'name': f'feat{i}_mf{j}', 'mftype': 'gaussmf', 'params': [centers[j], stds]})

# Создание модели ANFIS и ее обучение
anfis_model = anfis.ANFIS([input_mf], 8, 4)
anfis_model.train(X_train, y_train, epochs=1000, batch_size=20)

# Оценка модели на проверочном наборе
y_pred = anfis_model.predict(X_test)
accuracy = np.mean(y_pred == y_test)
print('Точность:', accuracy)
```

**Рис. 5. Создание и обучение ANFIS**

*Примечание:* составлено авторами.

Следующим шагом является предварительная обработка данных.

Во-первых, это разделение на обучающую и тестовую выборки в оптимальном соотношении 70:30.

Во-вторых, стандартизация: некоторые характеристики имеют широкий диапазон значений и в процессе классификации могут создать систематическую ошибку. Вспомогательный класс `StandardScaler` масштабирует

данные так, чтобы они имели нулевое среднее значение и единичную дисперсию ( $\mu = 0$ ,  $\sigma = 1$ ). Важно то, что здесь выполняется стандартизация лишь входных данных, поскольку выходные содержат только закодированные метки [5, 6].

### Моделирование ANFIS

Создание модели ANFIS для восьмиклассовой классификации с 12 входными признаками Харалика состоит из следующих шагов.

#### Подготовка данных

– Собирается набор данных (изображений), помеченных 8 классами.

– Извлекается 12 признаков Харалика из каждого изображения (по 4 из каждой компоненты R, G, B).

– Набор данных разделяется на обучающий и проверочный наборы.

#### Создание функции принадлежности

– Выбирается тип функций принадлежности (в данном случае – гауссова).

– Определяется количество и местоположение функций принадлежности для каждого входного признака (далее для каждого признака используется 3 функции принадлежности).

Для инициализации начальных параметров функций принадлежности, таких как центры и стандартные отклонения, в данной работе используется метод нечеткой кластеризации С-средних. Это помогает избежать ручной настройки параметров и обеспечивает более точную и эффективную классификацию.

#### Расчет степеней принадлежности

– Для каждого обучающего и тестового изображения вычисляется степень принадлежности каждого признака каждой функции принадлежности.

#### Создание правил

В моделях ANFIS используется нечеткое правило Такаги–Сугено–Канга (TSK). Правила TSK имеют следующую форму:

*Если  $x_1$  относится к  $A_1$  и  $x_2$  относится к  $A_2$  и ... и  $x_n$  относится к  $A_n$ ,  
то  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .*

Количество правил TSK рассчитывается по следующему выражению:

$$\text{Количество правил} = (\text{Количество функций принадлежности для признака } 1) \wedge \dots \wedge (\text{Количество признаков}),$$

где *Количество функций принадлежности для признака 1* – это количество функций принадлежности, используемых для представления первого признака;

*Количество признаков* – это количество входных признаков в модели ANFIS.

Во избежание усложнения работы модели и увеличения числа правил TSK целесообразно сократить количество входных признаков: для каждого изображения будет взято среднее значение признака Харалика по каналам, например, для контраста:

$$con_{mean} = \frac{con_R + con_G + con_B}{3}. \quad (10)$$

Таким образом, число входных признаков сократится до 4, а значит количество правил TSK в модели ANFIS для классификации изображений на 8 классов будет равно  $3^4 = 81$ . Каждая комбинация функций принадлежности соответствует одному правилу TSK.

Модель ANFIS обучается с использованием гибридного алгоритма, который сочетает градиентный спуск и метод наименьших квадратов.

Алгоритм обучения состоит из двух основных этапов.

#### Прямой проход:

– Для каждого обучающего образца вычисляются степени принадлежности каждой функции принадлежности.

– Вычисляются веса правил TSK, используя степени принадлежности в качестве весов. Для вычисления весов правил используется метод наименьших квадратов. Это гарантирует, что взвешенная сумма выходных значений правил наиболее точно соответствует целевому выходному значению.

– Вычисляется взвешенная сумма выходных значений правил, чтобы получить прогнозируемое выходное значение модели.

– Вычисляется ошибка между прогнозируемым и фактическим выходным значением.

#### Обратный проход:

– Ошибка распространяется назад через сеть, чтобы обновить параметры функций принадлежности и веса правил.

– Параметры функций принадлежности и веса правил настраиваются с использованием градиентного спуска, чтобы минимизировать ошибку.

На этапе обратного прохода для настройки параметров функций принадлежности и весов правил используется градиентный спуск. Градиент ошибки рассчитывается относительно этих параметров, и они обновляются в направлении, который минимизирует ошибку.

Прямой и обратный проходы повторяются до тех пор, пока не будет достигнуто заданное количество эпох или пока ошибка не будет сведена к минимуму.

Таким образом, модель ANFIS для решения текущей задачи имеет следующие параметры:

- Количество входов: 4
- Количество выходов: 8 (1 общий)
- Количество функций принадлежности для каждого признака: 3
- Количество правил: 81
- Веса инициализируются случайными значениями и обучаются с помощью обратного распространения.

Код инициализации и обучения модели представлен на рис. 5.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Непосредственно классификация, помимо модели ANFIS, выполнялась еще тремя инструментами:

– сверточной архитектурой нейронной сети (CNN, MobileNetV2);

– классическим алгоритмом машинного обучения – логистической регрессией;

– базовой моделью искусственной нейронной сети – персептроном (ANN).

Результаты приведены в сравнительной таблице.

Как можно видеть из таблицы, CNN на базе MobileNetV2, использующей глубинно-разделимую свертку, справляется с задачей лучше прочих инструментов классификации, но ANFIS имеет перспективы улучшения – оптимизации параметров, в частности интеграции с генетическим алгоритмом или методами кластеризации.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что ANFIS может эффективно классифицировать болезни растений с высокой точностью. Использование текстурных признаков Харалика в качестве входных параметров оказалось полезным для различения болезней растений. Гибридный алгоритм обучения обеспечил быструю сходимость и хорошую точность.

Несмотря на то что CNN на основе MobileNetV2 лучше справилась с задачей, ANFIS является перспективным инструментом для классификации болезней растений. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение набора данных, исследование других признаков и оптимизацию архитектуры ANFIS для улучшения производительности, в частности целесообразно интегрировать в модель генетический алгоритм.

Таблица

Результаты классификации

| Метод классификации     | Метрика  |           |        |         |
|-------------------------|----------|-----------|--------|---------|
|                         | accuracy | precision | recall | f-score |
| ANFIS                   | 85 %     | 0,85      | 0,84   | 0,84    |
| CNN (MobileNetV2)       | 93 %     | 0,92      | 0,93   | 0,92    |
| Логистическая регрессия | 84 %     | 0,84      | 0,83   | 0,84    |
| ANN                     | 82 %     | 0,82      | 0,83   | 0,82    |

Примечание: составлено авторами.

### Список источников

1. Гурлина Е. В. Разработка метода выявления текстурных свойств заданных классов изображений с использованием признаков Харалика // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2020) : труды Междунар. науч.-технич. конф., 21–22 апреля 2020 г., г. Самара. Самара : Самарский научный центр РАН, 2020. С. 112–116.
2. Lofstedt T., Brynolfsson P., Asklund T. Gray-level invariant Haralick texture features // PLoS ONE. 2019. Vol. 14, no. 2. P. e0212110.
3. Брыкин В. В., Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. и др. Классификация состояния растений средствами текстурного вейвлет-анализа и машинного обучения // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 23–30. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-3.
4. Vyas A., Paik J. Review of the application of wavelet theory to image processing // IEIE Transactions on Smart Processing & Computing. 2016. Vol. 5, no. 6. P. 403–417. DOI 10.5573/IEIESPC.2016.5.6.403.
5. Балаганский А. Ю., Гребеньков А. А. Вейвлет-преобразование для обработки изображений системы управления отоплением с применением методов машинного обучения // Информация и образование: границы коммуникаций. 2022. № 14. С. 147–150.
6. Mahajan V., Dhumale N. R. Leaf disease detection using fuzzy logic // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2018. Vol. 7, no 6. P. 6801–6807. DOI 10.15680/IJIRSET.2018.0706067.
7. Ashish P., Tanuja P. Survey on detection and classification of plant leaf disease in agriculture environment // International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. 2017. Vol. 4, no. 4. P. 137–139. DOI 10.17148/iarjset/nciarcse.2017.40.
8. Thyagarajan K. K., Kiruba Raji I. A review of visual descriptors and classification techniques used in leaf species identification // Archives of Computational Methods in Engineering. 2019. Vol. 26. P. 933–960. DOI 10.1007/s11831-018-9266-3.
9. Алгоритм обучения anfis. URL: <https://studfile.net/preview/9501084/page:11/> (дата обращения: 05.04.2024).

### Информация об авторах

**В. В. Брыкин** – аспирант.

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

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

**И. Л. Назарова** – аспирант, инженер 1 категории.

### References

1. Gurlina E. V. Razrabotka metoda vyivleniia teksturnykh svoistv zadannykh klassov izobrazhenii s ispolzovaniem priznakov Kharalika. In: Prokhorov S. A., editor. *Proceedings of the International Scientific Conference “Advanced Information Technologies and Scientific Computing (PIT 2020)”*, April 21–22, 2020, Samara. Samara: Samara Scientific Center of RAS; 2020. p. 112–116. (In Russ.).
2. Lofstedt T., Brynolfsson P., Asklund T. Gray-level invariant Haralick texture features. *PLoS ONE*. 2019;14(2):e0212110.
3. Brykin V. V., Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V. et al. Classification of plants health via texture wavelet analysis and machine learning. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):23–30. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-3. (In Russ.).
4. Vyas A., Paik J. Review of the application of wavelet theory to image processing. *IEIE Transactions on Smart Processing & Computing*. 2016;5(6):403–417. DOI 10.5573/IEIESPC.2016.5.6.403.
5. Balagansky A. Yu., Grebenkov A. A. Wavelet transformation for image processing of a heating control system using machine learning methods. *Informatatsiia i obrazovanie: granitsy kommunikatsii*. 2022;(14):147–150. (In Russ.).
6. Mahajan V., Dhumale N. R. Leaf disease detection using fuzzy logic. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2018;7(6):6801–6807. DOI 10.15680/IJIRSET.2018.0706067.
7. Ashish P., Tanuja P. Survey on detection and classification of plant leaf disease in agriculture environment. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2017;4(4):137–139. DOI 10.17148/iarjset/nciarcse.2017.40.
8. Thyagarajan K. K., Kiruba Raji I. A review of visual descriptors and classification techniques used in leaf species identification. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019;26:933–960. DOI 10.1007/s11831-018-9266-3.
9. Algoritm obucheniia anfis. URL: <https://studfile.net/preview/9501084/page:11/> (accessed: 05.04.2024). (In Russ.).

### Information about the authors

**V. V. Brykin** – Postgraduate.

**M. Ya. Braginsky** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

**D. V. Tarakanov** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

**I. L. Nazarova** – Postgraduate, 1st Category Engineer.

Научная статья

УДК 004.9

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-4



## МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ОЦЕНКИ СЛОВ РЕСПОНДЕНТОМ ДЛЯ ПРОГНОЗА СИЛЫ ТОНАЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ В ТОНАЛЬНОМ СЛОВАРЕ

Александр Романович Гончаров<sup>1</sup>, Светлана Александровна Лысенкова<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

<sup>1</sup>mr.tesanta@ya.ru

<sup>2</sup>lsa1108@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрен ручной способ оценки слов и расчет их тональности в задаче формирования тонального словаря. В работе предложен метод моделирования оценки слов респондентами при прохождении анкетирования методом «best-worst scaling» для расчета эмоционального окраса слов. Содержание метода моделирования заключается в использовании готовых «словарей-ориентиров», служащих для вычисления статистических вероятностей предполагаемого выбора ответа в заданном вопросе анкеты. Введение коэффициента ошибки позволит учесть человеческий фактор в процессе выбора элементов. Реализация данного метода позволит выявить влияние распределения слов для оценивания, а также минимальное количество респондентов для формирования адекватных результатов, ожидаемых по сравнению со «словарем-ориентиром».

**Ключевые слова:** сентимент-анализ, тональный словарь, словарь-ориентир, ручной способ, моделирование оценки слов, наилучшее-наихудшее масштабирование

**Для цитирования:** Гончаров А. Р., Лысенкова С. А. Метод моделирования оценки слов респондентом для прогноза силы тональности элементов в тональном словаре // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 31–38. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-4.

Original article

## MODELING METHOD FOR RESPONDENT'S ANALYSIS OF WORDS FOR PREDICTING SENTIMENT ANALYSIS OF SENTIMENT DICTIONARY'S ELEMENTS

Aleksandr R. Goncharov<sup>1</sup>, Svetlana A. Lysenkova<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Surgut State University, Surgut, Russia

<sup>1</sup>mr.tesanta@ya.ru

<sup>2</sup>lsa1108@mail.ru

**Abstract.** The study discusses a manual method for evaluating words and their sentiment analysis in order to compile a sentiment dictionary. To evaluate the emotional coloring of words, a method of modeling respondents' evaluations of words using the best-worst-scaling questionnaire is proposed. The modeling method depends on the reference dictionaries, which help determine the statistical probabilities of the expected answer choice for a given question of the questionnaire. The human factor in the selection process can be considered by introducing an error coefficient. The implementation of this method allows detecting the influence of word distribution on evaluation results, as well as the minimum number of respondents required to gather sufficient results in comparison with the reference dictionary.

**Keywords:** sentiment analysis, sentiment dictionary, reference dictionary, manual method, word evaluation modeling, best-worst scaling

**For citation:** Goncharov A. R., Lysenkova S. A. Modeling method for respondent's analysis of words for predicting sentiment analysis of sentiment dictionary's elements. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):31–38. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-4.

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ мнений и оценок людей в интернет-среде по отношению к различным объектам (качество услуг, товаров, реакции на события и т.п.) становится популярным направлением исследования, получившим большое распространение из-за роста объема доступной текстовой информации. Сентимент-анализ (или анализ тональности), областью которого является компьютерная лингвистика, занимается вопросами по автоматическому извлечению эмоционально-смысловой информации из сообщений пользователей с целью формирования тональной оценки [1]. Под «тональностью» в общем случае понимается субъективная модальность текста – выражение эмоционально-волевой установки автора по отношению к объекту или теме повествования в сформулированных им текстовых данных посредством применения лексических единиц (слов, словосочетаний и т.п.). Важно отметить, что лексические единицы, на основе которых определяют тональность, не являются прямыми выразителями эмоций, а только передают понятие о них в узком эмоциональном спектре [2]. Поэтому в работах по тональному анализу текста данное отношение выражается категорией, имеющей полярность «негативность–положительность», где текст соотносят к одной из групп эмоций: положительной, отрицательной или нейтральной.

В настоящее время сентимент-анализ реализуется на основе методов машинного обучения, правил или применения словарей с оценочной лексикой (тональных словарей).

Такие структуры содержат специально выделенные слова и словосочетания, применяемые в рамках одной предметной области или теме повествования и несущие эмоциональный окрас, который выражается номинально (например, в словарях «РусСентиЛекс-2017», «Словарь Блинова»), количественно («LINIS Crowd») или в смешанном варианте («КартаСловСент»).

В работе [3] представлен систематический обзор существующих тональных словарей, а также основные способы их формирования, среди которых выделяют автоматический и ручной. Ручной способ предполагает привлечение экспертов или носителей языка (краудсорсинг), усилиями которых происходит эмоциональная классификация (разметка) слов будущего словаря. В основе данного способа лежит процесс «классического» анкетирования, где каждому участнику (респонденту) предлагают назначить оценки предложенным элементам в соответствии с заданной шкалой тональности и рассматриваемым контекстом. Так, например, при составлении русскоязычного словаря «LINIS Crowd» респонденты оценивали элемент словаря по пятибалльной шкале [4], а в формировании словаря «КартаСловСент» определяли тональность элемента, выбрав один из четырех предложенных вариантов ответа (рис. 1) [5]. В результате разметки слов «классическим» анкетированием каждому элементу присваивается эмоциональная группа на основе статистики выбора элементов.

Существует другой вариант проведения анкетирования для разметки слов словаря –

Вопрос: уютность - это что то нейтральное, положительное или отрицательное?

|               |               |
|---------------|---------------|
| нейтральное   | положительное |
| отрицательное | не знаю       |

Рис. 1. Пример вопроса, задаваемого в рамках «классической» разметки слов

Примечание: рисунок по [5] с изменениями.

метод «наилучшее–наихудшее масштабирование» (best-worst scaling, BWS) [6], который применялся при составлении англоязычного словаря «NRC-EIL» [7]. Суть данного метода заключается в том, что респонденту предлагают выбрать два различных элемента из предложенного ему списка слов (кортежа) из одной эмоциональной группы по наилучшему и наихудшему рассматриваемому свойству. Так, например, из списка слов необходимо выбрать два разных элемента, которые передают в большей и меньшей степени соответственно проявление эмоции «гнев» (рис. 2). В результате разметки слов BWS-методом образуются сравнительные пары отношения элементов, из которых рассчитывают степень проявления эмоции  $\omega_w$  по формуле:

$$\omega_w = \frac{L_w - X_w}{N_w} \in [-1; +1],$$

где  $\omega_w = -1$  – наименьшая степень проявления тональности слова  $w$ ;

$\omega_w = +1$  – наивысшая степень проявления тональности слова  $w$ ;

$N_w$  – количество вхождений слова  $w$  в разные списки;

$L_w$  – количество оценок слова  $w$  как обладающим «наилучшим» свойством;

$X_w$  – количество оценок слова  $w$  как обладающим «наихудшим» свойством.

Несмотря на то что большинство русскоязычных словарей построены вручную [3], такой способ формирования словарей остается

популярным, так как обеспечивает высокую точность классификации слов с учетом лингвистических особенностей естественного языка [8]. Однако ручной способ не обделен недостатками: субъективность характера ответов респондентов, субъективность исследователя при составлении вопросов в анкете, неопределенность трактовки вопросов, затраты времени на обработку и др. Уменьшение влияния первых двух недостатков достигается путем совершенствования методов составления анкет [9]. Результаты анкетирования позволяют выявить закономерности распределения слов в вопросах для дальнейшего формирования «оптимальных» анкет, помогающих снизить неопределенность в процессе выбора респондентом, который может испытывать трудности в силу «близости» рассматриваемых свойств элементов.

Поэтому целью данной работы является предложить метод моделирования оценки слов респондентами в анкетировании, позволяющий предсказать полученные результаты в формировании тонального словаря ручным способом. Такое моделирование подразумевает решение следующих задач:

– определить содержательную часть вопросов анкет, где количественно оценить значение распределения слов и их влияние на итоговый результат;

– определить минимальное количество требуемых респондентов для получения адекватных результатов анкетирования и расчета эмоционального окраса слов;

Вопрос 1.1: Определите термин, связанный с НАИБОЛЬШИМ количеством гнева

|         |           |
|---------|-----------|
| дерево  | грррр     |
| кипяток | обиженный |

Вопрос 1.2: Определите термин, связанный с НАИМЕНЬШИМ количеством гнева

|         |           |
|---------|-----------|
| дерево  | грррр     |
| кипяток | обиженный |

Рис. 2. Пример вопроса, задаваемого в рамках разметки слов по BWS-методу

Примечание: рисунок по [7] с изменениями.

– определить предельное количество предлагаемых респонденту вопросов, после которых предполагается совершение им ошибок.

В результате работы описан метод моделирования выбора респондентами в анкетировании методом BWS на основе расчета статистических вероятностей из выбранного «словаря-ориентира».

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемый метод моделирования оценки слов анкетированием по BWS-методу основывается на применении статистических вероятностей выбора того или иного элемента. Такие вероятности рассчитываются из существующих тональных словарей.

Пусть исследователь формирует анкету  $A$  для респондентов по BWS-методу для расчета силы эмоционального окраса слов в тональном словаре, содержащая  $N$  вопросов:  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$ . Каждый вопрос состоит из списка различных оценочных слов размерностью 4 элемента:  $Q_i = (q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}, q_{i4})$ . Также каждый элемент для разметки должен встречаться в восьми разных вопросах. Такое распределение позволяет сформировать ранжированные оценки и значительно сократить количество операций оценки в сравнении с классическим попарным сравнением элементов. Так, при составе словаря из  $N$  элементов BWS-методом требуется  $4N$  вопросов при их разделении в выборе как наихудшего и наилучшего элемента, в то время как классическое попарное сравнение требует  $N^2$  вопросов.

Отмечено, что список слов и словосочетаний, включенных в итоговый словарь, составляется на основе существующих словарей оценочной лексики либо извлекается из общих текстовых массивов, что говорит о схожести содержательного состава различных слова-

рей (их пересечение) [3]. Пересечение словарей проявляется в близости эмоционального окраса некоторых слов, что связано в первую очередь с особенностями рассматриваемого языка и контекста их применения. Это означает, что при формировании тонального словаря эмоциональный окрас некоторых слов будет схожим с другими из существующих словарей. Данная особенность позволяет использовать некоторый готовый тональный словарь как «ориентир» при составлении иного. Важно отметить, что в данном контексте работы в качестве такого словаря подходят только те, которые содержат количественные значения силы проявления тональности. Так, для моделирования оценки англоязычных слов можно использовать словарь «NRC-EIL-2022», а для русскоязычных – «КартаСловСент».

В данной работе в качестве примера «словаря-ориентира» использован словарь «КартаСловСент» с предварительным нормированием коэффициентов значений силы тональности в диапазоне от 0 до 1. Можно вывести предположение, что элементы с высоким значением коэффициента выбирают чаще респондентами как «наилучший» по рассматриваемому свойству тональности, а низкое значение коэффициента – как «наихудший». В табл. 1 приведен пример содержания данного словаря группы «positive» с предварительным нормированием коэффициентов по методу «минимакс».

Согласно данной таблице при предоставлении респонденту кортежа слов  $Q = (\text{ангельский, безвинный, аромат, безмятежный})$  с большей вероятностью можно утверждать, что элемент «ангельский» респондент выберет как «наилучший», а «безмятежный» – как «наихудший» по свойству «позитивности». Однако при формировании статистической

Таблица 1

Пример элементов группы «positive» словаря «КартаСловСент»

| Элемент     | Интенсивность тональности |
|-------------|---------------------------|
| ангельский  | 1,000                     |
| безвинный   | 0,870                     |
| аромат      | 0,835                     |
| безмятежный | 0,775                     |

Примечание: составлено по [5].

вероятности выбора элементов возникает ряд вопросов:

– Насколько элемент  $A$  выбирают чаще, чем  $B$ ?

– Насколько вероятность выбора  $A$  различается с выбором элемента  $B$ ?

Такая установка задает «силу» различия вероятностей элементов, что корректно, так как сам метод BWS анкетирования и расчета эмоционального окраса слов подразумевает исключительно формирование сравнительных пар. Исследователь предположительно на основе количественных показателей в «словаре-ориентире» может реконструировать изначально предполагаемое сравнительное отношения выбора элементов.

Так, расчет статистических вероятностей предполагаемого выбора ответа как «наилучшего» респондентом в заданном вопросе  $Q$  сводится к определенному алгоритму:

В  $Q$  = (ангельский, безвинный, аромат, безмятежный) на основе «словаря-ориентира» (табл. 1) сформировать сравнительное отношение: безмятежный < аромат < безвинный < ангельский.

Для самого наихудшего элемента в данном отношении принять вероятность выбора респондентом за  $p$ . Для остальных вероятностей выбора элементов присвоить количественное отношение по сравнению с «наихудшим» элементом согласно коэффициенту из «словаря-ориентира» (табл. 1), беря за расчет только значение из дробной части. Значение из дробной части берутся до  $n$ -го знака после запятой. В данном случае  $n = 3$ . Кроме того, при коэффициенте силы тональности из словаря ориентира, равном 1,0, необходимо взять значение  $10^n$ :

$$P(\text{безмятежный}) = p,$$

$$P(\text{аромат}) = (835-775)p = 60p,$$

$$P(\text{безвинный}) = (870-775)p = 95p,$$

$$P(\text{ангельский}) = (1000-775)p = 225p.$$

Далее необходимо просуммировать данные вероятности и решить простое математическое уравнение вида  $p + 60p + 95p + 225p = 1$ .

Найдя  $p$ , рассчитать другие вероятности выбора элементов в вопросе согласно составленному выражению на предыдущем шаге:

$$P(\text{безмятежный}) \approx 0,0026,$$

$$P(\text{аромат}) \approx 0,156,$$

$$P(\text{безвинный}) \approx 0,247,$$

$$P(\text{ангельский}) \approx 0,585.$$

При использовании случайной величины  $R \in [0,1]$  можно воссоздать предполагаемую ситуацию выбора респондентом «наилучшего» элемента в вопросе  $Q$  по свойству «позитивности». Так образуются пары элементов с их предполагаемой вероятностью выбора < (безмятежный, 0,0026), (аромат, 0,156), (безвинный, 0,247), (ангельский, 0,585) > (рис. 3).

При моделировании выбора «наихудшего» элемента необходимо вновь рассчитать статистические вероятности по заданному алгоритму, беря во внимание тот факт, что требуется скорректировать заданные значения интенсивности тональности «словаря-ориентира»  $y$  по формуле  $y^* = 1,0 - y$  (табл. 2).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный алгоритм расчета статистических вероятностей выборов элементов с использованием случайной величины позволяет спрогнозировать предполагаемый выбор эле-

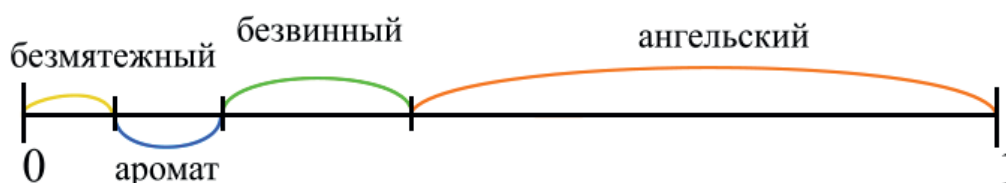


Рис. 3. Распределение выбора «наилучшего» элемента респондентом в  $Q$  относительно случайной величины  $R$

Примечание: составлено авторами.

Таблица 2

Корректировка элементов словаря «КартаСловСент»

| Элемент     | Интенсивность тональности |
|-------------|---------------------------|
| ангельский  | 0,000                     |
| безвинный   | 0,130                     |
| аромат      | 0,165                     |
| безмятежный | 0,225                     |

Примечание: составлено авторами.

ментов респондентом в анкетировании методом BWS. В рассмотренном выше примере можно сделать вывод, что прослеживается влияние распределения элементов в вопросах. Так, при предоставлении «близких» элементов респонденту, значения силы тональности которых по словарю-ориентире приблизительно равны, выбор респондента можно свести к равномерному или хаотичному явлению. Конечно, при составлении иного тонального словаря и расчета тональности в другой предметной области, когда похожих словарей еще попросту не существует, трудно определить предполагаемую близость оценочных элементов. Однако, учитывая факт пересечения словарей из разных предметных областей, можно выявить обобщенные элементы и предположить о возможной их тональности.

Предложенный метод моделирования не учитывает «индивидуальность» респондента, которая может проявляться по-разному (пол, возраст, регион проживания и т.д.). В данном случае необходимо ввести фактор совершения ошибки респондентом, который можно интерпретировать как его невнимательность или утомляемость при прохождении ан-

кетирования. Для добавления случайности фактора ошибки респондентом требуется ввести коэффициент ошибки  $err$ , который будет сводить каждую вероятность выбора элемента  $P(w)$  к  $1/4$ , что равносильно равномерному распределению. Так, с каждым новым вопросом  $Q$  требуется корректировать каждую вероятность выбора элемента формулой:

$$P(w)' = P(w) - err \cdot k, \quad (2)$$

где  $err = |P(w) - 1/4|$ ;

$k$  – коэффициент роста ошибки,  $0 \leq k \leq 1$ .

В свою очередь, коэффициент  $k$  подчиняется распределению  $f(x) = \frac{-1}{(x+1)^2} + 1$  (рис. 4), где  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 1$  при  $x \geq 0$ , а  $x$  – количество пройденных вопросов респондентом.

Необходимо учесть масштабирование распределения  $k = f(x)$  под реальные задачи, так как уже при начальных значениях  $x$  наблюдается высокий рост коэффициента  $k$ . Поэтому введение дополнительного регулируемого параметра  $s$ , где  $0 < s \leq 1$ , позволит предотвратить высокий рост ошибки на начальных этапах анкетирования и тем самым задаст «индивидуальность» респондента, выраженного в степени его «утомляемости». Так, фор-

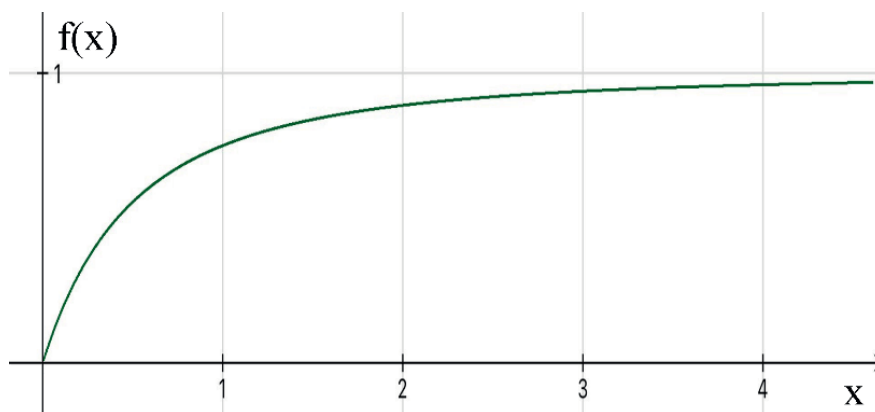


Рис. 4. График роста коэффициента  $k = f(x)$  относительно пройденных респондентом вопросов анкеты

Примечание: составлено авторами.

мула расчета коэффициента  $k$  с введением дополнительного параметра преобразуется в следующий вид:

$$k = f(x) = \left( \frac{-1}{(x \cdot s + 1)^2} + 1 \right). \quad (3)$$

Такая корректировка позволит учесть человеческий фактор, когда респондент «утомляется» поочередно оценивать предложенные ему оценочные элементы.

Для выявления оптимального количества предлагаемых респонденту элементов и остановки процесса моделирования оценки элементов необходимо ввести метрику расчета вероятностей  $|P(w) - \text{err}| \geq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – допустимый предел, определяемый исследователем самостоятельно, при котором выбор «наилучшего» и «наихудшего» элемента не сводится к случайному выбору.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод расчета вероятностей выбора элементов и проведение моделирования их оценки респондентом методом BWS при помощи случайной величины по-

зволит исследователю выявить оптимальное распределение слов для оценивания, а также минимальное количество респондентов для получения предполагаемых результатов в задаче формирования тонального словаря относительно «словаря-ориентира».

Использование тональных значений готовых словарей предполагает некоторую их общность содержания и контекст использования элементов. Тем не менее данная близость в применении разных предметных областей текста может существенно отличаться, что сказывается на автоматических алгоритмах определения тональности текста.

Важно учесть, что разброс значений в используемом «словаре-ориентире» оказывает немаловажную роль в процессе моделирования выбора элемента, так как предоставление близких по свойству элементов для оценки респонденту создаст трудности их выбора и интерпретации, что требует дальнейшего исследования.

## Список источников

1. Майорова Е. В. О сентимент-анализе и перспективах его применения // Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Серия 6: Языкознание. 2020. № 4. С. 78–86.
2. Матвеева Т. В. Тональность текста // Эффективное речевое общение (базовые компетенции): словарь-справочник / под ред. А. П. Сковородникова. 2-е изд., перераб. и доп. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2014. С. 692–694.
3. Котельников Е. В., Разова Е. В., Котельникова А. В. и др. Современные словари оценочной лексики для анализа мнений на русском и английском языках (аналитический обзор) // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2020. № 12. С. 16–33. DOI 10.36535/0548-0027-2020-12-3.
4. Koltsova O. Yu., Alexeeva S. V., Kolcov S. N. An opinion word lexicon and a training dataset for Russian sentiment analysis of social media // Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Proceedings of the International Conference “Dialogue 2016”, June 1–4, 2016, Moscow. Moscow, 2016. Vol. 15. P. 277–287.
5. Кулагин Д. И. Открытый тональный словарь русского языка КартаСловСент // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: по ма-

## References

1. Mayorova E. V. O sentiment-analize i perspektivakh ego primeneniia. *Social Sciences and Humanities. Domestic and Foreign Literature. Series 6: Linguistics*. 2020;(4):78–86. (In Russ.).
2. Matveeva T. V. Tonalnost teksta. In: Skovorodnikov A. P., ed. *Successful verbal communication (basic skills). Reference dictionary*. 2nd ed., rev. ed. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2014. p. 692–694. (In Russ.).
3. Kotelnikov E. V., Razova E. V., Kotelnikova A. V. et al. *Sovremennye slovari otsenочноi leksiki dlia analiza mnenii na russkom i angliiskom iazykakh (analiticheskii obzor)*. *Nauchno-tekhnicheskaiia informatsiia. Serii 2: Informatsionnye protsessy i sistemy*. 2020;(12):16–33. DOI 10.36535/0548-0027-2020-12-3. (In Russ.).
4. Koltsova O. Yu., Alexeeva S. V., Kolcov S. N. An opinion word lexicon and a training dataset for Russian sentiment analysis of social media. *Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Proceedings of the International Conference “Dialogue 2016”*, June 1–4, 2016, Moscow. Moscow; 2016. Vol. 15. p. 277–287.
5. Kulagin D. I. Publicly available sentiment dictionary for the Russian language KartaSlovSent. In: *Computational Linguistics and Intellectual Technologies. Pa-*

- териалам ежегодной междунар. конф. «Диалог», 16–19 июня 2021 г., г. Москва. Вып. 20. М. : Российский государственный гуманитарный университет, 2021. С. 1106–1119. DOI 10.28995/2075-7182-2021-20-1106-1119.
6. Flynn T. N., Marley A. A. J. Best-worst scaling: Theory and methods // Handbook of choice modelling / Hess S., Daly A., eds. Cheltenham, UK : Edward Elgar Publishing, 2014. P. 178–201.
7. Mohammad S. M. Word affect intensities // Proceedings of the 11th International Conference on the Language Resources and Evaluation (LREC–2018), May 7–12, 2018, Miyazaki, Japan. URL: <https://www.saifmohammad.com/WebDocs/word-affect-intensities.pdf> (дата обращения: 25.03.2024).
8. Лукашевич Н. В. Автоматический анализ тональности текстов: проблемы и методы // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2022. Т. 26, № 1. С. 50–61.
9. Вакуленко А. А., Стрелец А. В., Сытник Д. А. Методика оценки влияния качества анкеты на достоверность результатов анкетирования методом имитационного моделирования // Вестник Московского государственного областного университета. 2013. № 4. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_21206563\\_45223214.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_21206563_45223214.pdf) (дата обращения: 25.03.2024).
- pers from the Annual International Conference “Dialogue”, June 16–19, 2021, Moscow. Vol. 20. Moscow: Russian State University for the Humanities; 2021. p. 1106–1119. DOI 10.28995/2075-7182-2021-20-1106-1119. (In Russ.).
6. Flynn T. N., Marley A. A. J. Best-worst scaling: Theory and methods. In: Hess S., Daly A., eds. Handbook of choice modelling. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing; 2014. p. 178–201.
7. Mohammad S. M. Word affect intensities. In: *Proceedings of the 11th International Conference on the Language Resources and Evaluation (LREC–2018)*, May 7–12, 2018, Miyazaki, Japan. URL: <https://www.saifmohammad.com/WebDocs/word-affect-intensities.pdf> (accessed: 25.03.2024).
8. Lukashevich N. V. Automatic sentiment analysis of texts: Problems and methods. *Intelligent Systems. Theory and Applications*. 2022;26(1):50–61. (In Russ.).
9. Vakulenko A., Strelets A., Sytnik D. Methods of assessing the impact of the questionnaire’s quality on the polling results reliability by means of simulation. *Bulletin of Moscow Region State University*. 2013;(4). URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_21206563\\_45223214.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_21206563_45223214.pdf) (accessed: 25.03.2024). (In Russ.).

### Информация об авторах

**А. Р. Гончаров** – аспирант.

**С. А. Лысенкова** – кандидат физико-математических наук, доцент.

### Information about the authors

**A. R. Goncharov** – Postgraduate.

**S. A. Lysenkova** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

Научная статья

УДК 004.94:519.876.5:531.17

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-5



## РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЛЯ ШЕСТИЗВЕННОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

**Олег Валерьевич Гусев***Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева, Рыбинск, Россия**gusevov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7380-5470>*

**Аннотация.** В работе описана последовательность действий, необходимых для решения прямой задачи кинематики, ориентированной на шестизвенного робота-манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M. Решение задачи базируется на использовании современных технологий твердотельного CAD-моделирования совместно со средой физического моделирования, многозвенных пространственных механизмов SimMechanics системы Simulink. Среда SimMechanics системы Simulink используется для визуализации динамики движения рабочего органа манипулятора. Полученное выражение матрицы манипулятора позволит в дальнейшем использовать его для решения обратной задачи кинематики.

**Ключевые слова:** промышленный робот-манипулятор, прямая кинематическая задача, матрица манипулятора, SimMechanics, имитационное моделирование, FANUC Robot M-20iA/35M

**Для цитирования:** Гусев О. В. Решение прямой задачи кинематики для шестизвенного робота-манипулятора // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 39–48. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-5.

Original article

## SOLVING THE DIRECT KINEMATIC PROBLEM FOR A SIX-UNIT ROBOT MANIPULATOR

**Oleg V. Gusev***Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia**gusevov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7380-5470>*

**Abstract.** The study describes steps to solve the direct kinematic problem for a six-unit robot manipulator, the FANUC Robot M-20iA/35M. The problem solving is based on modern solid CAD modeling technologies combined with a physical modeling environment, as well as Simulink's SimMechanics multi-unit spatial mechanisms. Simulink's SimMechanics environment is used for visualizing the dynamics of the manipulator's operating component. The manipulator's matrix equation can then be used for solving the inverse kinematic problem.

**Keywords:** industrial robot manipulator, direct kinematic problem, manipulator matrix, SimMechanics, simulating modeling, FANUC Robot M-20iA/35M

**For citation:** Gusev O. V. Solving the direct kinematic problem for a six-unit robot manipulator. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):39–48. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-5.

### ВВЕДЕНИЕ

Манипуляционные роботы являются основными компонентами современных робототехнических комплексов и, как правило, имеют множество степеней свободы или

подвижности. Последнее дает возможность перемещать их исполнительные органы в трехмерном пространстве и выполнять комплексные задачи. Для моделирования перемещения исполнительного механизма

робота необходимо решить задачи кинематики и динамики.

Кинематика манипуляторов описывает движение робототехнической системы в трехмерном евклидовом пространстве относительно заданной абсолютной системы координат в зависимости от времени, но без учета сил и моментов, которые порождают такое движение. Иными словами, задача кинематики – это описание пространственного положения манипулятора как функции времени. Кинематическая задача разделяется на прямую и обратную. Прямая задача кинематики служит для определения пространственных координат рабочего инструмента манипулятора по значениям координат и углов его шарнирных соединений.

Обратная позиционная кинематическая задача заключается в определении значений обобщенных координат шарниров манипулятора по заданному положению исполнительного органа.

При динамическом анализе работы необходимо по известным значениям сил и моментов, развиваемых приводами манипулятора, определить параметры движения его звеньев, обратная задача – в том, чтобы по заданным обобщенным координатам, скоростям и ускорениям определить действующие в сочленениях манипулятора силы и моменты. Аналитический подход, используемый для решения

задачи кинематики и динамики, является сложным и затратным с точки зрения вычислительных ресурсов.

В статье предложено решение прямой задачи кинематики для промышленного робота-манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M [1].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

FANUC Robot M-20iA/35M представляет собой стационарный шестиосевой робот с подвижной рукой. В качестве исполнительных двигателей применяются электрический сервопривод, шестиступенчатые шарнирные соединения с возможностью переворачиваться назад для увеличения рабочего диапазона и обеспечения максимальной гибкости. На рис. 1 показана конструкция робота и наименование и обозначение осей устройства (рис. 1а) с направлением вращения и пределам вращения по углам. На рис. 1б показано рабочее пространство манипулятора в виде диаграммы движения.

Robot M-20iA/35M является манипулятором с шестью степенями свободы, составные части манипулятора перемещаются в пространстве с помощью шести серводвигателей, которые размещаются в осях вращения (суставах) робота. Каждый роботизированный сустав перемещается в определенном диапазоне углов. На рис. 1а сочленения (joint) звеньев манипулятора обозначены

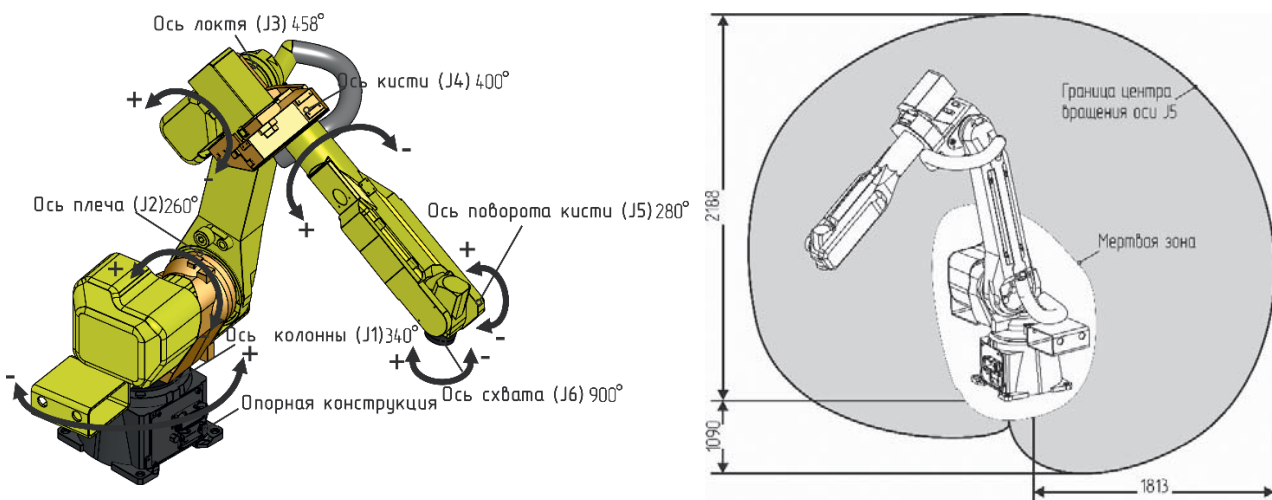


Рис. 1. Конструкция робота FANUC Robot M-20iA/35M

а) составные части и оси манипулятора; б) диаграмма движения манипулятора по осям

Примечание: составлено автором.

буквами J1...J6. Кинематическая цепь манипулятора состоит из шести кинематических пар вращательного типа, Robot M-20iA/35M работает в ангулярной (антропоморфной) системе координат, представляющей собой сферу (рис. 1б). Основные механические характеристики, а также пределы вращения по осям даны в таблице.

Конструкция роботизированного манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M стандартна для своего типа и состоит из неподвижного основания, с которым связана базовая система координат, поворотной стойки, к которой крепятся составные узлы манипулятора и его рабочий орган (концевой эффектор). При такой конструкции концевой эффектор манипулятора имеет возможность занять любое положение в его рабочем пространстве. В твердотельной модели рабочий орган не показан и используется его имитация в виде сферы. В реальном проекте в качестве концевой эффектора предполагается использовать систему технического зрения (СТЗ) для визуализации и обработки объекта сложной формы [2].

Для реализации поставленной цели необходимо рассчитать прямую и обратную кинематическую задачу. Прямая задача связана с определением пространственных координат рабочего органа манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M по значениям углов поворота его звеньев (шарниров). Обратная задача кинематики – расчет набора обобщенных координат звеньев манипулятора по заданной позиции рабочего органа манипулятора. К изучению кинематики, т. е. к описанию движения манипулятора, можно подойти, рассмотрев две дополняющие друг друга задачи (см. рис. 2).

При решении поставленных задач предполагается, что СТЗ фиксируется на рабочем инструменте робота-манипулятора и позволяет осуществить распознавание искомого объекта, а также определить его месторасположение в пространстве. Дальнейшая обработка полученного с помощью СТЗ изображения позволит обнаружить дефекты анализируемой поверхности (повреждения, разрывы и т. д.). Таким образом, необходимо решить обратную кинематическую задачу – вычисления углов сочленений манипулятора, так, чтобы

Таблица

Механические характеристики FANUC Robot M-20iA/35M

| Характеристики                                         |                              | Значение                                  |
|--------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| Способ монтажа                                         |                              | Напольный/настенный/наклонная поверхность |
| Количество осей подвижности                            |                              | 6 (J1, J2, J3, J4, J5, J6)                |
| Радиус рабочей зоны, мм                                |                              | 1813                                      |
| Движение по осям, °/<br>Скорость движения по осям, °/с | - (J1) ось колонны           | 340°/370° (опционно) (180°/с)             |
|                                                        | - (J2) ось плеча             | 260° (180°/с)                             |
|                                                        | - (J3) ось локтя             | 458° (200°/с)                             |
|                                                        | - (J4) ось вращения запястья | 400° (350°/с)                             |
|                                                        | - (J5) ось поворота запястья | 280° (350°/с)                             |
|                                                        | - (J6) ось вращения фланца   | 900° (400°/с)                             |
| Допустимый момент инерции по осям, Н·м                 | J4                           | 110,0                                     |
|                                                        | J5                           | 110,0                                     |
|                                                        | J6                           | 60,0                                      |
| Допустимый крутящий момент по осям, кг·м <sup>2</sup>  | J4                           | 4,00                                      |
|                                                        | J5                           | 4,00                                      |
|                                                        | J6                           | 1,50                                      |
| Максимальная грузоподъемность, кг                      |                              | 35                                        |
| Вес тела манипулятора (без блока управления), кг       |                              | 252                                       |
| Точность повторного позиционирования, мм               |                              | ±0,08                                     |

Примечание: составлено на основании источника [1].

концевой эффектор занимал определенное положение и ориентацию относительно анализируемой поверхности. В качестве модели сложной поверхности в дальнейшем будет использована модель рабочей лопатки 4-й ступени ротора компрессора низкого давления.

Обратная кинематическая задача может быть решена в численном либо аналитическом виде [3, 4]. Аналитический метод решения обратной задачи для многозвенного манипулятора основан на использовании аппарата тригонометрических функций. Преимуществом аналитического метода является получение решения с произвольной точно-

стью, однако получение аналитического решения не всегда возможно для произвольной конструкции манипулятора. Использование численных методов позволяет решить обратную задачу кинематики для тех конструкций манипуляторов, для которых получение точного решения в аналитических выражениях не представляется возможным либо достаточно затруднительно [5].

На рис. 3 схематически показана кинематическая схема манипулятора, а также оси вращения его сочленений. Шесть степеней свободы манипулятора Robot M-20iA/35M обеспечивают эффективное и точное по-

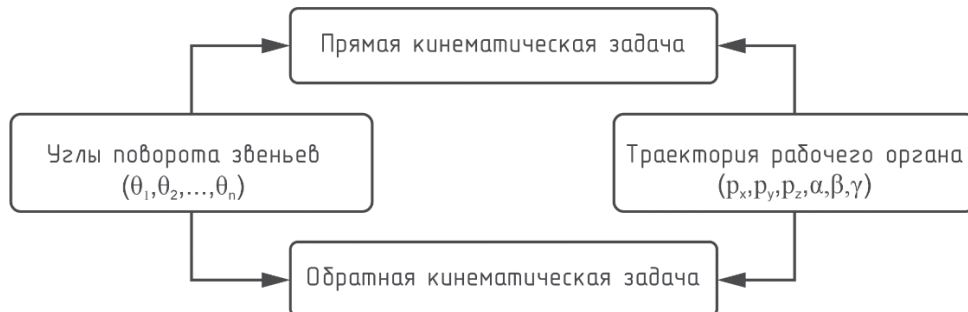


Рис. 2. Блок-схема процесса кинематического анализа  
 Примечание: составлено автором.

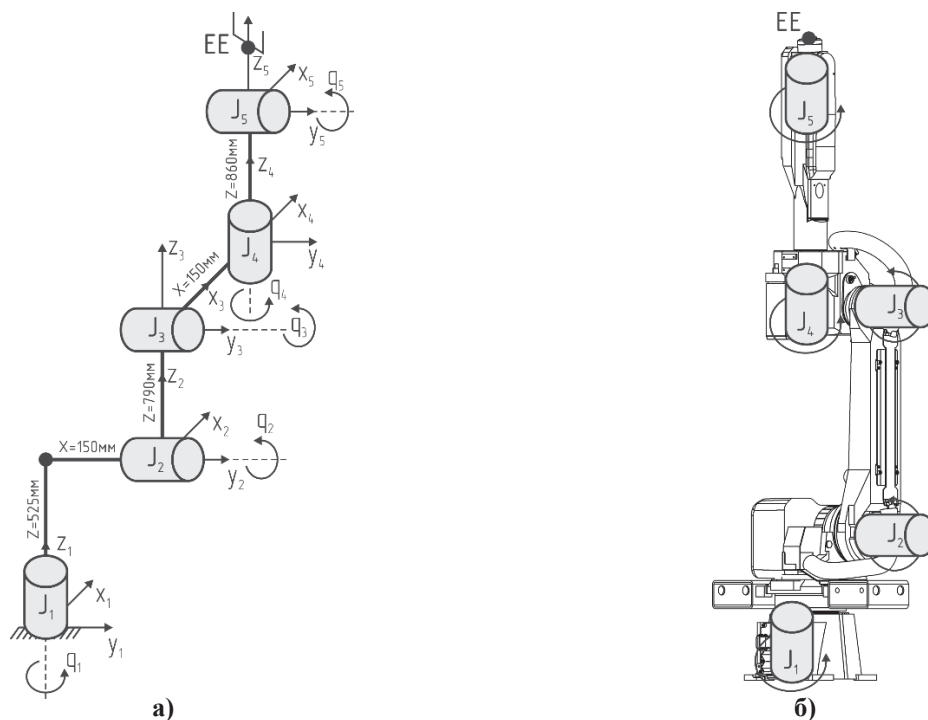


Рис. 3. Система координат манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M

а) смещение осей вращения в сочленениях манипулятора; б) оси вращения в соответствии с твердотельной моделью манипулятора

Примечание: составлено автором.

зиционирование его конечного эффектора. Число степеней свободы связано с числом одноосных вращательных соединений в звеньях манипулятора (ось вращения шестого звена манипулятора, которая отвечает за вращение шпинделя конечного эффектора, не бралась в расчет, т. е. полагалось, что конечный эффектор манипулятора неподвижен) [6]. Звенья манипулятора связаны вращательными кинематическими парами пятого класса (кинематическая схема разомкнута). Направление осей вращения задается в соответствии с правилом правой руки: пальцы правой руки согнуты в направлении вращения, большой палец правой руки направлен в положительном направлении оси. Сочленения (joint) звеньев манипулятора обозначены буквами J1...J5, точка крепления рабочего органа (end-effector) обозначена буквами EE.

Решение прямой задачи кинематики заключается в расчете координат положения и ориентации системы координат, связанной с рабочим органом, при заданном наборе обобщенных координат манипулятора [7]. Для ее решения обычно используют тот или иной метод преобразования координат [8–10]. Основой расчета является построение однородной матрицы преобразования (или матрица манипулятора)  $T$  размерностью  $4 \times 4$ , описывающей положение системы координат каждого звена манипулятора относительно системы координат предыдущего. Матрицу  $T$  можно представить как блочную матрицу вида:

$$T = \left[ \begin{array}{c|c} \frac{R_{3 \times 3}}{f_{1 \times 3}} & \frac{p_{3 \times 1}}{1 \times 1} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c|c} \text{Поворот} & \text{Сдвиг} \\ \hline \text{Преобразование перспективы} & \text{Масштабирование} \end{array} \right], \quad (1)$$

где  $R_{3 \times 3}$  – матрица поворота размерностью  $3 \times 3$ ;

$p_{3 \times 1}$  – матрица  $3 \times 1$ , задающая положение вектора начала повернутой системы координат отдельного звена относительно абсолютной;

$f_{1 \times 3}$  – матрица размерностью  $1 \times 3$ , задающая преобразование перспективы;

$1 \times 1$  – глобальный масштабирующий множитель (глобальное сжатие или расширение координат).

Система координат OXYZ фиксирована в трехмерном пространстве и принята за абсолютную. В качестве абсолютной системы выступает центр неподвижного основания робота. Система координат, которая вращается относительно абсолютной и физически рассматривается как связанная система координат, обозначается OUVW. Система OUVW жестко связана с твердым телом (сочленениями манипулятора) и движется вместе с ним. Подматрица  $p_{3 \times 1}$  – однородная матрица преобразования – задает параллельный перенос системы координат OUVW относительно абсолютной системы OXYZ на вектор  $\hat{p} = (p_x, p_y, p_z, 1)^T$ . Глобальный масштабирующий множитель для роботов-манипуляторов принимается равным единице [4]. Матрица  $f_{1 \times 3}$ , задающая преобразование перспективы, для универсального манипулятора состоит из нулевых элементов. Отличные от нуля значения матрицы  $f_{1 \times 3}$  используются в задачах машинного зрения. Матрицу поворота  $R_{3 \times 3}$  можно определить как матрицу преобразования трехмерного вектора положения в евклидовом пространстве, переводящую его из повернутой (связанной со манипулятором) системы отсчета OUVW в абсолютную, неподвижную, систему координат OXYZ. Матрицы элементарных поворотов по осям координат  $R_{x, \alpha}$ ,  $R_{y, \phi}$  и  $R_{z, \theta}$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} R_{x, \alpha} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \\ R_{y, \phi} &= \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix}, \\ R_{z, \theta} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x, y, z$  – оси, вокруг которых осуществляется поворот;

$\alpha, \varphi, \theta$  – углы поворота.

Однородная матрица композиции преобразований манипулятора (1) может быть получена путем перемножения однородных матриц элементарных поворотов и сдвигов для каждого звена:

$${}^0_nT = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}_iT, \quad (3)$$

где  $n$  – число подвижных звеньев;

$i$  – номер звена.

Для кинематической схемы манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M (см. рис. 2а) число подвижных звеньев  $n = 6$ , все сочленения вращательного типа. Сдвиг по осям координат каждого последующего звена относительно предыдущего показан на схеме в направлениях соответствующих осей. Решение прямой задачи кинематики для шестизвеного манипулятора является вопросом вычисления матрицы  ${}^0_6T$  с помощью последовательного перемножения шести смежных матриц  ${}^0_nT$ . Однородные матрицы преобразований для каждого сочленения в соответствии со схемой (см. рис. 2а) будут иметь следующий вид:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & X1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & Z2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & X3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Однородная матрица преобразования для конечного эффектора манипулятора (матрица  ${}^0_6T$ ) состоит из единичной матрицы с нулевым сдвигом по координатам [11]. Это объясняется тем, что для решения задачи, поставленной в статье, не требуется учитывать вращение шпинделя конечного эффектора. Результирующая, единственная однородная матрица решения прямой задачи кинематики манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M:

$${}^0_6T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T \cdot {}^5_6T. \quad (4)$$

Аналитическое выражение матрицы манипулятора имеет достаточно громоздкий вид и в статье не приводится. Однако полученное математическое выражение (4) используется в блочной модели для проверки правильности расчетов.

Для анализа траектории движения манипулятора и проверки правильности вычисления результирующей матрицы манипулятора использовалась система SIMULINK системы MATLAB. Твёрдотельная модель манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M разработана с использованием CAD-системы (SolidWorks 3D CAD Design Software). При анализе динамики движения использовался гибридный подход, заключающийся в импортировании модели манипулятора в специализированный пакет расширения SimMechanics [12]. Данный пакет служит для моделирования и расчета многодельных пространственных механизмов; в частности, SimMechanics широко используется для решения задач прямой и обратной кинематики и динамики роботов. Блок-схема импорта модели показан на рис. 4, сам механизм импорта подробно описан в [12, 13]. Для импорта модели манипулятора

в систему MATLAB использовалась утилита SimScape Multibody Link, которая преобразует данные механической системы из CAD-системы в приложение физического моделирования SimScape Multibody. Утилита SimScape Multibody Link генерирует два файла. Первый файл (\*.stl) содержит информацию о геометрии твердотельной модели, во втором файле (\*.xml) содержится информация о сопряжении деталей в CAD-сборке и их физических характеристиках (моменты инерции, масса и объем). На основе двух полученных файлов генерируется блочная Simulink-модель (файл \*.slx) со связями и сопряжениями в системе SimMechanics [14].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Имитационная модель манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M, импортированная в систему Simulink/SimScape Multibody, представлена на рис. 5.

Твердотельные элементы манипулятора (блоки M\_20iA35M\_J1...J5) в блочной модели соединяются между собой и с неподвижным основанием (блок M\_20iA35M\_base) при помощи сочленений (блоки REVOLUTE\_J1...J5 на рис. 5). Блоки REVOLUTE\_J1...J5 обеспечивают одну вращательную степень свободы. При реализации как прямой, так и инверсной кинематики сочленения манипулятора должны вращаться в некоторых пределах, ограничения вращения сочленений манипулятора определяются только физическими пределами изменения углов  $\theta_i$  для каждого из них. Пределы изменения углов для FANUC Robot M-20iA/35M даны в таблице и задаются в модели как параметры блоков REVOLUTE\_J1...J5 (параметр constraints-блоков). На вход блоков REVOLUTE\_J1...J5 подается внешний сигнал управления, который соответствует величине угла поворота для каждого из сочленений. Данные сигналы генерирует блок J1...J5 ANGLE'S.

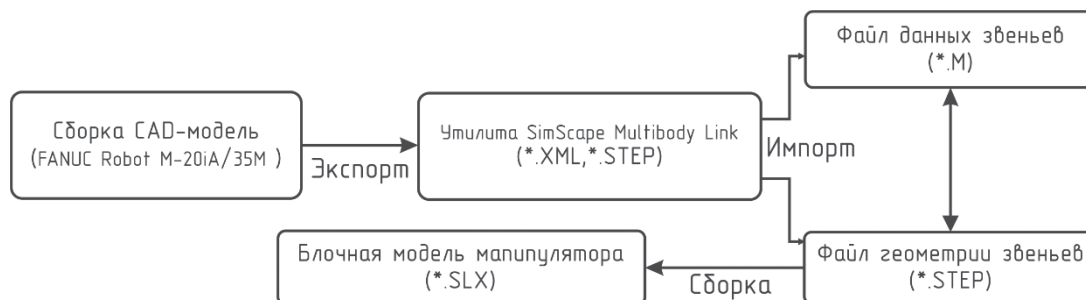


Рис. 4. Импорт CAD-модели манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M в систему MATLAB/Simulink

Примечание: составлено автором.

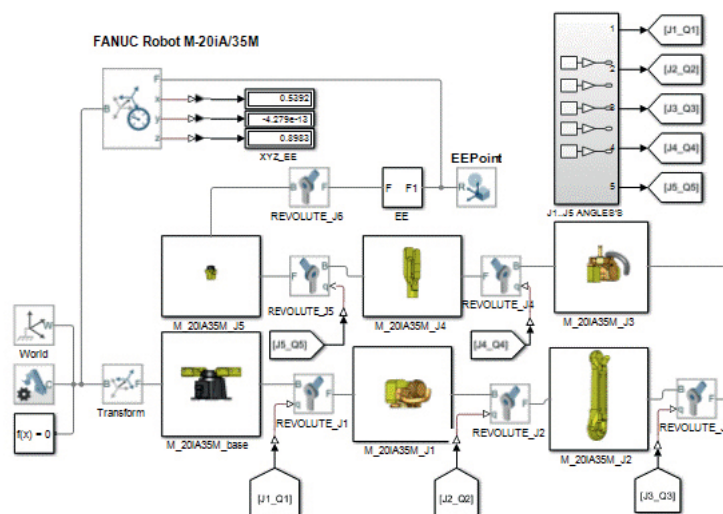


Рис. 5. Блочная Simulink/SimScape модель манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M

Примечание: составлено автором.

На рис. 6 показана твердотельная модель манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M при симуляции перемещения его рабочего органа в окне Mechanics Explorer системы Simulink. Точка, которая соответствует положению конечного эффектора манипулятора и координаты которой отслеживаются, показана в окне Mechanics Explorer в виде маркера (на рис. 6 в системе Mechanics Explorer маркер изображен в виде сферы).

На рис. 6 показано положение конечного эффектора манипулятора для углов сочленений  $\theta_1 = 0$ ,  $\theta_2 = 45$ ,  $\theta_3 = 65$ ,  $\theta_4 = 0$ ,  $\theta_5 = 0$ . Шестой угол и шестая степень свободы отвечают за вращение вокруг своей оси самого конечного эффектора. В связи с тем что СТЗ крепится к конечному эффектору манипулятора, для получения изображения анализируемой поверхности детали не требуется вращение камеры вокруг своей оси, поэтому принималось, что конечный эффектор неподвижен. Это упростит аналитическое выражения матрицы манипулятора  ${}^0T_6$ , так как матрица преобразований  ${}^5T_6$  для конечного эффектора не будет содержать тригонометрических функций. В блочной модели (рис. 5) положение эффектора, его координаты относительно неподвижной системы отчета отслеживались блоком XYZ\_EE. Блок выводит координаты  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в зависимости от заданных углов

сочленений. Так, для заданных углов сочленений  $\theta_1 = 0$ ,  $\theta_2 = 45$ ,  $\theta_3 = 65$ ,  $\theta_4 = 0$  и  $\theta_5 = 0$  координаты конечного эффектора после проведения моделирования будут  $[0,5392; 0; 0,8984]$ . Решение прямой задачи с использованием матрицы манипулятора (4) в среде MATLAB дает аналогичные значения координат конечного эффектора. На рис. 7 показано аналитическое и численное решение. Красным маркером выделены значения, полученные для вышеобозначенных углов  $\theta_1 \dots \theta_5$ .

Для получения численного результата при задании значений углов для матрицы манипулятора использовались среда MATLAB и визуальный редактор Live Editor [15]. В окно Live Editor в виде исполняемого скрипта вносились аналитические выражения для матрицы элементарных поворотов по осям координат (выражение 2) и конечной матрицы манипулятора (выражение 4). Значение углов поворота каждого шарнира ( $\theta_1 \dots \theta_5$ ) задавались как константы. Результирующая матрица манипулятора  ${}^0T_6$  и ее аналитическое выражение вычислялись как произведение матриц отдельных звеньев. В результате работы скрипта в окне Live Editor отображается аналитическое выражение матрицы  ${}^0T_6$ , а также значение координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  конечного эффектора FANUC Robot M-20iA/35M (на рис. 7 полученные координаты выделены красным).

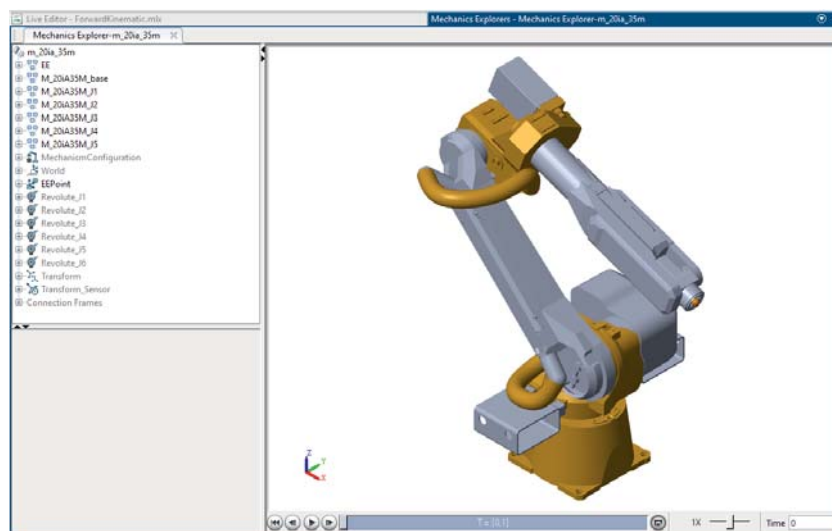


Рис. 6. Моделирование перемещения манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M в окне Mechanics Explorer системы Simulink

Примечание: составлено автором.

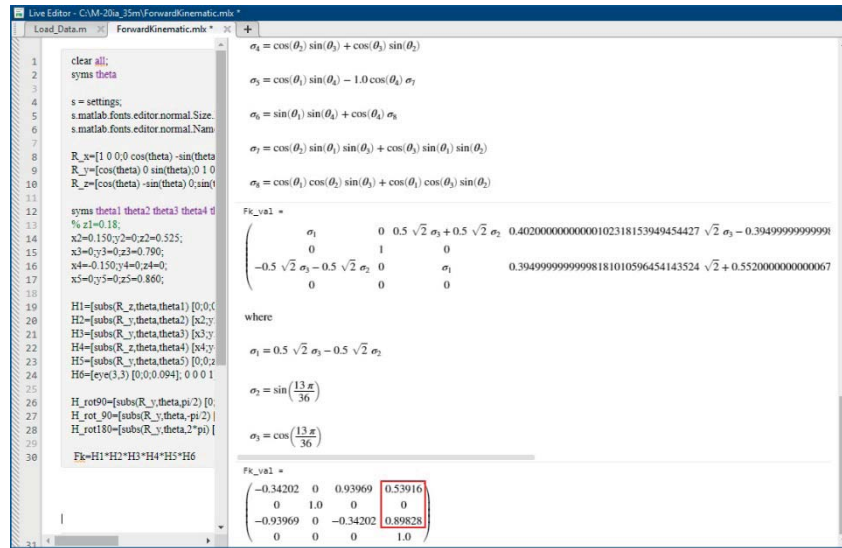


Рис. 7. Численное решение матрицы манипулятора в среде MATLAB

Примечание: составлено автором.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена прямая кинематическая задача с применением гибридного подхода моделирования манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M с шестью степенями свободы. Полученное аналитическое решение матрицы манипулятора  ${}^0T_6$  позволяет для каждого мо-

мента времени определить положение его исполнительного органа. В дальнейшем предложенная блочная Simulink-модель может быть дополнена и усовершенствована для учета ориентации конечного эффектора манипулятора при решении задачи инверсной кинематики.

## Список источников

1. FANUC global. URL: <https://www.fanuc.com/> (дата обращения: 15.04.2024).
2. Лесков А. Г., Морoshкин С. Д. Система технического зрения для определения расположения объектов // Экстремальная робототехника : тр. междунар. науч.-технич. конф., 24–25 ноября 2016 г., г. Санкт-Петербург. СПб. : ООО «АП4Принт», 2016. С. 287–290.
3. Angeles J. Fundamentals of robotic mechanical systems. Theory, methods and algorithms. 4th ed. Switzerland : Springer, 2014. 589 p.
4. Фу К., Гонсалес Р., Ли. К. Робототехника. М. : Мир, 1989. 624 с.
5. Колтыгин Д. С., Седельников И. А. Метод и программа решения прямой и обратной задачи кинематики для управления роботом-манипулятором // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 4. С. 65–74. DOI 10.18324/2077-5415-2020-4-65-74.
6. Садков К. О., Моногаров С. И. Роботизированный манипулятор с шестью степенями свободы // Наука, техника и образование. 2018. № 8. С. 37–43.
7. Karger A. Singularity analysis of serial robot-manipulators // Journal of Mechanical Design. 1996. Vol. 118, no. 4. P. 520–525.

## References

1. FANUC global. URL: <https://www.fanuc.com/> (accessed: 15.04.2024).
2. Leskov A. G., Moroshkin S. D. Computer vision system for objects pose estimation. In: *Proceedings of the International Scientific and Technological Conference "Extreme robotics"*, November 24–25, 2016, Saint Petersburg. St. Petersburg: ООО «AP4Print», 2016. p. 287–290. (In Russ.).
3. Angeles J. Fundamentals of robotic mechanical systems. Theory, methods and algorithms. 4th ed. Switzerland: Springer; 2014. 589 p.
4. Fu K. S., Gonzales R. C., Lee C. S. G. Robotics: Control, sensing, vision, and intelligence. Moscow: Mir; 1989. 624 p. (In Russ.).
5. Koltygin D. S., Sedelnikov I. A. Method and program for solving direct and inverse kinematics problems for controlling a robot manipulator. *Systems. Methods. Technologies*. 2020;(4):65–74. DOI 10.18324/2077-5415-2020-4-65-74. (In Russ.).
6. Sadkov K. O., Monogarov S. I. Robotized manipulator with six degrees of freedom. *Science, Technology and Education*. 2018;(8):37–43. (In Russ.).
7. Karger A. Singularity analysis of serial robot-manipulators. *Journal of Mechanical Design*. 1996;118(4):520–525.

8. Denavit J., Hartenberg R. S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // *Journal of Applied Mechanics*. 1955. Vol. 22, no. 2. P. 215–221.
9. Hayati S., Mirmirani M. Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators // *Journal of Robotic Systems*. 1985. Vol. 2, no. 4. P. 397–413.
10. Brandstötter M., Angerer A., Hofbaur M. An analytical solution of the inverse kinematics problem of industrial serial manipulators with an ortho-parallel basis and a spherical wrist. // *Proceedings of the Austrian Robotics Workshop*, May 22–23, 2014, Linz, Australia. Vol. 22. 2014. P. 7–11.
11. Singla A., Singh G., Virk G. S. Matlab/simMechanics based control of four-bar passive lower-body mechanism for rehabilitation // *Perspectives in Sciences*. 2016. Vol. 8. P. 351–354.
12. Hroncova D., Pastor M. Mechanical system and SimMechanics simulation // *American Journal of Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 1, no. 7. P. 251–255.
13. Achilli G. M., Logozzo S., Valigi M. C. et al. Under-actuated soft gripper for helping humans in harmful works // *Proceedings of I4SDG Workshop 2021* / Quaglia G., Gasparetto A., Petunya V., Carbone G., eds. Cham : Springer, 2021. P. 264–272.
14. Гусев О. В. Имитационное моделирование захвата антропоморфной кисти руки // *Вестник кибернетики*. 2023. Т. 22, № 4. С. 18–25.
15. MATLAB live editor. URL: <https://nl.mathworks.com/products/matlab/live-editor.html> (дата обращения: 15.04.2024).
8. Denavit J., Hartenberg R. S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics*. 1955;22(2):215–221.
9. Hayati S., Mirmirani M. Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators. *Journal of Robotic Systems*. 1985;2(4):397–413.
10. Brandstötter M., Angerer A., Hofbaur M. An analytical solution of the inverse kinematics problem of industrial serial manipulators with an ortho-parallel basis and a spherical wrist. In: *Proceedings of the Austrian Robotics Workshop*, May 22–23, 2014, Linz, Australia. Vol. 22. 2014. p. 7–11.
11. Singla A., Singh G., Virk G. S. Matlab/simMechanics based control of four-bar passive lower-body mechanism for rehabilitation. *Perspectives in Sciences*. 2016;8:351–354.
12. Hroncova D., Pastor M. Mechanical system and SimMechanics simulation. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2013;1(7):251–255.
13. Achilli G. M., Logozzo S., Valigi M. C. et al. Under-actuated soft gripper for helping humans in harmful works. In: Quaglia G., Gasparetto A., Petunya V., Carbone G., eds. *Proceedings of I4SDG Workshop 2021*. Cham: Springer; 2021. p. 264–272.
14. Gusev O. V. Simulation of anthropomorphic wrist gripping. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(4):18–25. (In Russ.).
15. MATLAB live editor. URL: <https://nl.mathworks.com/products/matlab/live-editor.html> (accessed: 15.04.2024).

### Информация об авторе

О. В. Гусев – кандидат физико-математических наук, доцент.

### Information about the author

O. V. Gusev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

Научная статья

УДК 004.8

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-6



## РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СЕГМЕНТАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ТАРГЕТИРОВАННОЙ РЕКЛАМЕ

Светлана Анатольевна Никитина<sup>1✉</sup>, Екатерина Рафаэлевна Болтачева<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>1</sup>[nikitina@csu.ru](mailto:nikitina@csu.ru)<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-1975-1256>

<sup>2</sup>[katya473@mail.ru](mailto:katya473@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5170-5738>

**Аннотация.** В данной работе предложен способ построения архитектуры нейронной сети для решения задачи классификации пользователей на основании сделанных ими комментариев, размещенных в открытых источниках. Для обучения нейронной сети применяется метод обратного распространения ошибки. Данные для обучения были предварительно размечены, а затем выборку разбили на три части, а именно тренировочную, валидационную и тестовую. Потребовалось провести предобработку отзывов покупателей до того, как они подавались на вход сети. Для реализации построенной модели было необходимо создать специальные словари слов, показывающих принадлежность к определенному классу. На основании полученного выходного значения построенной сети можно сделать вывод о том, к какой категории следует отнести определенных покупателей. Это позволит предприятию эффективно применять таргетированную рекламу к выявленной целевой группе потребителей.

**Ключевые слова:** анализ данных, нейросетевые технологии, задача классификации, эффективные стратегии

**Для цитирования:** Никитина С. А., Болтачева Е. Р. Разработка архитектуры нейронной сети для проведения сегментации пользователей при таргетированной рекламе // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 49–56. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-6.

Original article

## DEVELOPING A NEURAL NETWORK ARCHITECTURE TO PERFORM USER SEGMENTATION WITH TARGETED ADVERTISING

Svetlana A. Nikitina<sup>1✉</sup>, Ekaterina R. Boltacheva<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>1</sup>[nikitina@csu.ru](mailto:nikitina@csu.ru)<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-1975-1256>

<sup>2</sup>[katya473@mail.ru](mailto:katya473@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5170-5738>

**Abstract.** The article proposes a method for constructing a neural network architecture to solve the problem of classifying users based on their comments posted in open sources. The backward propagation of error is used to train a neural network. The training data was pre-marked, and then sampled into three groups: training, validation, and test. Customers' reviews were pre-processed before being submitted to the network. The constructed model was implemented using special layers of words classified into specific groups. Based on the obtained output value of the constructed network, it is possible to determine which category certain customers should be assigned. Thus, the company will be able to effectively apply targeted advertising to the identified target group of consumers.

**Keywords:** data analysis, neural network technologies, classification task, effective strategies

**For citation:** Nikitina S. A., Boltacheva E. R. Developing a neural network architecture to perform user segmentation with targeted advertising. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):49–56. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-6.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время появляются новые методы и приемы для продвижения товаров и услуг, для расширения рынка продаж; создаются и совершенствуются инструменты для их реализации. Вместе с тем можно отметить намечающиеся изменения в модели потребительского поведения. Клиенты устанавливают новые требования, а именно: быстрое удовлетворение появляющихся потребностей, персонализированный подход, кастомизация товара или услуги. Для компаний одной из приоритетных задач становится разработка технологии привлечения и удержание внимания потенциальных клиентов. Для того чтобы получить и сохранить доверие потребителя в условиях возрастающей конкуренции, специалисты по маркетингу разрабатывают и осваивают инновационные методы, в том числе на основе применения информационных технологий. Среди этих методов можно выделить таргетированную рекламу как один из действенных способов рекламы в интернете.

Таргетированная реклама (от англ. target – цель) в литературе определяется так: вид интернет-рекламы, для демонстрации которого осуществляется подбор потребительской аудитории; рекламное объявление, направленное на отображение исключительно у целевой аудитории клиентов; выборочное представление некоторого товара или услуги потребителю путем ориентации на полученную о нем информацию [1, с. 233].

Для определения целевой аудитории, для которой будет интересен определенный продукт, проводится специальный анализ на основе предварительно проведенного сбора данных.

Следует отметить, что на сегодня объем накопленного информационного контента социальных сетей огромен. Поэтому возникает необходимость автоматизации процесса указанного мониторинга. Для этого можно использовать методы анализа и классификации данных, основанные на нейросетевом подходе.

Под искусственной нейронной сетью понимается структура из связанных друг с дру-

гом нейронов. Нейроны могут быть связаны совершенно по-разному, это определяется выбранной архитектурой конкретной сети. Принцип работы нейронной сети следующий: по значениям поступающих на вход сети сигналов формируется выходной сигнал. Проще говоря, нейронную сеть можно представить в виде черного ящика, у которого есть входы и выходы, а внутри этого ящика расположено большое количество нейронов [2, с. 6].

Целью исследования является изучение вопроса применения нейронных сетей при проведении таргетированной рекламы.

В качестве задач исследования выступают:

1. Изучение основных механизмов таргетированной рекламы.
2. Рассмотрение базовых архитектур нейронных сетей.
3. Разработка подходящей модели нейронной сети для проведения сегментации данных.

Актуальность выбранной для исследования темы определяется необходимостью проработки вопроса эффективности существующих рекламных стратегий на основе таргетинга вследствие непрерывного развития цифровых технологий.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Анализ цифровых инструментов рекламных кампаний в последнее десятилетие проводился многими авторами. Сделаем обзор некоторых научных работ, посвященных исследованию вопросов в рассматриваемой области.

Так, в [3, с. 212] авторы представили обзор подходов к построению нейронных сетей для анализа данных, размещенных в социальных сетях в свободном доступе. Описаны практические результаты, полученные для байесовского классификатора.

В статье [4, с. 112] изучались основные технологии таргет-рекламы. Была показана выгода от применения данного инструмента продвижения. При этом доказательной практической базой исследования являются данные в области интернет-маркетинга за несколько лет.

В работе [5, с. 3] проведено сравнение возможностей таргетированной рекламы для популярных социальных сетей «ВКонтакте» и «Одноклассники». В основу для сравнения положены два показателя: наличие возможности настроек подбора аудитории для демонстрации рекламных сообщений и наличие возможности рекламных форматов. Сделаны выводы, сформулированы рекомендации.

В статье [6, с. 31] рассматривается, каким образом трансформируются традиционные маркетинговые технологии в связи с возможностями, которые предлагает искусственный интеллект и машинное обучение. В исследовании [7, с. 18] проведена систематизация инструментов нескольких платформ с точки зрения использования извлеченных данных о клиентах в таргетированной рекламе. В статье [8, с. 102] доказывается важность таргетированной рекламы как части маркетинговой системы компании.

Отметим также несколько работ, в которых описаны основные методы анализа данных и нейросетевые технологии.

В статье [9, с. 8–15] сделан обзор современных архитектур нейронных сетей. Описаны важные тренды в области искусственного интеллекта. В работе [10, с. 28–31] приведена базовая терминология, приемы разработки и обучения нейросети. В материалах [11] представлена подборка сервисов аналитики, которые могут помочь упростить работу по анализу данных в социальных сетях.

На основании проведенного выше обзора научной литературы были установлены базовые механизмы осуществления таргетированной рекламы. Это позволило выявить и очертить круг решаемых задач. Установлено [12, с. 37], что главной из них является разделение пользователей социальных сетей на группы, что дает возможность в дальнейшем получить целевую аудиторию. Кроме этого, были рассмотрены некоторые современные архитектуры искусственных нейронных сетей, что помогло разработать подходящую модель нейронной сети для проведения сегментации данных.

В практической части работы решена задача классификации пользователей на осно-

вании оставленных ими отзывов. Для этого была спроектирована нейронная сеть прямого распространения [13, с. 145]. Для обучения нейронной сети выбран метод обратного распространения ошибки [14, с. 77].

Отметим, что авторами статьи ранее была рассмотрена подобная задача при классификации текстов, поэтому часть полученных в статье [15, с. 15] результатов удалось применить и при решении данной проблемы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенность таргетированной рекламы состоит в том, что ее имеет смысл запускать только на основе проведенного предварительного анализа пользовательской аудитории. Определение нужного сегмента целевой аудитории для таргетинга – одна из важнейших составляющих эффективности такой рекламы. Необходимо четко понимать цели рекламной кампании и то, какие результаты планируется достичь с ее помощью. Если правильно сегментировать имеющиеся данные, то можно существенно увеличить объем и рынок продаж.

Главным преимуществом таргет-рекламы является то, что она настраивается исключительно на отдельную целевую аудиторию, которая заинтересована в предлагаемых продуктах. Другим преимуществом такого вида рекламы является ее невысокая стоимость, что позволяет снизить затраты компании.

Таргетирование состоит из нескольких этапов, каждый из них имеет свои особенности, которые необходимо обязательно учитывать для достижения цели рекламной кампании. Перечислим эти этапы.

1. Создание портрета потребителя и поиск целевой аудитории. На этом этапе проводится сбор и анализ данных пользователей.

2. Наполнение контента. Речь идет о наполнении страницы или сайта, на которых происходит продажа, удобной и полной информацией.

3. Генерация рекламных сообщений. Важный этап, так как на нем выполняется создание материала, способного заинтересовать представителей целевой аудитории.

Для реализации первого пункта в части сбора сведений необходимо провести так называемое извлечение данных из информационной среды. Это возможно выполнить, например, с помощью специальной программы, называемой парсером. Данные, собранные парсером, записываются по определенным правилам в заданном формате. Парсинг позволяет собрать базу людей, которым возможно будет интересно предложение компании. Для эффективной настройки таргетированной рекламы подобный сбор информации является необходимым. Для выполнения несложного анализа можно собрать первичную информацию: пол, возраст, образование, место проживания, наличие семьи, указанные интересы и контакты. Однако для более тщательного анализа аудитории может потребоваться информация о сообществах, в которых состоят потребители, о количестве друзей, об активности за определенный период, о размещенных постах и комментариях. Отдельно можно отобрать фотографии для их дальнейшего анализа (какую одежду и каких брендов предпочитает, носит ли очки и аксессуары, увлечения, досуг, вредные привычки и т. д.).

Непосредственно анализ уже отобранных данных может быть проведен с использованием нейросетевых технологий, которые позволяют автоматически устанавливать закономерности в больших объемах данных.

При проведении второго и третьего этапов таргетирования также возможно использовать искусственные нейронные сети. Они позволяют создавать креатив как визуальный, так и текстовый. Для упрощения создания наполнения страницы или сайта можно использовать специальные нейронные сети, генерирующие нужные элементы. Процесс создания рекламных сообщений также можно «поручить» нейронным сетям. На сегодня нейросети умеют подстраивать сообщения (текст, изображение, звук) под предпочтения конкретного человека.

На текущий момент разработано большое количество видов нейронных сетей, различающихся по связям между нейронами, количе-

ству слоев, сложности в реализации, методу обучения. Следует отметить, что архитектура нейронной сети подбирается разработчиком для каждой конкретной задачи. Существует базовые архитектуры, которые рекомендуются применять к определенным классам задач.

Следуя работе [13, с. 137], приведем базовые архитектуры искусственных нейронных сетей.

Сначала опишем полносвязную нейронную сеть. В этой сети каждый нейрон из одного слоя связан со всеми нейронами, расположенными в соседних слоях, при этом связи сети всегда направлены от входных нейронов к выходным.

Эта сеть решает задачу классификации, если нам нужно разбить данные на категории, либо задачу регрессии, если необходимо получить прогноз (предсказание) значения по входным данным. Обучение полносвязной сети обычно выполняется методом обратного распространения ошибки, построенного на базе градиентного спуска.

Для таргетированной рекламы нейросеть с такой архитектурой может применяться, например, для классификации пользователей по заданным характеристикам. Выполненная классификация позволит очертить круг потенциальных пользователей товара или услуги.

Сверточные нейронные сети – это сети, архитектура которых позволяет работать с небольшими участками входа. Основной задачей, решаемой такими нейросетями, является обработка изображений (классификация и детекция). В состав архитектуры обязательно входят сверточные слои, слои для уменьшения размера изображения и полносвязные слои (расположены перед выходным слоем и используются для классификации).

Для таргет-рекламы сверточная нейросеть может применяться, например, в случае «детального таргетирования», когда по фотографии отбираются пользователи, которые носят бороду, очки, определенные бренды и т. д.

Рекуррентные нейронные сети работают с данными, в которых присутствует времен-

ная зависимость. Связи между нейронами в этих сетях могут идти не только от текущего слоя к последующему, но и к предыдущему. Эта особенность позволяет отразить зависимость переменных задачи от значений в разные моменты времени.

Для таргетированной рекламы рекуррентная нейросеть может применяться, например, для моделирования контента. Такие сети лучше всего работают с генерацией текстов и обработкой последовательностей значений, то есть с данными, имеющими закономерности при изменении во времени.

### **Разработка модели нейронной сети для проведения сегментации**

Рассмотрим решение задачи классификации пользователей на основании оставленных ими комментариев в социальных сетях. Как было сказано выше, для решения такой задачи лучше всего подходит нейронная сеть прямого распространения. Для обучения нейронной сети возьмем метод обратного распространения ошибки.

Данные представляют собой отзывы о некотором продукте, размещенные в открытых источниках. Требуется выполнить сегментацию пользователей, то есть разбить на группы в зависимости от оставленного комментария. Зададим три класса отзывов: позитивные, негативные и нейтральные. При проведении исследования заранее был составлен специальный словарь наиболее часто встречающихся слов в каждом из трех видов отзывов.

Поскольку обучение сети в рассматриваемой задаче предполагает процесс обучения с учителем, то необходимо, чтобы полученные данные были заранее размечены. Разметка должна соответствовать заявленным трем классам. В работе была подготовлена размеченная выборка, то есть множество объектов с известными ответами. Размеченную выборку разделили на три части: тренировочную, валидационную и тестовую выборки в пропорции 70, 10 и 20 %. Это стандартная процедура для таких задач. Тренировочная выборка непосредственно участвует в процессе обуче-

ния, валидационная понадобится для оценки качества работы спроектированной нейросети. Тестовая выборка используется для окончательной проверки работы сети после указанных двух процессов.

До того как подать на вход сети текст, надо его подготовить, то есть провести предобработку. Предобработка включает в себя следующие этапы:

Удаление «служебных» единиц текста, то есть предлогов, союзов, знаков препинания, а также лишних пробелов и т. п.

Приведение всех слов к малому регистру.

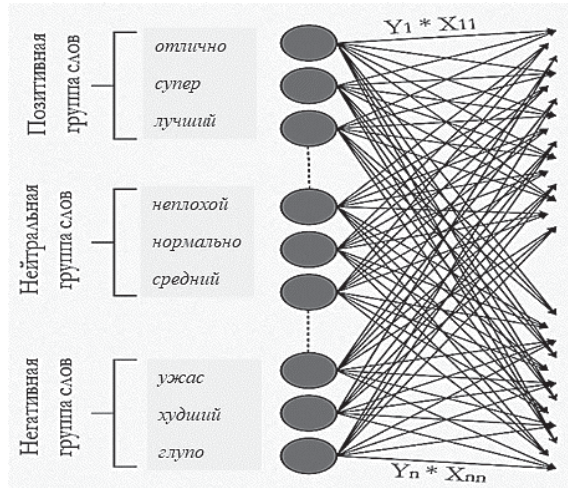
Обработка отрицаний – слияние отрицательных частиц с парными словами.

Отметим, что для выполнения предобработки нужен отдельный скрипт, созданный на основе специальных алгоритмов.

Нейроны входного слоя фактически представляют собой ранее составленный словарь часто употребляемых слов в положительных, нейтральных и негативных отзывах (отрицания включены в словарь). Перед тем как мы подаем отзыв на вход сети, мы вычленим из него все слова согласно этому словарю. На вход в нейроны подается количество  $Y_i$  вхождений определенного слова в отзыв. В дальнейшем данная величина умножается на весовой коэффициент  $X_{ij}$ , вычисленный в процессе обучения для каждой связи. Изначально любой вес  $X_{ij}$  полагаем равным некоторому небольшому значению. На вход в следующий слой подается величина, вычисленная по формуле  $Y_i * X_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, n$ . Здесь  $n$  – размерность первого слоя (рис. 1).

На вход в нейроны скрытого слоя подаются числа  $Y_i * X_{ij}$ , вычисленные на предыдущем слое. В дальнейшем данные величины суммируются и умножаются на весовые коэффициенты  $M_{ik}$ , вычисляемые в процессе обучения для каждой связи сети. Размерность данного слоя соответствует размерности входного слоя. Изначально любой вес  $M_{ik}$  равен произвольному небольшому значению. На вход в следующий слой (рис. 2) подается величина.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (Y_i \cdot x_{ij}) * M_{ik},$$

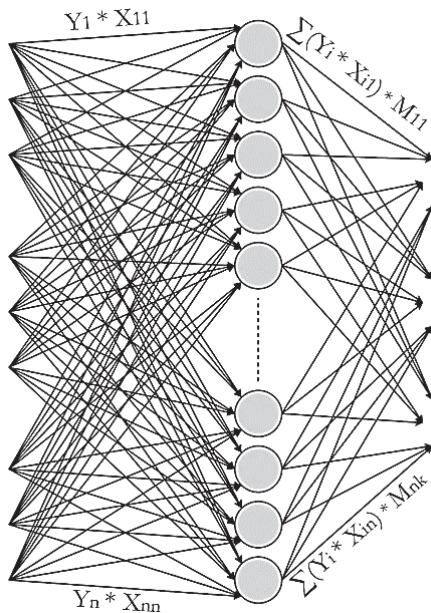


**Рис. 1. Схематическое описание входного слоя нейронной сети**

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

$k = 1, 2, 3$ . Здесь  $n$  – размерность первых двух слоев сети.

Следующий слой – это softmax-слой, то есть слой «сглаживания», является необходимым при классификации данных (рис. 3). Каждый нейрон данного слоя отвечает за определенный класс тональности (первый – за положительный, второй – за нейтральный, третий – за негативный).



**Рис. 2. Схематическое описание скрытого слоя нейронной сети**

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

Поясним применение этого слоя. Пусть  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – это положительные значения, которые выдал предыдущий слой нейронной сети.

Тогда числа

$$\frac{a}{a+b+c}, \quad \frac{b}{a+b+c}, \quad \frac{c}{a+b+c}$$

положительны и их сумма равна единице. То есть их можно интерпретировать как вероятности. Аналогичные значения определяются на данном слое нейронной сети.

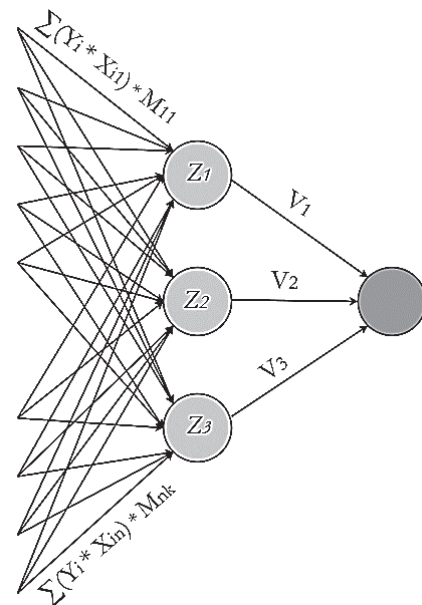
Введем обозначения:

$$z_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (Y_i \cdot x_{ij}) * M_{ik},$$

$$V_k = \frac{z_k}{\sum z_l},$$

$k = 1, 2, 3, l = 1, 2, 3$ .

На выходе слоя softmax в данной модели будет величина  $V_k \in [0; 1]$ , обозначающая вероятность принадлежности отзыва к определенному классу. В результирующем слое выбирается наибольшая вероятность и выдается за результат. Если любые из двух вероятностей равны, то в результате отзыв будет определяться как нейтральный.



**Рис. 3. Схематическое описание softmax-слоя нейронной сети**

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

Обучение нейронной сети по методу обратного распространения ошибки происходит так.

1. Выполняем инициализацию весовых коэффициентов случайным образом.

2. Из тренировочной выборки отделяем очередную обучающую пару; подаем на вход сети входной параметр этой пары.

3. Выполняем вычисление выходных параметров нейронной сети.

4. Определяем разность между полученным выходом нейросети и требуемым выходом (речь идет о целевом векторе обучающей пары).

5. Пересчитываем веса нейронной сети в целях минимизации ошибки. Точка минимума будет определять оптимальные веса.

6. Повторяем для каждого набора из тренировочной выборки шаги 2–5, пока ошибка обучения нейронной сети на всем множестве не достигнет приемлемого уровня.

Таким образом, полностью описана математическая модель и архитектура нейронной сети, а также пошагово представлен метод ее обучения.

Предполагается, что применение такой сети позволит решать задачу сегментации пользователей, которая, в свою очередь, даст возможность персонифицировать подачу рекламы товаров и услуг.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одна из основных целей анализа данных в маркетинге состоит в том, чтобы точно сегментировать клиентов для достижения эффективного взаимодействия с ними. В условиях глобализации рынка и усиливающейся конкуренции в центре внимания производителей находятся клиенты, а именно их интересы и предпочтения. Четкое знание того,

что необходимо клиентам, и поддержание их удовлетворенности позволяет компаниям обеспечивать рынок сбыта.

Использование нейросетевых технологий дает возможность автоматизировать многие трудоемкие процессы. Внедрение подобных технологий направлено на улучшение качества принимаемых решений, касающихся привлечения новых выгодных клиентов, совершенствования и сохранения взаимоотношений с уже имеющимися потребителями.

В представленной работе были рассмотрены основные этапы проведения таргетированной рекламы. Кроме этого, были разобраны базовые архитектуры искусственных нейронных сетей. Было отмечено, что для проведения каждого из этапов таргет-рекламы возможно разработать и применить подходящую нейронную сеть, которая справится с выполнением задачи наилучшим образом.

В работе отдельно рассмотрен вопрос сегментации пользователей. Было предложено использовать нейронные сети для выявления целевой группы потребителей продукции. Обосновано применение указанного подхода для данной задачи. В практической части построена архитектура полносвязной сети прямого распространения для решения задачи классификации пользователей на основе оставленных ими комментариев. Изложено выполнение работы по исследуемой теме в части получения и разметки тренировочных данных, а также составления специальных словарей. Описанная в работе сеть может быть рекомендована к использованию на практике. Это позволит предприятию эффективно применять таргетированную рекламу к выявленной целевой группе потребителей.

## Список источников

1. Жильцова О. Н., Артемьева О. А., Жильцов Д. А. Интернет-маркетинг. 2-е изд., пер. и доп. М. : Юрайт, 2023. 335 с.
2. Гафаров Ф. М., Галимянов А. Ф. Искусственные нейронные сети и приложения. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2018. 121 с.
3. Ищукова Е. А., Салманов В. Д., Калябин А. А. и др. Исследование алгоритмов анализа информации в

## References

1. Zhiltsova O. N., Artemyeva O. A., Zhiltsov D. A. Internet-marketing. 2nd ed., rev. ed. Moscow: Iurait; 2023. 335 p. (In Russ.).
2. Gafarov F. M., Galimyanov A. F. Iskustvennyye neironnyye seti i prilozheniia. Kazan: Publishing House of Kazan University; 2018. 121 p. (In Russ.).
3. Ishchukova E. A., Salmanov V. D., Kalyabin A. A. et al. Research of algorithms for analyzing informa-

- социальных сетях // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 4. С. 210–215.
4. Медведева О. С., Билюнас Д. В. Возможности таргетированной рекламы в социальных сетях // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2019. № 3–2. С. 112–117.
  5. Лучинкин В. Ю. Сравнение возможностей таргетинговой рекламы в социальных сетях «ВКонтакте» и «Одноклассники» // Наука. Общество. Государство. 2016. Т. 4, № 4. С. 1–7.
  6. Старостин В. С. Трансформация маркетинговых технологий в эпоху машинного обучения // Вестник университета. 2018. № 1. С. 28–34. DOI 10.26425/1816-4277-2018-1-28-34.
  7. Загорная Т. О., Баева Д. А., Коломыцева А. О. Оценка возможностей использования цифровых данных о потребителях в таргетированной рекламе // Новое в экономической кибернетике. 2020. № 2. С. 11–20.
  8. Корева О. В. Таргетированная реклама как инструмент маркетинговой политики коммерческих компаний // Тенденции и технологии управления процессами и системами в современной экономике : материалы Всерос. конф., 30 марта 2022 г., г. Орел. Орел : Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, 2022. С. 100–106.
  9. Макаренко А. В. Глубокие нейронные сети: зарождение, становление, современное состояние // Проблемы управления. 2020. № 2. С. 3–19.
  10. Созыкин А. В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6, № 3. С. 28–59.
  11. 35 инструментов для аналитики социальных сетей. URL: <https://popsters.ru/blog/post/35-instrumentov-dlya-analitiki-socsetey> (дата обращения: 17.04.2024).
  12. Жильцова О. Н., Синяева И. М., Жильцов Д. А. Рекламная деятельность. М. : Юрайт, 2023. 233 с.
  13. Николенко С., Кадуринов А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб. : Питер, 2018. 480 с.
  14. Головкин В. А., Краснопрошин В. В. Нейросетевые технологии обработки данных. Минск : БГУ, 2017. 263 с.
  15. Болтачева Е. Р., Никитина С. А. О некоторых подходах к решению задачи классификации текстов по тональности на примере анализа англоязычных отзывов // Вестник кибернетики. 2022. № 2. С. 14–19. DOI 10.34822/1999-7604-2022-2-14-19.
  4. Medvedeva O. S., Bilyunas D. V. The possibility of targeted advertising in social networks. *Vestnik Altaiskoi akademii ekonomiki i prava*. 2019;(3–2):112–117. (In Russ.).
  5. Luchinkin V. Yu. A comparison of the features targeting advertising in social networks “VKontakte” and “Classmates”. *Science. Society. State*. 2016;4(4):1–7. (In Russ.).
  6. Starostin V. S. Transformation of marketing technologies in machine intelligence era. *Vestnik universiteta*. 2018;(1):28–34. DOI 10.26425/1816-4277-2018-1-28-34. (In Russ.).
  7. Zagornaya T. O., Baeva D. A., Kolomytseva A. O. Evaluating the possibilities of using digital data about consumers in targeted advertising. *New in Economic Cybernetics*. 2020;(2):11–20. (In Russ.).
  8. Koreva O. V. Targeted advertising as a tool of marketing policy of commercial companies. In: *Proceedings of the All-Russian Conference “Tendentsii i tekhnologii upravleniia protsessami i sistemami v sovremennoi ekonomike”*, March 30, 2022, Orel. Orel: Orel State University named after I. S. Turgenev; 2022. p. 100–106. (In Russ.).
  9. Makarenko A. V. Deep neural networks: Origins, development, current status. *Control Sciences*. 2020;(2):3–19. (In Russ.).
  10. Sozykin A. V. An overview of methods for deep learning in neural networks. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2017;6(3):28–59. (In Russ.).
  11. Top 35 social media analytics tools: Free and paid. URL: <https://popsters.ru/blog/post/35-instrumentov-dlya-analitiki-socsetey> (accessed: 17.04.2024). (In Russ.).
  12. Zhiltsova O. N., Sinyayeva I. M., Zhiltsov D. A. Reklamaia deiatelnost. Moscow: Iurait; 2023. 233 p. (In Russ.).
  13. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. Glubokoe obuchenie. St. Petersburg: Piter; 2018. 480 p. (In Russ.).
  14. Golovko V. A., Krasnoproshin V. V. Neirosetevye tekhnologii obrabotki dannykh. Minsk: BSU; 2017. 263 p. (In Russ.).
  15. Boltacheva E. R., Nikitina S. A. On certain approaches to solving the problem of sentiment classification of a text: An analysis of English reviews. *Proceedings in Cybernetics*. 2022;(2):14–19. DOI 10.34822/1999-7604-2022-2-14-19. (In Russ.).

### Информация об авторах

**С. А. Никитина** – кандидат физико-математических наук, доцент.

**Е. Р. Болтачева** – магистрант.

### Information about the authors

**S. A. Nikitina** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

**E. R. Boltacheva** – Master’s Degree Student.

Научная статья

УДК 004.415.53

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-7



## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ СЛЕПЫХ ЗОН ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

*Андрей Олегович Никулин**Пензенский государственный университет, Пенза, Россия**nikulin.science@gmail.com*

**Аннотация.** В статье предложена методика, которая позволит выявить слепые зоны при тестировании программного обеспечения. Описаны общеизвестные проблемы в тестировании ПО и методики их решения. Описан способ, при помощи которого удастся выявить ту или иную проблему. Также продемонстрирован пример реализации этого способа.

**Ключевые слова:** тестирование, тестирование программного обеспечения, регрессионное тестирование, проблемы тестирования

**Для цитирования:** Никулин А. О. Разработка методики выявления слепых зон при тестировании программного обеспечения // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 57–61. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-7.

Original article

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR IDENTIFYING BLIND SPOTS IN SOFTWARE TESTING

*Andrei O. Nikulin**Penza State University, Penza, Russia**nikulin.science@gmail.com*

**Abstract.** The article proposes a method that will help identify blind spots in software testing. Common problems in software testing and methods for their solution are described. A method to detect a problem is presented. The study also demonstrates an example of implementing this method.

**Keywords:** testing, software testing, regression testing, testing problems

**For citation:** Nikulin A. O. Development of a method for identifying blind spots in software testing. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):57–61. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-7.

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс тестирования программного обеспечения основан на одном из фундаментальных принципов – тестирование демонстрирует наличие дефектов, а не их отсутствие [1]. Существование этого принципа формирует одну из важных проблем тестирования программного обеспечения, которая заключается в том, что неясно, каким универсальным способом можно сократить появление ошибок или дефектов.

Сейчас существует большое количество источников, где выделяются проблемы в тестировании программного обеспечения и методики их решения [2, 3]. Главным недостатком является то, что заявленные методики могут решить только конкретную проблему, которая уже известна. Поэтому возникает потребность в методике, которая поможет определить неизвестную проблему.

Чтобы решить эту проблему, была разработана методика, которая позволит выявить

слепые зоны при тестировании программного обеспечения для дальнейшего анализа и устранения, если это будет необходимо и возможно.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тестирование программного обеспечения – это испытание, при котором производится проверка соответствия продукта заявленным требованиям [4]. Часто после проведения тестирования обнаруживаются ошибки или дефекты, которые могут возникнуть из-за различных неучтенных случаев.

В рамках данной работы предлагается рассмотреть некоторые проблемы, которые могут способствовать появлению ошибок или дефектов в программном обеспечении.

### Нехватка ресурсов

Данная проблема связана с нехваткой программных или человеческих ресурсов. Чтобы избежать возникновения первого случая, следует обращать внимание на срок действия лицензий у систем управления тестированием и оценивать, какие затраты могут появиться в будущем. Если не производить учет, то через какое-то время может возникнуть нехватка бюджета, и процесс тестирования столкнется с программными ограничениями или полным отсутствием доступа к системам управления тестированием. Также может возникнуть нехватка человеческих ресурсов, что способствует замедлению или полной остановке всего процесса разработки программного обеспечения [2].

## Изменения

С каждой новой итерацией программное обеспечение меняется, поэтому инженеры по тестированию производят постоянное обновление тестовой документации [2], чтобы избежать случаев, когда, например, тестовые сценарии могут оказаться неактуальными. Учитывать эту проблему важно, так как на каждую итерацию отводится определенное количество времени и ресурсов.

### Регрессионное тестирование

Регрессионное тестирование иногда может приводить к такой проблеме, как «регрессионная спираль смерти». Рост функционала с каждой итерацией приводит к увеличению объема регрессионного тестирования, и в этом случае у команды тестирования остается все меньше и меньше времени на другие виды тестирования (представлено на рис. 1), поэтому регрессионное тестирование часто автоматизируют [5, 6].

Также важно отметить, что итеративность обуславливается популярным подходом к разработке программного обеспечения – Agile [7].

В результате были перечислены только некоторые проблемы, которые существуют в процессе тестирования программного обеспечения, а также методики их решения. Понимание самой проблемы дает возможность подобрать методику для ее решения, но проблема не всегда может быть известна, и по-

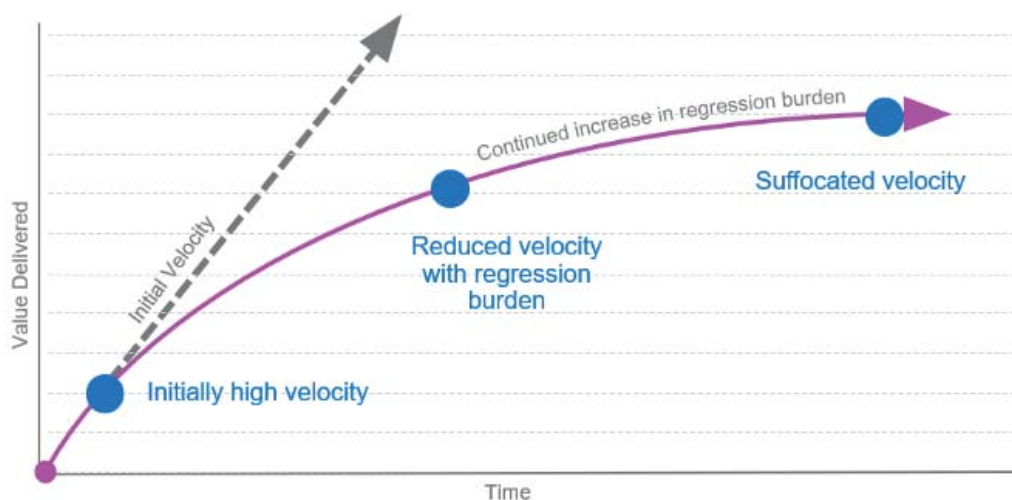


Рис. 1. Регрессионная нагрузка  
Примечание: составлено по [5].

является сложность в ее обнаружении. Для этого была разработана методика, которая позволит выявить слепые зоны при тестировании программного обеспечения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе будет представлена разработанная методика, которая позволит уменьшить появление различных ошибок или дефектов в программном обеспечении.

Перед демонстрацией следует выделить требование, без которого методика будет недостаточно эффективной. Суть заключается в том, что процессы на проекте должны быть хорошо выстроены, иначе происхождение большинства найденных ошибок или дефектов можно будет узнать сразу.

Применение методики следует начать с выбора уже исправленных ошибок или дефектов, таким образом, сразу можно избавиться от случаев, когда такого типа тикеты не воспроизводятся, дублируются, специально пропущены или неактуальны. В качестве визуализации будем использовать приложение YouTrack, которое позволяет совершать совместную работу над проектами, управлять задачами, ошибками, дефек-

тами и другими сущностями (представлено на рис. 2) [8].

Также представим небольшую платформу, которая хранит в себе различные документы. Она включает страницу, на которой можно загрузить документы, страницу с общей информацией о платформе и страницу контактов. Тестировщики обнаружили 2 дефекта и 2 ошибки в ней, затем через некоторое время проблемы были устранены, протестированы, и тикеты попали в колонку «Исправлена» (представлено на рис. 2). Таким образом, мы можем перейти к следующему шагу нашей методики.

Начинаем определять критерий, по которому произойдет выбор интересующих ошибок или дефектов. После отбора различных тикетов каждый из них помещается в таблицу для дальнейшего сравнения. Также таблица будет включать разные общеизвестные проблемы, и если потребуется, то можно добавлять собственные. Для примера будут использованы три проблемы, которые были описаны ранее:

1. Нехватка ресурсов.
2. Изменения.
3. Регрессия.

После того как в таблицу внесены ошибки, дефекты и проблемы, то теперь при помощи

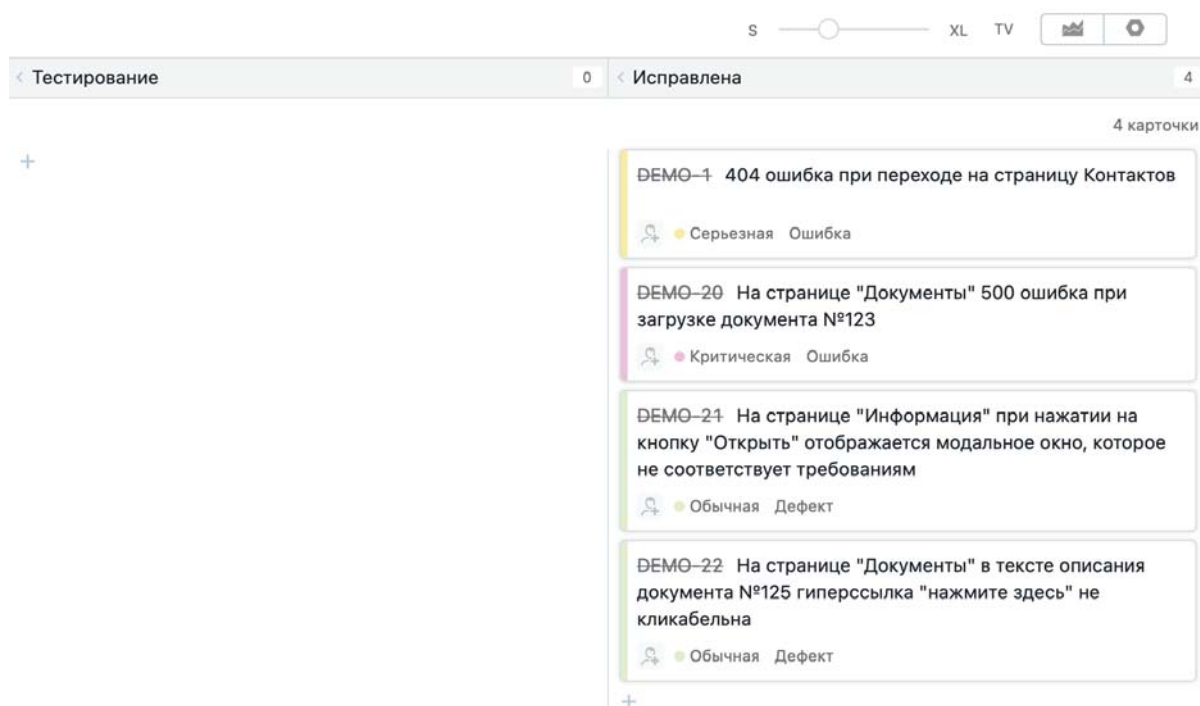


Рис. 2. Доска в YouTrack с ошибками и дефектами  
Примечание: составлено автором.

анализа исправленного тикета следует установить причину его возникновения и на пересечении отметить знаком “+”, если ошибка или дефект не относится к другим проблемам, то на их пересечении будет знак “–”. Также важно упомянуть, что ошибка или дефект может относиться сразу к нескольким проблемам.

Рассмотрим подробнее тикет, где была исправлена ошибка 404 (представлено на рис. 2). В одну из итераций разработки выпускался функционал, связанный со страницей Контактов, на проекте было 2 тестировщика, и планировалось, что тестированием будет заниматься каждый из них. Настал день, когда нужно начинать проверять функционал, и выяснилось, что второй тестировщик не сможет проводить тестирование, и задача полностью ляжет на первого тестировщика. За день до релиза тестировщик поделился результатами, в которых указал, что чек-лист был пройден на 80 %, и по итогу было решено игнорировать оставшиеся 20 % проверок и выпускать функционал для пользователя, так как казалось, что все основные кейсы уже пройдены. Спустя некоторое время после релиза пользователями была обнаружена ошибка 404 при переходе на страницу Контактов. Но если бы тестировщик прошел на 100 % чек-лист, то он бы зафиксировал эту ошибку намного раньше пользователя, так как проверка на это поведение находилась в оставшихся 20 % чек-листа.

Таким образом, мы делаем вывод о том, что проблема возникновения данной ошибки заключается в том, что у команды образовалась нехватка человеческих ресурсов и в таблице на пересечении следует отметить знаком “+”, а другие проблемы – знаком “–”, так как с ними это не связано.

Ошибка 500, возникающая на странице «Документы» при загрузке документа № 123, была связана с тем, что чек-лист на проверку регрессии по функциональности на загрузку документов не обновлялся, и в результате этого при тестировании не был учтен случай, где нужно было загрузить документ № 123,

что привело к ошибке 500. В данном случае в таблице следует отметить знаком “+” проблемы, связанные с изменениями и регрессией, а нехватку ресурсов – знаком “–”.

Дефект, где на странице «Информация» при нажатии на кнопку «Открыть» отображалось модальное окно, не соответствующее требованиям. Это обнаружилось при проведении регрессионного тестирования. В таблице следует отметить проблему, связанную с регрессией знаком “+”, а остальные – знаком “–”.

Дефект, где на странице «Документы» в тексте описания документа № 125 гиперссылка «нажмите здесь» не была кликабельна. На новую функциональность был написан чек-лист, но через некоторое время аналитик частично изменил требования, и тестировщик не обновил чек-лист. Но даже если бы тестировщик внес изменения в чек-лист, то он бы все равно не успел протестировать ту часть чек-листа из-за того, что не хватило времени и было решено выпускать функционал, не продолжая тестирование. В таблице следует отметить проблему, связанную с нехваткой ресурсов и изменениями, знаком “+”, а оставшуюся проблему – знаком “–”.

В результате была сформирована таблица, которая позволит определить, удастся ли в будущем избежать возникновения подобных тикетов или эта зона области не может быть изменена по каким-то причинам. Например, если будет решено исправить проблемы, связанные с регрессионным тестированием, то на нескольких последующих итерациях разработки нужно будет применять методику выявления слепых зон тестирования и проверять, что ошибки или дефекты с такой проблемой больше не появляются. В случае если такие тикеты будут обнаруживаться, то следует менять подход к построению процесса регрессионного тестирования.

Таким образом, для каждой ошибки или дефекта мы можем найти причину возникновения. Если применять данную методику на протяжении нескольких итераций, то удастся уменьшить появление различных ошибок или дефектов.

Таблица

## Результаты применения методики выявления слепых зон при тестировании программного обеспечения

| Ошибки и дефекты                                                                                                           | Проблемы          |           |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|
|                                                                                                                            | Нехватка ресурсов | Изменения | Регрессия |
| На странице «Информация» при нажатии на кнопку «Открыть» отображается модальное окно, которое не соответствует требованиям | –                 | –         | +         |
| На странице «Документы» в тексте описания документа № 125 гиперссылка «нажмите здесь» некликабельна                        | +                 | +         | –         |
| 404 ошибка при переходе на страницу Контактов                                                                              | +                 | –         | –         |
| На странице «Документы» 500 ошибка при загрузке документа № 123                                                            | –                 | +         | +         |

Примечание: составлено автором.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной статьи была разработана методика выявления слепых зон при тестировании программного обеспечения. Ее суть заключается в анализе уже исправленных ошибок или дефектов для того, чтобы обнаружить проблему, из-за которой они могли возникнуть, и решить ее. Устранение каких-либо проблем позволит в даль-

нейшем снизить появление ошибок или дефектов.

Методика не сможет гарантировать отсутствие ошибок или дефектов, так как это противоречит принципу тестирования, который описывался ранее. Она способна лишь уменьшить их появление, в том числе за счет этого процессы на проекте будут улучшаться с каждой итерацией применения методики.

## Список источников

1. Принципы тестирования: нас 7. URL: <https://habr.com/ru/post/699990/> (дата обращения: 08.02.2024).
2. 16 software testing challenges: How to handle them. URL: <https://www.softwaretestingmaterial.com/software-testing-challenges/> (дата обращения: 05.02.2024).
3. Do you have blind spots in your software testing? URL: <https://www.testrail.com/blog/blind-spots-software-testing/> (дата обращения: 08.02.2024).
4. Software testing. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Software\\_testing](https://en.wikipedia.org/wiki/Software_testing) (дата обращения: 03.03.2024).
5. Регрессионная спираль смерти. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/512702/> (дата обращения: 03.03.2024).
6. Никулин А. О. Рекомендации к решению проблем регрессионного тестирования // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума, 29 мая–2 июня 2023 г., г. Пенза. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. Т. 1. С. 465–466.
7. Что такое методология Agile? URL: <https://www.atlassian.com/ru/agile> (дата обращения: 05.03.2024).
8. YouTrack. Powerful project management for all your teams. URL: <https://www.jetbrains.com/youtrack/> (дата обращения: 15.02.2024).

## References

1. Printsipy testirovaniia: nas 7. URL: <https://habr.com/ru/post/699990/> (accessed: 08.02.2024). (In Russ.).
2. 16 software testing challenges: How to handle them. URL: <https://www.softwaretestingmaterial.com/software-testing-challenges/> (accessed: 05.02.2024).
3. Do you have blind spots in your software testing? URL: <https://www.testrail.com/blog/blind-spots-software-testing/> (accessed: 08.02.2024).
4. Software testing. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Software\\_testing](https://en.wikipedia.org/wiki/Software_testing) (accessed: 03.03.2024).
5. The regression death spiral. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/512702/> (accessed: 03.03.2024). (In Russ.).
6. Nikulin A. O. Recommendations for solving regression testing problems. In: *Proceedings of the International Symposium "Nadezhnost i kachestvo"*, May 29–June 2, 2023, Penza. Penza: Publishing House of the Penza State University; 2023. Vol. 1. p. 465–466. (In Russian).
7. Chto takoe metodologiya Agile? URL: <https://www.atlassian.com/ru/agile> (accessed: 05.03.2024). (In Russ.).
8. YouTrack. Powerful project management for all your teams. URL: <https://www.jetbrains.com/youtrack/> (accessed: 15.02.2024).

## Информация об авторе

А. О. Никулин – аспирант.

## Information about the author

A. O. Nikulin – Postgraduate.

Научная статья

УДК 004.9+519.68

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-8



## МОДУЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НАИВНОГО БАЙЕСОВСКОГО КЛАССИФИКАТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОТЫ АПТЕКИ

**Кирилл Валерьевич Святков<sup>1</sup>, Вадим Сергеевич Мошкин<sup>2</sup>, Игорь Александрович Щукарев<sup>3</sup>**✉

<sup>1, 2, 3</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

<sup>1</sup>k.svyatov@ulstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8978-8567>

<sup>2</sup>v.moshkin@ulstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9258-4909>

<sup>3</sup>blacxpress@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8860-8103>

**Аннотация.** Эффективным способом увеличения прибыли и укрепления рентабельности аптеки становится внедрение принципов автоматизации и управления деятельностью фармацевта с помощью информационных систем. Компании используют алгоритмы машинного обучения для корректировки своей стратегии, изучения отношения клиентов к своей организации посредством анализа отзывов и для повышения имиджа фирмы. Однако ручная обработка поступающих отзывов требует значительного времени и усилий фармацевта. Автоматизировать данный вид деятельности в статье предлагается за счет алгоритма наивного байесовского классификатора, реализованного средствами Python. Для обучения классификатора был создан собственный корпус размеченных текстов отзывов с двумя категориями, суммарное количество отзывов около 500. Для поиска отзывов использовался парсер, написанный на Python. В рамках предварительной обработки текста отзывов были выполнены: лемматизация, удаление знаков пунктуации, процедура приведения текста к нижнему регистру, токенизация и удаление стоп-слов, а в качестве способа векторизации текста был выбран метод «Bag of Words», или мешок слов. Согласно проведенным численным экспериментам, наивысшая точность классификатора достигалась при соотношении обучающей и тестовой выборки 80/20, без стоп-слов. При использовании классификатора на анализ 100 отзывов потребуется в восемь раз меньше времени по сравнению с их чтением человеком. Сам классификатор может быть представлен как отдельное приложение или как модуль информационной системы. Таким образом, растущее количество положительных отзывов у фирмы является показателем ее успешной работы и числа довольных клиентов, а рост имиджа позволит увеличить доверие покупателей к фирме и приведет к росту продаж.

**Ключевые слова:** классификация текстов, машинное обучение, корпус, токен, стоп-слово, лемматизация, обработка естественных языков, наивный байесовский классификатор, информационная система, Python

**Для цитирования:** Святков К. В., Мошкин В. С., Щукарев И. А. Модуль информационной системы на основе наивного байесовского классификатора для автоматизации работы аптеки // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 62–70. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-8.

## INFORMATION SYSTEM MODULE BASED ON NAIVE BAYES CLASSIFIER FOR PHARMACY OPERATION AUTOMATION

**Kirill V. Svyatov<sup>1</sup>, Vadim S. Moshkin<sup>2</sup>, Igor A. Shchukarev<sup>3</sup>**✉

<sup>1, 2, 3</sup>Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

<sup>1</sup>k.svyatov@ulstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8978-8567>

<sup>2</sup>v.moshkin@ulstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9258-4909>

<sup>3</sup>blacxpress@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8860-8103>

**Abstract.** The introduction of the automation and management principles for pharmacists' activities using information systems is an effective way to increase profits and strengthen pharmacy profitability. Companies use machine learning algorithms to adjust their strategy, study customer reviews about their organization through feedback analysis, and improve the company's image. However, a significant amount of pharmacists' time and effort goes into the manual processing of incoming reviews. The article proposes automating the processing using the naive Bayes classifier algorithm, which is implemented in Python. To train the classifier, the authors created their own corpus of labeled review texts with two categories, with the total number of reviews being about 500. A parser written in Python was used to search for reviews. The following steps were taken during the preliminary processing of the reviews' text: lemmatization, elimination of punctuation, the text's letter conversion to lower case, tokenization, stop words removal, and text vectorization using the bag-of-words model. According to the numerical experiments carried out, the classifier's highest accuracy was achieved with an 80/20 ratio of training and test samples that did not include stop words. When using a classifier, analyzing 100 reviews takes 8 times less time than manual reading. The classifier itself can be presented as a separate application or as a module within an information system. Thus, the increasing number of positive reviews is an indicator of the company's efficient performance as well as the number of satisfied customers. The growth of its image will strengthen customers' loyalty to the company, resulting in greater sales.

**Keywords:** text classification, machine learning, corpus, token, stop word, lemmatization, natural language processing, naive Bayes classifier, information system, Python

**For citation:** Svyatov K. V., Moshkin V. S., Shchukarev I. A. Information system module based on naive Bayes classifier for pharmacy operation automation. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):62–70. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-8.

## ВВЕДЕНИЕ

Имидж является одним из важнейших средств достижения компанией своих целей. Зачастую при принятии покупателем решения о покупке товара или услуги репутация организации выходит на первый план. Парой даже негативные отзывы могут заставить клиента изменить свое решение. Потребители ощущают сомнения при совершении покупок при отсутствии какой-либо информации о компании. Поэтому растущее количество отзывов, желательно положительных, у фирмы является показателем ее успешной работы и числа довольных клиентов [1, 2]. Сегодня многие предприятия и организации используют в своей работе разнообразные информационные системы. Они могут быть связаны с различными областями деятельности предприятия, такими как автоматизация деятельности, бухгалтерия, управление персоналом и т.д. Под аптекой понимается специализированная организация системы здравоохранения, которая занимается производством, фасовкой и реализацией населению ассортимента лекарственных средств, биологически активных добавок и товаров медицинского назначения [3].

В ежедневной деятельности аптеки большое количество времени тратится, как правило, на работу с поставщиками, заказ товара, продажу лекарственных средств, консультирование покупателей, работу с ценниками, накладными и т.д., кроме того, необходимо позаботиться и о способах привлечения клиентов в аптеку, что позволит увеличить поток покупателей и приведет к росту прибыли.

Направление sentiment-анализа активно применяется на практике, а применение алгоритмов машинного обучения в коммерческих целях сегодня диктуется необходимостью классификации собранных статистических данных [4, 5]. Авторами работы [6] приводятся результаты численного эксперимента, в которых исследовались методы машинного обучения для классификации отзывов клиентов. В условиях современной экономики большинство предприятий делают ставку на долгосрочные отношения с клиентами и их позитивные эмоции в процессе потребления услуги. Для высокой конкурентоспособности предприятию необходимо эффективно управлять процессом оказания услуг, например с помощью анализа собираемой информации

от клиентов. Авторами проведено исследование отзывов клиентов с портала tophotels.ru. Показано, что машинное обучение позволяет классифицировать отзывы с точностью 85–88 %, а лемматизация повышает точность классификации отзывов на русском языке. В статье [7] анализируются отзывы клиентов относительно двух программных продуктов с целью сформулировать рекомендации по их улучшению для лиц, принимающих решение. Для решения поставленной задачи авторы использовали информацию, доступную на интернет-ресурсах. В качестве метода анализа был выбран наивный байесовский классификатор. Также авторами была разработана программа «OtClik». Методика анализа тональности текстовой информации включала этапы лемматизации и разбиение текста на униграммы. Программная реализация выполнена на языке Python в виде десктопного приложения на компьютер. Авторами работы [8] рассматривается проблема анализа отзывов об отелях в сфере туризма. Туристы рассказывают о своих впечатлениях от пребывания в отеле, оставляя отзывы. При наличии большого количества отзывов туристы не могут понять, содержат ли они положительные или отрицательные мнения. Чтобы быстро определить, являются ли отзывы положительными или отрицательными, необходимо провести соответствующий анализ. Авторами предлагается решение путем классификации положительных и отрицательных отзывов с использованием метода наивного байесовского классификатора.

В настоящей работе в рамках одного из направлений автоматизации аптеки предлагается использовать классификатор. В результате обратной связи собираются отзывы о работе аптечной организации, а с помощью обученного классификатора на основе размеченных данных фармацевт выбирает только позитивные отзывы и выставляет их на сайте компании с целью повышения привлекательности аптеки для покупателей, поэтому использование методов машинного обучения для обработки большого числа поступающих отзывов вместо их ручной

классификации более чем оправданно [9]. Однако перед анализом текста необходимо провести его предварительную обработку, например с помощью Python, который является высокоуровневым языком программирования с открытым исходным кодом. Для работы с Python необходима и интегрированная среда разработки или IDE. PyCharm – это кросс-платформенная IDE, которая предоставляет пользователю комплекс средств для написания кода с возможностью выявления в нем ошибок [10]. Чтобы оценить, насколько эффективно работает классификатор, можно использовать одну из стандартных метрик, например Accurasy. В качестве метода классификации данных был выбран наивный байесовский классификатор (Naive Bayes Classifier), среди преимуществ которого можно выделить высокую скорость работы и простоту программной реализации [11]. Байесовский классификатор можно использовать для систематизации документов с прямыми отношениями между признаками и соответствующими категориями, например для обнаружения рекламного контента, группировки отзывов об товарах, услугах или организациях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленной задачи предлагается использовать алгоритм наивного байесовского классификатора, программная реализация которого была выполнена как отдельная функция информационной системы организации. Для решения задачи классификации предварительно был создан корпус текстов с двумя категориями – положительные и отрицательные отзывы, а чтобы компьютер мог обрабатывать информацию, она была представлена в машиночитаемой форме [12].

Предположим, что имеется отзыв о работе аптечного пункта  $o_i \in O$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , где  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$  – множество отзывов в корпусе, а  $N$  – размерность корпуса. Под  $K$  будем понимать набор соответствующих категорий (положительные и отрицательные отзывы)  $K = \{k_1, k_2\}$ . Используя обучающую и тестовую

вую выборки с помощью метода машинного обучения, была получена классифицирующая функция, которая задает отображение множества отзывов во множество категорий  $f: O \rightarrow K$ . В таком случае формула Байеса со строгими (наивными) предположениями о том, что значение любого заданного признака не зависит от значений других признаков, примет вид:

$$P(k|o) = \frac{P(o|k) \cdot P(k)}{P(o)},$$

где  $P(k|o)$  – вероятность того, что отзыв  $o$  принадлежит категории  $k$ ;

$P(o|k)$  – вероятность встретить отзыв  $o$  среди всех отзывов категории  $k$ ;

$P(k)$  – вероятность встретить отзыв  $o$  категории  $k \in K$  среди всех отзывов  $O$ ;

$P(o)$  – вероятность встретить отзыв  $o$ .

Шанс того, что отзыв  $o$  принадлежит категории  $k$  с учетом оценки апостериорного максимума (Maximum a posteriori estimation):

$$k_{\text{max}} = \arg \max_{k \in K} \frac{P(o|k) \cdot P(k)}{P(o)}.$$

Шанс встретить отзыв  $o$  всегда один и тот же для любого отзыва  $o \in O$ , т.е.  $P(o)$  является константой и не может повлиять на ранжирование категорий:

$$k_{\text{max}} = \arg \max_{k \in K} (P(o|k) \cdot P(k)).$$

В естественном языке зачастую вероятность появления какого-либо слова зависит от контекста. Алгоритм байесовского классификатора представляет отзыв о работе аптечного пункта или аптеки как набор слов, вероятности которых условно не зависят друг от друга. Таким образом, условная вероятность отзыва аппроксимируется произведением условных вероятностей всех слов, входящих в отзыв:

$$P(o|k) \approx P(o_1|k) \cdot P(o_2|k) \cdots$$

$$\cdots P(o_n|k) = \prod_{i=1}^n P(o_i|k),$$

$$k_{\text{max}} = \arg \max_{k \in K} \left( P(k) \cdot \prod_{i=1}^n P(o_i|k) \right).$$

Чтобы оценить, насколько эффективно работает классификатор, можно использовать, например, метрику Ассигасу:

$$A = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

где  $TP$  – количество отзывов, которые принадлежат данной категории и которые были правильно определены классификатором;

$TN$  – количество отзывов, которые не принадлежат данной категории и которые были правильно определены классификатором;

$FP$  – количество отзывов, которые принадлежат данной категории и которые были неправильно определены классификатором;

$FN$  – количество экземпляров, которые не принадлежат данной категории и которые были неправильно определены классификатором.

Наивный байесовский классификатор был реализован средствами Python с помощью библиотеки nltk, предназначенной для обработки естественного языка (рис. 1) [13]. Для обучения классификатора был создан собственный корпус размеченных текстов отзывов с двумя категориями. Для создания корпуса использовался парсер, написанный на Python (рис. 2) [14]. В рамках предварительной обработки текста отзывов были выполнены: лемматизация, удаление знаков пунктуации, процедура приведения текста к нижнему регистру, токенизация и удаление стоп-слов, а в качестве способа векторизации текста был выбран метод «Bag of Words», или мешок слов.

Пример положительного отзыва из корпуса: «Хорошая аптека с круглосуточным графиком работы. Профессиональные работники. Можно заказать лекарства, витамины и косметику через их сайт с быстрой доставкой в аптеку. Очень часто проходят акции на некоторые лекарства и средства, можно здорово сэкономить». Пример отрицательного отзыва из корпуса: «Цены на препараты не соответствуют. На сайте одна цена, а в аптеке другая, дороже в 2 раза. И дороже, чем по всей России. Ужасная аптека, разориться можно».

```
def slov(corpus):
    m = Mystem()
    lemma = m.lemmatize(corpus)
    lemmas = "".join(lemma).strip()
    corp_punct = re.sub( pattern: r'[\w\s]', repl: '', lemmas)
    corp_reg = corp_punct.lower()
    tokens = word_tokenize(corp_reg)
    corp_stop = [word for word in tokens if not word in stopwords.words('Russian')]
    corp_bigr = nltk.bigrams(corp_stop)
    return dict([(word, True) for word in corp_stop])
# print(slov(otz_1))

usage
def label(corpus):
    lab = collections.defaultdict(list)
    for i in corpus.categories():
        for j in corpus.fileids(categories=[i]):
            lab[i].append(slov(corpus.raw(fileids=[j])))
    return lab
# print(label(my_corpus))
# print(label(my_corpus).items())

n = 0.8
usage
def split(corpus):
    train = []
    test = []
    for i, j in corpus.items():
        k = int(len(j)*n)
        train.extend([(m, i) for m in j[:k]])
        test.extend([(m, i) for m in j[k:]])
    return train, test
train, test = split(label(my_corpus))
```

Рис. 1. Фрагмент кода классификатора на Python

Примечание: написано авторами для исследования.

```
2 import requests
3 html = requests.get('https://spb.blizko.ru/naiti/byd_zdorov/gde_kypit_lekarstva/apteki/company_reviews').text
4 soup = BeautifulSoup(html) # создаём экземпляр класса BeautifulSoup
5 links = soup.find_all('div', class_='text-') # получаем список ссылок и наименований
6 # print(html)
7 # print(links)
8
9 for i, link in enumerate(links):
10     name = link.text() # извлекаем наименование из блока со ссылкой
11     print(i)
12     print(f"{name}")
13     file = open(f"{i+1}.txt", "w", encoding="utf-8")
14     file.write(f"{name}")
15     file.close()
```

Рис. 2. Фрагмент кода парсера на Python

Примечание: написано авторами для исследования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для тестирования и оценки точности наивного байесовского классификатора были проведены серии экспериментов, результаты которых приведены в таблице. Точность числялась с помощью библиотеки nltk Python.

Как видно из таблицы, наивысшая точность классификатора достигается при соотношении обучающей и тестовой выборки 80/20 без стоп-слов. Для проверки корректности работы классификатора дополнительно были найдены два отзыва, не входящих

в исходный корпус, которые классификатор верно отнес к соответствующим категориям (рис. 3).

Согласно исследованиям, оптимальная скорость чтения составляет от 120 до 150 слов в минуту. Именно при такой скорости достигается наилучшее понимание смысла текста. При скорости чтения, большей чем 150 слов в минуту, например 180 (темп скороговороки), или меньшей 120 слов в минуту, человек с трудом воспринимает смысл прочитанного, что приводит к необходимости читать текст несколько раз [15]. Поэтому при больших объемах данных предпочтительнее использовать методы автоматической обработки информации, основанные на алгоритмах машинного обучения. Для целесообразности использования байесовского классификатора в рамках одного из направлений автоматизации аптеки

был проведен следующий эксперимент. Были собраны 100 отзывов и посчитано время, необходимое на чтение этих отзывов с целью их сортировки по категориям, и время, затраченное обученным байесовским классификатором. Результаты эксперимента приведены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, на анализ 100 отзывов требуется в восемь раз меньше времени при использовании классификатора, реализованного средствами Python, по сравнению с чтением человеком. Это время может варьироваться в зависимости от конфигурации компьютера, на котором выполняется программа. Сам классификатор может быть представлен как отдельное приложение со своим графическим интерфейсом [16] (рис. 5a) или как модуль некоторой разработанной информационной системы (рис. 5b).

Таблица

**Точность наивного байесовского классификатора в зависимости от соотношения обучающей и тестовой выборки**

| Обучение/тест, % | 70/30 | 80/20 | 90/10 |
|------------------|-------|-------|-------|
| Со стоп-словами  | 0,86  | 0,85  | 0,86  |
| Без стоп-слов    | 0,87  | 0,88  | 0,84  |

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

```
D:\Programs\Python311\python.exe D:\Programs\OneDrive\Sample\PythonProject\b_cl\b_cl.py
Всего категорий: 2
Количество негативных отзывов: 250; Количество позитивных отзывов: 250
Train: 80.0 %; Обучаем на: 400; Тестируем на: 100; Точность: 0.88
Most Informative Features
    удобно = True          pos : neg = 15.7 : 1.0
    удобный = True         pos : neg = 13.0 : 1.0
    хороший = True         pos : neg = 12.5 : 1.0
    спасибо = True         pos : neg = 11.0 : 1.0
    отличный = True        pos : neg = 10.6 : 1.0
    вежливый = True        pos : neg = 10.4 : 1.0
    быстро = True          pos : neg = 8.6 : 1.0
    говорить = True        neg : pos = 7.7 : 1.0
    находить = True        pos : neg = 7.4 : 1.0
    вместо = True          neg : pos = 7.0 : 1.0
Тестирование на позитивном отзыве: pos
Тестирование на негативном отзыве: neg
```

**Рис. 3. Результат обучения классификатора**

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

```
D:\Programs\Python311\python.exe D:\Programs\OneDrive\Sample\PythonProject\b_cl_test\t.py
Всего: 100 отзывов
['neg', 'pos', 'neg', 'neg', 'neg', 'pos', 'neg', 'pos', 'neg', 'pos', 'neg', 'pos', 'neg',
Потребуется для чтения 16.00 Минут
Время работы классификатора 2.00 минут

Process finished with exit code 0
```

Рис. 4. Время, необходимое на классификацию 100 отзывов

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



Рис. 5. Классификатор (а) и пример интерфейса информационной системы с функцией классификатора отзывов (б)

Примечание: составлено авторами для исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в данной статье показано, что использование методов машинного обучения, а именно наивного байесовского классификатора, в рамках одного из направлений по автоматизации работы аптеки или аптечного пункта позволит существенно сэкономить время фармацевта. Предложенный байесовский классификатор, точность которого составляет порядка 88 %, позволит в восемь раз уменьшить время на обработку откликов в расчете на каждые 100 отзывов. Позитивные отзывы можно

публиковать в социальных сетях или на сайте компании. Таким образом, рост имиджа аптеки, формируемый, в частности, и на основе положительных отзывов, позволит увеличить доверие покупателей к фирме и приведет к росту продаж. В рамках дальнейшей деятельности прикладного характера планируется усовершенствование функции классификации отзывов в информационной системе, например путем автоматического удаления отрицательных отзывов после классификации, и сохранение оставшихся в указанный каталог.

## Список источников

1. Белоконев С. Ю., Крохина В. О., Дронов А. И. Технологии имиджевого позиционирования компаний табачного и фармацевтического рынков в условиях рыночной конкуренции // Известия Тульского государственного университета. Гуманитарные науки. 2020. № 2. С. 93–101.
2. Гуськова О. В. Репутационный маркетинг как инструмент генерирования, мотивации, популяризации компании в интернет-среде // Инновационное развитие экономики. 2022. № 1–2. С. 138–143.

## References

1. Belokonev S. Yu., Crohina V. O., Dronov A. I. Image positioning technologies of the tobacco and pharmaceutical companies in the highly competitive market. *Bulletin of Tula State University. Humanitarian Sciences*. 2020;(2):93–101. (In Russ.).
2. Guskova O. V. Reputation marketing as a tool for generation, motivation, popularization of a company in the internet environment. *Innovative Development of Economy*. 2022;(1–2):138–143. (In Russ.).

3. Скрипко А. А., Фёдорова Н. В., Клименкова А. А. Информационные технологии в фармации. В 4 ч. Ч. 4. Комплексная автоматизация деятельности аптечных организаций. Иркутск : ИГМУ, 2020. 84 с.
4. Сидикова Г. Р. Методы и инструменты сентимент-анализа // Современные проблемы лингвистики и методики преподавания русского языка в ВУЗе и школе. 2022. № 34. С. 974–985.
5. Большаков Н. И., Сидорова Е. В. Сравнительный анализ методов машинного обучения для задач классификации данных // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 8. С. 66–71. DOI 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2023\_8\_66.
6. Богданова Д. Р. Оценка степени удовлетворенности клиентов сферы услуг на основе учета их эмоционально окрашенной информации // Системная инженерия и информационные технологии. 2021. Т. 3, № 3. С. 72–81.
7. Любченко М. А. Об одном опыте анализа данных и извлечения информации о программном продукте // Системная инженерия и информационные технологии. 2021. Т. 3, № 2. С. 75–80.
8. Farisi A. A., Sibaroni Y., Faraby S. A. Sentiment analysis on hotel reviews using Multinomial Naïve Bayes classifier // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1192. P. 012024.
9. Кугач В. В., Рылко Я. Н. Информационное наполнение и оформление интернет-сайтов аптечных организаций // Вестник фармации. 2022. № 1. С. 28–41.
10. Федяева И. А. Разработка метода отслеживания зависимостей для кэша вывода типов статического анализатора кода среды разработки Pycharm // XXIV Всерос. студенч. науч.-практич. конф., 05–06 апреля 2022 г., г. Нижневартовск. Ч. 3. Нижневартовск : Нижневартовский государственный университет, 2022. С. 209–214.
11. Хисамутдинов Д. С., Рыженко И. А., Павлова К. А. Автоматическая классификация документов // Научный альманах Центрального Черноземья. 2022. № 1–7. С. 143–157.
12. Томашевская В. С., Старичкова Ю. В., Яковлев Д. А. Использование машинного обучения для распознавания текстовых шаблонов литературных источников // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 3. С. 15–26. DOI 10.21685/2072-3059-2022-3-2.
13. Дрянкова Д. А. Искусственный интеллект в языке программирования Python // Modern Science. 2023. № 6–2. С. 15–19.
14. Болтовский Г. А. Создание парсера на языке Python с использованием библиотеки BeautifulSoup // Постулат. 2022. № 6. С. 1–6.
15. Максимова В. П., Черемных Е. О. Зависимость скорости чтения текста от формата носителя // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования : материалы II Национал. науч.-практич. конф., 07 февраля 2019 г.,
3. Skripko A. A., Fyodorova N. V., Klimentkova A. A. Informationsionnye tekhnologii v farmatsii. In 4 parts. Part 4. Kompleksnaia avtomatizatsiia deiatelnosti aptechnykh organizatsii. Irkutsk: ISMU; 2020. 84 p. (In Russ.).
4. Sidikova G. R. Metody i instrumenty sentiment-analiza. *Sovremennye problemy lingvistiki i metodiki prepodavaniia russkogo iazyka v VUZe i shkole*. 2022;(34):974–985. (In Russ.).
5. Bolshakov N. I., Sidorova E. V. Comparative analysis of machine learning methods for problems of data classification. *Mathematical Methods in Technics and Technologies*. 2023;(8):66–71. DOI 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2023\_8\_66. (In Russ.).
6. Bogdanova D. R. Assessment of the level of customer satisfaction in the service sphere based on their emotionally colored information. *System Engineering and Information Technologies*. 2021;3(3):72–81. (In Russ.).
7. Lyubchenko M. A. One experience in data analysis and extraction of information about the software product. *Systems Engineering and Information Technologies*. 2021;3(2):75–80. (In Russ.).
8. Farisi A. A., Sibaroni Y., Faraby S. A. Sentiment analysis on hotel reviews using Multinomial Naïve Bayes classifier. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1192:012024.
9. Kugach V. V., Rylko Ya. N. Information content and design of Internet sites of pharmacy organizations. *Vestnik farmatsii*. 2022;(1):28–41. (In Russ.).
10. Fedyaeva I. A. Razrabotka metoda otslezhivaniia zavisimostei dlia kesha vyvoda tipov staticheskogo analizatora koda sredy razrabotki Pycharm. In: *Proceedings of the 24th All-Russian Student Research-to-Practice Conference*, April 5–6, 2022, Nizhnevartovsk. Pt. 3. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk State University; 2022. p. 209–214. (In Russ.).
11. Khisamutdinov D. S., Ryzhenko I. A., Pavlova K. A. Automatic document. *Nauchnyi almanakh Tsentralno-go Chernozemia*. 2022;(1–7):143–157. (In Russ.).
12. Tomashevskaya V. S., Starichkova Yu. V., Yakovlev D. A. Using machine learning for recognition of text patterns of literary sources. *University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences*. 2022;(3):15–26. DOI 10.21685/2072-3059-2022-3-2. (In Russ.).
13. Dryankova D. A. Iskusstvennyi intellekt v iazyke programmirovaniia Python. *Modern Science*. 2023;(6–2):15–19. (In Russ.).
14. Boltovskiy G. A. Creating a Python parser using the BeautifulSoup library. *Postulat*. 2022;(6):1–6. (In Russ.).
15. Maksimova V. P., Cheremnykh E. O. Zavisimost skorosti chteniia teksta ot formata nositelia. In: *Proceedings of the 2nd National Research-to-Practice Conference “Innovatsionnoe razvitie regionov: potentsial nauki i sovremennogo obrazovaniia”*, February 7, 2019, As-

- г. Астрахань. Астрахань : Информационно-издательский центр, 2019. С. 176–178.
16. Щукарев И. А., Маркова Е. В. Разработка генератора паролей с использованием GUI MATLAB // Программные продукты и системы. 2022. № 3. С. 413–419.

#### Информация об авторах

**К. В. Святлов** – кандидат технических наук, доцент.

**В. С. Мошкин** – кандидат технических наук, доцент.

**И. А. Щукарев** – кандидат физико-математических наук.

trakhan. Astrakhan: Information Publishing Center; 2019. p. 176–178. (In Russ.).

16. Shchukarev I. A., Markova E. V. Developing a password generator using GUI MATLAB. *Software and Systems*. 2022;(3):413–419. (In Russ.).

#### Information about the authors

**K. V. Svyatov** – Candidate of Sciences (Engineering), Do-cent.

**V. S. Moshkin** – Candidate of Sciences (Engineering), Do-cent.

**I. A. Shchukarev** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics).

Научная статья

УДК 004.4

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-9



## ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ NO-CODE И LOW-CODE ПЛАТФОРМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ БИЗНЕСА

*Анастасия Андреевна Слотвицкая*<sup>1✉</sup>, *Борис Викторович Мартынов*<sup>2</sup>,  
*Евгения Сергеевна Прокопенко*<sup>3</sup>

<sup>1, 2</sup>Южный университет (ИУБиП), Ростов-на-Дону, Россия

<sup>3</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup>*anastasiaslot@mail.ru*<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0009-0002-7353-8795>

<sup>2</sup>*martynov@iubip.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-3278-1003>

<sup>3</sup>*pes\_eup@rgups.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-6969-8238>

**Аннотация.** В последние годы в сфере IT наблюдается увеличение интереса к инструментам автоматизации бизнес-процессов без кода. Инвестиции в no-code платформы за последние пять лет превысили миллиард долларов. Особое внимание уделено анализу вышеуказанных технологий в разрезе малого и крупного бизнеса. Однако вопрос о замене классической разработки остается. Исследование ставит цель выяснить, кому полезно использовать no-code, а кому классическую разработку. Актуальность темы обусловлена ограниченностью ресурсов компаний. Методы включают анализ эффективности и сравнение результатов внедрения. Преимущества no-code включают скорость, стоимость и низкие риски, но есть зависимость от программного решения и необходимость в навыках программирования. Исследование призывает к балансу между использованием no-code и классической разработкой для максимизации выгоды. На основе исследования установлено, что no-code и low-code разработка малоэффективна без классического программирования и будет более результативна для внедрения в компании, которые уже содержат штат IT-специалистов.

**Ключевые слова:** автоматизация, low-code, no-code, платформа, инвестиции, бизнес-процессы, классическая разработка

**Для цитирования:** Слотвицкая А. А., Мартынов Б. В., Прокопенко Е. С. Перспективность и эффективность no-code и low-code платформ для автоматизации бизнеса // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 71–75. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-9.

Original article

## THE PROSPECTS AND EFFICIENCY OF NO-CODE AND LOW-CODE PLATFORMS FOR BUSINESS AUTOMATION

*Anastasiya A. Slotvitskaya*<sup>1✉</sup>, *Boris V. Martynov*<sup>2</sup>, *Evgeniya S. Prokopenko*<sup>3</sup>

<sup>1, 2</sup>Southern University (IMBL), Rostov-on-Don, Russia

<sup>3</sup>Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup>*anastasiaslot@mail.ru*<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0009-0002-7353-8795>

<sup>2</sup>*martynov@iubip.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-3278-1003>

<sup>3</sup>*pes\_eup@rgups.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-6969-8238>

**Abstract.** In recent years, there has been a growing interest in no-code automation tools for business processes in the IT industry. Over the last five years, investments in no-code platforms have crossed one billion dollars. The study focuses on the analysis of these technologies in the context of small and large businesses. However, the issue of replacing traditional development remains. The study aims to determine who benefits

from using no-code and who benefits from traditional development. The research is relevant since companies have limited resources. Methods include efficiency analysis and comparison of implementation results. The advantages of no-code include speed, cost, and low risks, but it is dependent on the software solution and requires programming skills. The study calls for a balance between the use of no-code and traditional development to maximize benefits. Based on the research, it is established that no-code and low-code development are less effective without traditional programming and will be more effective for implementation in companies that already have a team of IT specialists.

**Keywords:** automation, low-code, no-code, platform, investments, business processes, traditional development

**For citation:** Slotvitskaya A. A., Martynov B. V., Prokopenko E. S. The prospects and efficiency of no-code and low-code platforms for business automation. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):71–75. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-9.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования, изложенного в тексте, обусловлена повышенным интересом в сфере информационных технологий к инструментам автоматизации бизнес-процессов без необходимости программирования [1]. Рост количества инвестиций в no-code платформы и успешные примеры их применения, такие как компания Zapier, свидетельствуют о возросшем интересе и значимости данной технологии. Однако, несмотря на широкое внедрение, вопрос о том, могут ли no-code и low-code платформы полностью заменить классическую разработку, остается открытым [2].

Цель исследования заключается в выяснении, каким организациям полезно использовать no-code платформы, а кому предпочтительнее сфокусироваться на классической разработке. Рабочая гипотеза предполагает, что no-code и low-code платформы могут быть эффективным инструментом для автоматизации бизнес-процессов, особенно в условиях ограниченных ресурсов и необходимости быстрого внедрения.

Автор текста проявляет осведомленность в исследуемой теме, упоминая о тенденциях в сфере ИТ, данных о инвестициях в no-code платформы и примере успешного применения такой технологии компанией Zapier [3]. Кроме того, автор анализирует преимущества и недостатки использования no-code и low-code платформ, обращая внимание на их эффективность, стоимость разработки, риски и зависимость от программных решений.

Обзор ранее проведенных исследований включает в себя упоминание о том, что большая часть из них имеет теоретическую составляющую о технологиях no-code и low-code, но лишена практических рекомендаций [4]. В тексте также упоминаются ограничения таких платформ, как зависимость от программных решений и необходимость дополнительной разработки функционала.

Нерешенными аспектами проблемы остаются вопросы о масштабируемости и совместимости no-code и low-code платформ с существующими системами и бизнес-процессами, а также об оценке полного потенциала таких технологий для различных типов организаций [5]. Также требуется уточнение вопросов о безопасности и информационной защите при использовании этих платформ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В представленном тексте авторы решали задачу выяснить, каким организациям полезно использовать no-code платформы, а кому предпочтительнее сфокусироваться на классической разработке. Основным объектом исследования были no-code и low-code платформы, а также их эффективность в различных организациях.

Для выполнения задачи авторы использовали следующие материалы и данные:

– информацию о тенденциях в сфере ИТ, особенно о повышенном интересе к инструментам автоматизации бизнес-процессов без написания кода;

– данные о количестве инвестиций в no-code платформы за последние пять лет, превышающих миллиард долларов;

– анализ деятельности компании Zapier и ее успешных показателей в привлечении пользователей и инвестициях;

– результаты анализа эффективности внедрения no-code платформ в работу малого и крупного бизнеса, а также сравнительный анализ результатов функционирования этих платформ в разных компаниях.

Ограничения и допущения, которые могут влиять на достоверность результатов исследования, могут включать в себя ограниченность доступа к данным о конкретных компаниях, использование оценок и предположений о влиянии no-code и low-code платформ на эффективность бизнеса, а также ограниченность доступа к информации о конкретных практиках внедрения этих платформ.

Для анализа использовались методы сравнения, анализа трендов в сфере ИТ, а также сбор и анализ данных о финансировании и успехах компаний в этой области. Последовательность выполнения исследования включала анализ текущих тенденций, сбор и анализ данных, формулирование выводов и рекомендаций на основе полученных результатов.

Выбор используемых методов обосновывается их способностью к сравнительному анализу и оценке эффективности использования no-code и low-code платформ в различных организациях. Методы сравнения позволяют выявить различия в результативности этих платформ и определить, для каких типов организаций они могут быть наиболее полезны.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование было начато с определения понятий. Данный метод позволил выявить мысль, отражающую общие существенные признаки объекта, отраженного в понятии «no-code платформа». Итак, no-code платформа – это способ создания ИТ-продуктов (сайтов, веб- и мобильных приложений) без написания кода с помощью специальных платформ. Метод работы с такими платформами – drag-and-drop («тащи-и-бросай»),

то есть визуальное моделирование. Они работают по принципу конструктора [1]. Затем был проведен анализ эффективности внедрения no-code платформ в работу малого и крупного бизнеса. Далее с помощью метода сравнения были установлены различия в результатах функционирования no-code платформ в разных компаниях.

Как уже было отмечено, no-code и low-code платформы позволяют выполнить ряд задач, начиная от автоматизации бизнес-процессов и заканчивая созданием нового ИТ-продукта, не прибегая к написанию кода. Чаще всего интерфейс таких платформ выглядит так (см. рисунок) [6]:

Low-code платформы содержат модули с уже готовым кодом, которые пользователь перемещает и распределяет в необходимой последовательности, получая таким образом конечный продукт. Но, как и любая технология, low-code и no-code имеет достоинства и недостатки. К преимуществам вышеописанного подхода можно отнести:

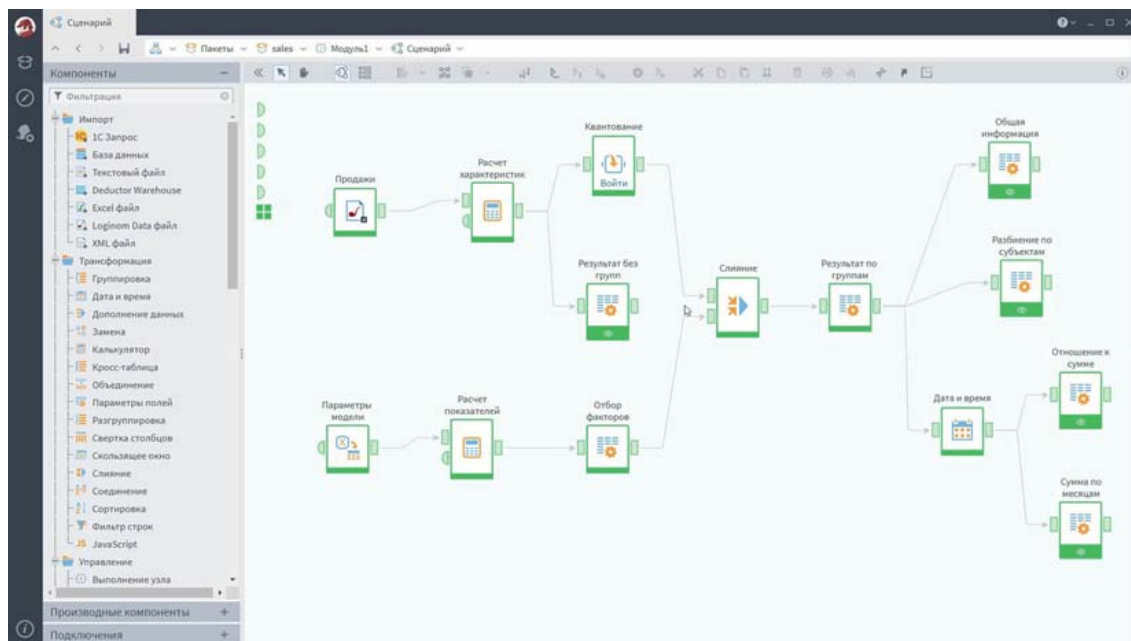
1. Скорость. Несомненно, наличие готовых модулей в разы ускоряет процесс разработки/автоматизации [7].

2. Стоимость разработки. Зарплаты разработчиков на рынке растут, и содержать целый штат может быть невыгодно. Однако на реализацию проекта с помощью low-code платформы потребуется меньше часов, чем на разработку с нуля, а соответственно и расходы бизнеса снизятся.

3. Низкие риски. Преимущество может быть актуально для начинающих предпринимателей, которые только планируют выход на IPO. Собрать MVP на конструкторе гораздо выгоднее и проще, чем сразу прибегать к классической разработке, как в финансовом плане, так и в целях экономии времени [8].

Нельзя не отметить и недостатки low-code платформ:

1. Зависимость от программного решения. Вероятнее всего, функционала сервисов с открытым кодом не хватит для нужд бизнеса, и придется обращаться к вендорам за оплачиваемым ПО. Более того, открытый код несет риск нарушения норм информационной безопасности.



**Рисунок. Интерфейс no-code и low-code платформ**

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

сти, что может стать критической проблемой в компаниях с определенной спецификой бизнеса. Масштабироваться в рамках одной платформы тоже может быть проблематично.

2. С использованием low-code платформ не отпадает на 100% потребность в навыках программирования. Готовых модулей может не хватить для реализации задачи, и в таком случае будет необходимо дорабатывать функционал. Low-code позволяет внедрять разработку на стороне заказчика, что является несомненным плюсом. Однако вытекает потребность со стороны заказчика в квалифицированном разработчике.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод о том, что в настоящие дни действительно наблюдается популяризация no-code и low-code платформ, и это небезосновательно. Данные технологии имеют множество преимуществ, однако в силу определенных технических ограничений принести пользу смогут не всем организациям. Создание продукта или автоматизация бизнес-процесса на low-code платформе наиболее актуальна, когда все IT-специалисты заняты приоритетными проектами, которые требуют

глубокой экспертизы, а текущую задачу необходимо выполнить «здесь и сейчас», в ограниченные сроки. Это быстро, эффективно, не требует вложения больших ресурсов.

Но все же сократить штат программистов в пользу low-code разработки не удастся. Такое решение могло бы быть выгодным с точки зрения текущих финансов организации, однако в дальнейшей перспективе ограниченность функционала таких платформ будет тормозить рост предприятия и, соответственно, выручка будет снижаться. No-code и low-code платформы могут стать отличным инструментом для быстрого решения задач в организации, в которой уже есть штат IT-специалистов для доработки решения, его усовершенствования. Однако малому бизнесу, у которого стоит выбор между наймом IT-команды и покупкой low-code ПО и наймом одного сотрудника, который сможет разрабатывать решения без написания кода и поддерживать его, все-таки стоит обратить внимание на первый вариант. В данном случае бизнесу будет проще масштабироваться и не придется обращаться на аутсорс для помощи квалифицированных разработчиков, что непременно произойдет в силу того, что само по себе low-code решение практически не может существовать без синергии с классической разработкой.

### Список источников

1. Akperov I. G., Khramov V. V. Development of instruments of fuzzy identification of extended objects based on the results of satellite monitoring // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 896. P. 325–332. DOI 10.1007/978-3-030-04164-9\_44.
2. Акатова Н. А. Автоматизация бизнес-процессов предприятия средствами типовых программных решений. Модуль 2 «Управление производством в 1С: ERP». М. : МИСИС, 2020. 262 с.
3. Акперов Г. И., Александрова Т. С., Дегтярев В. В. и др. Методика выбора языка программирования на основе мягких моделей // *Вестник кибернетики*. 2022. № 3. С. 6–13.
4. Романюк С. ИТ-Стайер. 2020. URL: <https://ф62.пф/it-stayer-54962909> (дата обращения: 14.05.2024).
5. Akperov G. I., Khramov V. V., Gorbacheva A. A. Using soft computing methods for the functional benchmarking of an intelligent workplace in an educational establishment // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1095. P. 54–60. DOI 10.1007/978-3-030-35249-3\_6.
6. Перфильев Д. А., Громыко В. А. Стандарты автоматизации административной деятельности : моногр. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2020. 204 с.
7. Осовицкая Н. А. HR DIGITAL. Практики лучших работодателей. СПб. : Питер, 2018. 409 с.
8. Lindenbaum T., Belyaev A., Grebenyuk E. et al. The method of identifying a person in formation of an educational trajectory // *INTERAGROMASH 2022 : Proceedings of the XV International Scientific Conference, March 2–4, 2022, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don, 2023*. P. 1323–1332. DOI 10.1007/978-3-031-21219-2\_148.

### Информация об авторах

**А. А. Слотвицкая** – магистрант.

**Б. В. Мартынов** – кандидат философских наук, доцент.

**Е. С. Прокопенко** – кандидат экономических наук, доцент.

### References

1. Akperov I. G., Khramov V. V. Development of instruments of fuzzy identification of extended objects based on the results of satellite monitoring. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019;896:325–332. DOI 10.1007/978-3-030-04164-9\_44.
2. Akatova N. A. Avtomatizatsiia biznes-protsessov predpriiatiia sredstvami tipovykh programmnykh reshenii. Modul 2 “Upravlenie proizvodstvom v 1C: ERP”. Moscow: MISIS; 2020. 262 p. (In Russ.).
3. Akperov G. I., Aleksandrova T. S., Degtyarev V. V. et al. Method for selecting a programming language based on soft models. *Proceedings in Cybernetics*. 2022;(3):6–13. (In Russ.).
4. Romanyuk S. IT-Staier. 2020. URL: <https://ф62.пф/it-stayer-54962909> (accessed: 14.05.2024). (In Russ.).
5. Akperov G. I., Khramov V. V., Gorbacheva A. A. Using soft computing methods for the functional benchmarking of an intelligent workplace in an educational establishment. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1095:54–60. DOI 10.1007/978-3-030-35249-3\_6.
6. Perfiliev D. A., Gromyko V. A. Standarty avtomatizatsii administrativnoi deiatelnost. Monograph. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2020. 204 p. (In Russ.).
7. Osovitskaya N. A. HR DIGITAL. Praktiki luchshikh rabotodatelei. St. Petersburg: Piter; 2018. 409 p. (In Russ.).
8. Lindenbaum T., Belyaev A., Grebenyuk E. et al. The method of identifying a person in formation of an educational trajectory. In: *Proceedings of the XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”, March 2–4, 2022, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don, 2023*. p. 1323–1332. DOI 10.1007/978-3-031-21219-2\_148.

### Information about the authors

**A. A. Slotvitskaya** – Master’s Degree Student.

**B. V. Martynov** – Candidate of Sciences (Philosophy), Docent.

**E. S. Prokopenko** – Candidate of Sciences (Economics), Docent.

Научная статья

УДК 004.896+007.52

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-10



## СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ПЛОСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

**Владимир Викторович Храмов<sup>1</sup>**, **Ольга Юрьевна Митясова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Южный университет (ИУБиП), Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>ООО «Бизнес ИТ», Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup>[vxramov@inbox.ru](mailto:vxramov@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1848-8174>

<sup>2</sup>[moypoceta2012@yandex.ru](mailto:moypoceta2012@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1895-0077>

**Аннотация.** В работе рассмотрен такой важный аспект компьютерного зрения, как формирование признаков распознавания объектов, в системах технического зрения. Подобные системы, нашедшие широкое применение в различных отраслях промышленности, дают возможность получить большой объем быстро собираемой информации. При этом собирается информация о свойствах наблюдаемых объектов, в число которых зачастую относят перемещение, а также геометрические параметры их формы. Авторами предлагается использование признаков распознавания объектов, в основе которых лежат ортоэкспоненциальные функции и которые сохраняют в себе информацию о форме исследуемого объекта. Для контуров некоторых правильных геометрических фигур приведены примеры вычисленных комплексных значений элементов матрицы формы, получаемой на основе коэффициентов разложения рассматриваемых в работе ортоэкспоненциальных функций.

**Ключевые слова:** контуры объектов, признаки распознавания, робототехнические системы, машинное зрение

**Для цитирования:** Храмов В. В., Митясова О. Ю. Способ формирования ортогональных признаков распознавания объектов на плоских изображениях // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 76–80. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-10.

Original article

## METHOD FOR FORMING ORTHOGONAL FEATURES FOR OBJECT RECOGNITION IN FLAT IMAGES

**Vladimir V. Khramov<sup>1</sup>**, **Olga Yu. Mityasova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Southern University (IMBL), Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup>ООО Business IT, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup>[vxramov@inbox.ru](mailto:vxramov@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1848-8174>

<sup>2</sup>[moypoceta2012@yandex.ru](mailto:moypoceta2012@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1895-0077>

**Abstract.** The study discusses such an important aspect of computer vision in technical vision systems as object recognition features formation. Such systems, which are widely applied in a variety of industries, allow for the rapid acquisition of a vast amount of information. At the same time, information about the observed objects' properties, which often include movement, as well as the geometric parameters of their shape, is collected. The authors propose using object recognition features, which are based on orthoexponential functions and which retain information about the studied object's shape. Examples of calculated complex values of the shape matrix's elements are presented for some regular geometric shapes' contours. The shape matrix is obtained based on the decomposition coefficients of orthoexponential functions discussed in the study.

**Keywords:** objects' contours, recognition features, robotic systems, machine vision

**For citation:** Khramov V. V., Mityasova O. Yu. Method for forming orthogonal features for object recognition in flat images. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):76–80. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-10.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные системы очувствления роботов предполагают наличие элементов технического зрения, способных обеспечить прием и обработку информации о свойствах объектов распознавания, в первую очередь об их форме, размерах и ориентации. Зная эти свойства, можно идентифицировать объекты текущего изображения с некоторым эталоном, находящимся в памяти ЭВМ.

Для более сложных систем технического зрения помимо текстурных признаков, описывающих структуру видимой поверхности объекта, применяются признаки для различения объектов по цвету, а также геометрические признаки, учитывающие не только форму объекта, но и его пространственное положение.

Одним из ключевых элементов систем технического зрения (СТЗ) является алгоритм сегментации изображения, который позволяет выделить объекты на фоне изображения и определить их границы [1]. Для этого используются различные методы обработки изображений, в том числе фильтрация, морфологические операции, выделение краев и др.

Для увеличения эффективности распознавания объектов в СТЗ в последнее время все чаще применяются методы машинного обучения, нейронные сети, метод опорных векторов, алгоритмы кластеризации и др. Эти методы позволяют повысить точность и скорость работы системы при обучении на большом объеме данных.

Таким образом, современные системы технического зрения роботов используют разнообразные признаки и методы обработки изображений для распознавания объектов и выполнения различных задач в автоматизированных процессах. Рассмотрим разработанную авторами методику, обладающую, на наш взгляд, несколькими большими возможностями и универсальностью.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Система технического зрения (СТЗ) простейших роботов-манипуляторов использует метрические признаки, известные из интегральной геометрии [1]: удлиненность объекта  $P_1 = \frac{b}{a}$ , сложность контура  $P_2 = \frac{a}{S}$ , компактность фигуры  $P_3 = \frac{P}{a \cdot b}$ , моменты инерции относительно осей и т.д. ( $P$  – площадь;  $S$  – периметр;  $a$  – наибольшее сечение объекта;  $b$  – наибольшее сечение из перпендикулярных сечению  $a$ ). Роботы же, ориентированные на решение широкого круга задач и обладающие высоким уровнем искусственного интеллекта, нуждаются в более развитой, более универсальной системе признаков распознавания.

Одной из эвристик, которая применяется для контурной идентификации объектов, является использование оператора Собеля для выделения границ объектов на изображении. Этот оператор позволяет выделить различные уровни контрастности и изменений яркости, что, в свою очередь, помогает выявить контуры объектов.

Другой эвристикой является использование алгоритмов машинного обучения для классификации контуров объектов. На основе набора обучающих данных, таких как изображения с контурами различных объектов, модель может быть обучена распознавать и идентифицировать контуры объектов на новых изображениях.

Авторами используется собственная эвристика, основанная на использовании кодов Фримена, применительно к клеточным автоматам на плоскости [2, 3].

Интеграция этих и других эвристик в процесс анализа изображений позволяет повысить эффективность и точность идентификации объектов, явлений и ситуаций. Тем самым, развитие технологий интеллектуального анализа данных значительно улучшает возможности применения систем технического зрения в различных областях, от медицины и автопрома до робототехники и безопасности [4].

## Методология

Остановимся на таком подходе к формированию признаков, который бы обеспечил сохранение в них информации о форме распознаваемых контуров как едином целом, в первую очередь с учетом взаимосвязи координат соседних точек контура. Такой подход получил не только официальное признание [5], но и показал свою эффективность на практике [6].

Пусть средствами предварительной обработки выделен замкнутый контур объекта на двумерном изображении, то есть задана упорядоченная совокупность координат  $\{x_i; y_i\}$  точек  $a_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , контура, где  $N$  – количество точек контура. Выбирается начальная точка контура по какому-либо правилу, например:

$$\min_x \min_y \{a(x_i; y_i)\}.$$

Направление движения по контуру справа от объекта примем за положительное и представим контурную линию параметрически:

$$\begin{cases} x_i = x_i(s); \\ y_i = y_i(s), \end{cases}$$

где  $s$  – расстояние по контуру от начальной точки до  $i$ -й.

Для изображения, задаваемого на прямоугольном растре, любая контурная линия является решением линейного дифференциального уравнения порядка не выше  $n < \infty$ . В работе [7] для этого случая было доказано, что для сохранения полной информации о форме контура достаточно не более чем по  $(n + 1)$ -му коэффициенту разложения в ряд ортогональных экспоненциальных функций для  $x = x(s)$  и  $y = y(s)$ .

Базисные ортоэкспоненциальные функции задаются выражением:

$$\varepsilon_i(s) = \sqrt{2mi} \sum_{k=0}^{i-1} (-1)^k C_{i-1}^k C_{i+1}^k \sum_{l=0}^{i-1} (-1)^l C_k^l e^{-(l+1)ms},$$

где  $m \in (0, 1)$  – масштабный коэффициент.

Если обозначить  $J_k = \int_0^\infty f(s) e^{-kms} ds$ , то коэффициенты разложения  $^0$  будут вычисляться по формулам [1]:

$$\begin{aligned} E_0 &= \sqrt{2m} J_0, \\ E_1 &= \sqrt{4m} \left( J_0 - \frac{3}{2} J_1 \right) \\ &\dots\dots\dots \end{aligned}$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая, что аппаратное вычисление коэффициентов ортогонального разложения  $\{E_i\}$  проблем в настоящее время не представляет [3], переход  $\{J_k\} \leftarrow \{E_i\}$  также вполне разрешимая задача.

Обратив внимание на то, что:

$$F(p) \Big|_{p=km} = \int_0^\infty f(s) e^{-ps} ds \Big|_{p=km} = J_k,$$

и обозначив  $f_1(s) = x(s); f_2(s) = y(s); f_3(s) = x(S-s); f_4(s) = y(S-s)$ , где  $x(S-s); y(S-s)$  – «зеркальные» функции;  $S$  – длина контура, можно образовать матрицу формы контура:

$$\begin{bmatrix} 1 & \Phi_{12} & \Phi_{13} & \Phi_{14} \\ 0 & 1 & \Phi_{23} & \Phi_{24} \\ 0 & 0 & 1 & \Phi_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

При этом  $\Phi_{ij}$  характеризует связность точек контура. Вещественные сечения некоторых элементов матрицы формы ( $\Phi_{13}; \Phi_{24}$ ) были исследованы ранее в работе [3] и получили название экспоненциальных коэффициентов формы.

Отметим два полезных свойства элементов матрицы формы:

1) в силу того, что все  $f_i(s)$  периодические, с одним периодом  $S$ :

$$\Phi_{ij} = \frac{\int_0^\infty f_i(s) e^{-ps} ds}{\int_0^\infty f_j(s) e^{-ps} ds} = \frac{\int_0^S f_i(s) e^{-ps} ds}{\int_0^S f_j(s) e^{-ps} ds};$$

2)  $\Phi_{12}$  и  $\Phi_{34}$  инвариантны к выбор начальной точки контура, а следовательно, и к повороту объекта на текущем изображении.

Приведем примеры вычисленных инвариантных комплексных значений элементов матрицы формы для контуров правильных геометрических фигур:

– квадрат со стороной  $a$ :  $\Phi_{12} = e^{-ap}$ ;

– окружность:  $\Phi_{12} = e^{-\frac{\pi}{2}p} = \frac{1}{p}$ ;

– эллипс с осями  $a$  и  $b$ :

$$\Phi_{ij} = e^{\frac{e^{-\frac{b}{2}p}(1 + e^{-ap}) - ap(1 - e^{-(a+b)p})}{e^{-\frac{a}{2}p}(1 + e^{-bp}) - bp(1 - e^{-(a+b)p})}} e^{-ap}.$$

Элементы матрицы для фигур произвольной формы, равно как и их проекции на действительную ось, сохраняют свойства 1 и 2.

Анализируя вид выражений для  $\Phi_{12}$  контуров различных фигур, следует отметить, что некоторые признаки, полученные другими, например эвристическими, опытными методами [1, 7] (признаки  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ), входят в качестве компонентов для выражения элементов матрицы формы. Тем самым теоретически доказывается правомерность их практического использования, по меньшей мере в качестве признаков первого уровня иерархической системы распознавания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Способ описывает порядок формирования ортогональных признаков для распознавания объектов на плоских изображениях. Основные шаги способа включают [7]:

1. Описание контура объекта: имеется замкнутый контур объекта, который параметрически описывается по его координатам на плоскости.

2. Параметризацию контура: координаты контура представляются в виде функций расстояния от фиксированной точки (например, начала координат) вдоль контура объекта, это позволяет учесть форму и структуру объекта.

3. Разложение функций расстояния в ряд: полученные функции расстояния разлагаются в ряды по ортогональным полиномам. Ортогональные полиномы – это функции, которые ортогональны друг другу на определенном интервале с некоторым весом. С учетом того, что исследуемые объекты описываются замкнутыми контурами, параметрические описания – периодические функции, следовательно, пределы интегрирования могут быть заданы от нуля до значения, равного длине контура. Это существенно упрощает вычислительные процедуры.

4. Формирование признаков идентификации: коэффициенты разложения функций расстояния в ряды по ортогональным полиномам могут сами использоваться как признаки для идентификации объектов. Комбинации отношений этих коэффициентов также могут образовывать признаки второго уровня, в том числе формируемые в матрицы, которые в ряде практических случаев весьма эффективны [4, 8].

Такой подход позволяет учитывать как геометрические, так и структурные особенности объектов при их распознавании на изображениях.

## Список источников

1. Долгин Ю. Н., Васильев Г. И., Храмов В. В. Выбор информационных признаков для распознавания некоторых многомерных сигналов // Проектирование и применение микроэлектронных специализированных вычислителей : сб. науч. тр. М. : МИЭТ, 1985. С. 82–86.
2. Kramarov S., Khramov V. Methodology of formation of unite geo-informational space in the region // Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018 : Proceedings of the International Conference / Sukhomlin V., Zubareva E., eds. 2020. P. 309–316. DOI 10.1007/978-3-030-46895-8\_24.
3. Абдуллаева А. М., Аверченко Е. В., Александрова Т. С. и др. Возможности сочетания естествен-

## References

1. Dolgin Yu. N., Vasilyev G. I., Khramov V. V. Vybor informatsionnykh priznakov dlia raspoznavaniia nekotorykh mnogomernykh signalov. In: *Collection of Scientific Works "Proektirovanie i primeneniye mikroelektronnykh spetsializirovannykh vychislitelei"*. Moscow: MIET; 1985. p. 82–86. (In Russ.).
2. Kramarov S., Khramov V. Methodology of formation of unite geo-informational space in the region. In: Sukhomlin V., Zubareva E., eds. *Proceedings of the International Conference "Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018"*. 2020. p. 309–316. DOI 10.1007/978-3-030-46895-8\_24.
3. Abdullaeva A. M., Averchenko E. V., Aleksandrova T. S. et al. Vozmozhnosti sochetaniia estestvenno-

- ного и искусственного интеллектов в образовательных системах. М. : Изд. центр РИОР, 2023. 232 с.
4. Akperov I. G., Khramov V. V. Development of instruments of fuzzy identification of extended objects based on the results of satellite monitoring // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 896. P. 325–332. DOI 10.1007/978-3-030-04164-9\_44.
  5. Акперов И. Г., Акперов Т. И., Александрова Т. С. и др. Программа для формирования признаков контурного распознавания и идентификации информационных объектов : программа для ЭВМ № 2023680950 Российская Федерация, № 2023668703 ; заявл. 11.09.2023 ; опублик. 11.10.2023 ; заявитель ЧОУ ВО «Южный университет (ИУБиП)». URL: <https://onlinepatent.ru/software/2023680950/> (дата обращения: 14.05.2024).
  6. Lindenbaum T., Belyaev A., Grebenyuk E. et al. The method of identifying a person in formation of an educational trajectory // *INTERAGROMASH 2022 : Proceedings of the XV International Scientific Conference, March 2–4, 2022, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don, 2023*. P. 1323–1332. DOI 10.1007/978-3-031-21219-2\_148.
  7. Дедус Е. Ф., Храмов В. В. Система признаков распознавания контуров произвольной формы // Тематический научно-технический сборник. Т. 2. М. : Изд-во Министерства обороны СССР, 1988. С. 21–23.
  8. Akperov G. I., Grigoriev S. G., Işiklar A. et al. Cognitive modeling of university management support as a human-machine system // *Informatics and Education*. 2024. Vol. 39, no. 1. P. 65–73. DOI 10.32517/0234-0453-2024-39-1-65-73.
  4. Akperov I. G., Khramov V. V. Development of instruments of fuzzy identification of extended objects based on the results of satellite monitoring. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019;896:325–332. DOI 10.1007/978-3-030-04164-9\_44.
  5. Akperov I. G., Akperov T. I., Aleksandrova T. S. et al. Software for formation of contour recognition and identification of information objects. Computer software 2023680950 RU, No. 2023668703, filed on September 11, 2023, issued on October 11, 2023, applicant Southern University (IMBL). URL: <https://onlinepatent.ru/software/2023680950/> (accessed: 14.05.2024). (In Russ.).
  6. Lindenbaum T., Belyaev A., Grebenyuk E. et al. The method of identifying a person in formation of an educational trajectory. In: *Proceedings of the XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”, March 2–4, 2022, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don, 2023*. p. 1323–1332. DOI 10.1007/978-3-031-21219-2\_148.
  7. Dedus E. F., Khramov V. V. Sistema priznakov raspoznavaniia konturov proizvolnoi formy. In: *Collection of Theme Scientific and Engineering Papers*. Vol. 2. Moscow: Publishing House of the Ministry of Defense of USSR; 1988. p. 21–23. (In Russ.).
  8. Akperov G. I., Grigoriev S. G., Işiklar A. et al. Cognitive modeling of university management support as a human-machine system. *Informatics and Education*. 2024;39(1):65–73. DOI 10.32517/0234-0453-2024-39-1-65-73.

### Информация об авторах

**В. В. Храмов** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник.

**О. Ю. Митясова** – кандидат технических наук.

### Information about the authors

**V. V. Khramov** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent, Leading Researcher.

**O. Yu. Mityasova** – Candidate of Sciences (Engineering).

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

Научная статья

УДК 004.94:536.46

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-11



### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СМЕСИ

Максим Михайлович Алексеев<sup>1</sup>, Олег Юрьевич Семенов<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup>Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

<sup>1</sup>amm.iff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>

<sup>2</sup>ous.tutor.phinma@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>

**Аннотация.** Проведено экспериментальное исследование и численное моделирование распространения фронта пламени по стратифицированной газовой смеси в плоском канале малого поперечного размера, образованного двумя параллельными пластинами. Получены изображения фронта пламени методом прямого фотографирования. Обнаружено изменение формы пламени при колебательном распространении в длинном канале. Построены поля распределения температур, концентрации газа, давления, скорости и линии тока. Показано, что результаты моделирования качественно совпадают с результатами экспериментов.

**Ключевые слова:** OpenFOAM, фронт пламени, эксперимент, плоский канал, численное моделирование, пропан, стратифицированная смесь, метан

**Для цитирования:** Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Численное моделирование фронта пламени газовой смеси в стратифицированном канале // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 81–91. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-11.

Original article

### NUMERICAL MODELING OF THE FLAME FRONT OF A GAS-AND-AIR STRATIFIED MIXTURE

Maksim M. Alekseev<sup>1</sup>, Oleg Yu. Semenov<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup>Surgut State University, Surgut, Russia

<sup>1</sup>amm.iff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>

<sup>2</sup>ous.tutor.phinma@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>

**Abstract.** The study conducts a test and numerical modeling of flame front propagation along a stratified gas mixture in a small transverse flat channel made by two parallel plates. Images of the flame front were obtained through direct photography. A shape change was detected during the flame oscillatory propagation along a long channel. The distribution fields of temperature, gas concentration, pressure, velocity, and streamline were constructed. The simulation findings have been shown to qualitatively coincide with the test findings.

**Keywords:** OpenFOAM, flame front, experiment, flat channel, numerical simulation, propane, stratified mixture, methane

**For citation:** Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Numerical modeling of the flame front of a gas-and-air stratified mixture. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):81–91. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-11.

## ВВЕДЕНИЕ

Научный интерес изучения горения стратифицированных газоздушных смесей связан с влиянием неоднородного распределения концентрации на устойчивость и структуру пламени. Стратифицированная смесь – это смесь, в которой ее разные компоненты распределены слоями, то есть стратами. Это может происходить, например, при смешивании газов или жидкостей.

Стратификация приводит к изменению температуры и плотности газа, что влияет на распределение концентрации и, следовательно, на безопасность и эффективность процессов горения [1–5]. В статье [6] изучается поведение фронта пламени стратифицированной пропановоздушной смеси в плоском канале. Авторы обнаружили, что пламя распространяется преимущественно вдоль узкой области, это связано с особенностями стратификации газовой смеси и процессами теплопередачи. Авторами работ [7, 8] описаны методики определения концентрации газов легких углеводородов. Прогнозирование особенностей распространения фронта пламени важно для предотвращения пожаров и разработки эффективных систем пожаротушения. В рабо-

тах [9–11] рассматриваются приборы для обнаружения утечек нефтепродуктов и методы устранения аварий на магистральных трубопроводах с учетом стратификации газов. Сжигание газоздушного топлива разной концентрации в небольших по размеру горелочных устройствах является многообещающей технологией, которая имеет большой потенциал для создания новых типов энергетических и двигательных установок [12–15]. В настоящее время в научной литературе недостаточно представлено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных при распространении фронта пламени в стратифицированном слое, приводящего к изменению его формы и неустойчивости.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для экспериментальных исследований пламени в неоднородной среде использовали вертикальный прямоугольный канал размерами  $1400 \times 300 \times 3$  мм<sup>3</sup> (рис. 1). Канал из прозрачного оргстекла, герметично закрытый со всех сторон, заполняли метановоздушной или пропановоздушной смесью, состав которой значительно превышал концентрационные пределы распространения пламени.

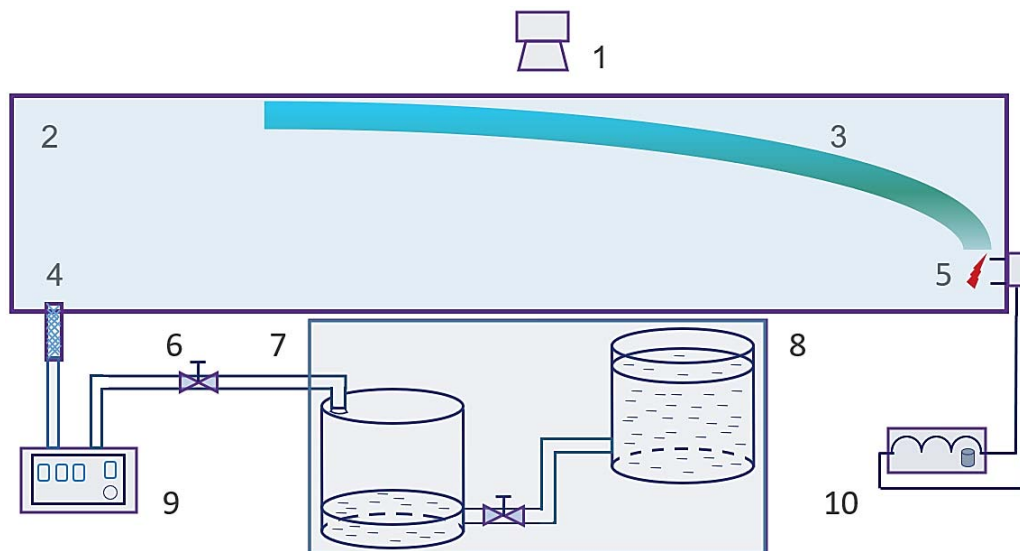


Рис. 1. Схема установки для изучения процесса горения газовой смеси:

- 1 – цифровая фотокамера (вид сбоку); 2 – прозрачный плоский канал;
- 3 – траектория фронта пламени; 4 – пламегаситель; 5 – электроды;
- 6 – кран подачи газовой смеси; 7 – газовая трубка; 8 – газометр вытеснения;
- 9 – расходомер газа; 10 – катушка с электрическими проводами

Примечание: составлено авторами.

После заполнения канала газовой смесью одна из его боковых стенок открывалась, и смесь вытекала из ее верхней или нижней части. Через фиксированное время горючую газовую смесь, образовавшуюся в канале в результате смешивания с заходящим в канал воздухом, воспламеняли высоковольтным разрядом и записывали процесс распространения пламени на цифровую видеокамеру. Для регистрации структуры и формы пламени, изучения колебаний границы траектории, последующего анализа параметров движения пламени применялся метод прямого фотографирования и получения изображения на матрице ПЗС при открытом затворе фотокамеры.

Процесс распространения пламени снимался на цифровую камеру с высоким разрешением и возможностью скоростной видеозаписи от 25 до 1000 кадров в секунду. С помощью видеосъемки была получена серия изображений, которые показали динамику границы пламени в течение определенного периода времени. Для улучшения видимости контура канала и фронта пламени устанавливали подсвечиваемый внешним источником света экран. Это позволило получить более четкие и яркие изображения участков фронта пламени, а также контура канала, что помогло точнее анализировать и интерпретировать полученные экспериментальные данные.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Экспериментальные результаты

В ходе проведенных опытов наблюдались изменения концентрации и формы траекто-

рии распространения фронта пламени при различных соотношениях смесей для метана и пропана в воздухе, а также в зависимости от разных точек воспламенения смеси в канале (рис. 2).

Угол наклона траектории границы пламени зависит от времени истечения пропана. Фронт двигался по области, где образовалась смесь с нужной концентрацией. От начальной концентрации смеси зависела ширина фронта пламени в плоском канале. При чистом пропане граница стратификации становилась более резкой.

На рис. 3 представлены фотокадры опытов зажигания горючей смеси в нижней части торцевой стенки плоского канала. Большая светимость поверхности пламени связана с распределением концентрации газа в воздухе. Нижняя часть фронта пламени имеет зелено-синий цвет, а верхняя – сине-фиолетовый цвет. Температура в области горения изменяется от минимальной, соответствующей пределам воспламенения, до максимальной при образовании стехиометрической концентрации газовой смеси.

На рис. 4 показаны два изображения пламени – кадр из видеофильма распространения пламени и его фотометрическое изображение, позволяющее определить распределение энергетической светимости на поверхности пламени. Верхняя часть фронта пламени может отставать от нижнего края или опережать его из-за различной нормальной скорости пламени на отдельных участках его поверхности. Эта скорость зависит от локального состава горючей смеси, при этом фронт пламени

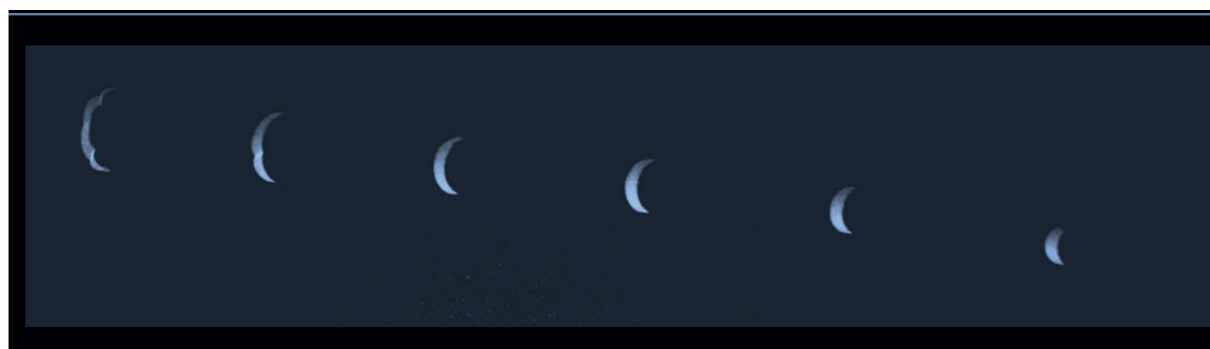
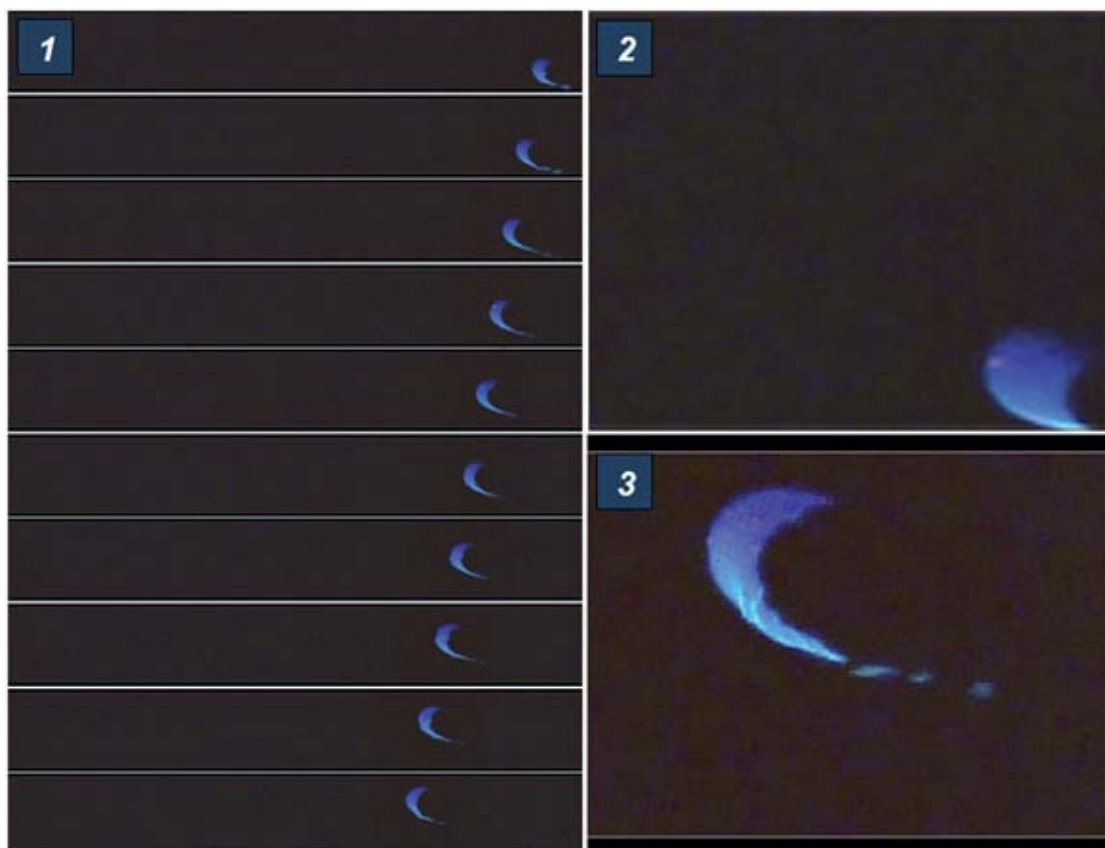
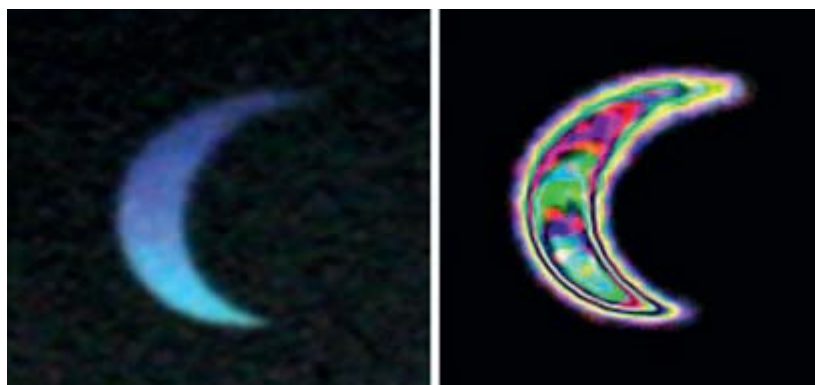


Рис. 2. Кадры движения фронта пламени в стратифицированном слое

Примечание: составлено авторами.



**Рис. 3. Фрагменты из видеофильма эксперимента:**  
 1 – отдельные кадры пламени; 2 – начальный фрагмент пламени;  
 3 – образование ячеек на фронте пламени  
*Примечание:* составлено авторами.



**Рис. 4. Отдельный фотокадр пламени и его фотометрическое изображение**  
*Примечание:* составлено авторами.

деформируется, разделяясь на отдельные ячейки. Управление формой и скоростью фронта пламени можно осуществлять, изменяя время стратификации горючей смеси.

Получим уравнение поверхности, разделяющей стратифицированный слой газовой смеси при вытекании газа из открытого края вертикально расположенного плоско-

го канала. Покажем на рис. 5 траекторию пламени в канале относительно координат  $x$  и  $z$ . Так как скорость газа мала, то течение в канале потенциально.

Силы тяжести относительно координат  $x$  и  $z$  равны силам гидростатического давления в канале:

$$\text{grad}P(x,z) = \text{grad}U(x,z). \quad (1)$$



Рис. 5. Схема вытекания газа из открытой части плоского канала

Примечание: составлено авторами.

Давление определим из выражения:

$$P(x, z) = U(x, z) + P_0. \quad (2)$$

Зависимость потенциала  $U(x, z)$  от координаты  $z$ :

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -(\rho - \rho_0)g, \quad (3)$$

где  $(\rho - \rho_0) \cdot g$  – результирующая силы тяжести и силы Архимеда для элементарного объема газа;

$\rho_0$  – плотность воздуха;

$\rho$  – плотность газозвоздушной смеси в канале;

$g$  – ускорение свободного падения.

Из выражения (3) следует, что потенциал определяется как  $U(z) = -(\rho - \rho_0) \cdot gz$ . Поверхность раздела между легкой и тяжелой компонентами горючей смеси искривляется при вытекании газа из открытой части канала. Тогда зависимость  $U(x, z)$  от координаты  $x$  найдем из условий:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -\rho a \text{ и } U(x) = -\rho ax, \quad (4)$$

где  $a$  – ускорение газа в горизонтальном направлении.

Полный дифференциал потенциальной энергии будет равен:

$$dU = \frac{\partial U}{\partial x} dx + \frac{\partial U}{\partial z} dz = -(\rho - \rho_0)dzdz - \rho adx. \quad (5)$$

Из формул (3) и (4) получим выражение:

$$U(x, z) = -(\rho - \rho_0)gz - \rho ax. \quad (6)$$

Давление  $P$  определяется из (2) и (6):

$$P = P_0 - (\rho - \rho_0)gz - \rho ax. \quad (7)$$

Перепад давления  $\Delta P$  с учетом начальных условий вдоль длины канала равен  $\Delta P = P - P_0 = (\rho - \rho_0) \cdot gz_0$ .

Запишем уравнение поверхности раздела между легкой и тяжелой компонентами газовой смеси:

$$z = z_0 - \frac{\rho}{\rho - \rho_0} \cdot \frac{a}{g} x. \quad (8)$$

Поверхность раздела представляет собой плоскость, имеющую определенный угол наклона относительно вертикали, который можно найти из формул:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} \cdot \frac{a}{g} x \text{ и } \operatorname{tg} \alpha = \frac{z_1 - z_0}{L}, \quad (9)$$

где  $L$  – расстояние вдоль длины канала;

$z_1$  и  $z_0$  – вертикальные координаты поверхности внутри канала в поперечных сечениях, разделенных расстоянием  $x$  (рис. 5).

Из соотношений (7) и (8) следует выражение для ускорения (10), с которым двигался элементарный объем газа к открытой боковой стенке канала:

$$a = \frac{(z_1 - z_0) \cdot (\rho - \rho_0)g}{\rho L}. \quad (10)$$

Для нахождения уравнения поверхности, разделяющей стратифицированные слои газовой смеси открытого края канала, используем условие постоянства горизонтальной составляющей скорости газа  $u$  вдоль вертикального направления:

$$a = -A \frac{dz}{dx}, \quad (11)$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от расстояния между стенками канала и вязкости газа в смеси.

Объемный расход газа через поперечное сечение также постоянен на единице ширины канала, и он находится как:

$$q = u \cdot z. \quad (12)$$

Согласно формулам (11) и (12) объемный расход равен:

$$q = -Az \frac{dz}{dx}. \quad (13)$$

Интегрируя выражение (13), получим уравнение для стратифицированного слоя газовой смеси:

$$x = -\frac{A}{q}z^2 + C, \quad (14)$$

где константа  $C$  определяется из условия  $z = z_0$  при  $x = 0$ .

Акустические колебания в канале могут быть связаны со стабильностью стратифицированного слоя горючего газа. На рис. 6 представлено изменение формы пламени, сфотографированного при открытом затворе фотокамеры в течение длительного времени. Фотография показывает колебания границы пламени в зависимости от его ширины и формы в плоском узком канале. Частота колебаний пламени, измеренная по кадрам из видеофильма, равна частоте 2,0 Гц.

## Моделирование

Численное моделирование фронта пламени газовой смеси является важным инструментом для изучения процессов горения. Это позволяет исследовать сложные процессы, происходящие при горении, и разрабатывать новые методы управления пламенем, такие как подавление или ускорение горения [16–19].

Для моделирования химических реакций, процессов горения и получения данных о полях скоростей газа, температурах, давлениях и концентрациях компонентов продуктов горения в процессе формирования и распространения фронта пламени был использован «решатель» reactingFoam из пакета программ OpenFOAM.

На рис. 7 представлена расчетная область, соответствующая условиям плоского узкого канала, рассматриваемого в данном исследовании. Расчетная область имеет форму параллелепипеда размером 700 мм в длину, 300 мм в ширину и 5 мм в высоту.

Для моделирования применялась однородная ортогональная расчетная сетка. Размеры ячеек расчетной сетки составляли 0,5 мм в на-



Рис. 6. Фотография колебательного распространения пламени

Примечание: составлено авторами.

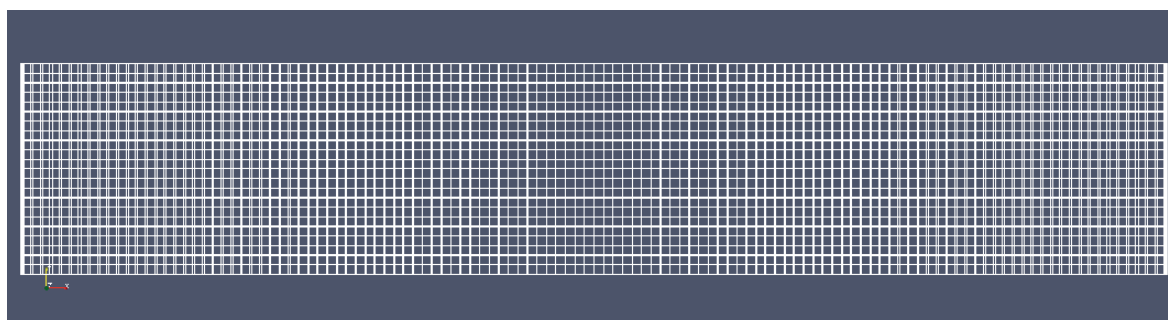


Рис. 7. Расчетная область плоского канала

Примечание: составлено авторами.

правлениях осей  $x$  и  $y$  и 0,1 мм для оси  $z$ . Общее количество ячеек в расчетной сетке было 1 050 000. Граничные условия соответствовали условиям закрытой стенки, за исключением правой границы параллелепипеда. На правой границе задавались условия открытой стенки моделируемого канала, сообщающегося с атмосферой.

Из-за ограничений вычислений по времени в данной работе был рассмотрен только одноступенчатый процесс окисления для пропана, а именно реакция вида:  $C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$ , также проводили моделирование для метановоздушных смесей.

Процесс формирования фронта пламени в стратифицированной смеси разделен на два этапа: создание неоднородного распределения компонентов пропановоздушной смеси в канале и зажигание смеси в точке, соответствующей концентрационным пределам воспламенения пропана в воздухе. Для создания стратифицированной смеси

в качестве начальных условий в канале использовалось равномерное распределение массовой доли  $C_3H_8$ , когда канал заполнен чистым пропаном. Далее происходило истечение пропана из открытой боковой стенки и одновременное поступление воздуха с соответствующими массовыми долями  $O_2$  и  $N_2$ . В результате в канале формировалась граница раздела между пропаном и воздухом с концентрациями компонентов, соответствующими пределам распространения пламени. Рис. 8–9 иллюстрируют распространение фронта пламени в области с различными концентрациями метана и пропана в воздухе, где белыми линиями обозначена область концентраций, в которой может распространяться фронт пламени.

На рис. 10 представлено распределение концентрации пропана в канале в различные моменты времени в виде цветовых шкал.

С течением времени в канале происходит выход пропана из открытой стенки, что



Рис. 8. Последовательные положения фронта пламени стратифицированной метановоздушной смеси и моделирование процесса распространения пламени

Примечание: составлено авторами.

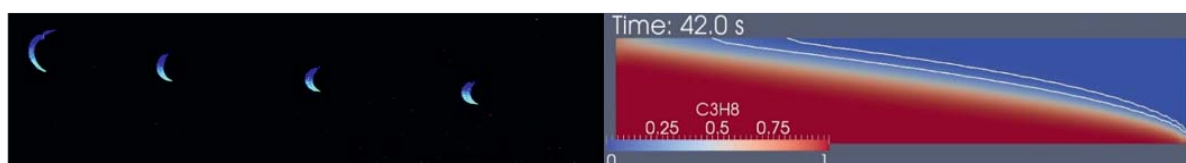


Рис. 9. Положение границы пламени в пропановоздушной смеси с течением времени и по результатам в OpenFOAM

Примечание: составлено авторами.

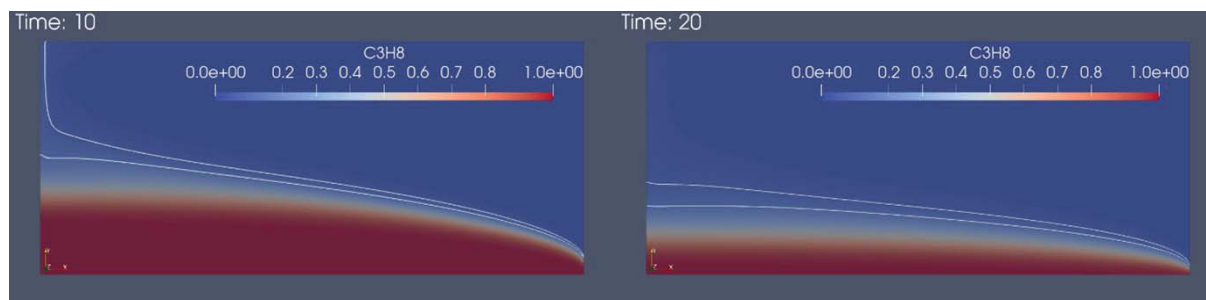


Рис. 10. Изменение распределения концентрации пропана при его истечении из канала

Примечание: составлено авторами.

приводит к образованию градиента концентрации, направленного от верхней границы канала к нижней. После получения необходимого распределения концентраций производится воспламенение смеси путем включения источника тепла (рис. 11).

На рис. 12 представлены распределения различных физических величин (темпе-

ратуры, концентрации компонентов и т.д.) в плоском канале, соответствующие одному и тому же моменту времени после воспламенения смеси.

Источник нагревает смесь до температуры, при которой начинается устойчивый процесс горения. В результате моделирования процесса истечения газа из канала образуется узкая

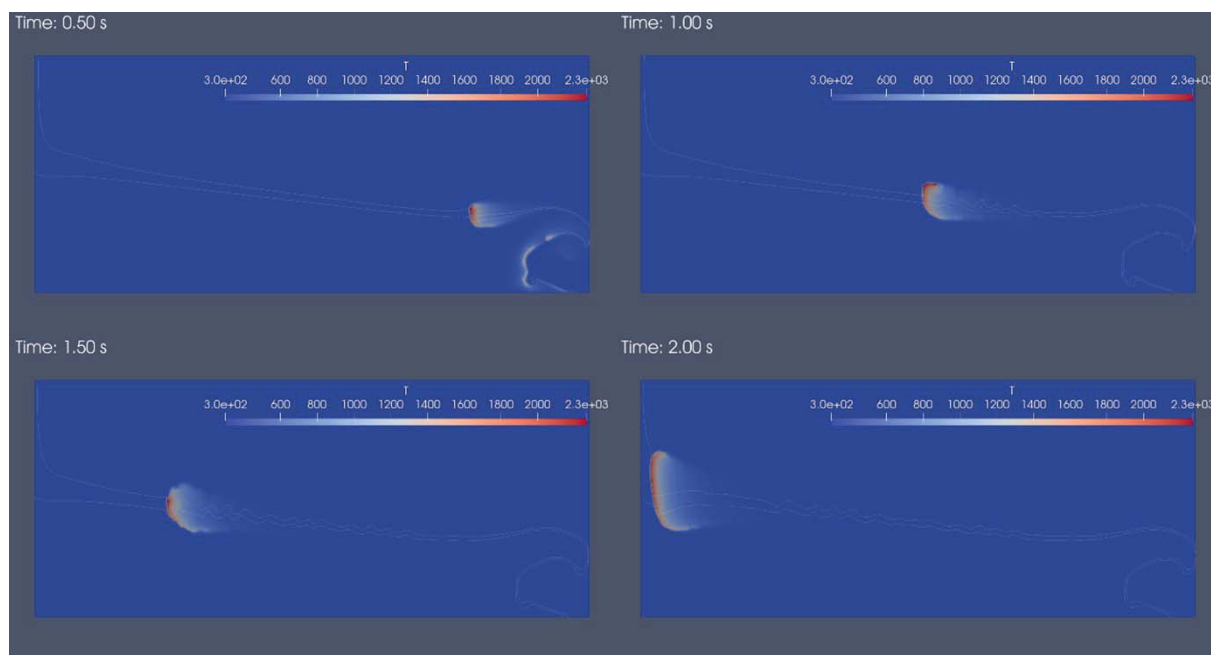


Рис. 11. Распределение температур в канале в различные моменты времени после воспламенения смеси  
 Примечание: составлено авторами.

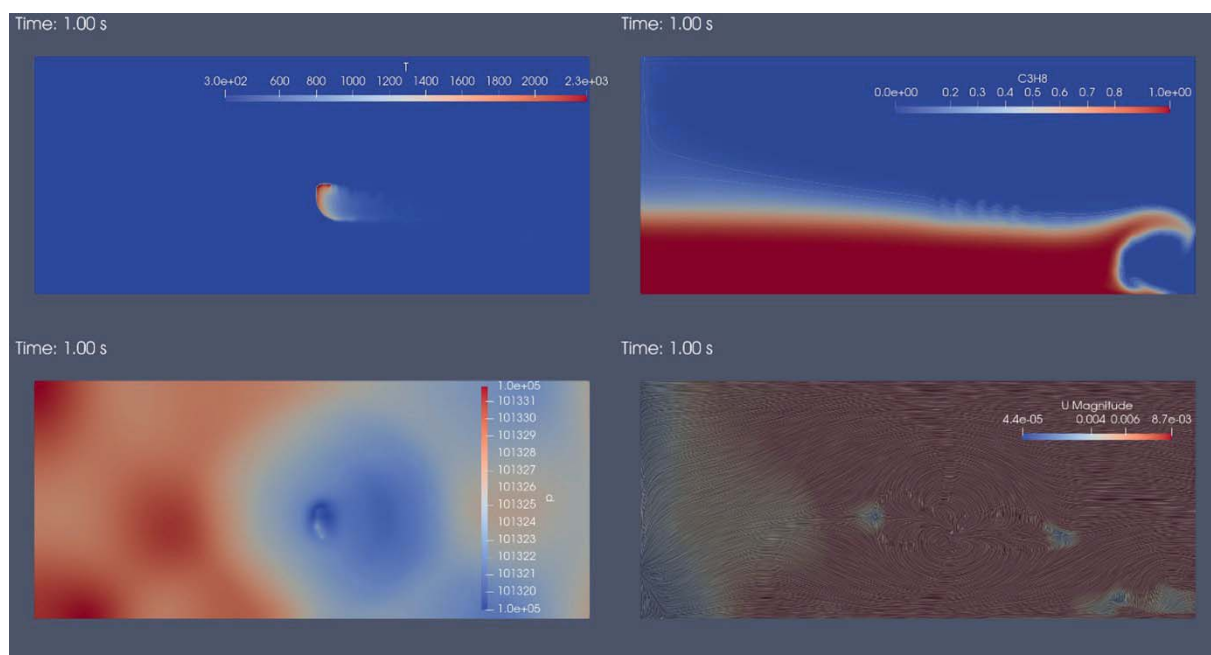


Рис. 12. Распределение температур, концентрации пропана, давления, скорости и линии тока в канале  
 Примечание: составлено авторами.

зона с концентрациями пропана и воздуха, в пределах которых происходит распространение пламени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментального исследования и моделирования, представленного в работе, выявлены закономерности изменения концентрации газа на границе с воздухом при его истечении из канала. Особое внимание уделено влиянию стратификации, разделению смеси под действием силы тяжести на газовые слои в канале с разной концентрацией. Установлено, что фронт пламени движется вдоль узкой области с концентрациями пропана и воздуха, а также для смеси с метаном в воздухе, которые соответствуют пределам распространения пламени. Ширину зоны распространения пламени в канале определяет начальный состав смеси и время ее стратификации. Вибрации фронта пламени происходят с частотой Вейсбаха – Брента, зависящей от параметров стратификации

смеси, геометрических характеристик канала и свойств самого пламени.

Из результатов моделирования следует, что траектория фронта пламени образует ту же форму, что и область, в которой возможно его распространение, зафиксированное в экспериментах.

Метод, представленный в этой работе, может использоваться для определения концентрационных полей в пространстве, в котором происходит утечка или подача газа. Показана возможность получения распределений газов в стратифицированном слое для различных параметров эксперимента без использования специальных методик и приборов, что упрощает проведение моделирования. Полученные результаты могут применяться для оптимизации процессов горения и предотвращения нежелательных выбросов тяжелых газов в атмосферу, при сканировании туннелей, шахт и нефтегазовых трубопроводов для обеспечения безопасности и предотвращения возможных пожаров и аварий.

## Список источников

1. Жидков Д. А., Девисилов В. А. Вихревая технология стратификации газов для решения экологических вопросов в нефтегазовых и химических производствах (обзор) // Безопасность в техносфере. 2015. Т. 4, № 6. С. 63–78.
2. Lee M. J., Kim N. I. The stabilization of a methane-air edge flame within a mixing layer in a narrow channel // *Combustion and Flame*. 2010. Vol. 157, no. 1. P. 201–203. DOI 10.1016/j.combustflame.2009.09.019.
3. Мошкин Н. П., Фомина А. В., Черных Г. Г. Динамика цилиндрической зоны турбулентного смешения в продольном сдвиговом потоке линейно стратифицированной среды // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 1. С. 41–50.
4. Ju Y., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2011. Vol. 37, no. 6. P. 669–715. DOI 10.1016/j.pecs.2011.03.001.
5. Burtsev S. A., Eletskiy I., Kochurov D. S. Gas stratification application in closed-cycle gas turbines // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2171, no. 1. P. 070007. DOI 10.1063/1.5133218.
6. Alekseev M. M., Smirnova I. V., Semenov O. Y. et al. Modeling edge flame propagation in a stratified fuel gas-air mixture // *Technical Physics Letters*. 2012. Vol. 38, no. 11. P. 1010–1012. DOI 10.1134/S106378501211017X.

## References

1. Zhidkov D. A., Devisilov V. A. Vortex technology of gases stratification for solving ecological issues of oil, gas and chemical industries. *Safety in Technosphere*. 2015;4(6):63–78. (In Russ.).
2. Lee M. J., Kim N. I. The stabilization of a methane-air edge flame within a mixing layer in a narrow channel. *Combustion and Flame*. 2010;157(1):201–203. DOI 10.1016/j.combustflame.2009.09.019.
3. Moshkin N. P., Fomina A. V., Chernykh G. G. The dynamics of a cylindrical zone of turbulent mixing in a longitudinal shear flow of a linearly stratified medium. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2019;26(1):41–50. (In Russ.).
4. Ju Y., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2011;37(6):669–715. DOI 10.1016/j.pecs.2011.03.001.
5. Burtsev S. A., Eletskiy I., Kochurov D. S. Gas stratification application in closed-cycle gas turbines. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2171(1):070007. DOI 10.1063/1.5133218.
6. Alekseev M. M., Smirnova I. V., Semenov O. Y. et al. Modeling edge flame propagation in a stratified fuel gas-air mixture. *Technical Physics Letters*. 2012;38(11):1010–1012. DOI 10.1134/S106378501211017X.

7. Качалина О. В., Ахметова Т. И. Определение углеводородных микропримесей в этилене полимеризационной чистоты хроматографическими методами // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 21. С. 39–42.
8. Belov M. L., Belov A. M., Gorodnichev V. A. et al. A laser control method for thin oil films on a water surface based on measurements of first-order and second-order derivatives of the reflection coefficient // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2011. Vol. 24, no. 7. P. 568–571.
9. Первухин П. А. Методы и приборы обнаружения утечек нефтепродуктов // Технологии техносферной безопасности. 2009. № 6. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_14868583\\_27783791.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_14868583_27783791.pdf) (дата обращения: 12.04.2024).
10. Semenov O. Yu., Dyomko A. I. Liquid and gas optical flowmeter model development // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2141, no. 1. P. 050010. DOI 10.1063/1.5122153.
11. Бурцев С. А. Методика расчета устройств газодинамической температурной стратификации при течении реального газа // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5, № 9. С. 386–390.
12. Bychkov V. V., Liberman M. A. Dynamics and stability of premixed flames // *Physics Reports*. 2000. Vol. 325, no. 4. P. 115–237. DOI 10.1016/S0370-1573(99)00081-2.
13. Alexeev M. M., Semenov O. Yu., Yakush S. E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates // *Combustion Science and Technology*. 2019. Vol. 191, no. 7. P. 1256–1275. DOI 10.1080/00102202.2018.1521394.
14. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., Krainov D. A. Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 696. P. 012011. DOI 10.1088/1757-899X/696/1/012011.
15. Лебедев В. С., Скопинцева О. В., Савельев Д. И. Исследование остаточной газонасыщенности угля при тепловом воздействии // Горный журнал. 2014. № 5. С. 20–22.
16. Жуков В. Т., Феодоритова О. Б., Новикова Н. Д. О методологии численного моделирования процессов горения в высокоскоростной камере сгорания на основе OpenFOAM // Математическое моделирование. 2018. Т. 30, № 8 С. 32–50. DOI 10.31857/S023408790001171-2.
17. Кононов Д. С., Гидаспов В. Ю., Стрижак С. В. Упрощенные кинетические модели горения метана для расширения возможностей пакета OpenFOAM и физико-химических библиотек // Труды Института системного программирования РАН. 2021. Т. 33, № 6. С. 229–240.
18. Yakush S. E., Semenov O. Yu., Alexeev M. M. Premixed propane-air flame propagation in a narrow
7. Kachalina O. V., Akhmetova T. I. Opredelenie uglevodorodnykh mikroprimesei v etilene polimerizatsionnoi chistoty khromatograficheskimi metodami. *Herald of Technological University*. 2015;18(21):39–42. (In Russ.).
8. Belov M. L., Belov A. M., Gorodnichev V. A. et al. A laser control method for thin oil films on a water surface based on measurements of first-order and second-order derivatives of the reflection coefficient. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2011;24(7):568–571.
9. Pervukhin P. A. Methods and instruments of the finding drain of products of oils. *Technology of Technosphere Safety*. 2009;(6). URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_14868583\\_27783791.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_14868583_27783791.pdf) (accessed: 12.04.2024). (In Russ.).
10. Semenov O. Yu., Dyomko A. I. Liquid and gas optical flowmeter model development. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2141(1):050010. DOI 10.1063/1.5122153.
11. Burtsev S. A. Metodika rascheta ustroystv gazodinamicheskoi temperaturnoi stratifikatsii pri techenii realnogo gaza. *Thermal Processes in Engineering*. 2013;5(9):386–390. (In Russ.).
12. Bychkov V. V., Liberman M. A. Dynamics and stability of premixed flames. *Physics Reports*. 2000;325(4):115–237. DOI 10.1016/S0370-1573(99)00081-2.
13. Alexeev M. M., Semenov O. Yu., Yakush S. E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates. *Combustion Science and Technology*. 2019;191(7):1256–1275. DOI 10.1080/00102202.2018.1521394.
14. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., Krainov D. A. Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;696:012011. DOI 10.1088/1757-899X/696/1/012011.
15. Lebedev V. S., Skopintseva O. V., Savelyev D. I. Issledovanie ostatochnoi gazonosnosti uglia pri teplovom vozdeistvii. *Gornyi zhurnal*. 2014;(5):20–22. (In Russ.).
16. Zhukov V. T., Feodoritova O. B., Novikova N. D. On a computational technique for simulation of scramjet combustor by means of OpenFOAM. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2018;30(8):32–50. DOI 10.31857/S023408790001171-2. (In Russ.).
17. Kononov D. S., Gidasпов V. Y., Strijhak S. V. Simplified kinetic models of methane combustion to expand the capabilities of the OpenFOAM package and physicochemical libraries. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2021;33(6):229–240. (In Russ.).
18. Yakush S. E., Semenov O. Yu., Alexeev M. M. Premixed propane-air flame propagation in a narrow channel with obstacles. *Energies*. 2023;16(3):1516. DOI 10.3390/en16031516.

- channel with obstacles // *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 3. P. 1516. DOI 10.3390/en16031516.
19. Пашченко Д. И. CFD-моделирование горения синтетического топлива систем термохимической регенерации тепла // *Физика горения и взрыва*. 2018. Т. 54, № 6. С. 50–58. DOI 10.15372/FGV20180606.
19. Pashchenko D. I. Computational fluid dynamics modeling of combustion of synthetic fuel of thermochemical heat recuperation systems. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2018;54(6):50–58. DOI 10.15372/FGV20180606. (In Russ.).

### Информация об авторах

**М. М. Алексеев** – кандидат физико-математических наук, доцент.

**О. Ю. Семенов** – кандидат физико-математических наук, доцент.

### Information about the authors

**M. M. Alekseev** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

**O. Yu. Semenov** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

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](http://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 03.07.2024.