

ISSN 2413-7383

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Институт проблем
искусственного интеллекта»

ПРОБЛЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

2025 № 3 (38)

Международный
рецензируемый
научно-теоретический
журнал

ДОНЕЦК 2025

ISSN 2413-7383

Ministry of science and higher education
of the Russian Federation

The Federal State Budgetary
Scientific Institution «Institute of Problems
of Artificial Intelligence»

PROBLEMS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

2025 № 3 (38)

International
Peer-Reviewed
Scientific
Journal

DONETSK 2025

Редакционная коллегия
Международного рецензируемого
научно-теоретического журнала
«Проблемы искусственного интеллекта» /
International Peer-Reviewed Scientific Journal
“Problems of Artificial Intelligence”

Главный редактор
Владислав Юрьевич Шелепов, д.ф.-м.н., профессор
(Донецк)

Члены редколлегии

С. С. Анцыферов, д.т.н., профессор (Москва)
Л. К. Бабенко, д.т.н., профессор (Таганрог)
О. О. Варламов, д.т.н. (Москва)
О. В. Даринцев, д.т.н., профессор (Уфа)
Т. В. Ермоленко, к.т.н., доцент (Донецк)
С. Г. Капустян, д.т.н. (Таганрог)
К. Л. Метлов, д.ф.-м.н. (Донецк)
А. В. Мищенко, к.ф.-м.н. (Роканкур, Франция)
А. В. Нищенко, к.т.н. (Донецк)
В. Н. Павлыш, д.т.н., профессор (Донецк)
А. Л. Ронжин, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург)
К. Е. Румянцев, д.т.н., профессор (Таганрог)
И. С. Сальников, к.т.н. (Донецк)
А. С. Сигов, академик РАН, профессор, д.ф.-м.н. (Москва)
Ю. С. Харин, академик НАНБ, профессор, д.ф.-м.н. (Минск)
А. А. Харламов, д.т.н., профессор (Москва)
А. А. Шарипбаев, д.т.н., д.ф.-м.н. профессор (Алмата)
В. Ю. Шелепов, д.ф.-м.н., профессор (Донецк)

Ответственный редактор
Светлана Борисовна Иванова

И.о.директора федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Институт проблем искусственного
интеллекта» (ФГБНУ «ИПИИ»)

Ответственный секретарь

Валентина Николаевна Пигуз, н.с.
заведующий отделом компьютерных информационных
технологий ФГБНУ «ИПИИ»

Editorial Board
of the International Peer-Reviewed Scientific Journal
«Problemy iskusstvennogo intellekta» /
“Problems of Artificial Intelligence”

Chief editor
Vladislav Yurievich Shelepov, Dr. Phys.-Math., professor
(Donetsk)

Members of the Editorial Board

S. S. Antsyferov, Dr. Eng., Professor (Moscow)
L. K. Babenko, Dr. Eng., Professor (Taganrog)
O. O. Varlamov, Dr. Eng. (Moscow)
O.V. Darintsev, Dr. Eng., Professor (Ufa)
T. V. Ermolenko, PhD. Eng. (Donetsk)
S.G. Kapustyan, Dr. Eng. (Taganrog)
K. L. Metlov, Dr. D. (Donetsk)
A. V. Mishchenko, Ph.D. (Rocancourt, France)
A. V. Nitsenko, PhD. Eng (Donetsk)
V. N. Pavlysh, Dr. Eng., Professor (Donetsk)
A.L. Ronzhin Dr. Eng., Professor (St. Petersburg)
K. E. Rummyantsev, Dr. Eng., Professor (Taganrog)
I. S. Salnikov, PhD. Eng (Donetsk)
A. S. Sigov, Academician of the RAS, Professor (Moscow)
Y.S. Kharin, Academician of NASB, Professor (Minsk)
A. A. Kharlamov, Dr. Eng., Professor (Moscow)
A. A. Sharipbaev, Dr. Eng., Professor (Nur-Sultan)
V. Y. Shelepov, Dr. Phys.-Math., professor (Donetsk)

Managing Editor

Svetlana Borisovna Ivanova
Director of the Federal State Budgetary Scientific Institution
«Institute of Problems of Artificial Intelligence»
(FSBSI «IPAI»)

Executive Secretary

Valentina Nikolaevna the Department of Computer and
Information Technologies of the FSBSI «IPAI»

Свидетельство

о регистрации средства массовой информации
Серия ААА № 000114 от 14.03.2017, ISSN 2413-7383
**Международный рецензируемый
научно-теоретический журнал**
«Проблемы искусственного интеллекта» /
«Problems of Artificial Intelligence»
внесен в перечень
ВАК РФ от 25 сентября 2024 г.

В журнале публикуются
основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук
по специальностям:

- 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение
- 1.2.2. Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ
- 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов
и компьютерных сетей
- 2.3.6. Методы и системы защиты информации,
информационная безопасность
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы
- 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Рекомендовано к печати
Ученым советом ФГБНУ «ИПИИ»
Протокол № 6 от 12.09.2025 г.

Mass Media Registration Certificate

Series AAA № 000114 dated by 14.03.2017, ISSN 2413-7383
**International Peer-Reviewed Scientific Journal «Problemy
iskusstvennogo intellekta» /**
«Problems of Artificial Intelligence»
**is included into the VAK DPR list of peer-reviewed
scientific periodicals**
Order of the MES RF of September 25, 2024

The journal approves basic scientific results
of Ph.D. and Doctoral dissertations:
by specialties:

- 1.2.1. Artificial intelligence and machine learning
- 1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods
and software packages
- 1.2.3. Theoretical computer science, cybernetics
- 2.3.1. System analysis, information management and
processing, statistics
- 2.3.3. Automation and control of technological
processes and productions
- 2.3.5. Mathematical and software support of computing
systems, complexes and computer networks
- 2.3.6. Methods and systems of information protection,
information security
- 2.3.8. Computer Science and information processes
- 2.5.4. Robots, mechatronics and robotic systems

Recommended for publication
by the Academic Senate of the FSBSI «IPAI»
Protocol No 6 dated by 12.09.2025

Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта» /
«Problems of Artificial Intelligence», ISSN 2413-7383 зарегистрирован в:
научометрической базе **РИНЦ SCIENCE INDEX** (Лиц. договор № 306-05/2016 от 25 мая 2016 г.);
БД РЖ ВИНТИ РАН (Договор о сотрудничестве от 27 марта 2017 г.);
ICI Journals Master List Index Copernicus International (ICI) (17.09.2020 г.);
ЭБ Cyberleninka (Договор о сотрудничестве от 13 марта 2020 г.);
РНБ ФГБУ «Российская национальная библиотека», г. Санкт-Петербурга
(Лицензионный Договор от 29 августа 2023 г.)

УДК 519.4

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-4-10

Hao, H.

Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev
34 Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia

NAMED ENTITY RECOGNITION IN REFRACTORY HIGH-ENTROPY ALLOYS USING DEEP LEARNING

Хао Х.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

РАСПОЗНАВАНИЕ ИМЕНОВАННЫХ СУЩНОСТЕЙ В ТУГОПЛАВКИХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБИННОГО ОБУЧЕНИЯ

To address the challenges posed by the rapid growth of literature in the field of refractory high-entropy alloys (RHEAs) and the low efficiency of key information extraction, this paper proposes a semi-automated information extraction workflow. The method leverages a large language model for initial annotation, combined with manual review to construct a high-quality corpus. Based on this, a BERT-BiLSTM-CRF named entity recognition (NER) model is trained to automatically identify and extract information related to materials, processing, structure, and properties. The final results show that the NER model achieves an F1 score of 77% on the test set, significantly reducing manual curation costs and providing support for the construction of materials knowledge bases and data-driven research on new materials.

Key words: Refractory high-entropy alloys, named entity recognition, large language model, BERT-BiLSTM-CRF.

В ответ на быстрый рост объема литературы в области тугоплавких высокоэнтروпийных сплавов (RHEAs) и низкую эффективность извлечения ключевой информации в данной статье предлагается полуавтоматический рабочий процесс извлечения информации. Метод использует большую языковую модель для первоначальной разметки в сочетании с ручной проверкой для построения высококачественного корпуса. На этой основе обучена модель распознавания именованных сущностей BERT-BiLSTM-CRF для автоматического распознавания и извлечения информации о материалах, процессах, структуре и свойствах. Окончательные результаты показывают, что модель NER достигла оценки F1 в 77% на тестовом наборе, что значительно снизило затраты на ручную обработку и обеспечило поддержку для построения базы знаний о материалах и исследований новых материалов на основе данных.

Ключевые слова: тугоплавкие высокоэнтропийные сплавы, распознавание именованных сущностей, большая языковая модель, BERT-BiLSTM-CRF.

Introduction

Refractory high-entropy alloys (RHEAs) are regarded as potential key materials in fields such as aerospace and nuclear energy due to their exceptional performance under extreme conditions [1]. Compared to traditional nickel-based superalloys, RHEAs exhibit higher melting points, superior high-temperature stability, and outstanding corrosion and oxidation resistance. With the rapid advancement of research, the number of related scientific achievements and academic publications has grown exponentially. Since 2023 alone, thousands of relevant research articles have been added to international databases such as Web of Science and ScienceDirect.

However, a significant amount of critical information in these publications—such as alloy compositions, processing conditions, microstructures, and performance parameters—often exists in the form of unstructured text. Relying solely on manual reading and organization is not only inefficient but also prone to omissions, which has become a bottleneck limiting knowledge utilization and data-driven research.

The rapid development of natural language processing (NLP) technologies has provided new tools for knowledge extraction in materials science. Among these, named entity recognition (NER), as a core task, can convert proper nouns and key parameters in text into structured data, thereby supporting the construction of materials knowledge graphs and databases [2-4]. Previous studies have shown that deep learning-based NER methods (e.g., BiLSTM-CRF, BERT) have achieved remarkable progress in general text processing, and some domain-specific models (e.g., MatSciBERT, MatBERT) have also demonstrated advantages in processing materials science corpora [5], [6]. Nevertheless, tailored research for the specific system of RHEAs remains insufficient. The complexity of professional terminology, ambiguous entity boundaries, and diverse expression forms make general models difficult to apply directly, and there is a lack of efficient and systematic solutions.

At the same time, the emergence of large language models (LLM) has brought new opportunities for domain-specific text mining. LLM have demonstrated excellent performance in zero-shot and few-shot learning, yet they still face challenges related to accuracy and controllability in specialized domain applications. Therefore, the academic community has gradually begun to explore hybrid workflows that combine "LLM-assisted annotation, human review, and deep learning training" to enhance result reliability while maintaining efficiency [7-9].

1. Against this background, this study proposes an intelligent information extraction method for RHEAs. The innovations include:
2. Constructing an entity labeling system covering four dimensions: materials, processing, structure, and properties;
3. Designing an efficient annotation and modeling pipeline based on "LLM pre-annotation, human review, and deep learning training";
4. Building a high-quality corpus based on over 200 RHEA-related publications and training a BERT-BiLSTM-CRF model to achieve automated extraction of key information.

The research outcomes provide a data foundation for the construction of a RHEA knowledge base and the discovery of new materials.

Dataset Construction and Processing Methods

To construct a high-quality named entity recognition dataset tailored for the RHEAs domain, this study proposes a semi-automated workflow comprising: (1) literature preprocessing and candidate sentence construction; (2) entity annotation based on LLM followed by manual verification; (3) data post-processing and format standardization; and (4) NER model training and optimization.

The research data were sourced from over 200 English-language publications on RHEAs obtained from the Web of Science and ScienceDirect databases. The PDF files were first converted to TXT format using pdfminer, and sentence segmentation was performed based on SpaCy. Candidate sentences were then filtered using a predefined domain-specific terminology database for RHEAs, which includes keywords such as alloy names, processing techniques, and properties. Further cleaning operations involved removing noise such as garbled characters, headers and footers, author and journal information, as well as eliminating sentences with fewer than five words. Approximately 30,000 valid text units were ultimately obtained, with each sentence assigned a unique identifier.

To address the knowledge extraction requirements of RHEA-related texts, a four-category entity labeling system was designed, covering materials, processing, structure, and properties. The specific definitions are as follows:

- **MATERIALS:** Includes alloys, composites, coatings, and elemental symbols, such as TiZrHfNbAl_{0.5}, AlCoCrFeNi, Cr₂O₃, Co, and TiN thin film.
- **PROCESSING:** Encompasses preparation techniques, analytical methods, and related parameter descriptions, such as arc-melting, annealing at 1200 °C for 24 h, sintering, SEM, TEM, and EBSD.
- **STRUCTURE:** Covers phase composition and microstructural characteristics, such as BCC phase, Laves phase, dendritic structure, and grain boundary.
- **PROPERTIES:** Includes both qualitative and quantitative performance descriptions, where numerical values must be accompanied by units—e.g., corrosion resistance, 350 HV, 1100 MPa, and 15% elongation.

During the annotation phase, a large language model (deepseek-r1-distill-llama-70b) was employed for preliminary entity recognition. To ensure output quality, the prompts were meticulously designed to clarify annotation rules for each entity category, supplemented with positive and negative examples. The model-generated annotations were subsequently reviewed and refined manually to form a high-confidence corpus. This process effectively balanced efficiency and accuracy while significantly reducing manual effort. Specific annotation guidelines included:

- Material entities should be prioritized for annotation using full names or chemical formulas.
- Processing entities should include both the technique and associated parameter descriptions, while isolated numerical values were not annotated.
- Structure entities required complete and specific terminology, avoiding generic terms appearing in isolation.
- Property entities encompassed both qualitative and quantitative information, with the latter mandatorily including units.

In the data post-processing stage, the annotated results were automatically converted into start and end positions for each entity via scripting and standardized into the JSONL format. These were then imported into Label Studio for manual visual inspection and correction. Additionally, the data were transformed into the BIOES sequence labeling format to meet subsequent model training requirements. Throughout the entire dataset construction process, sentence identifiers were retained to ensure traceability and consistency.

An example of a single data entry is provided below:

```
{ "data": { "text": "NbMoTaWV and TaNbHfZrTi RHEAs with bcc structures were created for high-temperature applications, demonstrating great temperature strength and outstanding phase stability at 1473 K.", "annotations": [ { "result": [ { "type": "labels", "value": { "start": 35, "end": 48, "labels": ["STRUCTURE"] } }, { "type": "labels", "value": { "start": 118, "end": 138, "labels": ["PROPERTIES"] } }, { "type": "labels", "value": { "start": 155, "end": 170, "labels": ["PROPERTIES"] } }, { "type": "labels", "value": { "start": 174, "end": 180, "labels": ["PROCESSING"] } }, { "type": "labels", "value": { "start": 0, "end": 8, "labels": ["MATERIALS"] } }, { "type": "labels", "value": { "start": 13, "end": 23, "labels": ["MATERIALS"] } } ] } ] }
```

Experimental Design and Results

To ensure the effectiveness of model training, this study developed a preprocessing pipeline for the JSONL data. The key challenge involved resolving the alignment issue between subword tokenization and character-level annotations: the text and character offset annotations were parsed and converted into BIOES tag sequences. Using the BERT tokenizer's `offset_mapping`, a mapping was established to assign labels based on the first character of each token. Sequences were uniformly truncated or padded to a length of 256, converted into tensors, and then fed into the model.

For the model architecture, we adopted the well-established BERT-BiLSTM-CRF as the baseline NER model, leveraging pretrained semantic representations, bidirectional sequence modeling, and label dependency constraints to achieve efficient entity recognition. Training was conducted on approximately 17,000 annotated instances with the following hyperparameters: BERT-base, batch size = 16, learning rate = $5e-5$, and maximum sequence length = 256. The training process showed stable convergence, and early stopping was triggered at the 8th epoch. The model achieved a macro-average F1 score of 77% on an independent test set. Detailed performance metrics for each category are presented in Table 1. The training and validation loss curves (Figure 2) decreased smoothly and stabilized, indicating an effective training process without overfitting.

To further validate the practicality of the system, we selected two sentences from the literature that were not included in the training data. Here we present one example: "The $V_{2.5}Nb_1Mo_{0.5}Zr$ alloy after annealing at 1000 °C exhibited a predominant BCC phase and a yield strength of 1250 MPa."

The system output was:

"The $V_{2.5}Nb_1Mo_{0.5}Zr$ (MATERIALS) alloy after annealing at 1000 °C (PROCESSING) exhibited a predominant BCC phase (STRUCTURE) and a yield strength of 1250 MPa (PROPERTIES)."

The further extracted knowledge tuple was:

(MATERIALS, PROCESSING, STRUCTURE, PROPERTIES) = ($V_{2.5}Nb_1Mo_{0.5}Zr$, annealing@1000 °C, BCC, 1250 MPa)

This example demonstrates that the system can effectively automatically extract key information such as composition, processing, structure, and properties from complex technical texts and preserve it in a structured form, showing potential for direct application in knowledge base construction and scientific research analysis. The second test case is provided in Figure 3 for reference.

Entity	Precision	Recall	F1-score
MATERIALS	0.89	0.87	0.88
PROCESSING	0.73	0.72	0.72
STRUCTURE	0.67	0.78	0.72
PROPERTIES	0.69	0.63	0.66
Macro Avg	0.76	0.77	0.77
Weighted Avg	0.90	0.90	0.90

Table 1. Entity-level evaluation results

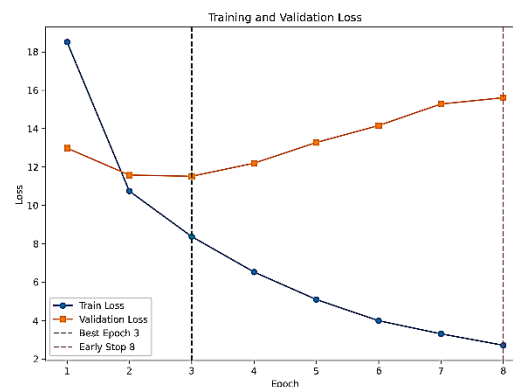


Figure 2 – Training and validation loss curves

```

=== Entity Recognition Result for Sentence 1 ===
Entity | Label
-----|-----
v2.5nb1mo0.5zralloy | MATERIALS
annealing | PROCESSING
1000°C | PROCESSING
bccphase | STRUCTURE
1250mpa | PROPERTIES
-----|-----
Original sentence: The V2.5Nb1Mo0.5Zr alloy after annealing at 1000°C exhibited a predominant BCC phase and a yield strength of 1250 MPa.

=== Entity Recognition Result for Sentence 2 ===
Entity | Label
-----|-----
ti6al4valloy | MATERIALS
heat-treated | PROCESSING
800°C | PROCESSING
950mpa | PROPERTIES
-----|-----
Original sentence: The Ti6Al4V alloy was heat-treated at 800°C, resulting in a tensile strength of 950 MPa.

```

Figure 3 – Entity recognition results for two test sentences from RHEA literature

Discussion

This study not only demonstrates the feasibility of semi-automated named entity recognition in the RHEA domain, but also highlights broader implications for scientific text mining and materials informatics. Compared with purely manual annotation, the proposed workflow substantially reduces the effort required from domain experts while maintaining high accuracy, thereby addressing the urgent need for efficient knowledge integration in rapidly growing scientific literature. By combining carefully designed prompts for large language models with rigorous human verification, the approach mitigates ambiguities associated with complex expressions such as alloy compositions, parameterized processing conditions, and microstructural descriptors. The resulting corpus of more than 17,000 annotated sentences is among the most comprehensive resources currently available for refractory alloys and can serve as a benchmark for future work in this field.

Equally important is the interdisciplinary nature of the workflow. Natural language processing specialists provide methodological expertise in model design and optimization, while materials scientists contribute domain knowledge to refine entity definitions and validate results. This synergy ensures that extracted information is both technically accurate and contextually meaningful for downstream applications, and exemplifies a practical model of human–AI cooperation in data-intensive research.

The structured information derived from the workflow also holds potential for applications beyond named entity recognition. It can serve as the foundation for constructing domain-specific knowledge graphs, support hypothesis generation, and reveal hidden links between composition, processing, structure, and properties. Furthermore, the integration of literature-derived knowledge with experimental and computational databases may ultimately enable closed-loop materials design. Thus, the contribution of this study extends beyond improving NER performance, offering a generalizable framework to accelerate data-driven research and innovation in advanced materials.

Conclusion

This work proposes a semi-automated workflow for information extraction from refractory high-entropy alloy literature, integrating large language models, human verification, and deep learning. The resulting BERT-BiLSTM-CRF model achieved an F1 score of 77%, confirming the effectiveness of the approach. The study contributes a large, high-quality annotated corpus and validates the feasibility of combining LLM-assisted annotation with domain expertise.

Future research will focus on extending the method to nested entity and relation extraction, constructing a comprehensive “composition–processing–structure–property” knowledge graph, and integrating literature mining with performance prediction in an intelligent design platform for advanced materials.

Author's Declaration

No funding was received for the research or authorship of this work.

The author employed DeepSeek-V3, a large language model, to assist in editing and improving the readability of the manuscript, including the refinement of Russian-language content. The ideas, content, and final expression remain the author's own work.

References

1. Miracle, D. B., Senkov, O. N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017, 122: 448–511.
2. Hearst, M. A. Automatic acquisition of hyponyms from large text corpora. *Proceedings of the 14th Conference on Computational Linguistics (COLING)*. 1992: 539–545.
3. Lafferty, J., McCallum, A., Pereira, F. Conditional random fields: Probabilistic models for segmenting and labeling sequence data. *Proceedings of the 18th International Conference on Machine Learning (ICML)*. 2001: 282–289.
4. Huang, Z., Xu, W., Yu, K. Bidirectional LSTM-CRF models for sequence tagging. *arXiv preprint. arXiv:1508.01991*, 2015.
5. Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., Toutanova, K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *Proceedings of NAACL-HLT*. 2019: 4171–4186.
6. Kim, E., Huang, K., Jegelka, S., Olivetti, E. Virtual screening of inorganic materials synthesis parameters with deep learning. *npj Computational Materials*. 2017, 3: 53.
7. Trewartha, A., Dagdelen, J., Huo, H., Cruse, K., Riebesell, J., Jain, A., Ceder, G., Persson, K. A. Quantifying the advantage of domain-specific pre-training on named entity recognition tasks in materials science. *Patterns*. 2022, 3(4): 100488.
8. Gupta, T., Trewartha, A., Cruse, K., Dagdelen, J., Huo, H., Ceder, G., Jain, A., Persson, K. A. MatSciBERT: A materials domain language model for text mining and information extraction. *npj Computational Materials*. 2022, 8: 102.
9. Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., et al. Language models are few-shot learners. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. 2020, 33: 1877–1901.

RESUME

Hao, H.

Named Entity Recognition in Refractory High-Entropy Alloys Using Deep Learning

Background: Refractory high-entropy alloys (RHEAs) have attracted increasing attention in aerospace and nuclear engineering due to their exceptional thermal stability and mechanical performance. The rapid growth of publications in this field presents challenges for systematically extracting critical knowledge, as information on alloy compositions, processing routes, microstructures, and properties is often embedded in unstructured text.

Materials and methods: To address this challenge, a semi-automated workflow was developed. Large language models were employed for initial entity annotation, followed by expert verification to ensure data quality. A domain-specific dataset was compiled from over 200 English-language papers, covering four entity types: materials, processing, structures, and properties. Subsequently, a BERT-BiLSTM-CRF model was trained for named entity recognition (NER).

Results: The workflow produced approximately 17,000 annotated sentences. Evaluation demonstrated that the trained model achieved an F1-score of 77% on the test set. The system

effectively identified alloy names, processing parameters, structural characteristics, and performance indicators, confirming its reliability for automatic knowledge extraction.

Conclusion: The proposed method substantially reduces manual annotation effort while ensuring accurate extraction of domain-specific knowledge. It provides a solid foundation for building materials knowledge bases and supports data-driven approaches for the discovery of new alloys.

РЕЗЮМЕ

Хао Х.

Распознавание именованных сущностей в тугоплавких высокоэнтропийных сплавах с использованием глубинного обучения

Тугоплавкие высокоэнтропийные сплавы (RHEAs) привлекают все большее внимание в аэрокосмической и ядерной областях благодаря своей исключительной термической стабильности и механическим характеристикам. Быстрый рост публикаций в этой области создает проблемы для систематического извлечения критически важных знаний, поскольку информация о составе сплавов, методах обработки, микроструктуре и свойствах часто представлена в неструктурированном текстовом виде.

Для решения этой задачи был разработан полуавтоматизированный рабочий процесс. Большие языковые модели использовались для первоначальной разметки сущностей с последующей экспертной верификацией для обеспечения качества данных. Специализированный набор данных был составлен из более чем 200 англоязычных статей и охватил четыре типа сущностей: материалы, обработка, структуры и свойства. Затем была обучена модель BERT-BiLSTM-CRF для распознавания именованных сущностей (NER).

В результате работы процесса было размечено приблизительно 17 000 предложений. Оценка показала, что обученная модель достигла F1-показателя в 77% на тестовом наборе. Система эффективно идентифицировала названия сплавов, параметры обработки, структурные характеристики и показатели свойств, что подтвердило её надежность для автоматического извлечения знаний.

Предложенный метод существенно сокращает усилия по ручной разметке при обеспечении точного извлечения доменно-специфичных знаний. Он обеспечивает прочную основу для создания баз знаний о материалах и поддерживает подходы, основанные на данных, для открытия новых сплавов.

Hao Hu – PhD student, Samara National Research University. Research fields: Machine Learning, Metallic Materials, Metallurgical Engineering. Tel.: +86 18104860834 (China) / +7 980 908 3470 (Russia). E-mail: 641229879@qq.com ORCID: 0009-0004-2902-2593

Статья поступила в редакцию 15.08.2025.

УДК 512.554.1

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-11-18

Д. И. Дзебоев

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
109028, Россия, г. Москва, Покровский бульвар, 11

ТЕНЗОРИАЛЬНАЯ АЛГЕБРА

D. I. Dzeboev

National Research University "Higher School of Economics"
109028, 11 Pokrovsky Boulevard, Moscow

TENSORIAL ALGEBRA

Цель работы заключается в разработке и обосновании нового универсального метода задания операции умножения, применимого для широкого класса алгебраических систем. Решение основано на введении тензориальной алгебры, где результат произведения определяется через тензор алгебры третьего ранга. Такой подход позволяет задавать или обучать правила умножения в произвольных алгебрах и обеспечивает сохранение размерности пространства при операциях. Показано, что предложенный метод универсализирует гиперкомплексные системы и открывает перспективы применения в теории неассоциативных алгебр, а также в задачах математического моделирования и вычислительной алгебры.

Ключевые слова: тензориальная алгебра, гиперкомплексные числа, неассоциативные алгебры, структуры умножения, алгебраические системы

The aim of this study is to develop and substantiate a new universal method for defining multiplication, applicable to a wide class of algebraic systems. The proposed solution is based on the introduction of Tensorial Algebra, where the product is determined through a third-order algebra tensor. This approach makes it possible to specify or to learn multiplication rules in arbitrary algebras and ensures the preservation of dimensionality in operations. It is shown that the proposed method generalizes hypercomplex systems and opens up prospects for applications in the theory of non-associative algebras, as well as in problems of mathematical modeling and computational algebra.

Key words: tensorial algebra, hypercomplex numbers, non-associative algebras, multiplication structures, algebraic systems

Введение

Современное развитие алгебраических структур выходит за рамки классических числовых систем, таких как поле вещественных или комплексных чисел. Расширения в виде кватернионов, октанионов и более общих гиперкомплексных систем демонстрируют богатство и гибкость алгебраических построений, в которых операция умножения не обязательно коммутативна или ассоциативна, но при этом сохраняется внутренняя логика замкнутости и линейной зависимости в фиксированном базисе. Одним из актуальных направлений является формализация обобщённых операций умножения, допускающих обучение или адаптацию к произвольной структуре данных.

В настоящей работе вводится и исследуется новая алгебраическая структура — Тензориальная алгебра, зарегистрированная в качестве программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент) под номером 2025667782 [1]. Структурно, тензориальная алгебра представляет собой алгебру с заданным тензором умножения третьего ранга $T\{ijk\}$, определяющим результат произведения любых двух базисных элементов в терминах линейной комбинации остальных базисов. Такая конструкция позволяет формально охватить множество гиперкомплексных алгебр и их обобщений, где законы умножения определяются не аналитически, а конструктивно — через таблицу или тензор структуры [11], [12], [13].

Принципиальное отличие тензориальной алгебры от традиционных формальных алгебр заключается в том, что её структура может быть не только задана вручную, но и **обучена** на эмпирических данных [3]. Для этого предложена реализация в виде нейросетевой архитектуры, в которой тензор структуры рассматривается как обучаемый параметр. Таким образом, становится возможным воспроизводить или аппроксимировать неизвестные законы гиперкомплексного умножения, восстанавливая их по наблюдаемым результатам, что делает тензориальную алгебру применимой не только в теоретико-алгебраическом анализе, но и в задачах машинного обучения, обработки сигналов и символьных вычислений.

1 Алгебраическая природа тензориальной алгебры и введение операции умножения

В основе любой алгебраической структуры лежат бинарные операции, определяющие внутренние правила взаимодействия элементов множества. В традиционных числовых алгебрах (например, в $\mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{H}$) [5] операция сложения определяется покомпонентно и сохраняет линейную структуру: сумма элементов осуществляется по соответствующим координатам в выбранном базисе. Именно такое поведение лежит в основе линейных пространств и не вызывает затруднений при обобщении.

Ключевым затруднением при построении новых алгебраических объектов всегда оставалась операция умножения. В классической матричной алгебре, как и в тензорном исчислении, умножение определяется либо композицией линейных отображений, либо через Эйнштейнову свёртку [2] — суммирование по совпадающим индексам. Однако оба подхода ориентированы на внешнюю структуру: умножение матриц, тензоров или операторов, как правило, изменяет размерность объекта и не гарантирует замкнутости в том же пространстве, в котором производились операции. Это нарушает фундаментальный принцип замкнутости, необходимый для построения кольца или алгебры в строгом смысле.

Тензорная алгебра устраняет это ограничение путём явного задания операции умножения на базисе. Пусть $\{e_1, \dots, e_n\}$ — базис конечномерного векторного пространства V . В тензорной алгебре мы задаём операцию умножения на этом базисе с помощью **тензора структуры** $T\{ijk\}$, такого что:

$$e_i \otimes e_j = \sum_{k=1}^n T_{ijk} e_k$$

Где \otimes задаётся, как символ тензорного умножения.

2 Полный порядок умножения двух исходных векторов:

Для двух тензоров a и b произвольных рангов и размерностей общей размерности n (равной друг другу), мы выполняем следующие операции для умножения:

2.1. Выравнивание в вектор

$$\vec{a} = \text{flatten}(A) \in \mathbb{R}^D, \quad \vec{b} = \text{flatten}(B) \in \mathbb{R}^D, \quad D = \prod_{i=1}^n d_i$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

На первом этапе тензорного умножения мы рассматриваем два тензора a и b , заданных в некотором тензорном пространстве общей размерности n . Необходимо выровнять их в плоские вектора той же размерности и представить в координатной форме.

2.2. Представление a и b , как линейной комбинации базисных тензоров

Базис пространства

$$\mathbf{e} = \{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n\}$$

Тензоры в этом базисе [4]

$$\mathbf{a} = \sum_{i=1}^n a_i \mathbf{e}_i = a_1 \mathbf{e}_1 + a_2 \mathbf{e}_2 + \dots + a_n \mathbf{e}_n$$

$$\mathbf{b} = \sum_{j=1}^n b_j \mathbf{e}_j = b_1 \mathbf{e}_1 + b_2 \mathbf{e}_2 + \dots + b_n \mathbf{e}_n$$

2.3. Произведение тензоров, как формальное произведение образующих их линейных комбинаций базисных векторов

$$\mathbf{a} \otimes \mathbf{b} = \left(\sum_{i=1}^n a_i \mathbf{e}_i \right) \otimes \left(\sum_{j=1}^n b_j \mathbf{e}_j \right) =$$

$$= (a_1 \mathbf{e}_1 + a_2 \mathbf{e}_2 + \dots + a_n \mathbf{e}_n) \otimes (b_1 \mathbf{e}_1 + b_2 \mathbf{e}_2 + \dots + b_n \mathbf{e}_n)$$

2.4. Раскрытие скобок из пункта 3. Произведение тензоров, как сумма одночленов из 4 множителей (2 коэффициента и два базисных тензора) [7]

$$\mathbf{a} \otimes \mathbf{b} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i b_j (\mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j)$$

$$= a_1 b_1 (\mathbf{e}_1 \otimes \mathbf{e}_1) + a_1 b_2 (\mathbf{e}_1 \otimes \mathbf{e}_2) + \dots + a_n b_n (\mathbf{e}_n \otimes \mathbf{e}_n)$$

2.5. Произведение тензоров как поэлементное произведение внешнего произведения координатных строчек и внешнего произведения базисных тензоров

$$\mathbf{a} \otimes \mathbf{b} = (\mathbf{a} \otimes \mathbf{b}) \circ (\mathbf{e} \otimes \mathbf{e})$$

2.6. Тензор тензориальной алгебры, как внешнее произведение базисных тензоров

$$\mathcal{T} = \mathbf{e} \otimes \mathbf{e}$$

Суть этого тензора в том, чтобы для каждой пары базисных тензоров вручную задать их результат, как линейную комбинацию всех базисных тензоров

К примеру, ячейка T_{ij} будет отвечать за результат произведения базисного тензора \mathbf{e}_i на базисный тензор \mathbf{e}_j и содержать n значений, являющихся координатами результата перемножения тензоров \mathbf{e}_i и \mathbf{e}_j в базисе \mathbf{e}

$$T_{ij} = \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j = T_{ij1} \mathbf{e}_1 + T_{ij2} \mathbf{e}_2 + \dots + T_{ijn} \mathbf{e}_n$$

Таким образом, раз мы задали результат умножения базисных тензоров, мы можем вернуться к задаче вычисления произведения общих тензоров, поскольку в ней единственной нерешённой задачей было именно умножение базисных тензоров

2.7. Представление умножения тензоров \mathbf{a} и \mathbf{b} в виде Эйнштейновой свёртки

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \otimes \mathbf{b} &= (\mathbf{a} \otimes \mathbf{b}) \circ (\mathbf{e} \otimes \mathbf{e}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i b_j (\mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i b_j \sum_{k=1}^n T_{ijk} \mathbf{e}_k = \\ &= \sum_{k=1}^n \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i b_j T_{ijk} \right) \mathbf{e}_k \\ \mathbf{a} \otimes \mathbf{b} &= \text{einsum}("i, j, ijk \rightarrow k", \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathcal{T}) \end{aligned}$$

Функционал Тензориальной алгебры также программно написан в Torch, где объявлен класс `TensorialAlgebra`, формально являющийся нейросетью, который при объявлении принимает размерность n , а также тензор алгебры $n \times n \times n$, или если его нет, инициализирует его нулями. Тензор может быть передан в `torch` или `numpy` массиве.

Создана функция `forward`, которая принимает два тензора размерности n , выравнивает их, производит умножение по правилам тензориальной алгебры и возвращает к исходному рангу.

В режиме инференса производится тензориальное умножение, а в режиме обучения, поскольку, опять же, формально и фактически, класс `TensorialAlgebra` – нейросеть с обучаемым линейным оператором Тензора алгебры, в объекте доступно автоматическое дифференцирование и подстройка тензора алгебры под необходимые примеры. К примеру, возможно задать датасет результатов умножения чисел в пространстве вещественных, комплексных чисел, кватернионов, октанионов и любых произвольных гиперкомплексных или иных алгебраических структур, и, даже не зная правил умножения в этом пространстве, автоматически подобрать такую алгебру, которая будет удовлетворять правилам с помощью нейросети.

3. Свойства

3.1. Структурные свойства с точки зрения теории групп и алгебр

Рассмотрим множество V , замкнутое по сложению и умножению, с операцией умножения, определённой через тензор \mathcal{T} . Тогда:

$(V, +)$ — абелева группа, как векторное пространство.

Если операция умножения обладает распределительным свойством:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \otimes (\mathbf{b} + \mathbf{c}) &= \mathbf{a} \otimes \mathbf{b} + \mathbf{a} \otimes \mathbf{c} \\ (\mathbf{a} + \mathbf{b}) \otimes \mathbf{c} &= \mathbf{a} \otimes \mathbf{c} + \mathbf{b} \otimes \mathbf{c} \end{aligned}$$

то V образует кольцо (ring).

При наличии единичного элемента $e \in V$, такого что $e \otimes x = x \otimes e = x$ — структура становится унитарным кольцом.

Если дополнительно умножение ассоциативно, т.е. $(a \otimes b) \otimes c = a \otimes (b \otimes c)$, то V — ассоциативная алгебра.

В случае неассоциативного, но альтернативного или гибкого умножения, возможна классификация в рамках неассоциативных алгебр: альтернативных, гибких, Ли-алгебр и других.

3.2. Сравнение с гиперкомплексными системами

Во всех гиперкомплексных числовых системах [9], [10] — например, в кватернионах \mathbb{H} , где базис $\{1, i, j, k\}$ и заданы правила типа $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$ — правила умножения фиксированы. Тензориальная алгебра же универсализирует этот подход: любая система умножения может быть задана как конкретная реализация тензора T .

Это позволяет:

- задавать произвольные гиперкомплексные алгебры, не выводя аналитически таблицу умножения,
- обучать структуру умножения по примеру, что невозможно в классических определениях.

3.3. Функциональное преимущество

Таким образом, основное отличие тензориальной алгебры заключается не в форме элементов, а в возможности целенаправленно задавать или подбирать структуру операции умножения, не нарушая замкнутость пространства. Эта операция не сводится к известным линейным, билинейным или тензорным операциям, и не требует формулировки в терминах линейных отображений.

4. Применение в теоретической физике

Тензориальная алгебра открывает перспективы применения в фундаментальной физике, где традиционно используются тензорные методы и различные формы обобщённой алгебры. В частности, в работе Ч. Миснера, К. Торна и Дж. Уилера подробно рассматривается использование тензорного исчисления для описания кривизны пространства-времени, построения тензора энергии-импульса и анализа динамики гравитационных полей [6]. Предложенная в данной статье тензориальная алгебра обеспечивает новый формализм, который позволяет не только воспроизводить эти конструкции, но и расширять их, задавая операции умножения в замкнутом пространстве без изменения размерности.

Другим направлением является связь с геометрической алгеброй, предложенной Д. Хестенесом [8]. В его подходе классическая механика переопределяется через язык клиффордовых структур, что позволяет более естественно описывать вращения, симметрии и динамику. Тензориальная алгебра в этом контексте может рассматриваться как дальнейшее обобщение: она предоставляет универсальный способ задания операций, которые могут быть обучаемыми и адаптивными, тем самым объединяя строгость алгебраического описания и гибкость вычислительных методов.

5. Применение в практических системах

Предлагаемый метод тензориальной алгебры имеет междисциплинарный потенциал и может использоваться в различных направлениях искусственного интеллекта и математического моделирования. В частности, важной областью применения

является построение экспертных систем на основе физико-математических моделей. Так, в исследовании В. С. Солода показано, что внедрение формализованных моделей сортопрокатного производства позволяет интегрировать методы искусственного интеллекта в промышленную практику и повышать эффективность проектирования [14]. Введение тензориальной алгебры обеспечивает единый язык описания таких моделей и расширяет возможности их согласования и обучения.

В прикладных задачах компьютерного зрения и обработки изображений ключевым является построение строгих математических моделей цифровых структур. Работа А. Е. Покинтелицы подчеркивает значимость формализации полутоновых изображений для извлечения информации и обработки данных [15]. Тензориальная алгебра позволяет не только описывать такие модели, но и обобщать их, задавая новые правила операций над изображениями в тензорной форме.

Кроме того, метод открывает перспективы в развитии глубокого обучения и трансформерных архитектур. В исследовании Т. В. Ермоленко и Р. С. Хакимова отмечается, что применение моделей глубокого обучения для задачи перекрёстной геолокализации связано с проблемами выбора архитектур и обработки многомерных данных [16]. Тензориальная алгебра может выступить универсальным средством задания и обучения правил взаимодействия признаков, что обеспечивает новые возможности для построения интерпретируемых и адаптивных нейросетевых систем.

Таким образом, предложенный подход демонстрирует актуальность не только в теории неассоциативных алгебр, но и в практических областях — от промышленных экспертных систем до компьютерного зрения и глубокого обучения.

Заключение

В данной работе представлена и обоснована новая алгебраическая структура — тензориальная алгебра, обобщающая гиперкомплексные числовые системы посредством конструктивного задания операции умножения на базисе через тензор структуры третьего ранга. В отличие от традиционных подходов, где умножение задано формулами или таблицами, тензориальная алгебра позволяет задать или обучить структуру алгебры на основе эмпирических данных, обеспечивая тем самым универсальность, замкнутость и программную реализуемость.

Ключевым отличием предложенной алгебры является сохранение размерности пространства при операции умножения, что делает её замкнутой и пригодной для построения кольцевых и алгебраических структур над конечномерными векторными пространствами. Умножение произвольных тензоров сводится к линейной комбинации умножений базисных элементов, с использованием заданного тензора структуры.

Разработанная модель реализована в виде нейросетевой архитектуры, позволяющей как вычислять произведения в фиксированной алгебре, так и подстраивать её структуру под данные. Это открывает перспективы для применения тензориальной алгебры в задачах обучения представлений, генерации новых числовых систем, автоматического синтеза алгебраических операций, а также в смежных областях, таких как физика, криптография, символьная математика и компьютерное моделирование.

В перспективе планируется расширить теоретическое обоснование, классифицировать возможные типы тензоров структуры, исследовать алгебраические свойства получаемых систем (ассоциативность, наличие единицы, делителей нуля и т.д.), а также реализовать интеграцию тензориальной алгебры в архитектуры глубокого обучения.

Список литературы

1. *Регистрация программы для ЭВМ. Тензорная алгебра*: № 2025667782. Зарегистрировано в ФИПС. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025667782&TypeFile=html (дата обращения: 05.07.2025).
2. Einstein A. The Foundation of the General Theory of Relativity. *Annalen der Physik*. 1916. Vol. 49, No. 7. P. 769–822.
3. Беловодский В. Н. Об интерполяции и аппроксимации функций с использованием нейронных сетей. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 3 (34). С. 4-19. [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3\(34\)-1.html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3(34)-1.html)
4. Greub W. *Multilinear Algebra*. New York: Springer-Verlag, 1978. 456 p.
5. Penrose R. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. London: Vintage, 2004. 1136 p.
6. Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A. *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman, 1973. 1279 p.
7. Lang S. *Algebra*. 3rd ed. New York: Springer, 2002. 914 p.
8. Hestenes D. *New Foundations for Classical Mechanics*. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1986. 734 p.
9. Hamilton W. R. *Lectures on Quaternions*. Dublin: Hodges and Smith, 1853. 736 p.
10. Baez J. C. The Octonions. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 2002. Vol. 39, No. 2. P. 145–205.
11. Lurie J. *Higher Topos Theory*. Princeton: Princeton University Press, 2009. 944 p.
12. Mac Lane S. *Categories for the Working Mathematician*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. 314 p.
13. Lee J. M. *Introduction to Smooth Manifolds*. 2nd ed. New York: Springer, 2013. 708 p.
14. Солод В. С. Физико-математическая модель для разработки экспертной системы сортопрокатного производства. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 3 (34). С. 20-28. [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3\(34\)-2.html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3(34)-2.html)
15. Покинтелица А. Е. Содержательные основы математической модели цифрового полутонового изображения. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 3 (34). С. 36-43. [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3\(34\)-4.html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3(34)-4.html)
16. Ермоленко Т. В., Хахимов Р. С. К вопросу о применении глубокого обучения для задачи перекрёстной геолокализации. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 4 (35). С. 4-15. [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/4\(35\)-1.html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/4(35)-1.html)

References

1. Computer Program Registration. Tensorial Algebra: No. 2025667782. Registered with FIPS. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025667782&TypeFile=html (accessed: 05.07.2025).
2. Einstein A. The Foundation of the General Theory of Relativity // *Annalen der Physik*. 1916. Vol. 49, No. 7. P. 769–822.
3. Belovodskiy V. N. On Interpolation and Approximation of Functions Using Neural Networks // *Problems of Artificial Intelligence*. 2024. No. 3(34). P. 4–19. Available at: [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3\(34\)-1.html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3(34)-1.html)
4. Greub W. *Multilinear Algebra*. – New York: Springer-Verlag, 1978. 456 p.
5. Penrose R. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. London: Vintage, 2004. 1136 p.
6. Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A. *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman, 1973. 1279 p.
7. Lang S. *Algebra*. 3rd ed. New York: Springer, 2002. 914 p.
8. Hestenes D. *New Foundations for Classical Mechanics*. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1986. 734 p.
9. Hamilton W. R. *Lectures on Quaternions*. Dublin: Hodges and Smith, 1853. 736 p.
10. Baez J. C. The Octonions // *Bulletin of the American Mathematical Society*. 2002. Vol. 39, No. 2. P. 145–205.
11. Lurie J. *Higher Topos Theory*. Princeton: Princeton University Press, 2009. 944 p.
12. Mac Lane S. *Categories for the Working Mathematician*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. 314 p.
13. Lee J. M. *Introduction to Smooth Manifolds*. 2nd ed. New York: Springer, 2013. 708 p.
14. Solod V. S. Physico-Mathematical Model for the Development of an Expert System for Rolling Production // *Problems of Artificial Intelligence*. 2024. No. 3(34). P. 20–28. Available at: [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3\(34\)-2.html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3(34)-2.html)
15. Pokintelitsa A. E. Substantive Foundations of the Mathematical Model of a Digital Halftone Image // *Problems of Artificial Intelligence*. 2024. No. 3(34). P. 36–43. Available at: [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3\(34\)-4.html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/3(34)-4.html)
16. Ermolenko T. V., Khakimov R. S. On the Application of Deep Learning to the Problem of Cross-Geolocation // *Problems of Artificial Intelligence*. 2024. No. 4(35). P. 4–15. Available at: [http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/4\(35\)-1.html](http://paijournal.guiaidn.ru/ru/2024/4(35)-1.html)

RESUME

D. I. Dzeboev

Tensorial Algebra

Background: The development of hypercomplex systems such as quaternions and octonions has demonstrated the richness of algebraic structures, but their multiplication rules are fixed and limited in scope. The need arises for a generalized formalism that can unify these systems and extend beyond them.

Materials and methods: The proposed framework, Tensorial Algebra, defines multiplication through a third-order algebra tensor. The method is based on flattening tensors into vectors, forming their outer product, and applying Einstein-style contraction with the algebra tensor. This approach makes it possible to explicitly specify or learn multiplication rules in arbitrary finite-dimensional algebras.

Results: It was shown that tensorial algebra generalizes hypercomplex systems and preserves the dimensionality of the algebraic space during multiplication. The model is implemented in a neural network form, allowing both direct computations and adaptive learning of multiplication structures.

Conclusion: Tensorial algebra provides a universal algebraic framework for defining multiplication in finite-dimensional non-associative algebras. This opens perspectives for further classification of algebraic varieties, as well as for applications in symbolic computation and mathematical modeling.

РЕЗЮМЕ

Д. И. Дзебоев

Тензоральная алгебра

Предпосылки: Развитие гиперкомплексных систем, таких как кватернионы и октавионы, показало богатство алгебраических структур, однако их правила умножения фиксированы и ограничены. Возникает необходимость в обобщённом формализме, который может объединить эти системы и выйти за их пределы.

Материалы и методы: Предложенная структура — тензоральная алгебра — задаёт умножение через тензор алгебры третьего ранга. Метод основан на выравнивании тензоров в векторы, построении их внешнего произведения и выполнении эйнштейновой свёртки с тензором алгебры. Такой подход позволяет явно задавать или обучать правила умножения в произвольных конечномерных алгебрах.

Результаты: Показано, что тензоральная алгебра обобщает гиперкомплексные системы и сохраняет размерность алгебраического пространства при умножении. Модель реализована в виде нейросетевой архитектуры, что позволяет как выполнять прямые вычисления, так и адаптивно обучать структуру умножения.

Вывод: Тензоральная алгебра представляет универсальный алгебраический аппарат для задания умножения в конечномерных неассоциативных алгебрах. Это открывает перспективы дальнейшей классификации алгебраических многообразий, а также применения в символьных вычислениях и математическом моделировании.

Дзебоев Д. И. – стажёр-исследователь, НИУ ВШЭ, Факультет компьютерных наук, Лаборатория моделирования и управления сложными системами, 109028, Москва, Покровский бульвар, 11, тел +7(965)199-29-44, dzeboev.daniil@gmail.com. *Область научных интересов:* Тензоральная алгебра, гиперкомплексные числа, неассоциативные структуры, искусственный интеллект, нейронные сети. Orcid 0009-0008-4004-8750

Статья поступила в редакцию 03.07.2025.

С. М. Селякова¹, А. В. Ниценко², Н. К. Базиян-Кухто³

¹ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28

²ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта»
283048, г. Донецк, ул. Артёма, д. 118-б

³ФГБОУ ВО «Донецкий государственный медицинский университет им. М. Горького»
283003, г. Донецк, проспект Ильича, д. 16.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ЛЕЧЕНИИ БОЛЬНЫХ С КРИТИЧЕСКОЙ ИШЕМИЕЙ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

S. M. Selyakova¹, A. V. Nicenko², N. K. Baziyani-Kuhto³

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University"

400005, Volgograd, Lenin avenue, 28.

²Federal Budgetary State Scientific Institution "Institute of Artificial Intelligence Problems"

283048, Donetsk, Artema str., 118-b.

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Donetsk State Medical University named after M. Gorky"

283003, Donetsk, Ilyicha avenue, 16.

INFORMATION SUPPORT FOR THE DECISION-MAKING PROCESS IN THE TREATMENT OF PATIENTS WITH CRITICAL LOWER LIMB ISCHEMIA

Статья посвящена разработке системы поддержки принятия решений «Ангиоэксперт» с целью повышения эффективности процесса лечения больных с критической ишемией нижних конечностей. Данная система позволяет оптимизировать хирургическую тактику и минимизировать риски возникновения осложнений и летальности. В работе представлены основные функции, общая структура, функциональная модель и главные окна пользовательского интерфейса системы. Рассмотрены задачи принятия врачебных решений, которые решаются на основе её управляющих алгоритмов.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, система поддержки принятия решений, ангиохирургия, критическая ишемия нижних конечностей.

This article presents the development of the "AngioExpert" decision support system (DSS), aimed at improving the efficacy of treatment for patients with critical limb ischemia (CLI). The system facilitates optimization of surgical management strategies and mitigates risks associated with postoperative complications and mortality. The paper details the system's core functionality, overall architecture, functional model, and key user interface components. It further examines the specific clinical decision-making tasks addressed by the system's algorithms.

Key words: clinical decision support, decision support system (DSS), vascular surgery, critical limb ischemia (CLI).

Введение

Лечение больных с хронической ишемией нижних конечностей является одной из актуальных международных социальных и медицинских проблем, которая «объединяет в себе группу заболеваний кровеносных сосудов, приводящих к уменьшению притока крови по артериям в пораженную конечность из-за их сужения (стеноз) или полной закупорки (окклюзия)» [1]. Критическая ишемия нижних конечностей (КИНК) является наиболее опасным исходом хронической артериальной недостаточности. КИНК приводит к высокому уровню инвалидизации, утрате трудоспособности, высокой летальности и экономическим затратами на лечение, а также составляет 56,2% наблюдений в структуре госпитальной заболеваемости хронической ишемией. Число людей, страдающих этим заболеванием, в России не менее 1,5 миллиона, следовательно, критическую ишемию обнаруживают у 100000 граждан, и это приводит к 20000-40000 ампутаций каждый год [2].

Наиболее эффективным методом лечения КИНК является выполнение последовательных вмешательств – сосудистой реконструкции и санации гнойно-некротического очага. В настоящее время широко используются следующие операции у больных с КИНК: транслюминальная баллонная ангиопластика; внутриартериальное стентирование; бедренно-подколенное шунтирование; профундопластика. Каждая из вышеперечисленных операций имеет свои показания и отдалённые результаты, учитывая локализацию и протяженность поражения [3].

Однако проведение реконструктивно-восстановительных операций на сосудах всё равно не может гарантировать успешного и своевременного заживления язвенно-некротических дефектов в дистальных отделах конечностей, а также сохранения конечностей. Благодаря накопленному опыту многолетней медицинской практики и росту технических возможностей, подавляющее количество запущенных случаев заболевания КИНК могут поддаваться лечению за счёт адекватного и всеобъемлющего диагностического подхода, включающего в себя методы визуализации, клинического наблюдения и комплексного анализа признаков заболевания [4-6].

С учетом того, что любой лечебный процесс обладает следующими особенностями: ошибочностью, неоднозначностью, динамичностью, неполнотой и противоречивостью исходных данных, эффективность лечения заболеваний, в первую очередь, зависит от опыта и знаний специалистов в конкретной области медицины. В связи с этим возникает естественное желание передать это умение ЭВМ, зафиксировать его в специальных системах с целью повышения качества и обоснованности решения соответствующих задач в сжатые сроки. В результате того, что применение экспертных систем и систем поддержки принятия решений на практике позволяет значительно повысить скорость принятия решений в условиях ограниченности, субъективности и неточности информации, актуально применить данные подходы для повышения эффективности лечебно-диагностического процесса также и при КИНК.

Постановка задачи исследования: разработать систему поддержки принятия решений (СППР) при лечении пациентов с КИНК, которая позволит повысить эффективность лечебно-диагностического процесса с учётом физиологических особенностей конкретного пациента и его истории болезни.

Обзор существующих информационных медицинских систем

Непрерывное развитие вычислительной техники расширяет потенциальные возможности медицинских информационных систем, которые в течение длительного времени применяют для диагностики и лечения различных заболеваний. Данные системы строятся на основе нескольких методов обработки информации: построение дерева решений, статистическая обработка данных и использование элементов искусственного интеллекта [7]. Перспективным является развитие методики построения самообучающихся медицинских экспертных систем принятия решений, которые должны удовлетворять следующим требованиям: индивидуализация; динамическое развитие; возможность перенастройки при резком изменении условий; способность к экстраполяции результата; возможность конструирования с нуля конечным пользователем; «нечёткий» характер результата или предоставление нескольких вариантов решения; ответственность за решение всегда лежит на пользователе (лице, принимающем решение) [8].

Исследования в области использования информационных технологий в медицине начались в конце 60-х начале 70-х гг. XX века [9]. С 2000-го года и по настоящее время успешно развиваются следующие зарубежные системы: IndiGO (Archimedes) – обеспечивает обработку данных клинической, физиологической природы и сведений об управлении процессом лечения и формирует индивидуализированные протоколы диагностики и лечения; Auminence – система дифференциальной диагностики, анализирует сведения о симптомах и др. информацию, формирует диагностический план; Diagnosis One – система использует данные об оказанных медицинских услугах и другие сведения для поиска упущений и формирования планов лечения; СППР Isabel Healthcare – система поддержки принятия диагностических решений на основе сведений о симптомах; Problem-Knowledge Couplers (Sharecare) – информационно-аналитическая система в сфере здоровья с широким функционалом; Visual Dx – система поддержки диагностических решений с использованием принципов дифференциальной диагностики; СППР Siemens система Protis – интерпретация результатов обследования на основе сведений о большом числе пациентов; Nuance – система поддержки принятия решений для радиологии; система IBM Watson – суперкомпьютер фирмы IBM, оснащённый вопросно-ответной системой искусственного интеллекта. Развиваются и более простые программные продукты интеллектуального направления, такие как симптом-чекеры и другие программы для конечного пользователя. Примеры: Web MD Symptom Checker, Dr Now, iParmacy, Easy Diagnosis и др. [10], [11]. При этом большинство ведущих СППР имеют онлайн- и мобильные версии [12].

Отметим, что искусственный интеллект был включен в компьютерные системы поддержки диагностических решений, которые изначально были разработаны для медицинских работников разных медицинских направлений [13], [14]. Эти платформы теперь стали легкодоступными для широкой публики и известны как приложения для самодиагностики или проверки симптомов. К примеру, это приложения «Ada health» и «K Health» [15]. На основе медицинской информации и симптомов, предоставленных человеком, эти цифровые платформы предоставляют людям список потенциальных диагнозов и помогают в их сортировке [16]. Хотя точность проверки симптомов все еще остается под вопросом, эта технология набирает популярность во всем мире благодаря своему потенциалу в решении проблемы отсутствия доступа к поставщикам первичной медико-санитарной помощи и ненужных визитов к врачу — серьезных проблем в большинстве стран мира [17], [18].

По оценкам Goldman Sachs, технологии ИИ будут способствовать росту производительности труда и в совокупности добавят к мировому ВВП 7 трлн долл. в ближайшие 10 лет. По мнению аналитиков Accenture внедрение когнитивных вычислений увеличат производительность труда на 40% к 2035 году [19].

Таким образом, экспертные системы внедрились практически во все сферы медицинской практики, и лечение заболеваний сосудов нижних конечностей не является исключением.

Ван Сяочэнь в 2019 году разработал автоматизированную систему прогнозирования результатов хирургического лечения у больных с хронической ишемией нижних конечностей на основании клинических, гемодинамических, реологических критериев и изменений липидного спектра. Система апробирована и широко внедрена в отделении хирургии ФБГНУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского» для поддержки принятия решений при реваскуляризации артерий нижних конечностей у больных с хронической ишемией с окклюзией бедренно-подколенного сегмента [20], [21].

В 2023 году также в ФБГНУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского» Е. Хаожань создана «Программа прогнозирования результатов хирургического лечения больных с КИНК у больных с сахарным диабетом». Она способствует планированию тактики лечения пациентов с КИНК на фоне сахарного диабета с целью избежания ампутаций конечностей и улучшения качества жизни пациентов, а в крайне тяжелых случаях, снижения уровня ампутаций. Данная программа вычисляет следующие показатели: проходимость шунтов после бедренно-подколенного шунтирования в течение года; сохранность оперированных конечностей после повторного шунтирования при тромбозе первичного шунта; сохранность оперированных конечностей после профундопластики в течение года [22], [23].

Результативность внедрения информационных систем в медицинскую практику должна быть объективно оценена по трём основным направлениям, оценивая клиническую, организационную и экономическую эффективность. К наиболее важным показателям эффективности внедрения компьютерных систем относят следующие: сокращение затрат рабочего времени медицинского персонала при подготовке отчетной документации; снижение количества врачебных ошибок при назначении препаратов и направлении на обследование; повышение точности, оперативности и информативности диагностических исследований; уменьшение числа обострений хронических заболеваний за определенный период времени; общее снижение заболеваемости; повышение степени соответствия лечения установленным стандартам [24]. Таким образом, информационная поддержка принятия решений при лечении различных заболеваний должна повысить эффективность процесса диагностики степени тяжести заболевания и сформировать оптимальные рекомендации по лечению пациента. Поэтому дальнейшее развитие данного подхода актуально в медицинской практике.

Структура СППР «Ангиоэксперт» и её основные функции

На основании проведенного анализа клинических, гемодинамических, гемостазиологических показателей больных с КИНК была разработана информационная система поддержки принятия решений (СППР) «Ангиоэксперт» с целью выбора наиболее эффективных методов хирургической реабилитации для данной категории пациентов. Система является помощником-консультантом для ангиохирурга на этапе предварительного сбора физиологических данных о пациенте, определения его объективного статуса и дальнейшего алгоритма лечения на основе текущего состояния здоровья пациента, его анамнеза, данных объективного и инструментального методов

обследования. СППР «Ангиоэксперт» является консультационной системой, обеспечивающей два режима работы: режим приобретения знаний и режим консультации. В режиме приобретения знаний эксперт (ангиохирург) дообучает систему в двух случаях: при возникновении осложнений после использования рекомендаций системы при лечении больного, а также при необходимости пополнения базы данных новыми клиническими случаями и рекомендациями. К основным преимуществам СППР «Ангиоэксперт» относятся следующие её функции:

1. Возможность внесения сведений о пациентах в единую базу данных системы, при этом результаты УЗИ и ангиографии сосудов изображаются наглядно в виде 2D-модели для удобства пользователя и изображения протяженности и локализации поражения.

2. Автоматизированная поддержка многокритериального сравнительного анализа различных типов реконструктивных операций на нижних конечностях, а также других способов лечения на основе модифицированного метода аналитической иерархии, что позволит врачу выбрать наиболее эффективный метод лечения КИНК для конкретного пациента.

3. Предварительная оценка кардиологического риска перед оперативным вмешательством на основе разработанной искусственной нейронной сети, учитывающая тип операции, возраст, функциональное состояние и физический статус пациента, а также степень сердечной и почечной недостаточности (при наличии); также есть возможность спрогнозировать риск ампутации конечности по классификации WIFI.

4. Автоматизированное дообучение системы на основе данных о послеоперационных осложнениях и повторных вмешательствах, проведённых в соответствии с рекомендациями системы.

С целью организации потоковой цепочки информационных процессов, типичной для СППР, в качестве основных компонентов «Ангиоэксперт» выбраны следующие подсистемы: интерфейс пользователя, база данных (БД), база знаний (БЗ), решатель задач, модуль обучения системы (МО) (рис. 1).

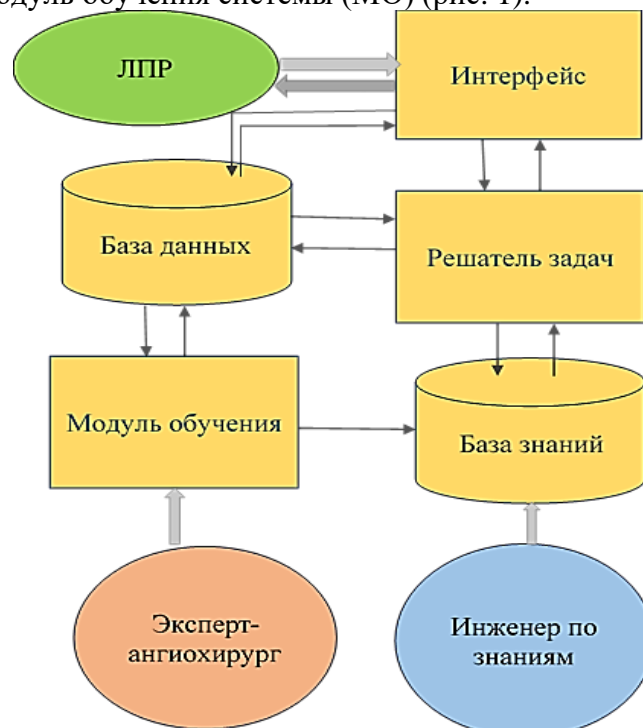


Рисунок 1 – Схема структуры СППР «Ангиоэксперт»

В качестве лица, принимающего решения (ЛПР) выступает, как правило, врач-ангиохирург. Также пользователями системы могут быть: создатель инструмента; инженер по знаниям; эксперт, добавляющий в систему новые знания; специалист, заносающий в систему текущую информацию.

Функциональная модель системы

Функциональная модель СППР «Ангиоэксперт» представлена в соответствии с требованиями методологии SADT и ее подмножества IDEF0. Процесс автоматизированного принятия решений при лечении сосудов нижних конечностей может быть разделен на ряд укрупненных модулей. Тор-диаграмма модели IDEF0 представлена на рисунке 2. Схема построена на основании утверждения, что лечение пациентов осуществляется персоналом лечебного учреждения с целью получения наилучшего результата в плане сохранения здоровья человека и максимального увеличения продолжительности и качества его жизни с учетом действующих законодательных и нормативных актов (в том числе должностных инструкций) [24].

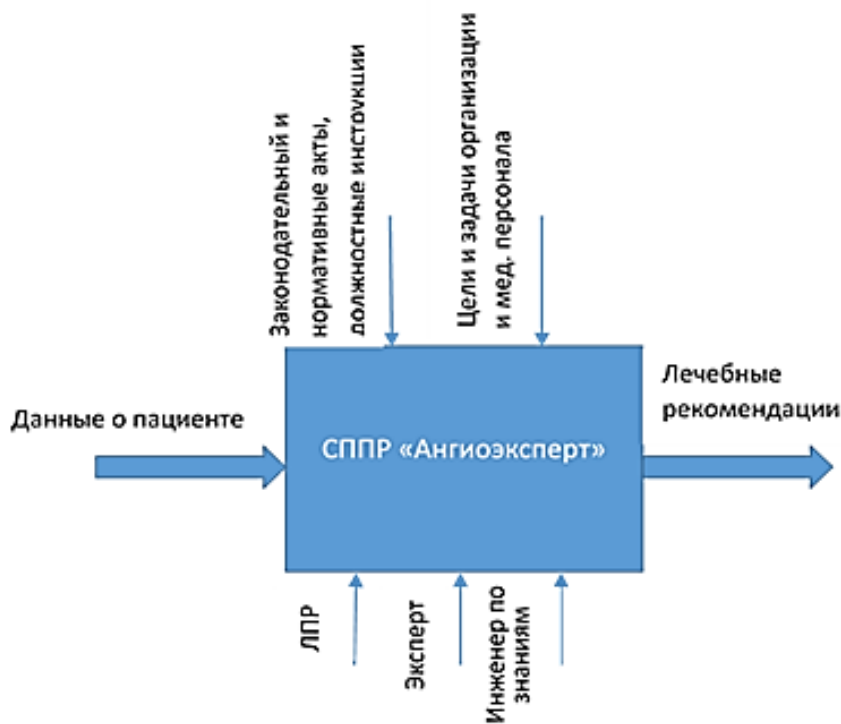


Рисунок 2 – A0-диаграмма функциональной модели системы

В качестве входных переменных системы выступают следующие показатели:

1. ФИО пациента;
2. Пол;
3. Возраст (лет);
4. Основной диагноз (атеросклероз; заболевания, вызванные дегенеративным поражением артериального русла; сахарный диабет, фибромышечная дисплазия; гигантоклеточный артериит (болезнь Хортона); болезнь Такаясу; синдром Бехчета; васкулиты, сопровождающие артропатии; узелковый периартериит; гранулематоз Вегенера; синдром Черга-Страуса; болезнь Кавасаки; поражения сосудов, обусловленные поражением радиацией; болезнь Бюргера

- (облитерирующий тромбоангиит); нарушения липидного обмена; повышенная вязкость крови и гиперкоагуляционные состояния; повышенный уровень С-реактивного белка; гиперфибриногенемия; повышенный уровень гомоцистеина.
5. Сопутствующие заболевания (ишемическая болезнь сердца; артериальная гипертензия; сахарный диабет II-го типа; хроническая почечная недостаточность; ХОБЛ; никотиновая зависимость по тесту Фагерстрема больше либо равно 4).
 6. Тип предполагаемой операции (эндоваскулярная, открытая, гибридная, первичная ампутация);
 7. Общее состояние (удовлетворительное, средней тяжести, тяжелое);
 8. Степень сердечной недостаточности по Василенко (отсутствует; I стадия; IIА стадия; IIБ стадия; III стадия);
 9. Тяжесть хронической ишемии по Покровскому (I – асимптомная; IIа – невыраженная легкая ПХ; IIб – умеренная ПХ; IIIа – выраженная ПХ; IIIб – боль в покое; IVа – начальные небольшие трофические нарушения; IVб – язва или гангрена);
 10. Тяжесть острой ишемии по Затевахину (1 – неугрожающая – онемение, парестезии, боль; 2А – угрожающая – парез; 2Б – угрожающая – паралич; 2В – субфасциальный отек; 3А – необратимая - дистальная контрактура, некротические дефекты; 3Б – необратимая – тотальная контрактура, некротические дефекты);
 11. Физический статус по ASA (I – здоровый пациент; II – пациент с легким системным заболеванием; III – пациент с тяжелым системным заболеванием; IV - пациент с тяжелым системным заболеванием, представляющим постоянную угрозу жизни; V – умирающий пациент, операция по жизненным показаниям);
 12. Функциональный статус (удовлетворительный, средней тяжести, тяжёлый, крайне тяжёлый);
 13. Креатинин (мкмоль/л);
 14. Входные показатели для WIFI-классификации – степень раневого поражения, степень ишемии и уровень инфицирования ран нижних конечностей.
 15. Уровень поражения артерий конечностей по сегментам.
 16. Класс поражения артерий нижних конечностей по TASC2 (A, B, C, D).
 17. Оценка проведенной операции (неудовлетворительно, удовлетворительно, хорошо).
 18. Характер ранее выполненной операции (эндоваскулярная, открытая, гибридная).
 19. Временной период развития повторной КИНК (сут.).

Выходные данные системы следующие:

1. Риск ампутации нижней конечности в течение 1 года по классификации WIFI (очень низкий, низкий, средний, высокий).
2. Показатель кардиориска (0-1).
3. Наиболее приемлемый вариант лечения (фармакотерапия, эндоваскулярное вмешательство, открытая, гибридная операция, ампутация конечности).

Работа системы начинается с ввода пользователем информации о пациенте на главной форме СППР (после нажатия кнопки «Новый пациент») или выбора нужного человека в БД системы, если данные о пациенте там уже хранятся. ФИО пациента

вводится в выпавшем окне, и после этого пользователь системы заполняет остальную информацию о больном на главной форме на основе имеющегося анамнеза, результатов клиничко-лабораторных и инструментальных исследований. В верхнем правом углу формы появится «Условный класс пациента», состоящий из одной буквы (X или Y – женщина или мужчина) и трех цифр, имеющих значение (0 или 1), где 0 – отсутствие, а 1 – наличие определенного признака у пациента, что используется при модельных расчетах в алгоритмах системы. Первая цифра задает пожилой возраст (после 55 лет), вторая – наличие сахарного диабета, третья – курение. Например, условный класс Y110 задает пожилого мужчину 68 лет с сахарным диабетом 2 типа и не курильщика (рис. 3).

Скриншот интерфейса программы «СППР "Ангиоэксперт"». В верхней части окна отображены поля для ввода Ф.И.О. (Иванов Иван Иванович) и кнопки «Новый пациент...». Основная форма «Данные пациента» содержит следующие элементы:

- Пол: муж
- Возраст: 68
- Тип операции: эндоваскулярная
- Условный класс пациента: Y110
- Основной диагноз: Болезнь Такаясу
- Соп. заболевания: Ишемическая болезнь сердца, Артериальная гипертензия, Сосудисто-мозговая недостаточность, Сахарный диабет II типа, Хроническая почечная недостаточность
- Общее состояние: удовлетворительное
- Степень сердечной недостаточности по Василенко: IIА стадия
- Тяжесть хронической ишемии (по Покровскому): IIb (<200м) - Умеренная ПХ
- Тяжесть острой ишемии (по Затевахину): 1 - Не угрожающая - Онемение, парестезии, боль
- Физический статус по ASA: ASA III - Пациент с тяжелым системным заболеванием
- Функциональный статус: Умеренный
- Креатинин (Мкмоль/л): 110
- Оценка проведенной операции: [выпадающее меню]
- Рецидив: Тип предыдущей операции: [выпадающее меню], Временной период рецидива (мес.): [поле ввода]

В нижней части формы расположены кнопки: «Карта сосудов», «WIFI классификация», «Рекомендации к лечению», «Кардиориск», «БД рецидивов», «Сохранить в БД» и «Выход».

Рисунок 3 – Форма введения начальных данных

Функциональная модель системы (уровень А1) состоит из следующих блоков:

1. Введение начальных данных о пациенте.
2. Прогноз риска ампутации нижней конечности по WIFI-классификации.
3. Оценка способов лечения и выбор наилучшего варианта.
4. Прогноз сердечно-сосудистого риска при операции.
5. Анализ результатов и принятие решений ЛПП.
6. Сохранение данных пациента в общей БД.
7. Сохранение данных в БД о характере послеоперационных осложнений и повторных оперативных вмешательствах.
8. Дообучение системы.

Блоки связаны информационными потоками, изображенными на рис. 4.

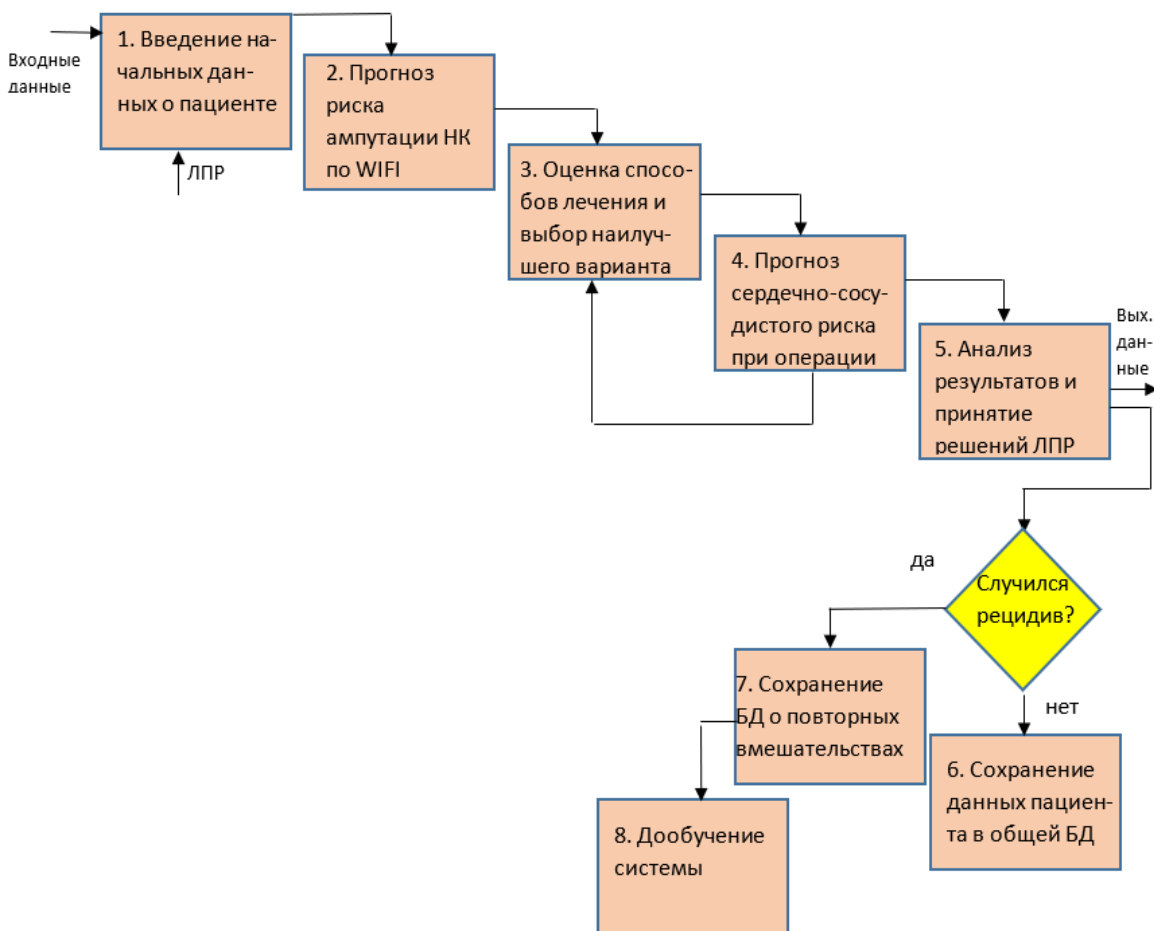


Рисунок 4 – A1- диаграмма функциональной модели системы

При введении начальных данных о пациенте (блок 1 в A1) проводится анализ жалоб пациента, учитывая его желание получить соответствующее лечение. Потом уточняется объективный статус пациента на основе опроса, объективного исследования, данных лабораторных и инструментальных обследований. При этом описывается анамнез жизни пациента – заболевания, которыми он болел или болеет в настоящее время (основные и сопутствующие), особенности профессиональной деятельности пациента в плане вредности для здоровья, предрасположенность к вредным привычкам, особенности питания и т.п. Информация, полученная в процессе общения с пациентом, вносится в БД системы.

Затем составляется карта состояния сосудов по компьютерной ангиографии или УЗИ сосудов, и врач определяет степень их повреждения по классификации TASC2. На карте сосудов указывается степень поражения сосудов в соответствии с классификацией TASC2 (рис. 5) и обозначается A0, A, B, C, D по мере усиления поражения. Для наглядности указанные данные отображаются на рисунке, и в зависимости от степени поражения та часть сосуда закрашивается в определенный цвет: серый (A0) – без повреждения, желтый (A) – до 25% повреждения, оранжевый (B) – 25-50%, красный (C) – 50-75% и фиолетовый (D) – 75-100%.

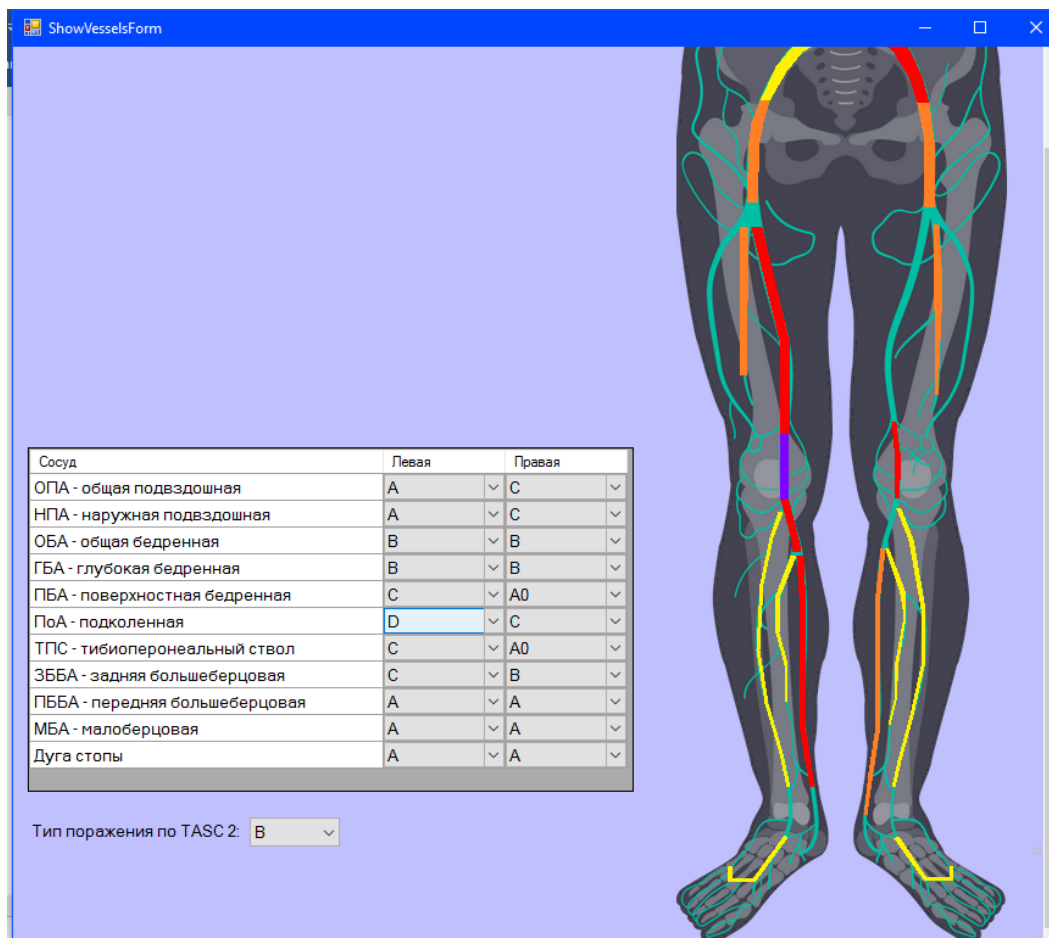


Рисунок 5 – Карта сосудов пациента

После введения начальных данных о пациенте программа позволяет оценить риск ампутации нижней конечности в течение одного года на основе WIFI – классификации [2], а также определить степень кардиологического риска для больного при различных типах операций на основе искусственной нейронной сети.

Выбор наиболее эффективной процедуры лечения КИНК осуществляется после нажатия кнопки «Рекомендации к лечению», расположенной в нижнем левом углу экрана. После появляется окно программы с альтернативами и критериями, которые должны учитываться при выборе наиболее эффективного метода лечения больного. В случае необходимости создания еще одного или нескольких вариантов решения задачи принятия решений есть возможность разработать другую модель, для этого нужно нажать кнопку «Создать новый вариант задачи». Появится пустая экранная форма для указания альтернатив, критериев и их оценок, на основании которых производятся расчеты оценок для каждой альтернативы по правилам модифицированного метода аналитической иерархии. Таблица с результатами сравнения эффективности всех вариантов лечения для некоторого пациента приведена на рис. 6.

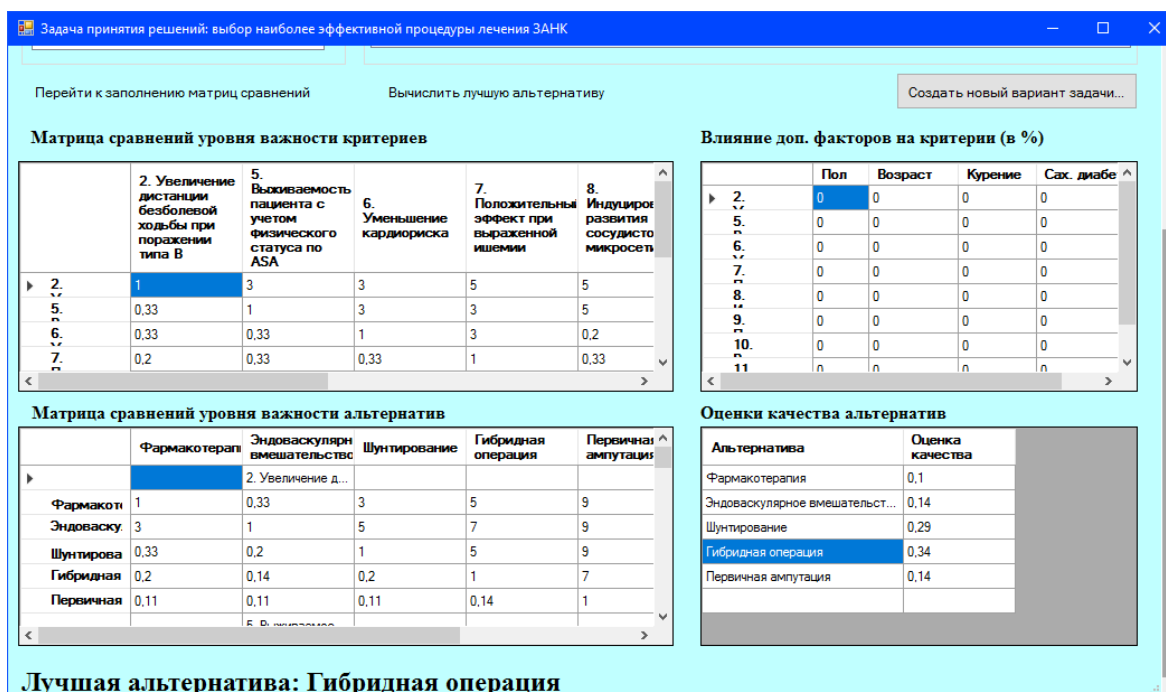


Рисунок 6 – Результативная форма выбора вариантов лечения

Разработанная функциональная модель обеспечивает полное и непротиворечивое отображение процесса функционирования СППР «Ангиоэксперт». Она позволяет реализовать подходы к эффективному медицинскому лечению, избежать ошибок на стадии реализации и функционирования системы. Большинство медицинских учреждений хорошо обеспечено компьютерами, и со временем оснащённость офисной техникой медицинских организаций будет только расти. Поэтому решение технических аспектов обеспечения системы не повлечет за собой больших материальных и трудовых затрат и может быть осуществлено на действующей программно-аппаратной базе.

Выводы

СППР «Ангиоэксперт» позволила улучшить лечебно-диагностический процесс, стандартизировать подготовку, оптимизировать хирургическую тактику и минимизировать риски возникновения осложнений и летальности особенно для пациентов с тяжелой и крайне тяжелой степенью сердечной патологии. Система обладает необходимой гибкостью функционирования и настройки, простотой в использовании, и при этом выдаёт наиболее приемлемые врачебные решения.

Список литературы

1. Белов Ю.В. Прогнозирование результатов реваскуляризирующих операций на артериях нижних конечностей на основе методов оценки регионарного кровотока / Ю.В. Белов, О.А. Виноградов, Н.Д. Ульянов, А.Н. Дзюндзя. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2014. № 7(5). С. 62-67.
2. *Национальные рекомендации по диагностике и лечению заболеваний артерий нижних конечностей с председателями экспертной группы*: акад. РАН Бокерия Л.А., акад. РАН Покровский А.В. М., 2019. 89 с.
3. Ho V.T. Open, percutaneous and hybrid deep venous arterialization technique for no-option foot salvage / V.T. Ho, R. Gologorsky, V. Chandra, A. Prent, J. Lee, A. Dua. *J. Vasc. Surg.* 2019. N 31. P. S0741-5214(19)32636-9.

4. Калинин Р.Е. *Ишемические болезни в практике семейного врача* / Р.Е. Калинин [и др.]. М.: ГЭОТАР, 2016. 296 с.
5. Кэмма А.Д. *Болезни сердца и сосудов: руководство Европейского общества кардиологов*: пер. с англ. / под ред.: А.Д. Кэмма, Т.Ф. Люшера, П.В. Серруиса. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2011. 1437 с.
6. Затевахин И.И. *Баллонная ангиопластика при ишемии нижних конечностей: руководство* / И.И. Затевахин, В.Н. Шиповский, В.Н. Золкин. М.: Медицина, 2004. 256 с.
7. Смолин Д.В. *Введение в искусственный интеллект*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 208с.
8. Koponenko W. Machine leaning for medical diagnosis: history, state of the art and perspective. *Artificial Intelligence in Medicine*. Ljubjana, 2001. P. 89-109.
9. Левин В.И. Д.А. Поспелов и развитие искусственного интеллекта в СССР. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2021. №2(21) С. 59-64.
10. Baker A. A Comparison of Artificial Intelligence and Human Doctors for the Purpose of Triage and Diagnosis / A. Baker, Y. Perov, K. Middleton, et al. *Front Artif Intell*. 2020. №3. P. 543405.
11. Chambers D. Digital and online symptom checkers and health assessment/triage services for urgent health problems: systematic review / D. Chambers, A.J. Cantrell, M. Johnson, et al. *BMJ Open*. 2019. №9(8). P. e027743.
12. Анцыферов С.С. Методология развития интеллектуальных систем / С.С. Анцыферов, А.С. Сигов, К.Н. Фазилова. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2022. №2(25) С. 42-47.
13. Ермоленко Т.В. Классификация аномалий сердцебиения с помощью глубокого обучения / Т.В. Ермоленко, Д.В. Ролик. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2022. №1(24) С. 40-53.
14. Тимофеев А. Будущее нашего общества и систем технического мышления. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2020. №1(16). С. 16-22.
15. Aboueid S. The Use of Artificially Intelligent Self-Diagnosing Digital Platforms by the General Public: Scoping Review / S. Aboueid, R.H. Liu, B.N. Desta, A. Chaurasia, S. Ebrahim. *JMIR Med Inform*. 2019. №7(2). P. e13445.
16. Semigran H.L. Evaluation of symptom checkers for self diagnosis and triage: audit study / H.L. Semigran, J.A. Linder, C. Gidengil, A. Mehrotra. *Br Med J*. 2015. №351. P. h3480.
17. Millenson M.L. Beyond Dr Google: the evidence on consumer-facing digital tools for diagnosis. / M.L. Millenson, J.L. Baldwin, L. Zipperer, H. Singh. *Diagnosis (Berl)*. 2018. №5(3). P. 95-105.
18. Fraser H. Safety of patient-facing digital symptom checkers / H. Fraser, E. Coiera, D. Wong. *Lancet* 2018. №392(10161). P. 2263-2264.
19. Миньковская М.В. Расширение внедрения цифровизации и средств искусственного интеллекта в экономику России. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. №1(32). С. 75-93.
20. Гавриленко А.В. Профундопластика в лечении больных с хронической ишемией нижних конечностей / А.В. Гавриленко, Н.Н. Аль-Юсеф, Ван Сяочэнь, Н.М. Мамедова, М.В. Ананьева, Ли Жуй. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2019. № 25 (3). С. 122–127.
21. Ван Сяочэнь *Прогнозирование результатов хирургического лечения больных с хронической ишемией нижних конечностей*, 14.01.26 – сердечно-сосудистая хирургия / Диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. М, 2020. 24 с.
22. Хаожань Е. *Прогнозирования результатов хирургического лечения больных с критической ишемией нижних конечностей, у больных с сахарным диабетом*, 3.1.15 – сердечно-сосудистая хирургия / Диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. М, 2023. 24 с.
23. Гавриленко А.В. Особенности лечения больных с КИНК при сахарном диабете / А.В. Гавриленко, Е. Хаожань, Я.М. Сарханидзе. *Клиническая медицина. Серия: Естественные и технические науки*. 2023. №1. С. 179-182.
24. Фролов С.В. Системы поддержки врачебных решений в медицине / С.В. Фролов, А.Ю. Куликов, О.А. Остапенко, Е.В. Стрыгина. *Научный журнал*. 2018. С. 9-16.

References

1. Belov Yu.V. Prediction of the results of revascularizing operations on the arteries of the lower extremities based on methods for assessing regional blood flow / Yu.V. Belov, O.A. Vinogradov, N.D. Ulyanov, A.N. Dzyunzya // *Cardiology and cardiovascular surgery* – 2014. – № 7 (5) – P. 62-67.
2. National recommendations for the diagnosis and treatment of diseases of the arteries of the lower limbs with the chairmen of the expert group: Bokeria L.A., Pokrovsky A.V. – М., 2019. – 89 p.

3. Ho V.T. Open, percutaneous and hybrid deep venous arterialization technique for no-option foot salvage / V.T. Ho, R. Gologorsky, V. Chandra, A. Prent, J. Lee, A. Dua // *J. Vasc. Surg.* – 2019. – N 31. – P. S0741-5214(19)32636-9.
4. Kalinin R.E. Ischemic diseases in the practice of a family doctor / R.E. Kalinin [et al.]. – M.: GEOTAR, 2016. – 296 p.
5. Kamma A.D. Heart and blood vessels: the leadership of the European Society of Cardiologists: Per. from English. /Ed.: A.D. Camma, T.F. Lushera, P.V. Serruis. – M.: GEOTAR-MEDIA, 2011. – 1437 p.
6. Zatevakhin I.I. Boundry angioplasty for ischemia of the lower limbs: Guide / I.I. Zatevakhin, V.N. Shipovsky, V.N. Zolkin. – M.: Medicine, 2004. – 256 p.
7. Smolin D.V. Introduction to artificial intelligence. – M.: Fizmatlit, 2004. – 208 p.
8. Kononenko W. Machine leaning for medical diagnosis: history, state of the art and perspective // *Artificial Intelligence in Medicine.* – Ljubjana, 2001. – P. 89-109.
9. Levin V.I. D.A. Pospelov and the development of artificial intelligence in the USSR / *Problems of artificial intelligence.* – 2021. – № 2 (21) – P. 59-64.
10. Baker A.A. Comparison of Artificial Intelligence and Human Doctors for the Purpose of Triage and Diagnosis / A. Baker, Y. Perov, K. Middleton, et al. // *Front Artif Intell.* – 2020. – №3 – P. 543405.
11. Chambers D. Digital and online symptom checkers and health assessment/triage services for urgent health problems: systematic review / D. Chambers, A.J. Cantrell, M. Johnson, et al. // *BMJ Open.* – 2019. – №9(8) P. e027743.
12. Antsyferov S.S. Methodology for the development of intellectual systems / S.S. Antsyferov, A.S. Sigov, K.N. Fazilova // *Problems of artificial intelligence.* – 2022. – №2(25) – P. 42-47.
13. Ermolenko T.V. Classification of heartbeat anomalies using deep learning / T.V. Ermolenko, D.V. Roller // *Problems of artificial intelligence* – 2022. – № 1 (24) – P. 40-53.
14. Timofeev A. The Future of our Society and Technical Thinking Systems / *Problems of Artificial Intelligence.* – 2020. – №1(16) – P. 16-22.
15. Aboueid S. The Use of Artificially Intelligent Self-Diagnosing Digital Platforms by the General Public: Scoping Review / S. Aboueid, R.H. Liu, B.N. Desta, A. Chaurasia, S. Ebrahim // *JMIR Med Inform.* – 2019. – №7(2) – P. e13445.
16. Semigran H.L. Evaluation of symptom checkers for self diagnosis and triage: audit study / H.L. Semigran, J.A. Linder, C. Gidengil, A. Mehrotra // *Br Med J.* – 2015. – №351. – P. h3480.
17. Millenson M.L. Beyond Dr Google: the evidence on consumer-facing digital tools for diagnosis. / M.L. Millenson, J.L. Baldwin, L. Zipperer, H. Singh // *Diagnosis (Berl).* – 2018. – №5(3). – P. 95-105.
18. Fraser H. Safety of patient-facing digital symptom checkers / H. Fraser, E. Coiera, D. Wong // *Lancet* 2018. – №392(10161). – P. 2263-2264.
19. M.V. Minkovsky Expansion of the introduction of digitalization and means of artificial intelligence in the Russian economy / *Problems of artificial intelligence.* – 2024. – №1(32) – P. 75-93.
20. Gavrilenko A.V. Profundoplasty in the treatment of patients with chronic ischemia of the lower extremities / A.V. Gavrilenko, N.N. Al-Yuseph, Van Xiaochen, N.M. Mamedova, M.V. Ananieva, Lee Zhui // *Angiology and vascular surgery.* – 2019. – №25(3) – P. 122-127.
21. Van Xiaochen Predicting the results of surgical treatment of patients with chronic ischemia of the lower extremities, 01.14.26 - cardiovascular surgery / dissertation for the degree of candidate of medical sciences. – M., 2020. – 24 p.
22. Khaozhan E. Predicting the results of surgical treatment of patients with critical ischemia of the lower extremities, in patients with diabetes, 3.1.15 - cardiovascular surgery / dissertation for the scientific degree of candidate of medical sciences. – M., 2023. – 24 p.
23. Gavrilenko A.V. Features of the treatment of patients with CILE in diabetes mellitus / A.V. Gavrilenko, E. Haozhan, Ya.M. Sarkhanidze // *Clinical medicine. Series: Natural and Technical Sciences.* – 2023. – №1 – P. 179-182.
24. Frolov S.V. Systems for supporting medical solutions in medicine / S.V. Frolov, A.Yu. Kulikov, O.A. Ostapenko, E.V. Strygina // *Scientific Journal* – 2018. – P. 9-16.

RESUME

S.M. Selyakova, A.V. Nicenko, N.K. Baziyani-Kuhto

Information support for the decision-making process in the treatment of patients with critical lower limb ischemia

The article is devoted to the development of a decision support system «AngioExpert» in order to increase the effectiveness of the treatment of patients with critical lower limb ischemia. This system allows you to optimize surgical tactics and minimize the risks of complications and mortality. The work presents the main functions, the general structure, functional model and the main windows of the user interface of the system. The tasks of making medical decisions that are solved on the basis of its control algorithms are considered.

The work uses the SADT methodology to develop a functional model of the decision support system to describe the multi-level movement of information flows during the operation of the system. Methods of intellectual management and decision theory are used to solve the problems of the system in different modes of its work (training and consultation mode).

The AngioExpert assists vascular surgeons in selecting the most appropriate treatment option for patients with critical lower limb ischemia – including pharmacotherapy, endovascular intervention, open surgery, hybrid procedures, or amputation – based on comprehensive physiological data, comorbidities, and preoperative assessments. The system also evaluates the cardiovascular risk associated with surgical intervention and estimates the likelihood of lower limb amputation within one year after the procedure.

The use of the AngioExpert in practice provides an improvement in the therapy and diagnostic algorithm by issuing effective medical recommendations. In this case, the system has the necessary functional flexibility and simplicity in tuning and using.

РЕЗЮМЕ

С.М. Селякова, А.В. Ниценко, Н.К. Базиян-Кухто

Информационная поддержка процесса принятия решений при лечении больных с критической ишемией нижних конечностей

Статья посвящена разработке системы поддержки принятия решений «Ангио-эксперт» с целью повышения эффективности процесса лечения больных с критической ишемией нижних конечностей. Данная система позволяет оптимизировать хирургическую тактику и минимизировать риски возникновения осложнений и летальности. В работе представлены основные функции, общая структура, функциональная модель и главные окна пользовательского интерфейса системы. Рассмотрены задачи принятия врачебных решений, которые решаются на основе её управляющих алгоритмов.

В работе применяется методология SADT для разработки функциональной модели системы поддержки принятия решений для описания многоуровневого движения информационных потоков при работе системы. Методы интеллектуального управления и теории принятия решений используются для решения задач системы при разных режимах её работы (режим обучения и консультации).

Разработанная СППР «Ангиоэксперт» позволяет ангиохирургу выбрать наиболее приемлемый вариант лечения больного с критической ишемией нижних конечностей (фармакотерапия, эндоваскулярное вмешательство, открытая, гибридная операция, ампутация), а также оценить кардиологический риск при оперативном вмешательстве и вероятность ампутации нижней конечности в течение одного года после операции.

Применение «Ангиоэксперт» на практике обеспечивает улучшение лечебно-диагностического алгоритма за счёт выдачи эффективных врачебных рекомендаций. При этом система обладает необходимой функциональной гибкостью и простотой в настройке и использовании.

Семякова Светлана Михайловна – к.т.н., доцент, доцент кафедры вычислительной техники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград. *Область научных интересов:* интеллектуальное управление систем, теория принятия решений, медицинские экспертные системы. Эл. почта: svemise@yandex.ru, адрес: 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28, телефон: +7 992 1431993.

Ниценко Артём Владимирович – к.т.н., старший научный сотрудник отдела распознавания речевых образов, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк. *Область научных интересов:* искусственный интеллект, обработка естественного языка, компьютерная лингвистика. Эл. почта: nav_box@mail.ru, адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон: +7949 4315356.

Базиян-Кухто Наира Кареновна – д.м.н., доцент, профессор кафедры сердечно-сосудистой хирургии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий государственный медицинский университет имени М. Горького», г. Донецк. *Область научных интересов:* сердечно-сосудистая хирургия, проктология, медицинские экспертные системы. Эл. почта: paira-251088@mail.ru, адрес: 283003, г. Донецк, проспект Ильича, д. 16, телефон: +7 949 4118735.

Статья поступила в редакцию 25.06.2025.

Д. Н. Тумаков¹, А. Р. Бердигулов¹, Д. И. Хайруллина¹, И. И. Бариев²

¹Институт вычислительной математики и информационных технологий,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

²Автономная некоммерческая организация высшего образования "Университет Иннополис"
420500, г. Иннополис, ул. Университетская, 1

ПРИМЕНЕНИЕ АНСАМБЛЕЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ТИПА LENET-5 ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПНЕВМОНИИ НА РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ЛЕГКИХ

D. N. Tumakov¹, A. R. Berdigulov¹, D. I. Khairullina¹, I. I. Bariev²

¹Institute of Computational Mathematics and Information Technology,
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Kazan Federal University"
420008, Kazan, Kremlevskaya St., 18

²Autonomous Non-Commercial Organization of Higher Education "Innopolis University"
420500, Innopolis, Universitetskaya St., 1

APPLICATION OF LENET-5-TYPE NEURAL NETWORK ENSEMBLES FOR DIAGNOSING PNEUMONIA IN LUNG X- RAY IMAGES

Рассмотрены ансамбли неглубоких нейронных сетей типа для определения пневмонии по рентгеновским изображениям. Результирующий ответ ансамблей построен по принципу, если хотя бы одна из его нейросетей определила пневмонию, то ансамбль тоже даёт ответ «пневмония». Такой подход по агрегации результатов отдельных нейросетей позволил максимально увеличить полноту (recall) класса «пневмония». Чтобы минимизировать ухудшение точности (precision), которое неизбежно при таком подходе агрегирования, нейросети из ансамбля рассмотрены одного типа – LeNet-5. Предложено шесть архитектур нейросетей, которые получают на вход изображения размером 256 на 256 пикселей и имеют различные размеры сверточных матриц. Также архитектуры рассмотренных сетей имеют разную глубину. На тестовой выборке для оптимальных ансамблей полнота составила 0.991, а точность изменяется в интервале от 0.934 до 0.936.

Ключевые слова: ансамбли нейронных сетей, LeNet-5, полнота, точность, пневмония.

Ensembles of shallow neural networks for identifying pneumonia from X-ray images are considered. The ensemble's resulting response is constructed according to the principle: if at least one of its neural networks identifies pneumonia, the ensemble also returns the answer "pneumonia." This approach to aggregating the results of individual neural networks maximizes the recall of the "pneumonia" class. To minimize the deterioration in precision that is inevitable with this aggregation approach, the ensemble's neural networks are all of the same type—LeNet-5. Six neural network architectures are proposed, each receiving 256 by 256 pixel images as input and having different convolutional matrix sizes. The architectures of the networks considered also have different depths. On the test set, the recall for the optimal ensembles was 0.991, while the precision varied between 0.934 and 0.936.

Key words: neural network ensembles, LeNet-5, recall, precision, pneumonia.

Введение

Сверточные нейронные сети на сегодняшний день широко используются в задачах классификации изображений. Простейшие классические сети, такие как LeNet-5, ориентированные на классификацию изображений небольшого размера, используются в основном для распознавания «простых» объектов [1], [2]. Однако их применение не ограничивается лишь подобными изображениями [3], и сети такого типа также используются в различных модификациях [4], [5] и комбинациях [5], [6] для классификации более сложных объектов.

Нейронная сеть LeNet-5, несмотря на свою простоту, даёт сопоставимые результаты с более сложными архитектурами [7], а зачастую и лучшие, чем такие сети как Handcrafted CNN, MobileNet, VGG16 и VGG19 для определения пневмонии [8]. Также в [9] сделан вывод, что для небольших наборов данных, модели LeNet-5 и AlexNet обеспечивают лучшие результаты классификации пневмонии, чем MobileNet, ResNet18 и Vision Transformer.

После появления первых нейронных сетей постоянно идёт совершенствование их архитектур для достижения лучших результатов в задачах классификации. Также используются и другой подход, называемый ансамблевое обучение, который объединяет несколько архитектур для устранения ограничений одиночных моделей. Два основополагающих исследования [10], [11] заложили основу современных ансамблевых методов, и с тех пор ансамблевое обучение успешно применяется к различным задачам благодаря своей высокой точности. Первоначально разработанные для моделей на основе деревьев решений, такие алгоритмы, как бэггинг и бустинг [12], [13], продемонстрировали как точность, так и устойчивость в области машинного обучения.

В последние годы ансамблевые методы были распространены на глубокое обучение, где несколько нейронных сетей обучаются независимо, а их результаты чаще всего объединяются с помощью голосования большинства или усреднения ответов. Этот подход доказал свою эффективность в снижении переобучения и уменьшении разбросов ответов между отдельными моделями [14], [15]. Ансамбли широко используются для улучшения точности при решении различных задач. Например, в [17] предложена модель для прогнозирования неисправностей промышленного оборудования, в которой использован ансамблевый подход в проведении операции голосования между сверточной нейронной сетью, логистической регрессией и методом опорных векторов. Выбор именно этих алгоритмов обусловлен низкой корреляцией их предсказаний друг с другом. Итоговая вероятность выхода оборудования из строя вычисляется как линейная комбинация трёх моделей с соответствующими весами.

Ансамблевое обучение получило распространение и в области компьютерного зрения, включая обнаружение объектов [17], [18]. Например, в [19] для обработки текстовой и визуальной информации использован ансамбль из трёх моделей LLaVa, CogVLM, Mini-Gemini. В области медицинской визуализации ансамбли также активно применяются для повышения эффективности диагностики [20-22]. В [23] предложена ансамблевая модель глубокого обучения (EDL-COVID) для классификации КТ-изображений, связанных с COVID-19. Этот подход повысил точность до 99,05%, что оказалось существенно лучше прогнозов индивидуальных моделей.

Хотя ансамблевое обучение способствует повышению точности и надежности, производительность в реальном времени остаётся важной в клинических условиях. Большие ансамблевые модели увеличивают потребление памяти и времени, что создаёт трудности для практического применения, особенно на устройствах с ограниченными ресурсами. Поэтому использование нейронных сетей с малым числом весов может существенно снизить требования к аппаратному и программному обеспечению.

Распознавание текстов на медицинских изображениях с помощью ансамблей, содержащих модели на основе нейронной сети LeNet-5 рассмотрено в [24]. Здесь каждый классификатор обучен на отдельном подмножестве, полученном методом бутстрэппинга, и оценивался на оставшихся валидационных данных в каждой итерации обучения. Ансамбль из трёх LeNet-5 с замененными функциями активации на ReLU позволил достичь точности 96% при классификации изображений пневмонии [25]. В [8] построенные ансамбли нейронных сетей с LeNet-5 для класса «пневмония» достигли $\text{recall} = 0.9785$ и $\text{precision} = 0.9830$.

С одной стороны результаты применения ансамблей различных нейронных сетей, в том числе и LeNet-5, дает высокую точность, а с другой стороны, сети типа LeNet-5 дают зачастую результаты, сопоставимую с результатами других нейронных сетей [26], и даже превосходящими их на небольших объемах обучающих данных. Также неглубокие нейронные сети не требуют больших вычислительных мощностей [27]. Принимая все это во внимание, в настоящей работе предпринята попытка рассмотреть ансамбли нейронных сетей типа LeNet-5 для определения пневмонии по рентгеновским снимкам. Результирующий ответ строится по следующему принципу: если хотя бы одна нейросеть в ансамбле определяет класс «пневмония», то общим результатом ансамбля будет тоже класс «пневмония». Такой подход по объединению (агрегации) результатов отдельных нейросетей необходим, чтобы максимально увеличить recall (полноту или чувствительность) класса «пневмония» и не пропустить пациента с заболеванием.

Однако предложенный подход, очевидно, уменьшает метрику precision (точность). Чтобы минимизировать понижение точности, нейросети рассматриваются одного типа. Первая сеть отличается от классической LeNet-5 размером входного изображения – он составляет 256 на 256 пикселей. Остальные нейросети могут отличаться от первой размерами сверточной матрицы – 3 на 3 или 7 на 7 вместо 5 на 5, что позволяет учитывать различные размеры особенностей. Также архитектуры рассмотренных сетей имеют разную глубину, а две сети имеют dropout на последних слоях.

В работе рассмотрено всего шесть вариантов нейронных сетей типа LeNet-5 и всевозможные ансамбли, получаемые этими сетями. Сделаны выводы об оптимальных комбинациях сетей для достижения максимальных метрик.

1 Постановка задачи классификации

Оценим возможности ансамблей простейших нейронных сетей типа LeNet-5 для классификации пневмонии по рентгеновским изображениям лёгких. Чтобы применить подобные сети для анализа рентгеновских изображений, нужно принять во внимание следующий момент. Исходная сеть LeNet-5 используется для работы с изображениями малых размеров – чаще всего 28 на 28 пикселей. Однако для извлечения признаков из рентгеновских изображений, которые в большинстве случаев имеют линейные размеры более тысячи пикселей, в исходной сети необходимо изменить размеры входного изображения, иначе при сильном сжатии начального снимка часть важной информации может быть потеряна. С учетом этого, положим, что на вход нейронной сети будут подаваться изображения размером 256 на 256 пикселей.

На начальном этапе обучим отдельные нейронные сети и оценим их точности. Затем сопоставим истинные и ошибочные результаты, полученные на тестовых выборках предложенных нейронных сетей. Так как рассматриваемые сети имеют близкую архитектуру (к LeNet-5), то стоит ожидать, что результаты классификации не должны сильно отличаться. Однако различия для отдельных случаев пневмонии могут дать возможность большего обнаружения заболеваний.

Наконец, на заключительном этапе рассмотрим и оценим точности получаемых ансамблей в различных комбинациях нейронных сетей, сделав основную ставку на выявление («непропускания») пациентов с пневмонией.

Набор данных содержит 5856 рентгеновских снимка (JPEG) и две категории (пневмония – 4273 снимка и норма – 1583 снимка). Рентгеновские снимки грудной клетки (переднезадние) отобраны из ретроспективных когорт педиатрических пациентов в возрасте от одного до пяти лет из Женского и детского медицинского центра Гуанчжоу. Все рентгенограммы грудной клетки были выполнены в рамках клинического ухода за пациентами и первоначально проверены на контроль качества путем удаления всех некачественных или нечитаемых сканов.

2 Классификация отдельными нейронными сетями

Рассмотрим применение отдельных нейронных сетей для задачи классификации пневмонии. Начнём с модели, наиболее приближенной к классической сети LeNet-5.

Модель 1

Данная модель по структуре полностью совпадает с классической LeNet-5, отличаясь размерами входного изображения и, как следствие, числом нейронов на всех последующих слоях (Рис. 1).

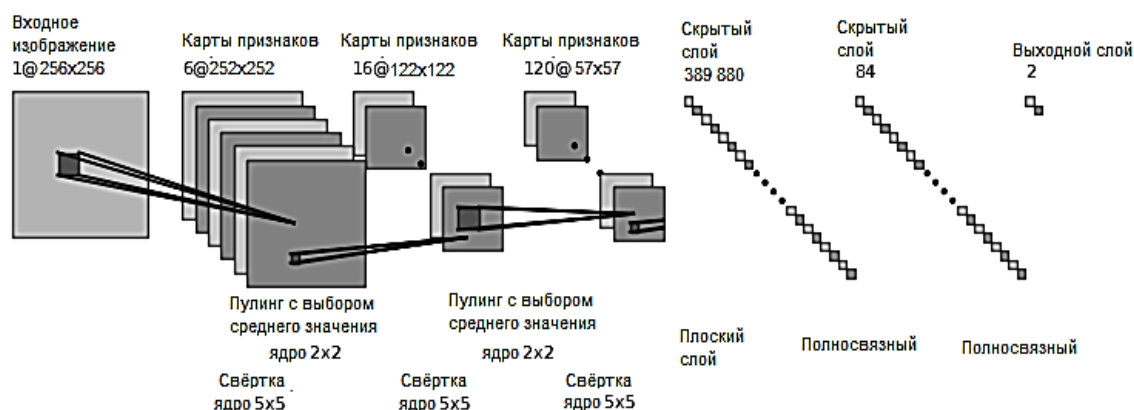


Рисунок 1 – Архитектура модели 1.

Модель имеет следующую архитектуру:

1. Свёрточный слой, принимающий на вход изображение 256 на 256 пикселей. Состоит из 6 фильтров размера 5 на 5 элементов с шагом в 1 элемент. После применения данных преобразований получаются 6 матриц размером 252 на 252 элемента.
2. Слой пулинга с размером фильтра 2 на 2 элемента, шагом в 2 элемента, который производит выборку среднего значения. После применения преобразований получается 6 матриц размера 126 на 126 элементов.
3. Свёрточный слой, принимающий на вход 6 матриц размера 126 на 126 элементов. Состоит из 16 фильтров размера 5 на 5 элементов. После применения преобразований получается 16 матриц размера 122 на 122 элемента.
4. Слой пулинга с размером фильтра 2 на 2 элемента, шагом в 2 элемента, который производит выборку среднего значения. После применения преобразований получается 16 матриц размера 61 на 61 элемент.

5. Свёрточный слой, принимающий на вход 16 матриц размера 61 на 61 элемент. Состоит из 120 фильтров размера 5 на 5 элементов. После применения преобразований получается 120 матриц размера 57 на 57 элементов.
6. Полносвязный слой, принимающий на вход $120 \cdot 57 \cdot 57 = 389880$ нейронов, на выходе получается 84 нейрона.
7. Полносвязный слой, принимающий на вход 84 нейрона, на выходе получается 2 нейрона (принадлежность к одному из классов: пневмония и здоровый).

В качестве функции активации используется гиперболический тангенс.

Для всех моделей функцией ошибки выбрана перекрёстная энтропия (cross entropy loss), а обучение проводится алгоритмом AdamW. Графики зависимостей значений функции потерь для обучающей и валидационной выборок от номера эпохи приведены на Рис. 2.

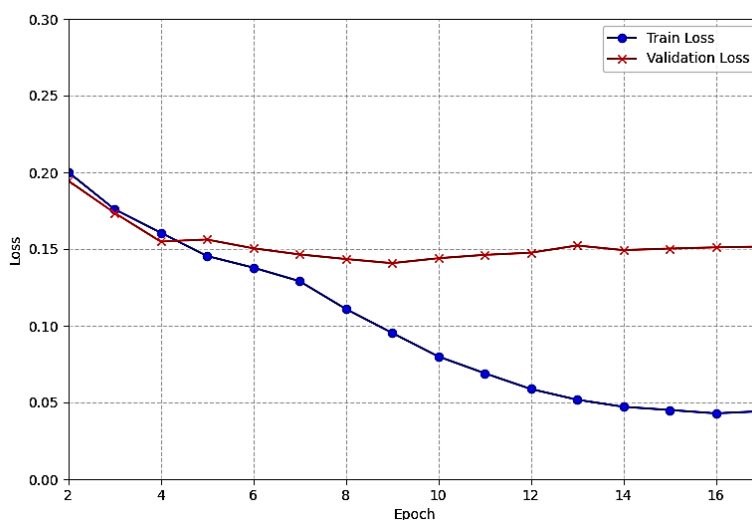


Рисунок 2 – Зависимость значений функции потерь от номера эпохи обучения для модели 1.

Для оценки качества работы моделей, обученных классифицировать рентгеновские изображения лёгких по категориям «здоровый» и «пневмония», на тестовой выборке использованы метрики accuracy, precision, recall и F1-score (F1-мера). По итогам обучения модели 1 на тестовой выборке полученные результаты представлены в таблице 1. Заметим, что обучение проводится с учетом валидации: т.е. сохраняются веса на эпохе, на которой «валидационная» функция потерь (красная линия) имеет минимальное значение. Для модели 1 это соответствует 9 эпохе.

Таблица 1 – Результаты модели 1 на тестовой выборке

Класс/Метрика	Precision	Recall	F1-score	Количество
Здоровый	0.908	0.867	0.887	240
Пневмония	0.951	0.967	0.959	639
Accuracy	93,97%			879

Можно заметить, что для класса «Здоровый» наблюдается низкое значение recall, это обусловлено распределением данных в обучающей выборке. Указанным значениям метрик соответствует матрица ошибок, указанная в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица ошибок модели 1 на тестовой выборке

Метка/Предсказание	Здоровый	Пневмония
Здоровый	208	32
Пневмония	21	618

Модель 2

Следующая модель, по сравнению с моделью 1, сможет обнаруживать более глубокие особенности изображений легких, используя дополнительные сверточный и объединяющий (pooling) слои. Фактически к предыдущей модели между 5 и 6 слоями добавляются ещё два слоя.

Зависимость значений функции потерь для обучающей и валидационной выборок от номера эпохи приведено на Рис. 3.

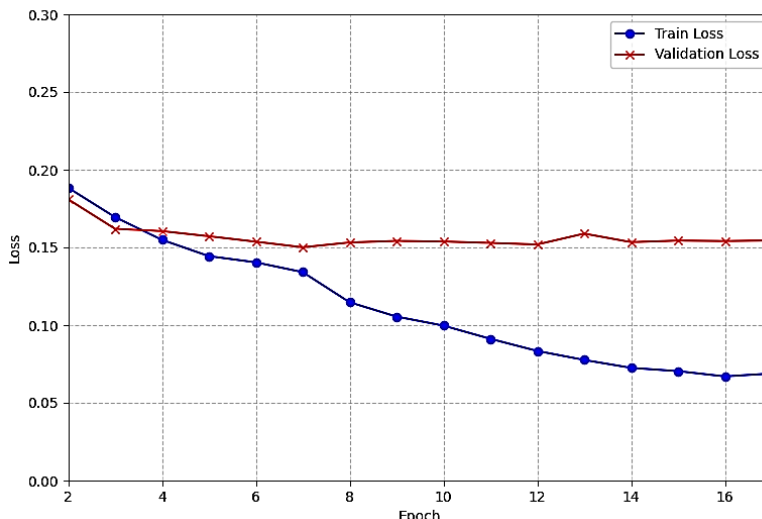


Рисунок 3 – Зависимость значений функции потерь от номера эпохи обучения для модели 2.

По красному графику на Рис. 3 можно видеть, что функция потерь на валидационной выборке для модели 2 немного больше 0.15. Также и обучающая выборка даёт несколько худшие функции потерь на всех эпохах. Результаты обучения модели 2 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты модели 2 на тестовой выборке

Класс/Метрика	Precision	Recall	F1-score	Количество
Здоровый	0.890	0.879	0.885	240
Пневмония	0.955	0.959	0.957	639
Ассурасу	93,74%			879

Можно заметить, что для класса «Здоровый» значение recall больше, а для класса «пневмония» меньше. Указанным значениям метрик соответствует матрица ошибок, указанная в таблице Таблица 4.

Таблица 4 – Матрица ошибок модели 2 на тестовой выборке

Метка/Предсказание	Здоровый	Пневмония
Здоровый	211	29
Пневмония	26	613

Модель 3

Данная модель по структуре совпадает с моделью 1, отличаясь лишь уменьшенным размером матриц свёрток (3 на 3 элемента) на всех слоях. Предложенная модель отыскивает признаки меньших размеров в отличие от первых двух моделей за счёт уменьшения размеров сверточной матрицы. Функции потерь для этого случая приведены на Рис. 4.

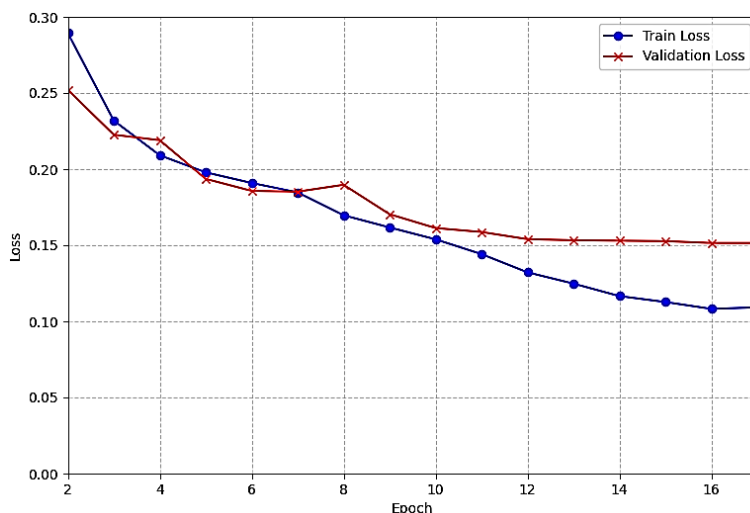


Рисунок 4 – Зависимость значений функции потерь от номера эпохи обучения для модели 3.

Можно отметить, что разница между функциями потерь обучающийся и валидационной выборками здесь меньше. Скорее всего это обусловлено тем, что признаки при малых свертках для различных изображений отличаются меньше. Результаты метрик для тестовой выборки приведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 – Результаты модели 3 на тестовой выборке

Класс/Метрика	Precision	Recall	F1-score	Количество
Здоровый	0.914	0.842	0.876	240
Пневмония	0.942	0.970	0.956	639
Accuracy	93,52%			879

Таблица 6 – Матрица ошибок модели 3 на тестовой выборке

Метка/Предсказание	Здоровый	Пневмония
Здоровый	202	38
Пневмония	19	620

Модель 4

Рассмотрим также модель, имеющую большую сверточную матрицу (7 на 7 элемента) на всех слоях. Таким образом можно учесть характерные особенности большего размера.

Зависимость значений функции потерь для обучающей и валидационной выборок от номера эпохи приведено на Рис. 5.

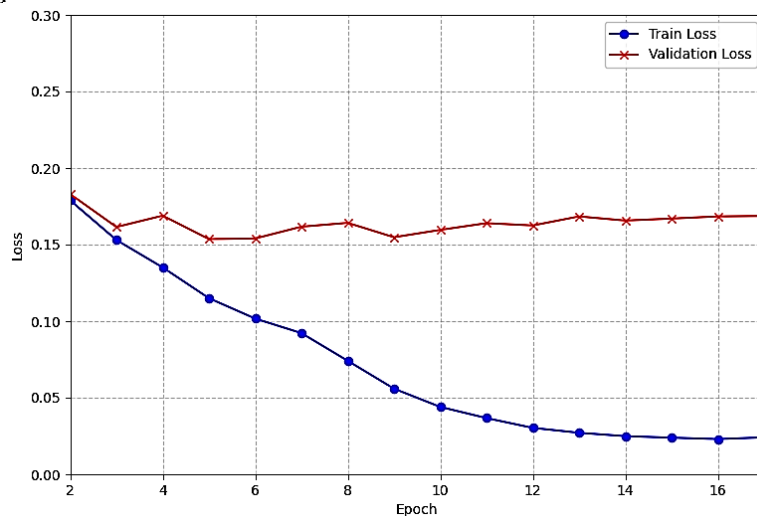


Рисунок 5 – Зависимость значений функции потерь от номера эпохи обучения для модели 4

Начиная с 9-й эпохи модель начинает переобучаться. Оптимальная точность на валидационной выборке достигается 5, 6, 9 эпохах и имеет значения функции потерь немного больше 0.15. Результаты тестирования для модели 4 приведены в таблицах 7 и 8

Таблица 7 – Результаты модели 4 на тестовой выборке

Класс/Метрика	Precision	Recall	F1-score	Количество
Здоровый	0.927	0.850	0.887	240
Пневмония	0.945	0.975	0.960	639
Accuracy	94,08%			879

Таблица 8 – Матрица ошибок модели 4 на тестовой выборке

Метка/Предсказание	Здоровый	Пневмония
Здоровый	204	36
Пневмония	16	623

Точности на валидационной выборке для рассмотренных четырех моделей практически близки. На тестовой выборке лучший результат показала модель 4 – она определила 623 больных пневмонией из 639, худший – модель 2: определила 613. Для выбора архитектуры ещё двух моделей будем опираться на валидационную выборку. Исходя из меньшей переобучаемости моделей выберем за основу модели с размером сверточных матриц 3 на 3. Также для уменьшения переобучения добавим dropout.

Модель 5

Данная модель похожа на модель 3 и имеет следующие особенности. После 5 шага добавляются пулинг, свёртка и пулинг, перед последним слоем – слой dropout, производящий случайное отключение весов с вероятностью 0.45.

В этой и следующей моделях в качестве функции активации используется ReLU. После каждого свёрточного слоя производится нормализация значений. Архитектура сети также визуализирована на Рис. 6.

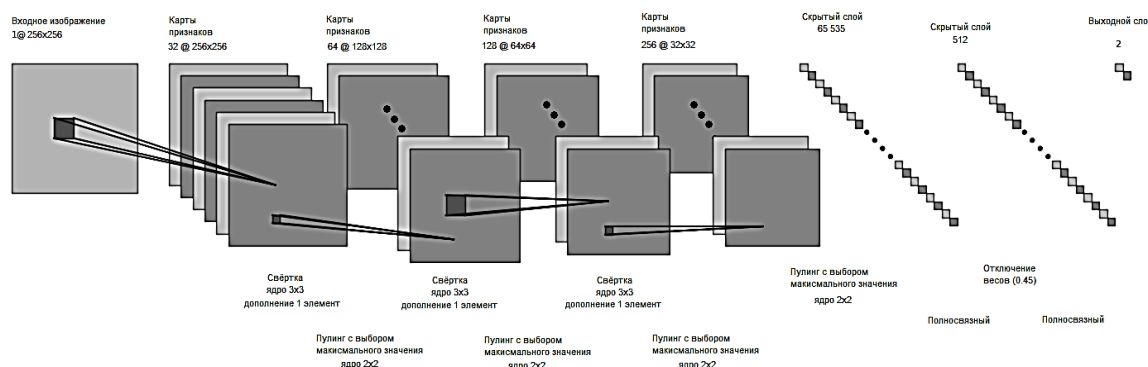


Рисунок 6 – Архитектура модели 5.

Зависимость значений функции потерь для обучающей и валидационной выборки от номера эпохи приведено на Рис. 7.

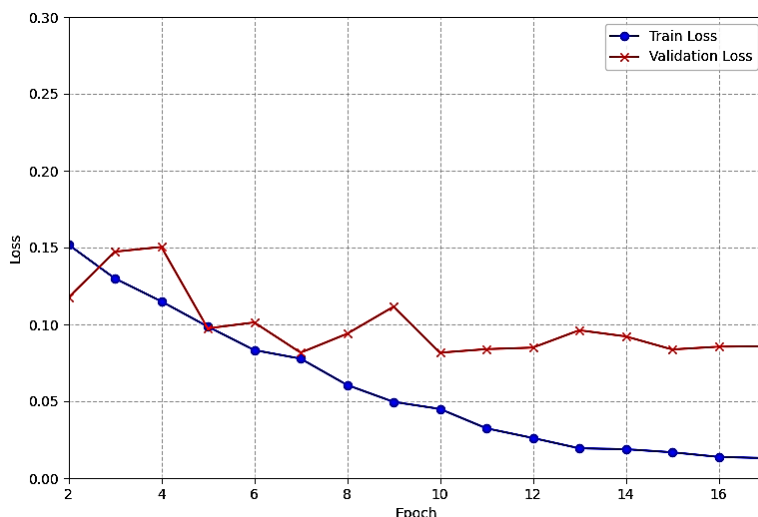


Рисунок 7 – Зависимость значений функции потерь от номера эпохи обучения для модели 5.

Точность валидационной выборки в этой модели выше, чем в предыдущих: значения функций потерь здесь менее 0.1 против 0.15 для предыдущих моделей. Результаты на тестовой выборке для модели 5 приведены в таблицах 9 и 10.

Таблица 9 – Результаты модели 5 на тестовой выборке

Класс/Метрика	Precision	Recall	F1-score	Количество
Здоровый	0.924	0.912	0.918	240
Пневмония	0.967	0.972	0.970	639
Асцигасу		95,56%		879

Таблица 10 – Матрица ошибок модели 5 на тестовой выборке

Метка/Предсказание	Здоровый	Пневмония
Здоровый	219	21
Пневмония	18	621

Модель 6

Данная модель основана на модели 5, но содержит дополнительные dropout (отключение весов с вероятностью 0.45) и полносвязный слой. Функции потерь на валидационной выборке для данной модели также менее 0.1 (Рис. 8).

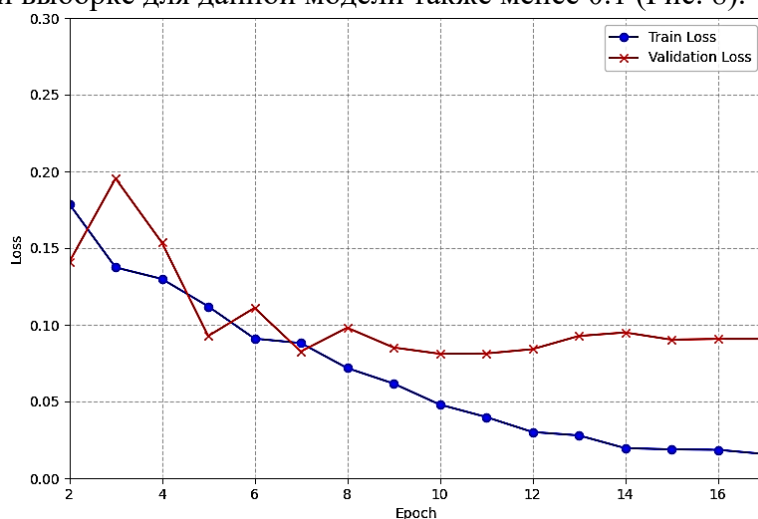


Рисунок 8 – Зависимость значений функции потерь от номера эпохи обучения для модели 6.

Результаты тестирования модели обобщены в таблицах Таблица 11 и 12.

Таблица 11 – Результаты модели 6 на тестовой выборке

Класс/Метрика	Precision	Recall	F1-score	Количество
Здоровый	0.952	0.904	0.921	240
Пневмония	0.965	0.983	0.974	639
Assugasu	96,13%			879

Таблица 12 – Матрица ошибок модели 6 на тестовой выборке

Метка/Предсказание	Здоровый	Пневмония
Здоровый	217	23
Пневмония	11	628

Последняя две модели имеет более высокие точности. Однако при принятии решения ансамблями, когда хотя бы одна нейронная сеть нашла заболевание, это не является самым важным критерием. Поэтому далее рассмотрим уже непосредственно сами ансамбли.

3 Классификация ансамблями нейронных сетей

Последняя две модели имеет более высокие точности. Однако при принятии решения ансамблями, когда хотя бы одна нейронная сеть нашла заболевание, это не является самым важным критерием. Поэтому далее рассмотрим уже непосредственно сами ансамбли.

Рассмотрим применение комбинаций нейронных сетей, когда каждая сеть независимо проводит классификацию, а затем происходит принятие решения с учётом всех результирующих классов, полученных отдельными нейронными сетями. Подобные структуры называют ансамблями. Так как в медицинской диагностике существенно важнее не пропустить заболевание, то в случае, если хотя бы одна сеть нашла пневмонию, то будем считать, что заболевание есть. Учитывая, что предложено 6 различных моделей сетей, рассмотрим ансамбли, содержащие от 2 до 6 различных нейронных сетей в своей структуре.

Для каждой модели оптимальное число эпох обучения получилось различным, так как это определяется минимальным значением функции потерь на валидационной выборке. Например, для модели 1 получилось 9 эпох (красная кривая на Рис. 2), а для модели 3 – 17 эпох (Рис. 4). Для шести изображений из тестовой выборки (person275_virus_565, person154_bacteria_728, person1181_bacteria_3129, person1192_bacteria_3141, person432_virus_881, person277_virus_571) всеми моделями класс «пневмония» был распознан неправильно как «Здоровый». Остальные изображения с пневмонией, кроме 27, приведенных в Таблице 13, классифицированы правильно. Буквой «П» обозначен правильный диагноз – пневмония, «-» – ошибочное диагностирование, как здорового. Изображения в таблице упорядочены в порядке возрастания числа нейронных сетей, которые правильно определяют класс «пневмония»: так первые три изображения правильно классифицированы только одной сетью, а следующие 10 – двумя сетями.

Таблица 13 – Таблица предсказанных классов из тестовой выборки различными моделями для «плохо-классифицируемых» изображений

Изображение/Модель	1	2	3	4	5	6
person485_bacteria_2049	-	-	-	-	-	П
person35_bacteria_178	-	-	-	-	-	П
person1461_virus_2510	-	-	-	-	-	П
person472_virus_969	П	-	П	-	-	-
person451_virus_932	-	-	П	-	П	-
person21_virus_53	-	-	-	-	П	П
person1582_bacteria_4137	-	-	-	-	П	П
person109_virus_203	-	-	П	П	-	-
person1497_virus_2607	-	-	П	П	-	-
person1286_virus_2209	-	-	-	-	П	П
person1252_virus_2124	-	-	-	-	П	П
person1230_virus_2081	-	-	-	П	-	П
person1227_virus_2078	-	-	-	-	П	П
person1155_virus_1934	-	-	-	П	П	П
person811_virus_1447	П	-	-	П	-	П
person781_virus_1412	П	П	П	П	-	-
person1174_virus_1980	П	П	П	П	-	-
person1225_virus_2076	П	-	-	П	П	П
person333_bacteria_1539	-	П	П	П	-	П
person317_bacteria_1473	П	П	П	П	-	-
person428_bacteria_1869	-	П	П	П	П	П
person1172_bacteria_3119	П	-	П	П	П	П
person590_bacteria_2428	П	-	П	П	П	П
person733_bacteria_2635	П	П	-	П	П	П
person754_virus_1379	П	П	П	П	-	П
person914_virus_1571	П	-	П	П	П	П
person983_bacteria_2910	П	-	П	П	П	П

Первые три изображения из Таблицы 13 правильно классифицированы только моделью 6. Это может свидетельствовать о том, что ансамбль с моделью 6 будет давать лучшие результаты, чем без неё. Проведем анализ на точность классификации всеми различными комбинациями ансамблей и приведем результаты лучших ансамблей по валидационной выборке. Также для этих ансамблей представим точности и на тестовой выборке. Отметим, что различных вариантов ансамблей всего 57. Результаты по обоим выборкам приведены в Таблице 14.

Таблица 14 – Результаты наилучших ансамблей для классификации пневмонии на валидационной и тестовой выборках

Класс/Метрика	Валидационная выборка		Тестовая выборка	
	Precision	Recall	Precision	Recall
Размер ансамбля = 2 (модели 3+6)				
Здоровый	0.972	0.861	0.970	0.817
Пневмония	0.951	0.991	0.935	0.991
Размер ансамбля = 3 (модели 3+5+6)				
Здоровый	0.976	0.861	0.970	0.812
Пневмония	0.951	0.992	0.934	0.991
Размер ансамбля = 3 (модели 1+4+6)				
Здоровый	0.958	0.861	0.970	0.821
Пневмония	0.950	0.986	0.936	0.991
Размер ансамбля = 4 (модели 2+3+5+6)				
Здоровый	0.976	0.857	0.970	0.796
Пневмония	0.949	0.992	0.928	0.991
Размер ансамбля = 5 (модели 1+2+3+5+6)				
Здоровый	0.976	0.853	0.969	0.792
Пневмония	0.948	0.992	0.927	0.991
Размер ансамбля = 6 (все модели)				
Здоровый	0.976	0.845	0.969	0.787
Пневмония	0.945	0.992	0.925	0.991

Лучшие результаты выделены жирным шрифтом. Для валидационной выборки максимальные точность и полнота достигается при размере ансамбля, равным трём (модели 3+5+6), для тестовой выборки оптимальный ансамбль также состоит из трёх нейросетей (модели 1+4+6). Во все оптимальные ансамбли входит модель 6.

Очевидно, что при добавлении новой модели в ансамбль, метрика precision уменьшается, так как появляются изображения, которые диагностируются добавленной моделью как изображение с пневмонией. Это видно по уменьшению значений precision с увеличением размеров ансамбля.

По результатам классификации на тестовой выборке оптимальным размером ансамблей можно считать 2 и 3. В этих случаях recall = 0.991, а precision варьируется в интервале от 0.934 до 0.936.

Заключение

Проведенный анализ позволяет отметить некоторые недостатки и определенные достоинства нейронных сетей.

Рассмотрено шесть вариантов нейронных сетей типа LeNet-5 с размером входного изображения 256 на 256 пикселей. Нейронные сети отличаются размерами сверточных матриц, что позволяет «обрабатывать» различные размеры особенностей изображений. Также архитектуры сетей имеют разную глубину, а у двух рассмотренных сетей есть dropout на последних полносвязанных слоях. Нейронные сети независимо обучены на одинаковой обучающей выборке, содержащей рентгеновские снимки здоровых пациентов и пациентов с пневмонией. Полученные метрики recall и precision для всех имеют примерно одинаковые значения с recall, изменяющимся в интервале от 0.959 до 0.983. Отметим, что с медицинской точки зрения под термином полнота (recall) понимается чувствительность (sensitivity), что трактуется как чувствительность модели к снимкам с пневмонией.

Рассмотрены ансамбли, содержащие от двух до шести обученных нейросетей в различной комбинации. Результирующий ответ ансамбля строится по принципу, если хотя бы одна из нейросетей определила пневмонию, то ансамбль тоже даёт ответ «пневмония». Такой подход позволил максимально увеличить полноту класса «пневмония», которая при наилучшем выборе нейросетей достигла значения 0.991, что означает 9 пропущенных больных из 1000. Полученное значение для recall превышает значения, достигаемое глубокими сетями [28]. Например, в [29] с помощью Quaternion CNN было получено значение 0.956, в [30] нейросетью VGG-16 – 0.959, а в [31], используя AlexNet, достигнуто значение 0.982.

Дальнейшее улучшение точности определения пневмонии может быть достигнуто за счёт анализа неверно интерпретированных снимков и подбора моделей нейронных сетей, правильно классифицирующих подобные рентгеновские изображения.

Список литературы

1. Balasubramaniam S. A modified LeNet CNN for breast cancer diagnosis in ultrasound images / S. Balasubramaniam, Y. Velmurugan, D. Jaganathan, S. Dhanasekaran. *Diagnostics*. 2023. Vol. 13, No. 17. P. 2746. DOI: 10.3390/diagnostics13172746.
2. Devesh R. Comparative analysis of machine learning algorithms in pneumonia detection / R. Devesh, V. Harsh, A. Mohd, S. Sonal. *Innovative Computing & Communication (ICICC 2024): Proceedings of the International Conference*. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4776487.
3. Demetgul M. Intelligent monitoring of linear stages with ensembles of improved LeNet DCNN and random forest classifiers / M. Demetgul, Y. Zhao, I.N. Tansel, J. Fleischer. *Measurement and Control*. 2025. [In press]. DOI: 10.1177/00202940251317395.
4. Hansen L. K. Neural network ensembles / L. K. Hansen, P. Salamon. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1990. Vol. 12, No. 10. P. 993–1001. DOI: 10.1109/34.58871.
5. Kayumov Z. Convolution neural network learning features for handwritten digit recognition / Z. Kayumov, D. Tumakov. *East-West Design and Test Symposium (EWDTS 2020): Proceedings of the 2020 IEEE*. 2020. P. 330–334. DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224822.
6. Kayumov Z. Hierarchical convolutional neural network for handwritten digits recognition / Z. Kayumov, D. Tumakov, S. Mosin. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 171. P. 1927–1934. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.206.
7. Tiar M. L. Pneumonia Classification using deep learning: a comparative study / M. L. Tiar, N. Terki, J.J. Dominguez-Jimenez. *Image and Signal Processing and their Applications (ISPA): Proceedings of the 8th International Conference*. 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/ISPA59904.2024.10536711.
8. Tuliabaeva D. On the recognition of weakly blurred, highly contrasting objects by neural networks / D. Tuliabaeva, D. Tumakov, A. Egorchev. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3243. Art. No. 020087. DOI: 10.1063/5.0247350.
9. Verdhan V. Image classification using LeNet / V. Verdhan. *Computer Vision Using Deep Learning: Neural Network Architectures with Python and Keras*. Apress, 2021. 308 p.
10. Yang Y. Pneumonia Recognition by Deep Learning: A Comparative Investigation / Y. Yang, G. Mei. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 9. P. 4334. DOI: 10.3390/app12094334.
11. Schapire R. E. The strength of weak learnability / R.E. Schapire. *Machine Learning*. 1990. Vol. 5, No. 2. P. 197–227. DOI: 10.1007/BF00116037.
12. Breiman L. Random forests / L. Breiman. *Machine Learning*. 2001. Vol. 45. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
13. Freund Y. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting / Y. Freund, R.E. Schapire. *Journal of Computer and System Sciences*. 1997. Vol. 55, No. 1. P. 119–139. DOI: 10.1006/jcss.1997.1504.
14. Dehaerne E. Optimizing YOLOv7 for semiconductor defect detection / E. Dehaerne, B. Dey, S. Halder, S. De Gendt. *Proceedings of SPIE*. 2023. Vol. 12496. P. 635–642. DOI: 10.48550/arXiv.2302.09565.
15. Chung A. Cloud computed machine learning based real-time litter detection using micro-UAV surveillance / A. Chung, D.Y. Kim, E. Kwok, M. Ryan, E. Tan, R. Gamadia. *MIT Undergraduate Research Technology Conference (URTC): Proceedings of the IEEE*. 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/URTC45901.2018.9244800.

16. Чернухин А.В. Построение модели предиктивной аналитики неисправностей промышленного оборудования / А.В. Чернухин, Е.А. Богданова, Т.В. Савицкая. *Программные продукты и системы*. 2024. Т. 37, № 2. С. 254–261. DOI: 10.15827/0236-235X.142.254-261.
17. Sasaki K. Lightweight and accurate YOLOv7-based ensembles with knowledge distillation for urinary sediment detection / K. Sasaki, H. Nishikawa, I. Taniguchi, T. Onoye. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 93468–93480. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3574169.
18. Viola P. Robust real-time face detection / P. Viola, M.J. Jones. *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 57, No. 2. P. 137–154. DOI: 10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb.
19. Бессарабов Н.А. Автоматизированная разметка изображений с беспилотного летательного аппарата при помощи предобученных моделей искусственного интеллекта / Н.А. Бессарабов, А.А. Сапожников, Д.В. Татарников, Р.П. Тюгунов, А.М. Цыганов. *Программные продукты и системы*. 2025. Т. 38, № 2. С. 251–260. DOI: 10.15827/0236-235X.150.251-260.
20. Nanni L. Ensemble of convolutional neural networks for bioimage classification / L. Nanni, S. Ghidoni, S. Brahmam. *Applied Computing and Informatics*. 2021. Vol. 17, No. 1. P. 19–35. DOI: 10.1016/j.aci.2018.06.002.
21. Balaji S. A context for effective prediction and classification of diabetic retinopathy disease using deep ensemble AlexNet & LeNet classifier / S. Balaji, B. Karthik. *Computing for Sustainable Global Development (INDIACom): Proceedings of the 11th International Conference*. 2024. P. 414–421. DOI: 10.23919/INDIACom61295.2024.10498405.
22. Rajeashwari S. Enhancing pneumonia diagnosis with ensemble-modified classifier and transfer learning in deep-CNN based classification of chest radiographs / S. Rajeashwari, K. Arunesh. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2024. Vol. 93. Art. ID 106130. DOI: 10.1016/j.bspc.2024.106130.
23. Zhou T. The ensemble deep learning model for novel COVID-19 on CT images / T. Zhou, H. Lu, Z. Yang, S. Qiu, B. Huo, Y. Dong. *Applied Soft Computing*. 2021. Vol. 98. Art. ID 106885. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106885.
24. Osagie E. Ensemble learning for medical image character recognition based on enhanced LeNet-5 / E. Osagie, W. Ji, N. Helian. *Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology (CIBCB): Proceedings of the 2023 IEEE Conference*. 2023. P. 1–8. DOI: 10.1109/CIBCB56990.2023.10264911.
25. Jaganathan D. Concatenated modified LeNet approach for classifying pneumonia images / D. Jaganathan, S. Balsubramaniam, V. Sureshkumar, S. Dhanasekaran. *Journal of Personalized Medicine*. 2024. Vol. 14, No. 3. – Art. ID 328. – DOI: 10.3390/jpm14030328.
26. Meir Y. Efficient shallow learning as an alternative to deep learning / Y. Meir, O. Tevet, Y. Tzach, S. Hodassman, R.D. Gross, I. Kanter // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – Art. ID 5423. – DOI: 10.1038/s41598-023-32559-8.
27. Пикалёв Я.С. О нейронных архитектурах извлечения признаков для задачи распознавания объектов на устройствах с ограниченной вычислительной мощностью / Я.С. Пикалёв, Т.В. Ермоленко // *Проблемы искусственного интеллекта*. – 2023. – № 3(30). – С. 44–54.
28. Sharma S. A systematic literature review on deep learning approaches for pneumonia detection using chest X-ray images / S. Sharma, K. Guleria // *Multimedia Tools and Applications*. – 2024. – Vol. 83. – P. 24101–24151. – DOI: 10.1007/s11042-023-16419-1.
29. Singh S. Pneumonia classification using quaternion deep learning / S. Singh, B.K. Tripathi // *Multimedia Tools and Applications*. – 2022. – Vol. 81. – P. 1743–1764. – DOI: 10.1007/s11042-021-11409-7.
30. Hasan M.D.K. Deep learning approaches for detecting pneumonia in COVID-19 patients by analyzing chest X-Ray images / M.D.K. Hasan [и др.] // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2021. – Art. ID 9929274. – 8 p. – DOI: 10.1155/2021/9929274.
31. Ibrahim A.U. Pneumonia classification using deep learning from chest X-ray images during COVID-19 / A.U. Ibrahim, M. Ozsoz, S. Serte, F. Al-Turjman, P.S. Yakoi // *Cognitive Computation*. – 2024. – Vol. 16. – P. 1589–1601. – DOI: 10.1007/s12559-020-09787-5.

References

1. Balasubramaniam S. A modified LeNet CNN for breast cancer diagnosis in ultrasound images / S. Balasubramaniam, Y. Velmurugan, D. Jaganathan, S. Dhanasekaran // *Diagnostics*. – 2023. – Vol. 13, No. 17. – P. 2746. – DOI: 10.3390/diagnostics13172746.
2. Devesh R. Comparative analysis of machine learning algorithms in pneumonia detection / R. Devesh, V. Harsh, A. Mohd, S. Sonal // *Innovative Computing & Communication (ICICC 2024): Proceedings of the International Conference*. – 2024. – DOI: 10.2139/ssrn.4776487.

3. Demetgul M. Intelligent monitoring of linear stages with ensembles of improved LeNet DCNN and random forest classifiers / M. Demetgul, Y. Zhao, I.N. Tansel, J. Fleischer // *Measurement and Control*. – 2025. – [In press]. – DOI: 10.1177/00202940251317395.
4. Hansen L. K. Neural network ensembles / L. K. Hansen, P. Salamon // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1990. – Vol. 12, No. 10. – P. 993–1001. – DOI: 10.1109/34.58871.
5. Kayumov Z. Convolution neural network learning features for handwritten digit recognition / Z. Kayumov, D. Tumafov // *East-West Design and Test Symposium (EWDTS 2020): Proceedings of the 2020 IEEE*. – 2020. – P. 330–334. – DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224822.
6. Kayumov Z. Hierarchical convolutional neural network for handwritten digits recognition / Z. Kayumov, D. Tumafov, S. Mosin // *Procedia Computer Science*. – 2020. – Vol. 171. – P. 1927–1934. – DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.206.
7. Tiar M. L. Pneumonia Classification using deep learning: a comparative study / M. L. Tiar, N. Terki, J.J. Dominguez-Jimenez // *Image and Signal Processing and their Applications (ISPA): Proceedings of the 8th International Conference*. – 2024. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ISPA59904.2024.10536711.
8. Tuliabaeva D. On the recognition of weakly blurred, highly contrasting objects by neural networks / D. Tuliabaeva, D. Tumafov, A. Egorchev // *AIP Conference Proceedings*. – 2024. – Vol. 3243. – Art. No. 020087. – DOI: 10.1063/5.0247350.
9. Verdhan V. Image classification using LeNet / V. Verdhan // *Computer Vision Using Deep Learning: Neural Network Architectures with Python and Keras*. – Apress, 2021. – 308 p.
10. Yang Y. Pneumonia Recognition by Deep Learning: A Comparative Investigation / Y. Yang, G. Mei // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, No. 9. – P. 4334. – DOI: 10.3390/app12094334.
11. Schapire R. E. The strength of weak learnability / R.E. Schapire // *Machine Learning*. – 1990. – Vol. 5, No. 2. – P. 197–227. – DOI: 10.1007/BF00116037.
12. Breiman L. Random forests / L. Breiman // *Machine Learning*. – 2001. – Vol. 45. – P. 5–32. – DOI: 10.1023/A:1010933404324.
13. Freund Y. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting / Y. Freund, R.E. Schapire // *Journal of Computer and System Sciences*. – 1997. – Vol. 55, No. 1. – P. 119–139. – DOI: 10.1006/jcss.1997.1504.
14. Dehaerne E. Optimizing YOLOv7 for semiconductor defect detection / E. Dehaerne, B. Dey, S. Halder, S. De Gendt // *Proceedings of SPIE*. – 2023. – Vol. 12496. – P. 635–642. – DOI: 10.48550/arXiv.2302.09565.
15. Chung A. Cloud computed machine learning based real-time litter detection using micro-UAV surveillance / A. Chung, D.Y. Kim, E. Kwok, M. Ryan, E. Tan, R. Gamadia // *MIT Undergraduate Research Technology Conference (URTC): Proceedings of the IEEE*. – 2018. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/URTC45901.2018.9244800.
16. Chernukhin A.V. Postroyeniye modeli prediktivnoy analitiki neispravnostey promyshlennogo oborudovaniya / A.V. Chernukhin, E.A. Bogdanova, T.V. Savitskaya // *Programmnyye produkty i sistemy*. – 2024. – T. 37. № 2. – S. 254–261. – DOI: 10.15827/0236-235X.142.254-261.
17. Sasaki K. Lightweight and accurate YOLOv7-based ensembles with knowledge distillation for urinary sediment detection / K. Sasaki, H. Nishikawa, I. Taniguchi, T. Onoye // *IEEE Access*. – 2025. – Vol. 13. – P. 93468–93480. – DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3574169.
18. Viola P. Robust real-time face detection / P. Viola, M.J. Jones // *International Journal of Computer Vision*. – 2004. – Vol. 57, No. 2. – P. 137–154. – DOI: 10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb.
19. Bessarabov N.A. Avtomatizirovannaya razmetka izobrazheniy s bespilotnogo letatel'nogo apparata pri pomoshchi predobuchennykh modeley iskusstvennogo intellekta / N.A. Bessarabov, A.A. Sapozhnikov, D.V. Tatarnikov, R.R. Tyuginov, A.M. Tsyganov // *Programmnyye produkty i sistemy*. – 2025. – T. 38. № 2. – S. 251–260. – DOI: 10.15827/0236-235X.150.251-260.
20. Nanni L. Ensemble of convolutional neural networks for bioimage classification / L. Nanni, S. Ghidoni, S. Brahnam // *Applied Computing and Informatics*. – 2021. – Vol. 17, No. 1. – P. 19–35. – DOI: 10.1016/j.aci.2018.06.002.
21. Balaji S. A context for effective prediction and classification of diabetic retinopathy disease using deep ensemble AlexNet & LeNet classifier / S. Balaji, B. Karthik // *Computing for Sustainable Global Development (INDIACom): Proceedings of the 11th International Conference*. – 2024. – P. 414–421. – DOI: 10.23919/INDIACom61295.2024.10498405.
22. Rajeashwari S. Enhancing pneumonia diagnosis with ensemble-modified classifier and transfer learning in deep-CNN based classification of chest radiographs / S. Rajeashwari, K. Arunesh // *Biomedical Signal Processing and Control*. – 2024. – Vol. 93. – Art. ID 106130. – DOI: 10.1016/j.bspc.2024.106130.

23. Zhou T. The ensemble deep learning model for novel COVID-19 on CT images / T. Zhou, H. Lu, Z. Yang, S. Qiu, B. Huo, Y. Dong. *Applied Soft Computing*. 2021. Vol. 98. Art. ID 106885. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106885.
24. Osagie E. Ensemble learning for medical image character recognition based on enhanced LeNet-5 / E. Osagie, W. Ji, N. Helian. *Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology (CIBCB): Proceedings of the 2023 IEEE Conference*. 2023. P. 1–8. DOI: 10.1109/CIBCB56990.2023.10264911.
25. Jaganathan D. Concatenated modified LeNet approach for classifying pneumonia images / D. Jaganathan, S. Balsubramaniam, V. Sureshkumar, S. Dhanasekaran. *Journal of Personalized Medicine*. 2024. Vol. 14, No. 3. Art. ID 328. DOI: 10.3390/jpm14030328.
26. Meir Y. Efficient shallow learning as an alternative to deep learning / Y. Meir, O. Tevet, Y. Tzach, S. Hodassman, R.D. Gross, I. Kanter. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Art. ID 5423. DOI: 10.1038/s41598-023-32559-8.
27. Pikalev Ya.S. O neyronnykh arkhitekturakh izvlecheniya priznakov dlya zadachi raspoznavaniya obyektov na ustroystvakh s ogranichennoy vychislitelnoy moshchnostyu / Ya.S. Pikalev. T.V. Ermolenko *Problemy iskusstvennogo intellekta*. 2023. № 3(30). S. 44-54.
28. Sharma S. A systematic literature review on deep learning approaches for pneumonia detection using chest X-ray images / S. Sharma, K. Guleria. *Multimedia Tools and Applications*. 2024. Vol. 83. P. 24101–24151. DOI: 10.1007/s11042-023-16419-1.
29. Singh S. Pneumonia classification using quaternion deep learning / S. Singh, B.K. Tripathi. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81. P. 1743–1764. DOI: 10.1007/s11042-021-11409-7.
30. Hasan M.D.K. Deep learning approaches for detecting pneumonia in COVID-19 patients by analyzing chest X-Ray images / M.D.K. Hasan [и др.] *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Art. ID 9929274. 8 p. DOI: 10.1155/2021/9929274.
31. Ibrahim A.U. Pneumonia classification using deep learning from chest X-ray images during COVID-19 / A.U. Ibrahim, M. Ozsoz, S. Serte, F. Al-Turjman, P.S. Yakoi. *Cognitive Computation*. 2024. Vol. 16. – P. 1589–1601. DOI: 10.1007/s12559-020-09787-5.

RESUME

D. N. Tumakov, A. R. Berdigulov, D. I. Khairullina, I. I. Bariev

Application of lenet-5-type neural network ensembles for diagnosing pneumonia in lung x-ray images

Background: Numerous studies are devoted to identifying various diseases from X-ray images. The neural networks used in these studies are deep, which leads to significant resource consumption for the algorithms implemented using such approaches. In a number of fields, ensembles of neural networks using bagging and boosting are used for classification tasks. Almost all studies emphasize computational accuracy rather than the completeness of disease identification.

Materials and methods: X-ray lung images were analyzed. The open Ped-Pneumonia dataset, containing 5,856 X-ray images in JPEG format and two classes (pneumonia – 4,273 images; normal – 1,583 images), was used. Pneumonia classification was performed using ensembles with varying numbers of shallow neural networks. The ensemble response selection criterion is based on the principle that if at least one neural network detects pneumonia, the ensemble also detects pneumonia. This maximizes recall.

Results: The optimal number of neural networks in the ensembles is 2 and 3. The maximum completeness of the "pneumonia" class for the best set of neural networks reached a value of 0.991.

Conclusion: The effective set of neural networks for use in the algorithm is proposed. Further improvement in pneumonia detection accuracy can be achieved by analyzing misinterpreted images and selecting neural network models that correctly classify such X-ray images.

РЕЗЮМЕ

Д. Н. Тумаков, А. Р. Бердигулов, Д. И. Хайруллина, И. И. Бариев
Применение ансамблей нейронных сетей типа LeNet-5 для
диагностирования пневмонии на рентгеновских изображениях легких

История вопроса, исходные данные: Большое количество работ посвящено определению различных заболеваний по рентгеновским снимкам. Нейронные сети, используемые в этих работ, являются глубокими. Это приводит к большим затратам ресурсов, которые необходимы для алгоритмов, реализуемых с помощью таких подходов. В ряде областей для задач классификации используются ансамбли нейронных сетей с использованием бэггинга и бустинга. Почти во всех работах ставка делается на точность вычислений, а не на полноту определения заболевания.

Материалы и методы: Исследованы рентгеновские изображения лёгких. Использован открытый датасет Ped-Pneumonia, содержащий 5856 рентгеновских снимков в формате JPEG и два класса: (пневмония – 4273 снимка и норма – 1583 снимка).

Классификация пневмонии проведена ансамблями с различным количеством неглубоких нейронных сетей. Условие выбора ответа ансамбля построено по принципу, если хотя бы одна из нейросетей определила пневмонию, то ансамбль тоже определяет пневмонию. Это позволяет максимально увеличить полноту.

Результаты: Оптимальное число нейронных сетей в ансамблях равняется 2 и 3. Максимальная полнота класса «пневмония», для лучшего набора нейросетей достигла значения 0.991.

Заключение: Предложен эффективный набор нейронных сетей для использования в составе алгоритма. Дальнейшее улучшение точности определения пневмонии может быть достигнуто за счёт анализа неверно интерпретированных снимков и подбора моделей нейронных сетей, правильно классифицирующих подобные рентгеновские изображения.

Тумаков Д. Н. – к.ф.-м.н., заместитель директора института вычислительной математики и информационных технологий по научной деятельности, ФГБОУ ВО К(П)ФУ, кафедра прикладной математики и искусственного интеллекта, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, тел +7(965) 586-79-97, dtumakov@kpfu.ru. *Область научных интересов:* нейронные сети, машинное зрение, обработка изображений, искусственный интеллект, проектирование антенных устройств.

Бердигулов А. Р. – магистрант института вычислительной математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО К(П)ФУ, кафедра прикладной математики и искусственного интеллекта, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, тел +7(937) 527-78-44, berdigulov.airat@mail.ru. *Область научных интересов:* нейронные сети, машинное зрение, искусственный интеллект в медицине.

Хайруллина Д. И. – магистрант института вычислительной математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО К(П)ФУ, кафедра прикладной математики и искусственного интеллекта, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, тел +7(927) 402-96-11, dina07.khayrullina.99@mail.ru. *Область научных интересов:* нейронные сети, машинное зрение, кластеризация.

Бариев И. И. – директор, АНО ВО «Университет Иннополис», 420500, Иннополис, ул. Университетская, 1, тел +7 (843) 203-92-53, i.bariev@innopolis.ru. *Область научных интересов:* нейронные сети, искусственный интеллект в медицине.

Статья поступила в редакцию 18.03.2025.

УДК 621; 534.014.4

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-52-64

В. Н. Беловодский, С. Л. Букин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
283001, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Артёма, 58

О ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ МАТЕРИАЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТИРУЮЩЕЙ МАШИНЕ НЕЛИНЕЙНОГО ТИПА, СОВЕРШАЮЩЕЙ СУБ- И СУПЕРГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

V. N. Belovodskiy, S. L. Bukin

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Donetsk National Technical University"
283001, Donetsk People's Republic, Donetsk, st. Artyoma, 58

ON THE MOVEMENTS OF A MATERIAL PARTICLE ON A HORIZONTAL TRANSPORTING MACHINE OF A NONLINEAR TYPE PERFORMING SUB- AND SUPERHARMONIC VIBRATIONS

Рассмотрена одномассовая горизонтальная транспортирующая машина с билинейной характеристикой упругих связей и инерционным гармоническим возбуждением и проведен анализ её колебаний в зонах сложных (суб- и супергармонических) резонансов. Установлена возможность возбуждения в этих частотных диапазонах колебаний, близких к оптимальным бигармоническим. На примере математической модели безотрывных движений материальной частицы выполнен сравнительный анализ скорости её перемещения по горизонтальной вибрирующей поверхности при таких движениях. Продемонстрирована возможность обеспечивать скорость перемещения частицы близкую к максимальной путем реализации субгармонического резонанса порядка 1:2.

Ключевые слова: вибрационная транспортирующая машина, суб- и супергармонические резонансы, материальная частица

A single-mass horizontal transporting machine with a bilinear characteristic of elastic elements and inertial harmonic excitation is considered and its vibrations in the zones of sub- and superharmonic resonances are analyzed. The possibility of excitation in these frequency ranges of oscillations close to optimal biharmonic has been established. Using the example of a mathematical model of motions of a material particle along a horizontal vibrating surface, a comparative analysis of the velocity of its movement is performed. It is demonstrated the possibility to provide a particle velocity close to the maximum by implementing a subharmonic resonance of the order of 1:2.

Key words: vibrating transporting machine, sub- and superharmonic resonances, material particle

Введение

В различных отраслях промышленности широко используются вибрационные машины с горизонтально расположенным рабочим органом, которые применяются для транспортирования материалов и продуктов с одновременным процессом сепарирования, сушки, охлаждения и пр. [1]. Очевидно, что этапу непосредственной разработки и исследований вибрационной машины предшествует этап обоснования используемого закона движения её рабочего органа с учётом особенностей вибротранспортирования по нему обрабатываемого груза.

Несмотря на широкий диапазон параметров перерабатываемых материалов, можно выделить общие закономерности процесса вибротранспортирования, активное изучение которых началось во второй половине XX века. Теория вибрационного транспортирования, применительно к материальной частице, создавалась трудом многих отечественных и зарубежных исследователей. Большие заслуги в области вибрационного перемещения принадлежат И. И. Блехману, Р. Ф. Ганиеву, Э. Э. Лавенделу, И. Ф. Гончаревичу, В. К. Преснякову, П. М. Василенко, И. Я. Федоренко, В. Н. Потураеву, В. П. Надутому, В. П. Франчуку, А. Г. Червоненко, Н. И. Камышному и другим. Теоретические и экспериментальные разработки этих авторов [2-13] послужили основой для создания широкого спектра специализированных вибрационных транспортно-технологических машин (ВТТМ).

Изучение технологического воздействия вибраций на различные обрабатываемые среды выявили перспективность использования колебаний с полигармоническим спектром не только для совершенствования технологии обработки материала, но и для интенсификации процесса транспортирования различных грузов [4-6], [10-19].

Установлено [1], [2], [4], [6-8], [10-20], что вибрационное транспортирование материала по горизонтальному рабочему органу ВТТМ возможно при асимметричных законах колебаний рабочего органа, в частности, би- или полигармонических.

На перспективность применения полигармонических вибровозбудителей в качестве привода вибрационных машин обращали внимание И. И. Блехман (1962 г.), Э. Э. Лавендел (1963), Б. И. Крюков (1967 г.), И. Ф. Гончаревич (1967 г.), А. Г. Червоненко (1970) и другие. Исследования транспортирования грузов по поверхностям, совершающим продольные бигармонические колебания, выполнены в ряде работ, упомянутых выше.

Естественно, что в процессе изучения режимов вибротранспортирования возникла задача определения оптимальных режимов колебаний рабочего органа ВТТМ, при которых достигается максимальная скорость перемещения обрабатываемого материала. Следует отметить, что изучение законов движения рабочих поверхностей для оптимального перемещения материальных частиц также начались в 60-х годах прошлого века. Так, путём проведения вычислительных экспериментов на АВМ Э. А. Аграновская и И. И. Блехман нашли оптимальный бигармонический закон горизонтального лотка при ограниченном ускорении [4]

$$\ddot{\zeta}(t) = A \cos(2\pi t) + B \cos(4\pi t + \varepsilon), \quad (1)$$

где $A/B = -1$, $\varepsilon = -\pi/3 = -1.0472$ (здесь $\ddot{\zeta}$ – ускорение; A, B – амплитуды первой и второй гармонических составляющих, соответственно; ε – сдвиг фазы между ними; t – время).

Учитывая периодический характер колебаний, после двукратного интегрирования выражения (1) можно получить переменную часть закона перемещений

$$\zeta_1(t) = -\frac{1}{4\pi^2} \left(A \cos(2\pi t) + \frac{B}{4} \cos(4\pi t + \varepsilon) \right). \quad (2)$$

Обратим внимание, что (1) и (2) описывает два противоположных режима вибраций рабочего органа, при которых и направления перемещения груза также противоположны.

К наиболее ранним исследованиям вопросов оптимизации вибротранспортировки относятся работы Э. Э. Лавендела [8], [12] и В. А. Троицкого [5], в которых исследовалось движение материальной частицы по горизонтальной плоскости и по плоскости, составляющей некоторый угол с горизонтом. Авторы пришли к выводу, что оптимальным законом колебаний плоскости в этом случае является такой, при котором ускорение меняется по прямоугольному закону, причём должно отсутствовать проскальзывание груза назад.

Фундаментальные исследования по оптимизации процессов вибротранспортирования, проведенные Э. Э. Лавенделом, обобщены в его монографии [12], в которой, в частности, определены оптимальные законы колебаний:

- для наклонного лотка с разными значениями пределов допустимого ускорения;
- для продольно движущегося лотка;
- для лотка, движущегося под углом вибрации;
- для лотка, движущегося в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

В этой работе автор подтвердил справедливость условий оптимизации параметров бигармонических колебаний горизонтального лотка, обеспечивающих наивысшую скорость транспортирования груза (1).

В вибрационных машинах бигармонический режим движения рабочего органа обычно обеспечивается центробежным вибровозбудителем, который содержит четыре дебалансные массы. Каждая пара дебалансов вращается в противоположных направлениях с равной начальной фазой, причём частоты вращения каждой пары относятся в отношении 1:2 [4], [6], [10], [12], [18], [20]. Как показал опыт применения подобных вибровозбудителей они в конструктивном отношении довольно сложны, имеют высокую материал- и энергоёмкость. Вместе с тем, известна возможность формирования полигармонических вибраций при помощи моногармонического возбуждения, которая присуща нелинейным системам, в частности, системам с нелинейной характеристикой упругих связей. Так, при возбуждении сложных, суб- и супергармонических, резонансов характер таких колебаний имеет выраженный полигармонический характер [21-26]. Вместе с тем, вопрос о том, насколько они близки к оптимальным, остаётся открытым. Ниже он изучается на примере вибрационной машины с горизонтальным рабочим органом и билинейной упругой характеристикой.

Целью работы является установление возможности формирования колебаний близких к оптимальным за счёт реализации сложных (суб- и супергармонических) резонансов на примере одномассовой ВТТМ с билинейной характеристикой упругих связей и проведение сравнительного анализа скорости перемещения материальной частицы при этих движениях.

1 Математическая модель вибрационной машины

Расчётная динамическая схема рассматриваемой ВТТМ, а также силовая характеристика билинейной упругой опоры представлены на рис. 1. Поэтапное изучение динамики такой машины представлено в работах авторов [24-26].

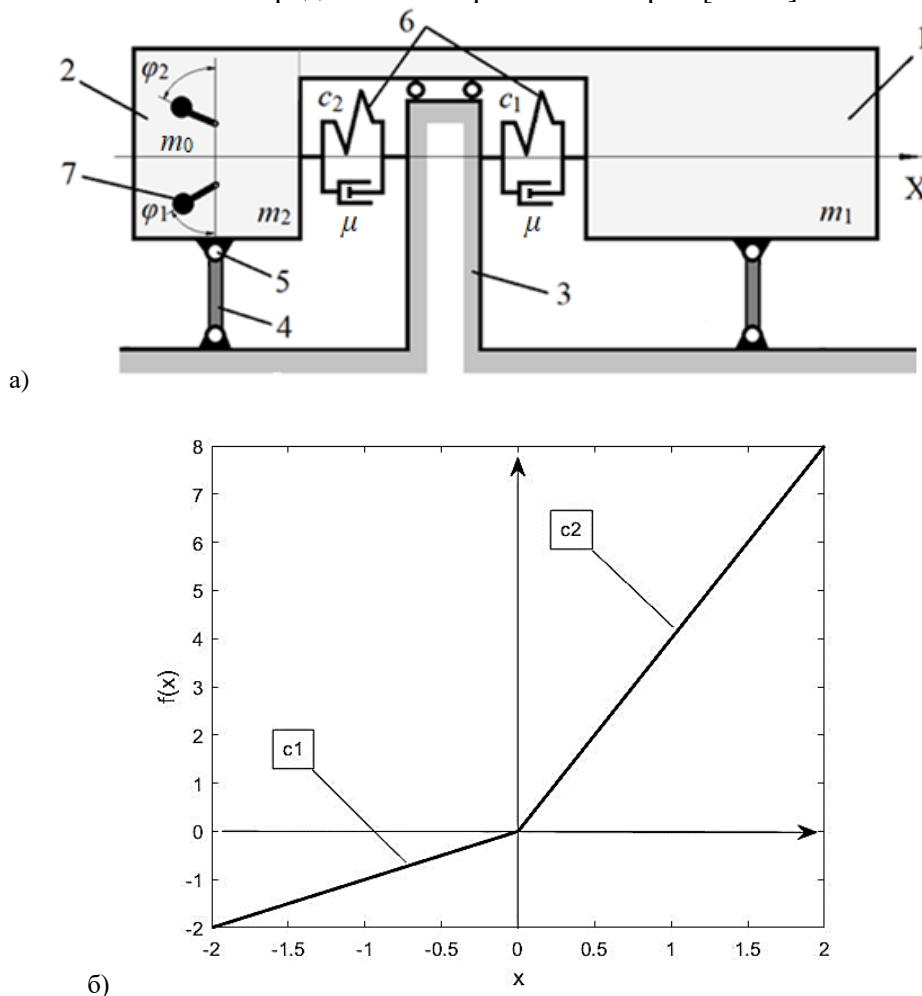


Рисунок 1 – Исследуемая вибрационная машина:

- а – динамическая схема; б – силовая характеристика упругая опоры ($\gamma=c_2/c_1=4$)
 1 – рабочий орган; 2 – корпус вибровозбудителя; 3 – основание; 4 – опорный рычаг;
 5 – резинометаллический шарнир; 6 – основная упругая связь; 7 – вибровозбудитель

Приняв традиционные допущения, опишем горизонтальные перемещения рабочего органа 1 (рис. 1), обозначив через $x(t)$ перемещение рабочего органа относительно положения покоя

$$M\ddot{x} + \mu \left(c_1 \frac{1 - \text{sign}(x)}{2} + c_2 \frac{1 + \text{sign}(x)}{2} \right) \dot{x} + \left(c_1 \frac{1 - \text{sign}(x)}{2} + c_2 \frac{1 + \text{sign}(x)}{2} \right) x = m_0 r \omega^2 \sin(\omega t), \quad (3)$$

где M – колеблющаяся масса, состоящая из масс рабочего органа m_1 , корпуса вибровозбудителя m_2 и его неуравновешенных частей m_0 ; r – эксцентриситет неуравновешенных частей вибровозбудителя; μ – коэффициент сопротивления упругой системы; c_1 , c_2 – коэффициенты жёсткости упругой опоры в направлении $-X$ и X , соответственно; ω – угловая скорость вращения неуравновешенных частей вибровозбудителя.

После замены $x=\xi\Delta$, $\tau=\omega_0 t$, $\omega_0=(c_1/M)^{0.5}$, $\eta=\omega/\omega_0$, $\gamma=c_2/c_1$, $P=m_0 r/(M\Delta)$, $\beta=\mu c_1/(M\omega_0)=\mu\omega_0$, где $\Delta=10^{-3}$ м, получим уравнение колебаний в безразмерной форме

$$\xi'' + \beta \left(\frac{1 - \text{sign}(\xi)}{2} + \gamma \frac{1 + \text{sign}(\xi)}{2} \right) \xi' + \left(\frac{1 - \text{sign}(\xi)}{2} + \gamma \frac{1 + \text{sign}(\xi)}{2} \right) \xi = P\eta^2 \sin(\eta\tau). \quad (4)$$

Для определённости, значение степени нелинейности упругой характеристики примем равным $\gamma=4$ и, ориентируясь на известные вибрационные машины резонансного типа, значение P выберем из условия, при котором при частоте возмущающей силы в три раза превосходящую собственную, амплитуда колебаний рабочего органа составляет 5-6 мм. Поэтому значение $P=5$. Коэффициент неупругих сопротивлений $\beta=0.1$, что соответствует реальным машинам технологического назначения.

2 Последовательность решения задачи

Задача выполняется в два этапа.

На первом этапе устанавливаются режимы движений, которые по амплитудным значениям гармонических составляющих в законе ускорений близки к режиму (1), а на втором – проводится сравнительный анализ перемещений материальной частицы при установленных на первом этапе, суб- и супергармонических, и оптимальных законах ускорений (1).

Для реализации первого этапа:

- 1) проводится построение частотных характеристик гармонических составляющих ускорений (AcFC) системы (4) в дорезонансной и резонансной зонах, включающих возбуждение супергармонического резонанса порядка 2:1 и субгармонического порядка 1:2;
- 2) с их помощью устанавливаются частоты возмущающей силы, при которых амплитуды двух младших гармоник в законе ускорений примерно равны;
- 3) определяются стационарные режимы движений, соответствующие этим частотам;
- 4) выполняется их спектрально-фазовый анализ и проводится построение их усечённых Фурье-разложений для ускорений рабочего органа;
- 5) проводится сравнение оптимальных законов ускорения (1), (2) с полученными стационарными режимами системы.

На втором этапе:

- 1) рассматривается модель движения материальной частицы по горизонтальной вибрирующей поверхности;
- 2) устанавливаются её законы перемещений при оптимальном и установленных на первом этапе суб- и супергармонических законах движения рабочего органа;
- 3) проводится сравнение, формулируются выводы.

Реализация первого этапа осуществляется с помощью разработанного программного обеспечения в виде приложений к среде моделирования Matlab. Построение частотных характеристик осуществляется путем сканирования с малым шагом выбранного промежутка изменения частоты вынуждающей силы. Для каждого её значения выполняется численное решение системы дифференциального уравнения (4) на временном отрезке, достаточном для установления колебаний. Затем, на промежутке, равном периоду стационарного режима, проводился его Фурье-анализ с использованием подпрограммы *ifft*, реализующей обратное преобразование Фурье.

Для снижения общего времени интегрирования дифференциальных уравнений при построении частотных характеристик, начальные условия, описывающие состояние системы для каждого следующего значения частоты возбуждения, принимаются равными конечным значениям фазовых переменных, полученным для предыдущего её значения. Решение уравнения (4) выполняется посредством солвера *ode23*, реализующего методы Рунге-Кутты 2-3-го порядков в модификации Богацки и Шампина [27], [28]. В данном случае, он оказывается более надёжным, по сравнению с решателями *ode45* (методы Рунге-Кутты 4-5-го порядка в модификации Дорманда и Принца) и *ode113* (метод Адамса, Башфорта, Моултона), хотя, и немного более медлительным.

Реализация второго этапа – определение перемещений материальной частицы на вибрирующей горизонтальной поверхности, осуществляется с помощью явного метода Эйлера [29].

3 Результаты исследования сложных резонансов

На рис. 2 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) гармонических составляющих в законах перемещений ВТТМ в до- и зарезонансной зонах, которые включают наиболее интенсивные из сложных резонансов, – супергармонический порядка 2:1 и субгармонический порядка 1:2.

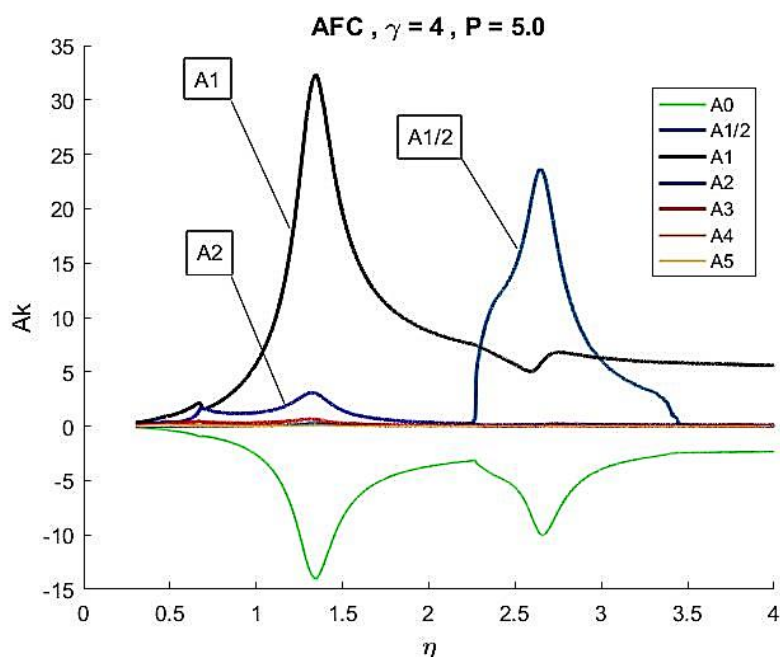


Рисунок 2 – АЧХ гармонических составляющих стационарных законов движения в зоне поиска

На рис. 3,а приводятся частотные характеристики пяти наиболее интенсивных гармонических составляющих закона ускорений рабочего органа в зоне возбуждения супергармонических резонансов. При частоте $\eta=0.96$ амплитуды первых двух из них, практически, совпадают. На рис. 3, б приводится, соответствующий этой частоте возбуждения, закон ускорений рабочего органа. Усечённое Фурье-разложение переменной части его закона перемещений с точностью до пяти гармонических составляющих имеет вид

$$\xi_1(\tau) = 4.7887 \cos(0.96\tau - 1.8629) + 1.2033 \cos(2 \cdot 0.96\tau + 3.0672) + 0.3101 \cos(3 \cdot 0.96\tau + 1.4152) + 0.0736 \cos(4 \cdot 0.96\tau + 0.0438) + 0.0063 \cos(5 \cdot 0.96\tau + 0.7921) \quad (5)$$

или, сделав замену

$$0.96\tau - 1.8629 = 2\pi t,$$

получим

$$\xi_1(t) = 4.7887 \cos(2\pi t) - 1.2033 \cos(4\pi t - 2.6318) + 0.3101 \cos(6\pi t + 0.7197) + 0.0736 \cos(8\pi t + 1.2122) + 0.0063 \cos(10\pi t - 2.4598). \quad (6)$$

Сравнивая (6) и (2), можно отметить, что соотношение амплитуд первых двух гармонических составляющих супергармонического режима близко к одному из оптимальных, однако фазовые различия весьма существенны.

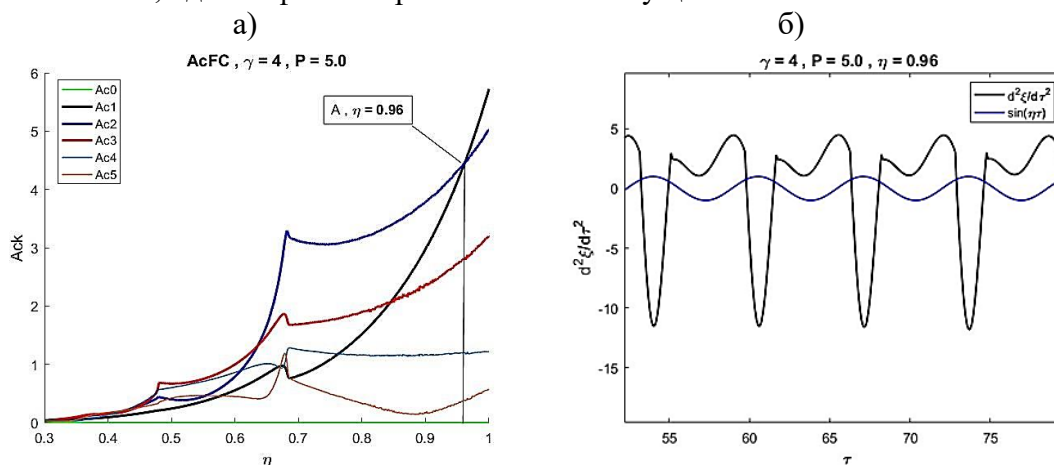


Рисунок 3 – Частотные характеристики гармонических составляющих закона ускорений в зоне супергармонических резонансов (а) и супергармонический закон ускорений рабочего органа (б) для $\eta=0.96$

Частотные характеристики субгармонического закона ускорений рабочего органа приведены на рис. 4, а. В промежутке изменения $\eta \in [2.59, 2.66]$ амплитуды младших гармоник, т.е. субгармоники и основной, примерно равны. На рис. 4, б приведен стационарный закон ускорений для одной из частот этого диапазона, а именно, для $\eta=2.62$. Усечённое Фурье-разложение переменной части закона перемещений рабочего органа для этой частоты возбуждения, с учётом пяти первых гармоник, имеет вид

$$\xi_1(\tau) = 23.0779 \cos\left(\frac{2.62}{2}\tau - 1.1388\right) + 5.5618 \cos\left(\frac{2.62}{2} \cdot 2\tau + 2.0169\right) + 0.4461 \cos\left(\frac{2.62}{2} \cdot 3\tau + 2.1569\right) + 0.0755 \cos\left(\frac{2.62}{2} \cdot 4\tau + 0.6111\right) + 0.0437 \cos\left(\frac{2.62}{2} \cdot 5\tau + 2.7971\right). \quad (7)$$

Сделав в (7) замену

$$\frac{2.62}{2}\tau - 1.1388 = 2\pi t$$

и переходя к переменной t , получим

$$\xi_1(\tau) = 23.0779 \cos(2\pi t) - 5.5618 \cos(4\pi t + 1.1529) + 0.4461 \cos(6\pi t - 0.7099) + 0.0755 \cos(8\pi t - 1.1170) + 0.0437 \cos(10\pi t + 2.2079). \quad (8)$$

Сравнивая, теперь, (8) с (2), можно отметить достаточно высокую точность выполнения амплитудного отношения двух первых гармонических составляющих и заметные различия в их фазовых соотношениях.

Перейдем к сравнению скорости перемещения материальной частицы при рассматриваемых режимах колебаний горизонтальной поверхности.

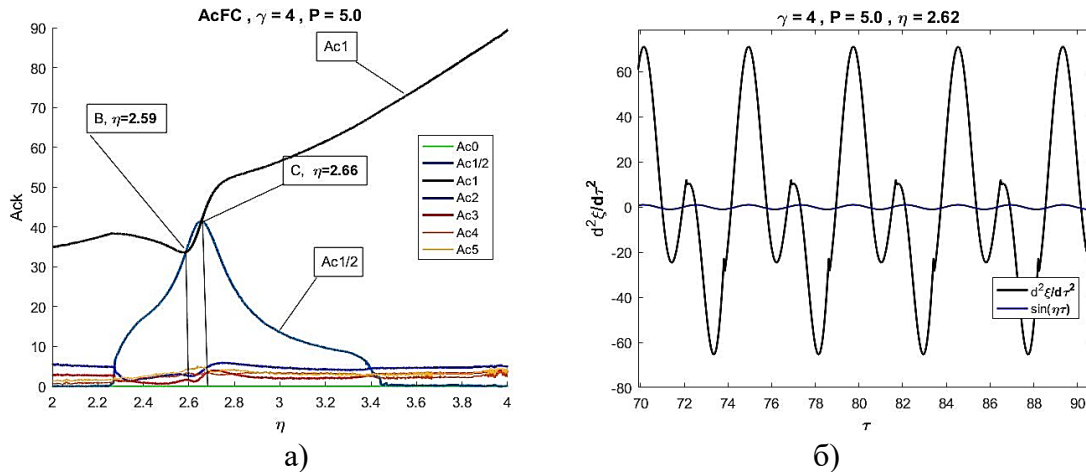


Рисунок 4 – Частотные характеристики гармонических составляющих закона ускорений в зоне субгармонического резонанса (а) и близкий к оптимальному субгармонический закон ускорений рабочего органа (б)

4 Перемещение материальной частицы

Проведём сравнительный анализ выделенных режимов, а именно, супергармонического (5) и субгармонического (7), с оптимальным режимом движения рабочего органа (2) по скорости перемещения на нём транспортируемого груза, идеализированного в виде материальной частицы. Известно, что описание обрабатываемого материала может осуществляться в виде материальной частицы (точки), механо-реологической модели слоя материала и других моделей [1]. Необходимо отметить, что и в настоящее время модель материальной частицы является наиболее часто применяемой при описании вибрационных процессов, т.к. позволяет выявить физический механизм многих процессов вибрационного перемещения [30].

Рассмотрим вариант, когда на частицу действуют следующие силы (рис. 5): тяжести G , нормальной реакции N , инерции J и трения F , причём сила трения изменяется по закону сухого трения Амонтона-Кулона.

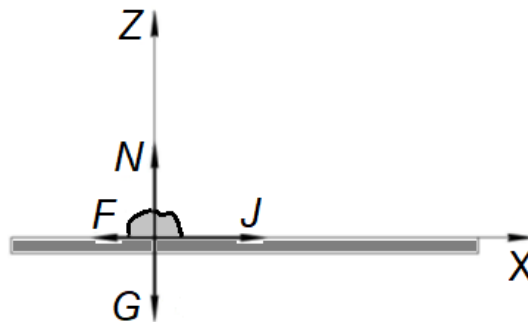


Рисунок 5 – Расчётная схема

Рассмотрим уравнение движения частицы в неподвижной системе координат XZ (рис. 5)

$$m\ddot{x} = -fres \cdot mg \cdot \text{sign}(\dot{x}(t) - \dot{x}_0(t)), \quad (9)$$

где $x(t)$ – перемещение частицы; $x_0(t)$ – перемещение вибрирующей поверхности; $fres$ – коэффициент трения скольжения; g – ускорение свободного падения.

Сделав в (9) замены (3) $x=\xi\Delta$, $\tau=\omega_0 t$, $\omega_0=(c_1/M)^{0.5}$, $\eta=\omega/\omega_0$, и $x_0=\Delta\zeta$, представим его в виде

$$\xi''(\tau) = -fres \cdot \frac{g}{\Delta\omega_0^2} \text{sign}(\omega_0\Delta\xi'(\tau) - \omega_0\Delta\zeta'(\tau))$$

или в безразмерной форме

$$\xi''(\tau) = -fr \cdot \text{sign}(\xi'(\tau) - \zeta'(\tau)), \quad \text{где } fr = fres \cdot \frac{g}{\omega_0}. \quad (10)$$

Для проведения расчётов возьмём значение коэффициента сопротивления сыпучего груза-антрацита по стальной поверхности $fres=0.29$ [31] и, ориентируясь на вибромашины резонансного типа, будем считать, что $\omega_0=26$ рад/с и значение $fr=fres \cdot g/\omega_0 \approx 0.11$. В уравнении (10) учитываем только переменные части законов движения, т.е. принимаем $\xi=\xi_1$ и $\zeta=\zeta_1$, с соответствующем переходом в (2) к переменной τ .

Результаты, полученные явным методом Эйлера, представлены на рис. 6.

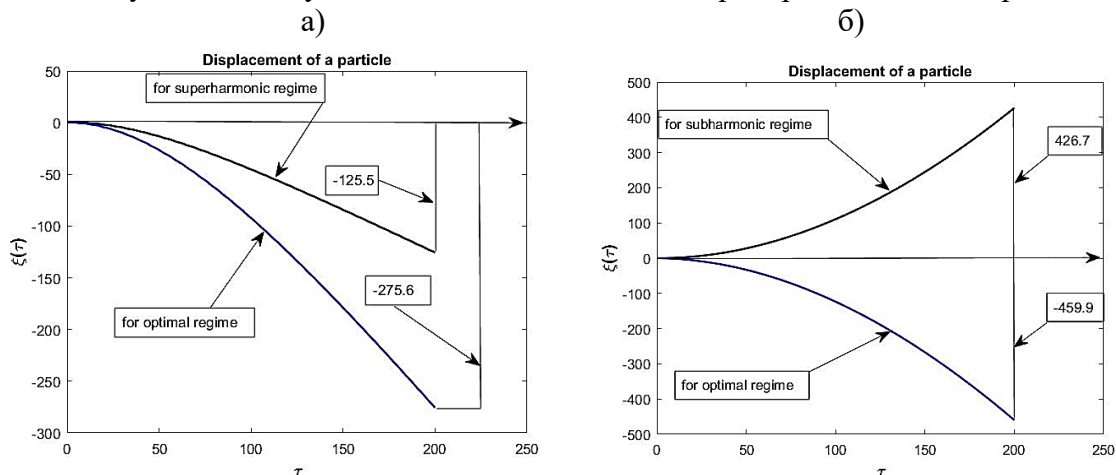


Рисунок 6 – Перемещение материальной частицы при супергармоническом а), субгармоническом б) и оптимальном режимах вибрации рабочей поверхности

Анализ рис. 6а показывает, что при супергармоническом режиме вибрации рабочей поверхности для приведенного временного промежутка интегрирования средняя скорость транспортирования оказалась более чем в два раза ниже, по сравнению с оптимальным режимом его вибрации. В этом плане выигрывает субгармонический режим (рис. 6б). При его реализации отличия, полученные на финальной стадии данного промежутка, невелики и составляют 7-8 %. Правда, следует отметить, что в силу различий фазовых соотношений в законах движения направления перемещения материальной частицы оказались противоположны. Данную особенность целесообразно иметь в виду при проектировании и выборе расположения упругих элементов 6 (рис. 1).

Заключение

Приведем основные результаты.

На примере горизонтальной ВТТМ с билинейной упругой характеристикой показано, что путём возбуждения сложных резонансов можно генерировать полигармонические колебания по амплитудному спектру близкие к оптимальным бигармоническим. Выполненные примеры расчёта обнадеживают и демонстрируют перспективность их использования в вибрационном машиностроении. При субгармонических порядка 1:2 режимах движения рабочей поверхности скорость транспортирования близка к оптимальной, на супергармонических порядка 2:1 она заметно ниже, однако, вследствие более широкого гармонического состава по сравнению с субгармоническими, их применение может положительно отразиться на сепарирующих свойствах вибрирующих поверхностей. Так, в частности, в спектре ускорений супергармонических режимов, величина третьей гармоники составляет более 50 % основной, а при субгармонических – около 20 %.

Список литературы

1. *Вибрации в технике: Справочник*. Т.4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э. Э. Лавендела. Москва: Машиностроение, 1981. 509 с.
2. Блехман И. И. Исследование процесса вибросепарации и вибротранспортировки. *Инженерный сборник*. Москва: Наука. 1952. Т. 11. С. 12-79.
3. Пресняков В. К. *Исследование режимов движения частиц сыпучего материала по вибрирующей плоскости применительно к расчету грохотов, питателям и конвейерам*. Донецк: ДПИ, 1961. 76 с.
4. Аграновская Э. А. Выбор оптимальных параметров вибрационных транспортирующих машин с помощью электронной моделирующей установки / Э.А. Аграновская, И.И. Блехман. *Обогащение руд*. 1962. №5. С.18-27.
5. Троицкий В. А. Об оптимизации процесса вибротранспортировки. *Прикладная математика и механика*. 1963. Т. XXVII. Вып. 6. С. 1117-1123.
6. Блехман И. И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. Москва: Наука, 1964. 410 с.
7. Потураев В. Н. *Вибрационные транспортирующие машины* / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, А.Г. Червоненко. М.: Машиностроение, 1964. 214 с.
8. Лавендел Э. Э. Оптимальный закон движения лотка при безотрывной прямой вибротранспортировке деталей. *Известия вузов. Машиностроение*. 1963. №12. С. 71-79.
9. Лавендел Э. Э. Графический способ определения средней скорости вибротранспортирования в безотрывном режиме движения. *Вопросы динамики и прочности. Сборник статей*. Вып. XII. Рига: Звайгзне. 1966. С. 88-99.
10. Крюков Б.И. *Динамика вибрационных машин резонансного типа*. Киев: Наукова думка. 1967. 210 с.
11. Червоненко А. Г. Аналитическое исследование виброперемещения сыпучего материала по рабочим поверхностям, совершающим полигармонические прямолинейные колебания. *Проблемы вибрационной техники: мат. науч. семинара*. Киев: Наукова думка. 1970. С. 116-125.
12. Лавендел Э. Э. *Синтез оптимальных вибромашин*. Рига: «Зинатне», 1970. 252 с.
13. Гончаревич И. Ф. Динамика вибрационного транспортирования. Москва: Наука, 1972. 244 с.
14. Топешашвили Т. А. Исследование закономерностей вибротранспортирования при бигармонических колебаниях / Т.А. Топешашвили, И.Ф. Гончаревич. *Транспорт горных предприятий*. МТИ. 1968. С. 223-226.
15. Камышный Н. И. Взаимодействие детали с бигармонически колеблющимся лотком / Н.И. Камышный, Б.И. Сапожников, С.И. Клепиков. *Известия вузов. Машиностроение*. 1977. № 5.
16. Абдуллаев А. А. Разработка и совершенствование вибрационных транспортно-технологических машин для мелкой рыбы и криля: Автореф. дис.... к.т.н.: Специальность 05.02.14, 05.05.05. Москва, 1985. 19 с.
17. Анахин В. Д. Вибрационное перемещение при продольных бигармонических колебаниях / В.Д. Анахин, В.Н. Монахов. *Известия вузов. Машиностроение*. 1974. №8. С. 74-78.
18. Клепиков С. И. *Качество вибрационных транспортно-технологических устройств*: монография. Хабаровск: изд-во Тихоокеанского ун-та, 2017. 106 с.

19. Васильев А. М. К вопросу о вибрационном перемещении при негармонических колебаниях рабочей поверхности / А.М. Васильев, С.А. Бредихин, В.К. Андреев. *Науч. журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2019. № 2. С. 42-48.
20. Гончаревич И. Ф. Динамика горных машин с упругими связями / И.Ф. Гончаревич, А.В. Докукин. Москва: Наука, 1975. 212 с.
21. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах: пер. с англ. Москва: Мир, 1968. 432 с.
22. Цыфанский С. Л. Использование нелинейных эффектов в вибрационных, электрогидравлических и кавитационных технологиях, вибродиагностике, разработке надводных и подводных биороботов. *Инновационные предложения*. Санкт-Петербург: «СУПЕРиздательство», 2021. 196 с.
23. Belovodskiy V. N., Bukin S.L., Sukhorukov M.Y., Babakina A.A. 2:1 Superharmonic Resonance in Two-Masses Vibrating Machine. *V Journal of Vibration Engineering and Technologies*, 2015, Vol. 3(2). pp. 123-135.
24. Беловодский В. Н. Субгармонические колебания одномассовой инерционной вибромашины с асимметричной упругой опорой / В. Н. Беловодский, С. Л. Букин. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2022. № 2(25). С. 4-15.
25. Беловодский В. Н. Одномассовая вибромашина с инерционным приводом и билинейной характеристикой упругих связей / Беловодский В.Н., Букин С.Л. *Информатика и кибернетика*. Донецк: ДонНТУ. 2024. № 2(36). С. 35-43.
26. Беловодский В. Н. О формировании идеальных законов движения рабочих органов вибрационных транспортирующих машин путём реализации супергармонических резонансов / В. Н. Беловодский, С. Л. Букин. *Информатика и кибернетика*. 2024. № 4(38). С. 27-31.
27. Кетков Ю. Л. *MATLAB 7. Программирование, численные методы* / Ю.Л. Кетков, А.Ю. Кетков, М.М. Шульц. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005 752 с.
28. Moler Cleve V. Numerical Computing with MATLAB/ Cleve V. Moler. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2004. 336 p.
29. Бахвалов Н. С. *Численные методы* / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2020. 636 с.
30. Федоренко И. Я. *Вибрационные процессы и устройства в АПК: монография* / И.Я. Федоренко. Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2016. 289 с.
31. *Углы естественного откоса и коэффициенты трения различных материалов*.
<https://nikulya.ru/koeffitsient/treniya/ugol/>

References

1. *Vibracii v tekhnike: Spravochnik*. Т.4. *Vibracionnye processy i mashiny* / Pod red. E. E. Lavendela // – Moskva: Mashinostroenie, 1981. – 509 s.
2. Blekhman I. I. *Issledovanie processa vibroseparacii i vibrotransportirovki* / I.I. Blekhman // *Inzhenernyj sbornik*. – Moskva: Nauka. – 1952. – Т. 11. – С. 12-79.
3. Presnyakov V. K. *Issledovanie rezhimov dvizheniya chastic sypuchego materiala po vibriruyushchej ploskosti primenitel'no k raschetu grohotov, pitatelyam i konvejeram* / V.K. Presnyakov. – Doneck: DPI, 1961. – 76 s.
4. Agranovskaya E. A. *Vybor optimal'nyh parametrov vibracionnyh transportiruyushchih mashin s pomoshch'yu elektronnoj modeliruyushchej ustanovki* / E.A. Agranovskaya, I.I. Blekhman // *Obogashchenie rud*. – 1962. – №5. – S.18-27.
5. Troickij V. A. *Ob optimizacii processa vibrotransportirovki* / V.A. Troickij // *Prikladnaya matematika i mekhanika*. – 1963. – Т. XXVII. – Вып. 6. – С. 1117-1123.
6. Blekhman I. I. *Vibracionnoe peremeshchenie* / I.I. Blekhman, G.Yu. Dzhanelidze. – Moskva: Nauka, 1964. – 410 s.
7. Poturaev V. N. *Vibracionnye transportiruyushchie mashiny* / V.N. Poturaev, V.P. Franchuk, A.G. Chervonenko. – М.: Mashinostroenie, 1964. – 214 s.
8. Lavendel E. E. *Optimal'nyj zakon dvizheniya lotka pri bezotryvnoj pryamoj vibrotransportirovke detalej* / E.E Lavendel // *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. – 1963. – №12. – S. 71-79.
9. Lavendel E. E. *Graficheskij sposob opredeleniya srednej skorosti vibrotransportirovaniya v bezotryvnom rezhime dvizheniya* / E.E Lavendel // *Voprosy dinamiki i prochnosti. Sbornik statej*. Вып. XII. – Riga: Zvajgzne. – 1966. – S. 88-99.
10. Kryukov B.I. *Dinamika vibracionnyh mashin rezonansnogo tipa* / B.I. Kryukov. – Kiev: Naukova dumka. – 1967. – 210 s.

11. Chervonenko A. G. Analiticheskoe issledovanie vibroperemeshcheniya sypuchego materiala po rabochim poverhnostyam, sovershayushchim poligarmonicheskie pryamolinejnye kolebaniya / A.G. Chervonenko // Problemy vibracionnoj tekhniki: mat. nauch. seminar. – Kiev: Naukova dumka. – 1970. – S. 116-125.
12. Lavendel E. E. Sintez optimal'nyh vibromashin / E.E Lavendel. – Riga: «Zinatne», 1970. – 252 s.
13. Goncharevich I. F. Dinamika vibracionnogo transportirovaniya / I.F. Goncharevich. – Moskva: Nauka, 1972. – 244 s.
14. Topeshashvili T. A. Issledovanie zakonomernostej vibrotransportirovaniya pri bigarmonicheskikh kolebaniyah / T.A. Topeshashvili, I.F. Goncharevich // Transport gornyh predpriyatij. – MTI. – 1968. – S. 223-226.
15. Kamyshnyj N. I. Vzaimodejstvie detali s bigarmonicheski koleblyushchimsya lotkom / N.I. Kamyshnyj, B.I. Sapozhnikov, S.I. Klepikov // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. – 1977. – № 5. – S.
16. Abdullaev A. A. Razrabotka i sovershenstvovanie vibracionnyh transportno-tekhnologicheskikh mashin dlya melkoj ryby i krilya: Avtoref. dis.... k.t.n.: Special'nost' 05.02.14, 05.05.05. – Moskva, 1985. – 19 s.
17. Anahin V. D. Vibracionnoe peremeshchenie pri prodol'nyh bigarmonicheskikh kolebaniyah / V.D. Anahin, V.N. Monahov // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. – 1974. – №8. – S. 74-78.
18. Klepikov S. I. Kachestvo vibracionnyh transportno-tekhnologicheskikh ustrojstv: monografiya / S.I. Klepikov. – Habarovsk: izd-vo Tihookeanskogo un-ta, 2017. – 106 s.
19. Vasil'ev A. M. K voprosu o vibracionnom peremeshchenii pri negarmonicheskikh kolebaniyah rabochej poverhnosti / A.M. Vasil'ev, S.A. Bredihin, V.K. Andreev // Nauch. zhurnal NIU ITMO. Seriya «Processy i apparaty pishchevyh proizvodstv». – 2019. – № 2. – S. 42-48.
20. Goncharevich I. F. Dinamika gornyh mashin s uprugimi svyazyami / I.F. Goncharevich, A.V. Dokukin. – Moskva: Nauka, 1975. – 212 s.
21. Hayasi T. Nelinejnye kolebaniya v fizicheskikh sistemah: per. s angl. – Moskva: Mir, 1968. – 432 s.
22. Cyfanskij S. L. Ispol'zovanie nelinejnyh effektov v vibracionnyh, elektrogidravlicheskikh i kavitacionnyh tekhnologiyah, vibrodiagnostike, razrabotke nadvodnyh i podvodnyh biorobotov. Innovacionnye predlozheniya / S. L. Cyfanskij. – Sankt-Peterburg: «SUPERizdatel'stvo», 2021. – 196 s.
23. Belovodskij V. N., Bukin S.L., Sukhorukov M.Y., Babakina A.A. 2:1 Superharmonic Resonance in Two-Masses Vibrating Machine. V Journal of Vibration Engineering and Technologies, 2015, Vol. 3(2). – pp. 123-135.
24. Belovodskij V. N. Subgarmonicheskie kolebaniya odnomassovoj inercionnoj vibromashiny s asimmetrichnoj uprugoj oporoy / V. N. Belovodskij, S. L. Bukin // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2022. – № 2(25). – S. 4-15.
25. Belovodskij V. N. Odnomassovaya vibromashina s inercionnym privodom i bilinejnoy karakteristikoj uprugih svyazey / Belovodskij V.N., Bukin S.L. // Informatika i kibernetika. Doneck: DonNTU. – 2024. – № 2(36). – S. 35-43.
26. Belovodskij V. N. O formirovanii ideal'nyh zakonov dvizheniya rabochih organov vibracionnyh transportiruyushchih mashin putyom realizacii supergarmonicheskikh rezonansov / V. N. Belovodskij, S. L. Bukin // Informatika i kibernetika. – 2024. – № 4(38). – S. 27-31.
27. Ketkov Yu. L. MATLAB 7. Programmirovanie, chislennye metody / Yu.L. Ketkov, A.Yu. Ketkov, M.M. Shul'c. – Sankt-Peterburg: BHV-Peterburg, 2005. – 752 s.
28. Moler Cleve B. Numerical Computing with MATLAB/ Cleve B. Moler. – Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004. – 336 p.
29. Bahvalov N. S. Chislennye metody / N.S. Bahvalov, N.P. Zhidkov, G.M. Kobel'kov. – Moskva: Binom. Laboratoriya znaniy, 2020. – 636 s.
30. Fedorenko I. Ya. Vibracionnye processy i ustrojstva v APK: monografiya / I.Ya. Fedorenko. – Barnaul: RIO Altajskogo GAU, 2016. – 289 s.
31. Ugly estestvennogo otkosa i koeffitsienty treniya razlichnyh materialov. – <https://nikulya.ru/koeffitsient/treniya/ugol/>

RESUME

V. N. Belovodskiy, S.L. Bukin

On the movements of a material particle on a horizontal transporting machine of a nonlinear type performing sub- and superharmonic vibrations

In paper reseaches devoted to use of polyharmonic oscillations in different technological processes has been analyzed and the task was to study the possibility of realizing oscillations close to optimal in vibrating transporting machines of a nonlinear type.

For this purpose, a single-mass horizontal vibrationg machine with a bilinear characteristic of elastic elements and inertial harmonic excitation is considered, the frequency characteristics are

constructed and the analysis of its stationary motions in the zones of sub- and superharmonic resonances is performed. In these frequency ranges, the possibility of excitation of vibrations with amplitude ratios close to optimal biharmonic ones is installed.

A mathematical model of movements of a material particle along a horizontal vibrating surface is considered and a comparative analysis of the velocity of its displacements for the selected sub- and superharmonic motions is carried out. When a subharmonic resonance of the order of 1:2 is excited in a vibrating machine, the possibility of forming motion modes of the working surface in which the particle velocity is close to the maximum is demonstrated.

РЕЗЮМЕ

В. Н. Беловодский, С.Л. Букин

О перемещениях материальной частицы на горизонтальной транспортирующей машине нелинейного типа, совершающей суб- и супергармонические колебания

В статье проведен анализ исследований, посвященных изучению воздействия полигармонических вибраций, в частности, на процессы вибротранспортирования, поставлена задача изучения возможности реализации колебаний близких к оптимальным в вибрационных машинах нелинейного типа.

С этой целью рассмотрена одномассовая горизонтальная транспортирующая машина с билинейной характеристикой упругих связей и инерционным гармоническим возбуждением, проведено построение частотных характеристик и выполнен анализ её стационарных колебаний в зонах сложных (суб- и супергармонических) резонансов. В этих частотных диапазонах установлена возможность возбуждения вибраций по амплитудным соотношениям близких к оптимальным бигармоническим.

Рассмотрена математическая модель безотрывных движений материальной частицы по горизонтальной вибрирующей поверхности и выполнен сравнительный анализ скорости её перемещения при таких движениях. При возбуждении субгармонического резонанса порядка 1:2 продемонстрирована возможность формирования режимов движения рабочей поверхности, при которых скорость перемещения частицы близка к максимальной.

Беловодский В.Н. - к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО ДонНТУ, кафедра компьютерного моделирования и дизайна, 283001, Донецк, ул. Артема, 58 ,тел +7(949) 334-9150, v.belovodskiy@gmail.com

Область научных интересов: моделирование технических систем, нелинейная динамика, фракталы и математический дизайн, нейронные сети

Букин С.Л. - к.т.н., доцент, тел +7(949) 333-4224, s.bukin08@gmail.com

Область научных интересов: вопросы проектирования вибрационных машин различного технологического назначения, моделирование технических систем, нелинейная динамика

Статья поступила в редакцию 09.07. 2025

УДК 621.771.07:004.94

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-65-77

В. С. Солод, В. М. Зуев, С. Б. Иванова

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк
283048, г. Донецк, ул. Артема, 118 б

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ОХЛАЖДЕНИЯ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ

V. S. Solod, V. M. Zuyev, S. B. Ivanova

Federal State Budgetary Scientific Institution «Institute of Artificial Intelligence Problems»
283048, Donetsk, Artema str, 118-b

EVALUATION OF THE POSSIBILITIES OF USING NEURAL NETWORK MODELS TO OPTIMIZING REINFORCING STEEL COOLING TECHNOLOGY

Целью работы является оценка возможностей применения простых искусственных нейронных сетей (ИНС) для моделирования сложных металлургических производственных процессов. Рассмотрено применения ИНС для описания технологии ускоренного охлаждения (УО) арматурного проката в потоке прокатного стана, предназначенной для формирования заданного уровня механических свойств готового проката. На основе анализа литературы определен набор входных и целевых параметров, архитектура ИНС. Разработан набор данных для обучения ИНС, полученный расчетом по математической модели авторов. Процесс обучения осуществляли при переменном количестве нейронов и целевых параметров. Проведен анализ результатов оценки моделей. Предложено направление дальнейших исследований.

Ключевые слова: арматурный профиль, ускоренное охлаждение, перцептрон, сетевая модель

The aim of the work is to evaluate the possibilities of using simple artificial neural networks (ANN) for modeling complex metallurgical production processes. The application of ANN for describing the technology of accelerated cooling (AC) of reinforcing bars in the rolling mill flow, designed to form a specified level of mechanical properties of finished rolled products, is considered. Based on the literature analysis, a set of input and target parameters, the ANN architecture are determined. A data set for training the ANN, obtained by calculating according to the mathematical model of the authors, is developed. The training process was carried out with a variable number of neurons and target parameters. The analysis of the results of model evaluation is carried out. The direction of further research is proposed.

Keywords: reinforcement profile, accelerated cooling, perceptron, network model

Введение

Современной тенденцией на рынке горячекатаного проката является расширение его номенклатуры при одновременном ужесточении требований к качеству, в том числе по структуре и механическим свойствам. Этим требованиям возможно удовлетворить путём применения комплексного подхода к решению задач определения влияния химического состава стали и основных технологических параметров производственного процесса на конечные показатели качества [1].

Однако здесь исследователи сталкиваются со значительными трудностями, вызванными наличием сложной связи между параметрами процесса [2], температурными изменениями при прокатке, недостаточно изученным процессом формирования микроструктуры металла [3] и его физико-механических свойств. Кроме того, в реальных металлургических условиях неизбежно существуют возмущающие воздействия, такие как колебания химического состава стали, а также колебания параметров температурно-деформационных режимов производства.

За последние двадцать лет значительно вырос интерес к искусственным нейронным сетям. В самых разных областях науки и техники пытаются применить возможности, предоставляемые этой технологией, и ищут приложения ее внутри своих дисциплин [4].

Поэтому для решения поставленных задач, возможно, целесообразно использовать нейросетевое моделирование.

При этом, первой, возникает проблема выбора оптимальной архитектуры нейронной сети. Так как области применения наиболее известных подходов пересекаются, то для решения конкретной задачи можно использовать различные типы нейронных сетей и при этом результаты могут оказаться одинаковыми [5]. Будет ли та или иная сеть лучше и практичнее, зависит в большинстве случаев от условий задачи, полноты набора обучающих данных, выбора метода обработки.

Набор обучающих данных должен быть типичным для задачи, решению которой обучается сеть. Обучение часто оказывается уникальным процессом, когда приемлемые решения многих проблем могут быть получены только в процессе многочисленных экспериментов [2].

В 2021 г. В.М. Зуевым предложен подход, при котором обучение нейросети происходит на наборе данных, являющимся комбинацией данных, получаемых из теоретической модели механизма, и данных, получаемых в ходе эксперимента с работающим механизмом [6-8].

Федоров М.В. в 2024 г. [9] презентовал доклад, в котором также предложен новый подход к построению моделей глубокого обучения на основе синтеза данных теоретических моделей и дополненных данных реального эксперимента (аугментация).

В данной работе. в качестве фундаментального знания предложено использовать физико-математическую модель [10] ускоренного многостадийного охлаждения арматурной стали в потоке прокатного стана.

Описанная в этой работе математическая модель разработана на основе фундаментальных знаний в области теплотехники [11], гидравлики [12], металловедения [13], в том числе – с применением методов статистической обработки данных заводских экспериментов. Также приведенная модель учитывает реальную конструкцию термоустановки и элементов камеры охлаждения.

Указанная модель может применяться как в качестве инструмента для создания обучающего набора данных для обучения искусственной нейронной сети, так и для оптимизации технологии при охлаждении профилей из различных марок стали при возможных изменениях температурно-скоростных режимов прокатки.

Построение моделей

В качестве пакета программ для разработки сети выбран MATLAB. Это решение обусловлено развитым графическим интерфейсом, наличием ряда встроенных полезных модулей для разработки, таких как модуль проектирования архитектуры искусственной нейросети и др.

Исходными данными для искусственной нейросети (ИНС) типа двухслойный перцептрон выбраны следующие 7 величин:

- номер профиля прокатки № (10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32);
- скорость прокатки V (5.0 ... 14.5 м/с);
- температура прокатки (аустенизации) t (1000 ... 1090 °С);
- содержание углерода C (0.16 ... 0.32%);
- содержание марганца Mn (0.4 ... 1.3%);
- содержание кремния Si (0.08 ... 0.6%);
- условный предел текучести готового проката $\sigma_{0.2}$ (467...880 МПа).

Разработанная нейросеть должна правильно предсказывать необходимые установки для прокатного стана, то есть в случае с установкой из 6 секций [14] — это давления воды на форсунках каждой из 6 секций P_1 - P_6 .

При попытке описать ИНС простой архитектурой на основе перцептрона с обратным распространением ошибки (7 входов, 18 нейронов в 1-ом скрытом слое, 6 нейронов во 2-ом выходном слое) установлено, что она не способна адекватно описать модель. Результат для набора данных из 188 опытов, полученный с помощью приложения NNfitting показан ниже на рис. 1 и не удовлетворяет требования по точности прогноза.

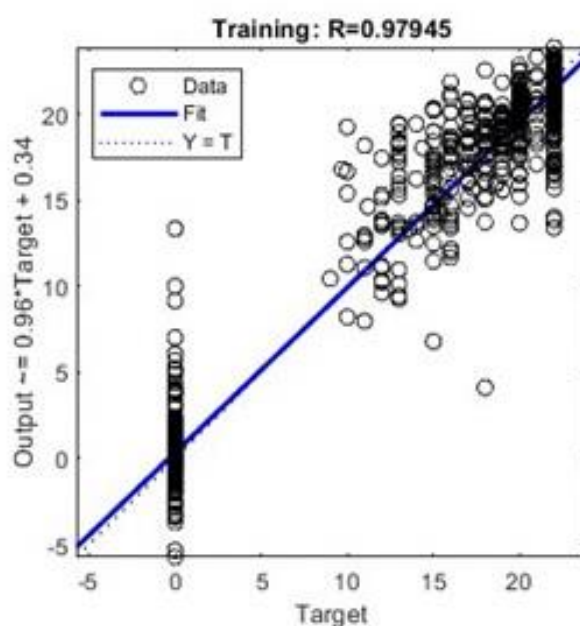


Рисунок 1 – результат обучения ИНС1: метод обучения – Levenberg-Marquardt, функция потерь – среднеквадратичное отклонения (MSE), функция активации – $\tanh(x)$.

Принятое решение обрабатывать каждый отклик отдельно слегка улучшило результат, но точность прогноза по-прежнему осталась неудовлетворительной.

На наш взгляд это обусловлено влиянием интегральных откликов в каждом опыте на результат процесса. На степень упрочнения металла ($\sigma_{0.2}$) кроме указанных выше входных шести параметров в каждом случае влияет время охлаждения и гидродинамические условия (давление). Время охлаждения зависит от суммарной длины активной зоны теплообмена (длины камер и количества включенных секций), а интенсивность охлаждения зависит от суммарного давления во включенных секциях. При этом первая секция с целью вариации времени охлаждения может быть короткой или длинной. Это тоже необходимо учитывать в выборе формы откликов.

Поэтому принято решение изменить архитектуру ИНС на (7x18x4) и обучение осуществлять для каждого целевого параметра индивидуально,

В качестве целевых параметров (Y1- Y4) приняты:

Y1- условная длина первой секции установки L (0-короткая, 1-длинная);

Y2 - количество включенных секций установки $N_{вкл}$;

Y3- сумма давлений на форсунках по установке S ;

Y4 - давление в 1-й секции P_{r1} (опционально).

В табл.1 показан пример расчета по модели [10] параметров режима при разном распределении давления по длинным секциям установки для двух профилей арматуры, из которого следует, что суммарную величину давлений можно распределить исходя из свойства аддитивности давлений в длинных секциях. То есть, зная сумму всех давлений и давление в 1-й секции, остальные распределить, например равномерно или по определенному закону.

Таблица 1 – Влияние распределения давлений по секциям установки на условный предел текучести арматуры №14 и 28 класса прочности А500 (к-короткая, д-длинная 1-я секция).

№	Скор.	t ауст	C	Mn	Si	$\sigma_{0.2}$	Длина 1 сек	Pфор1	Pфор2	Pфор3
армат.	м/с	°С	%	%	%	Мпа	к=0/д=1	ати	ати	ати
14	12	1060	0.2	0.6	0.15	534.5	0	22	13	16
14	12	1060	0.2	0.6	0.15	534.3	0	22	15	14
14	12	1060	0.2	0.6	0.15	533.8	0	22	18	11
14	12	1060	0.2	0.6	0.15	534.4	0	22	14.5	14.5
14	12	1060	0.2	0.6	0.15	533.6	0	22	11	18
28	6.6	1044	0.2	0.6	0.15	563.3	1	18	14	14
28	6.6	1044	0.2	0.6	0.15	560.2	1	12	17	17
28	6.6	1044	0.2	0.6	0.15	562.9	1	16	15	15

В процессе подготовки моделирования создан набор обучающих данных из 188 опытов, основу которого составили расчетные данные моделирующей программы [10], с добавлением (на этапе адаптации модели) незначительного количества экспериментальных производственных данных с сортового прокатного стана.

Математически задача формулируется следующим образом.

Дан набор векторов $x_i = X_i(p_1, \dots, p_m)$, где $i=1, \dots, I$ номера экспериментов, а p_m соответствует значениям указанных входных данных ($N_{\text{вкл}}, V, T, C, Mn, Si, \sigma_{0.2}$), центрированным и поделенным на величину среднеквадратичного отклонения вдоль выборки по i .

Кроме набора векторов x_i считается известным набор векторов $d_i = D_i(s_1, \dots, s_k)$, позиционно соответствующий x_i , но такой, что величины s_k соответствуют значениям параметров L, N, S, P_1 .

Необходимо вместо в общем-то неизвестной функции $X_i(p_1, \dots, p_m)$ подобрать аппроксимирующую её функцию $\tilde{X}_i(p_1, \dots, p_m; w_1, \dots, w_n)$, такую, что

$$J = \sum_i^I \sum_k^K (u_{ik} - s_{ik})^2 < eps$$

не превышает некоторой технологически допустимой величины eps . Здесь u_{ik} выход нейросети.

В неравенстве выше величины w_1, \dots, w_n являются параметрами нейросети: определяются количеством нейронных слоёв и количеством нейронов в слое.

В процессе моделирования были испробованы варианты нейросетей с разными количествами входных, выходных нейронов и разными количествами нейронов в разных внутренних слоях. За основной критерий выбора структуры нейросети был взят минимум функции среднеквадратичной ошибки прогноза. Так как планировалось создание аппаратного инструмента, указывающего операторам необходимые установки для прокатного стана, то предпочтение оказывалось такой нейросети, которая наиболее легко реализовывалась аппаратно.

Для успешного обучения нейронной сети следует уделить особое внимание подготовке набора данных. Пусть диапазоны изменений величин $N_b, V, T, C, Mn, Si, \bar{b}_{0.2}$ от минимальной до максимальной составляют соответственно B_n , где индекс $n \in \{N_b, V, T, C, Mn, Si, \bar{b}_{0.2}\}$.

Тогда объем пространства аппроксимации составит

$$W = \prod_n B_n,$$

Если задана относительная точность аппроксимации δ_n , то согласно теореме В.А. Котельникова, количество точек данных при равномерной аппроксимации должно быть не менее

$$Np = \frac{W}{M},$$

где

$$M = \prod_n \bar{B}_n \delta_n,$$

а \bar{B}_n - среднее значение B_n .

Подставляя данные из [6], получаем оценку для $Np=10^6-10^7$, то есть для уверенной аппроксимации массив обучающих данных должен иметь порядка миллиона значений.

Значительно уменьшить число данных для обучения модели можно применив неравномерную аппроксимацию. Для этого пространство W необходимо разбить на две (или более) частей в зависимости от значения производных

$$\frac{\partial B_i}{\partial B_j} \quad (i \neq j)$$

И в области больших значений производных оставить исходную плотность точек обучения, а в области малых - уменьшить эту плотность на 2-3 порядка. Так как величины B_n сильно разнятся, то, чтобы сравнение частных производных имело смысл, нужно величины B_n предварительно отнормировать.

Результаты моделирования

Результаты обучения нейросети, имеющей 6 входов, 18 нейронов внутреннего слоя и 4 выхода (поочередное обучение каждого) показаны ниже на рис.2. Результат тестирования ИНС1 – удовлетворительный, максимальная ошибка в 188 опытах в определении: L -0%, N-0%, S – 6%, Pr₁-10%. Однако, оценка модели на данных даже незначительно отличающихся от обучающих показала низкую адекватность. Ошибки в определении каждого из четырех откликов накладываются друг на друга, кроме того, ошибка в определении Pr₁ даже в процессе обучения достаточно велика для прогноза по б_{0.2} с требуемой точностью ±2%. Поэтому было принято решение сократить число интегральных целевых параметров до двух: Y1-время охлаждения (T_{охл}) и Y2- интенсивность охлаждения (S).

Здесь следует охарактеризовать процесс с точки зрения оптимизации технологии. Критерием оптимизации выступает минимально возможный расход воды и следовательно - электроэнергии на насосах при достижении допустимых значений механических свойств, определяемых стандартом для соответствующего класса арматуры. Очевидно, что экономии ресурсов можно добиться, проектируя режим таким образом, чтобы указанные свойства выполнялись с величиной близкой к минимально допустимой с учетом возможной погрешности прогноза. Например, согласно требованию стандарта ГОСТ 10884-94 допустимый нижний предел б_{0.2} для класса Ат500 составляет 500Мпа, верхний – 599Мпа, а оптимальным может быть выбрано, скажем, 530 Мпа.

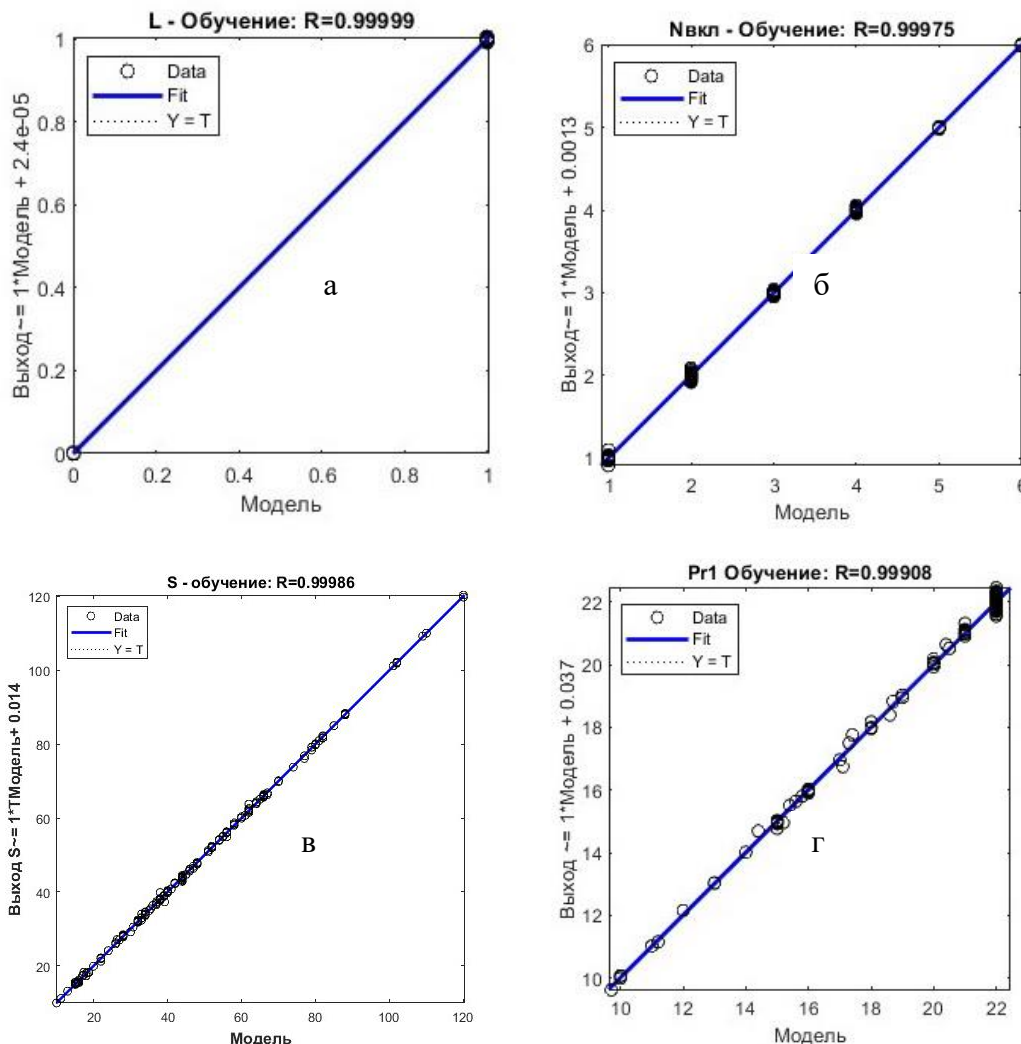
Одновременно необходимо выполнить ряд ограничений процесса, таких как:

- ограничение по max скорости прокатки – определяется максимальной пропускной способностью оборудования прокатного стана на разных профилях;
- максимально возможное давление на форсунке;
- незначительное превышение температуры конца прокатки над критической при которой совершаются химические изменения и физические превращения, имеющие влияние на свойства, стали, зависящей от химического состава стали;
- отсутствие перегрева охлаждающей воды в каждой из секций;
- наличие существенной силы гидротранспортирования на мелких профилях.

Последние два зависят от давления на форсунках. Указанные ограничения должны учитываться при проектировании обучающего набора. Задача усложняется еще и потому, что для одного и того же набора данных возможны несколько решений.

В табл. 2 показано влияние длины первой секции на расход воды и время охлаждения, из которой следует, что одного и того же значения параметра б_{0.2} можно достигнуть как с длинной, так и с короткой первой секцией. Установка короткой секции применяется во избежание перегрева воды при максимальной температуре проката на входе в установку или для сокращения времени охлаждения. При этом снижение времени охлаждения на первой секции компенсируется повышением суммы давлений на длинных. Расход воды на установке с короткой секцией выше, чем с длинной на 19-30%.

Рисунок 2 - Результаты моделирования ИНС1 (метод обучения – Levenberg-Marquardt,



функция потерь – среднеквадратичное отклонения (MSE), функция активации – $\tanh(x)$):
 а- условная длина первой секции установки; б – количество включенных секций установки
 Nвкл; в – сумма давлений на форсунках; г – давление в 1-й секции;

Таблица 2 - Влияние длины первой секции на расход охлаждающей воды и время охлаждения при производстве арматуры №14.

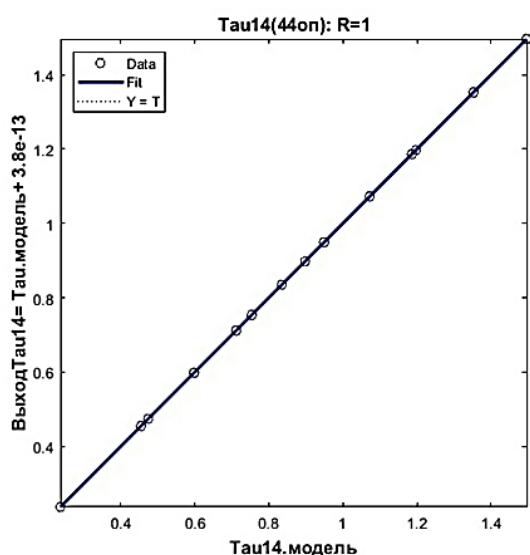
№ армат.	Скор. м/с	t пр °С	C %	Mn %	Si %	C _{экв} -	σ _{0.2} Мпа	Длина 1 секц 0-к/1-д	τ _{охл} сек	S атм	Nвкл -	Pфор1 атм	Pфор2 атм	Pфор3 атм	Pфор4 атм	Pфор5 атм	Pфор6 атм	Расход воды W, м ³ /ч	ΔW/W %
14	11.50	1042.00	0.16	0.40	0.15	0.24	452	0	0.455	44	2	22	22	0	0	0	0	282	
						0.24	452	1	0.598	31	2	16	15	0	0	0	0	194	-31%
	14.50	1069.00	0.17	0.40	0.08	0.24	526	0	0.835	88	4	22	22	22	22	0	0	518	
						0.24	526	1	0.949	72	4	18	18	18	18	0	0	422	-19%
	14.50	1069.00	0.19	0.50	0.15	0.29	624	0	1.072	88	5	16.0	18	18	18	18	0	560	
						0.29	627	1	1.186	68	5	13.6	13.6	13.6	13.6	0	0	450	-20%
	11.50	1042.00	0.22	0.65	0.30	0.36	706	0	0.754	55	3	19	18	18	0	0	0	362	
						0.36	705	1	0.897	45	3	15	15	15	0	0	0	280	-23%
	14.50	1069.00	0.28	0.80	0.60	0.47	883	0	0.835	76	4	20	20	18	18	0	0	479	
						0.47	883	1	0.949	60	4	18	14	14	14	0	0	380	-21%

Примечание: C_{экв} – углеродный эквивалент (характеристика свариваемости стали) согласно ДСТУ 3760:2006 определяется по формуле C_{экв}=C+ Mn/6+Si/10.

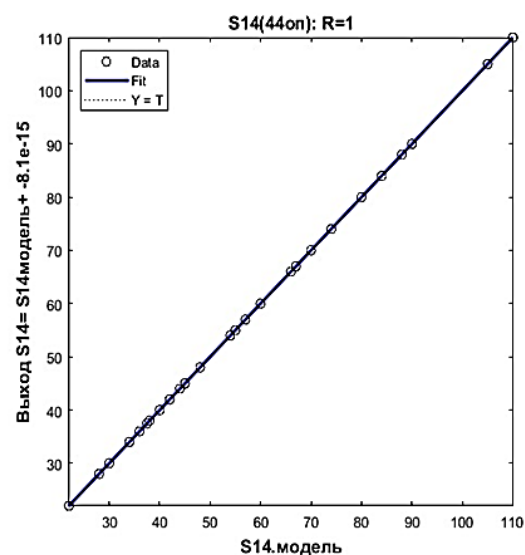
Учитывая указанные выше ограничения, разработан обучающий набор данных из 44 опытов для охлаждения профиля №14 при двух значениях V (14.5, 11.5 м/с) и соответствующих им значениях t (1069, 1042°C) соответственно для классов арматуры Ат400, Ат500, Ат600 и Ат800 по ГОСТ 10884-94 при вариации $C_{экв}$ (0.23...0.59). В этом наборе короткая первая секция использовалась только в том случае, когда избежать перегрева воды ($t_{в,ср} > 80^\circ\text{C}$) в длинной секции не удалось при максимальном давлении на форсунке. Таким образом удастся оценить отдельно степень влияния изменения факторов C , Mn , Si и $b_{0,2}$ на ошибку прогноза ИНС. В табл.3 показан фрагмент этого набора данных. На рис. 3 показаны регрессионные тренды результатов обучения ИНС2.

Таблица 3 – Фрагмент набора данных для обучения ИНС2.

№ армат.	Скор. м/с	t ауст. °C	C %	Mn %	Si %	C _{экв}	σв, Мпа	T _{охл} сек	S атм	Рфор1	Рфор2	Рфор3	Рфор4	Рфор5	Рфор6
										атм					
14	14.50	1069.00	0.16	0.40	0.15	0.233	472	0.712	46	16	16	14	0	0	0
14	14.50	1069.00	0.17	0.40	0.08	0.245	472	0.712	55	19	18	18	0	0	0
14	14.50	1069.00	0.18	0.50	0.18	0.281	472	0.712	38	12.5	12.5	12.5	0	0	0
14	14.50	1069.00	0.20	0.60	0.20	0.320	467	0.474	44	22	22	0	0	0	0
14	14.50	1069.00	0.22	0.65	0.20	0.348	470	0.474	38	19	19	0	0	0	0
14	11.50	1042.00	0.17	0.40	0.08	0.24	475	0.598	41	20.5	20.5	0	0	0	0
14	11.50	1042.00	0.16	0.40	0.15	0.24	467	0.598	36	18	18	0	0	0	0
14	11.50	1042.00	0.18	0.50	0.18	0.28	470	0.598	30	15	15	0	0	0	0
14	11.50	1042.00	0.20	0.60	0.20	0.32	467	0.598	27	14.50	12.50	0	0	0	0
14	14.50	1069.00	0.17	0.40	0.08	0.24	532	0.949	88	22	22	22	22	0	0
14	14.50	1069.00	0.18	0.50	0.18	0.28	536	0.712	66	22	22	22	0	0	0
14	14.50	1069.00	0.20	0.60	0.20	0.32	534	0.712	55	18	18.5	18.5	0	0	0
14	14.50	1069.00	0.22	0.65	0.30	0.36	542	0.712	38	18	10	10	0	0	0
14	14.50	1069.00	0.27	0.70	0.30	0.42	532	0.474	44	22	22	0	0	0	0
14	14.50	1069.00	0.30	0.80	0.30	0.46	540	0.474	28	18	10	0	0	0	0
14	11.50	1042.00	0.17	0.40	0.08	0.24	536	0.897	51	17.00	17.00	17.00	0	0	0
14	11.50	1042.00	0.18	0.50	0.18	0.28	535	0.897	33	17	8	8	0	0	0
14	11.50	1042.00	0.20	0.60	0.20	0.32	534	0.598	40	20	20	0	0	0	0
14	11.50	1042.00	0.22	0.65	0.30	0.36	533	0.598	36	18	18	0	0	0	0
14	11.50	1042.00	0.27	0.70	0.30	0.42	533	0.598	27	18	8.5	0	0	0	0



а)



б)

Рисунок 3 - Результаты моделирования ИНС2 (метод обучения – Levenberg-Marquardt, функция потерь – среднеквадратичное отклонения (MSE), функция активации – tanh(x)):

а- Y1- $\tau_{охл}$; б – Y2- S.

В табл. 4 показаны результаты оценки точности прогноза ИНС2, откуда следует, что изменение целевого параметра $b_{0.2}$ в пределах $\pm 7\%$ приводит к ошибке прогноза -2.8-+4%. Изменение характеристик химсостава приводит к ошибкам от --5.0 до +9%. Значительная ошибка ожидаемо соответствует изменениям параметров V и T , варьируемым только на двух уровнях, особенно для классов Ат400. Кроме того, поскольку существует ограничение по max давлению на форсунке, а модель это не учитывает, то возможен абсурдный результат прогноза (опыты 17, 18 – S_p больше предельно допустимой величины).

Таким образом, решение поставленной задачи с помощью ИНС на основе двухслойного перцептрона не представляется возможным. Для получения более точного прогноза необходимо применить другие методы машинного обучения, например такой, как Boosting - метод машинного обучения, при котором несколько слабых моделей (обычно деревья решений) обучаются последовательно, каждая следующая модель пытается исправить ошибки предыдущей. Итоговое предсказание строится как взвешенная сумма всех моделей [15-20]. Один из его видов XGBoost – оптимизированная библиотека распределённого градиентного Boosting, отличающаяся, по мнению авторов [15] высокой эффективностью, гибкостью и переносимостью. Полученные первые результаты применения XGBoost обнадеживают, однако эта информация выходит за рамки настоящего сообщения.

Таблица 4 – Оценка точности прогноза ИНС2.

№ опыта	Класс арматуры	Задание							Расчетные данные						
		№	V	t	C	Mn	Si	$b_{0.2}$	Lp	Np	$\tau_{охлр}$	Sp	$b_{0.2p}$	$\Delta b_{0.2}$	
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7			Y1	Y2	X7p		
1	Ат400	14	11.5	1042	0.18	0.50	0.18	440	1	2	0.517	25	430	-2.3%	
2	Ат600	14	14.5	1069	0.27	0.70	0.30	670	0	3	0.796	74	644	-3.9%	
3	Ат400	14	14.5	1069	0.17	0.40	0.08	440	0	3	0.633	48	436	-0.9%	
4	Ат500	14	14.5	1069	0.22	0.65	0.30	530	1	3	0.673	40	545	2.8%	
5	Ат600	14	14.5	1069	0.27	0.70	0.30	670	1	3	0.796	74	659	-1.6%	
6	Ат600	14	14.5	1069	0.32	1.00	0.30	670	0	4	0.783	39	669	-0.1%	
7	Ат500	14	11.5	1042	0.20	0.60	0.20	520	1	2	0.588	37	514	-1.2%	
8	Ат800	14	11.5	1042	0.32	0.80	0.30	850	1	3	0.861	66	864	1.6%	
9	Ат800	14	11.5	1042	0.32	0.80	0.28	850	1	3	0.871	67	858	0.9%	
10		14	11.5	1042	0.32	0.85	0.30	850	1	3	0.819	59	878	3.3%	
11		14	11.5	1042	0.30	0.80	0.30	850	1	3	0.918	63	853	0.4%	
12		14	11.5	1047	0.32	0.80	0.30	850	1	3	0.830	47	824	-3.1%	
13		14	12.0	1042	0.32	0.80	0.30	850	0	4	1.008	45	840	-1.2%	
14	Ат600	14	14.5	1069	0.27	0.70	0.25	670	0	4	0.804	57	634	-5%	
15		14	14.5	1069	0.27	0.60	0.30	670	0	4	0.813	84	732	9%	
16		14	14.5	1069	0.24	0.70	0.30	670	0	4	0.876	62	647	-3%	
17		14	14.5	1059	0.27	0.70	0.30	670	1	3	0.739	76	?	?	
18		14	13.5	1069	0.27	0.70	0.30	670	1	2	0.541	103	?	?	

Примечание: в выделенных ячейках значения варьируемых параметров.

Заключение

1. Результаты моделирования с помощью простой ИНС на основе перцептрона процесса ускоренного охлаждения арматурного проката показали, что приемлемое решение получить не удалось.

2. Ошибки прогноза $b_{0.2}$ превышают допустимые значения (2-3%), которые гарантируют получение заданных свойств проката в пределах, допускаемых стандартом. Область определения задачи имеет неоднородные несбалансированные данные и нерегулярную форму, которая сложно поддается описанию линейной регрессионной моделью.

3. Наличие ряда ограничений процесса усложняет задачу обучения, решение получается малоинформативным так как не отражает соответствие ограничениям.

4. Учитывая малые временные затраты одного прямого расчета по физико-математической модели [10] (3-5сек), еще одним вариантом решения может быть прямой расчет по физико-математической модели с алгоритмом оптимизации, учитывающим все ограничения, с выводом на монитор оператора таких параметров, как средняя температура охлаждающей воды на выходе секции, минимальная, средняя и максимальная скорость воды, силы гидротранспортирования, расход воды по секциям, производительность установки, температуру самоотпуска и других параметров эффективности режима. Окончательную подстройку системы можно осуществить по данным заводского эксперимента.

Список литературы

1. Нейросетевое моделирование процесса получения широкополосной горячекатаной стали с заданными механическими свойствами / В. М. Салганик, А. М. Песин, С. В. Денисов [и др.]. *Производство проката*. 2008. № 8. С. 26-27. EDN JTHZKJ.
2. Губинский В.И., Рыбалов А.А. Моделирование ускоренного охлаждения арматурного проката в потоке непрерывных мелкосортных станов. *Промышленная теплотехника*, 2002, т.24, №6.-С.24-28.
3. Пилюшенко В.Л., Ноговицин А.В. Феноменологическая модель механических свойств проката из низкоуглеродистой микролегированной стали *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Киев: Наукова думка, 1995. 218с.
4. Николаева С.Г. *Нейронные сети. Реализация в Matlab: учебное пособие* / С.Г. Николаева. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. 92 с.
5. Горбань А. Н., Россиев Д. А. *Нейронные сети на персональном компьютере*. Новосибирск: Наука, 1996. 224 с.
6. Зуев В.М. Использование нейросети для управления механизмами. (подъема мишеней).[Тезисы доклада]. *Материалы Донецкого международного научного круглого стола «Искусственный интеллект: теоретические аспекты и практическое применение» ИИ-2020*. Донецк: ГУ ИПИИ, 2020. С. 73–77.
7. Зуев В.М. Использование нейросети для управления механизмами. *Материалы конференции в Дивноморском 2021г. Всероссийская мультikonференция по проблемам управления*
8. В. М. Зуев, О. А. Бутов, С. Б. Иванова, А. А. Никитина, С. И. Уланов. Способ обучения нейронной сети управления роботом. *International Peer-Reviewed Scientific Journal «Problems of Artificial Intelligence»*, ISSN 2413-7383. 2021. № 2 (21). С. 22–33.
9. Федоров, М. В. (член-корр. РАН) Новые методы машинного обучения: использование фундаментального знания для решения практических задач: [тезисный онлайн-доклад] [Электронный ресурс] / М. В. Федоров // Программа II Всероссийской школы-семинара по искусственному интеллекту и большим данным в технических, промышленных, природных и социальных системах. – Национальный центр физики и математики (НЦФМ). – Дата проведения: 25-29 ноября 2024 г. – (дата обращения: 04.04.2025).
10. Солод В.С. Физико-математическая модель для разработки экспертной системы ускоренного охлаждения арматурного проката / В. С. Солод / *Проблемы искусственного интеллекта* 2025 № 2 (37). С. 44-58. DOI 10.34757/2413-7383.2025-2-37-44-58
11. *Тепломассообмен* /С.И.Гинкул, В.И.Шелудченко, В.В.Кравцов, С.В.Палкина.Донецк: Норд-Пресс, 2006. 298 с.
12. Моргунов К. П. *Гидравлика: Учебник*. СПб.: Издательство «Лань», 2014. 288 с.: ил.
13. Чудина, О.В. *Теория и практика термической обработки металлов: учебно-методическое пособие к мультимедийному изданию* / О.В. Чудина, Г.В. Гладова, А.В. Остроух. М.: МАДИ, 2013. 64 с.
14. О.Цкитишвили, А.Н.Чудновец, В.Н.Бруханский, Д.П.Кукуй, В.С.Солод, А. А.Мальцев Освоение производства высококачественной продукции на самом новом в Украине среднесортно-мелкосортном стане 390. *ОАО «Черметинформация» Бюллетень «Черная металлургия»*. 2011. №7.– С.56–65.
15. XGBoost Documentation" [Электронный ресурс]. *Документация XGBoost* : [сайт]. URL: https://xgboost.readthedocs.io/en/release_3.0.0/# (дата обращения: 04.05.2025).

16. А.Д. Смородинов, Т. В. Гавриленко, В. А. Галкин, Теоретические основы искусственных нейронных сетей для решения задачи аппроксимации и интерполяции. *Успехи кибернетики* 2023;4(4):41–53 DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-4-04
17. Сергеев, А. П. Введение в нейросетевое моделирование : учеб. пособие / А. П. Сергеев, Д. А. Тарасов ; под общ. ред. А. П. Сергеева. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 128 с. ISBN 978-5-7996-2124-7
18. Хливненко Л. В. *Практика нейросетевого моделирования : учебное пособие для вузов* / Л. В. Хливненко, Ф. А. Пятакович. 2е изд., стер. Санкт-Петербург : Лань, 2021. 200 с.: ил. Текст : непосредственный. ISBN 978.5.8114.8264.1
19. Головки, В. А. *Нейросетевые технологии обработки данных : учеб. пособие* / В. А. Головки, В. В. Краснопрошин. Минск : БГУ, 2017. 263 с. ISBN 978.985.566.467.4.
20. Вичугов В.Н Модифицированный градиентный алгоритм обучения радиально-базисных нейронных сетей. *Известия Томского политехнического университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2009. Т. 315. № 5 с150-152

References

1. Neural network modeling of the process of obtaining wide-strip hot-rolled steel with specified mechanical properties / V. M. Salganik, A. M. Pesin, S. V. Denisov [et al.] // *Rolled products production*. - 2008. - No. 8. - P. 26-27. - EDN JTHZKJ.
2. V. I. Gubinsky, A. A. Rybalov Modeling of accelerated cooling of reinforcing bars in the flow of continuous small-section mills. "Industrial heat engineering", 2002, v. 24, No. 6.-P. 24-28.
3. Pilyushenko V. L., Nogovitsyn A. V. Phenomenological model of mechanical properties of rolled low-carbon microalloyed steel. / *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. - Kyiv: Naukova Dumka, 1995. 218 p.
4. Nikolaeva S.G. Neural networks. Implementation in Matlab: tutorial / S.G. Nikolaeva. - Kazan: Kazan. state power University, 2015. - 92 p.
5. Gorban A.N., Rossiev D.A. Neural networks on a personal computer. - Novosibirsk: Nauka, 1996. - 224 p.
6. Zuev V.M. Using a neural network to control mechanisms. (lifting targets). [Abstracts of the report]. Proceedings of the Donetsk international scientific round table "Artificial Intelligence: theoretical aspects and practical application" AI-2020. – Donetsk: State University of Artificial Intelligence, 2020. – P. 73–77.
7. Zuev V. M. Using a neural network to control mechanisms. Proceedings of the conference in Divnomorskoye 2021. All-Russian multi-conference on control problems.
8. V. M. Zuev, O. A. Butov, S. B. Ivanova, A. A. Nikitina, S. I. Ulanov. A method for training a neural network to control a robot/ *International Peer-Reviewed Scientific Journal "Problems of Artificial Intelligence"*, ISSN 2413-7383. – 2021 – No. 2 (21). – P. 22–33.
9. Fedorov, M. V. (Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences) New Methods of Machine Learning: Using Fundamental Knowledge to Solve Practical Problems: [online abstract report] [Electronic resource] / M. V. Fedorov // Program of the II All-Russian School-Seminar on Artificial Intelligence and Big Data in Technical, Industrial, Natural and Social Systems. - National Center for Physics and Mathematics (NCPM). - Date: November 25-29, 2024 - (date of access: 04.04.2025).
10. Solod V. S. Physical and mathematical model for the development of an expert system for accelerated cooling of reinforcing bars / V. S. Solod / *Problems of Artificial Intelligence* 2025 No. 2 (37). - P. 44-58. DOI 10.34757/2413-7383.2025-2-37-44-58
11. Heat and Mass Transfer/S.I.Ginkul, V.I.Sheludchenko, V.V.Kravtsov, S.V.Palkina. -Donetsk: Nord-Press, 2006.-298 p.
12. Morgunov K.P. Hydraulics: Textbook.- St. Petersburg: Lan Publishing House, 2014. - 288 p.: ill.
13. Chudina, O.V. Theory and Practice of Heat Treatment of Metals: a teaching aid to a multimedia publication / O.V. Chudina, G.V. Gladova, A.V. Ostroukh. - M.: MADI, 2013. - 64 p.
14. O. Tskitishvili, A. N. Chudnovets, V. N. Brukhansky, D. P. Kukuy, V. S. Solod, A. A. Maltsev Development of high-quality production at the newest medium- and small-section mill 390 in Ukraine // *JSC "Chermetinformatsiya" Bulletin "Ferrous Metallurgy"*. - 2011. - No. 7. - P. 56 - 65.
15. "XGBoost Documentation" / [Electronic resource] // XGBoost Documentation: [website]. - URL: https://xgboost.readthedocs.io/en/release_3.0.0/# (accessed: 04.05.2025).
16. A. D. Smorodinov, T. V. Gavrilenko, V. A. Galkin, Theoretical foundations of artificial neural networks for solving the problem of approximation and interpolation. *Advances in Cybernetics* 2023;4(4):41–53 DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-4-04

17. Sergeev, A. P. Introduction to neural network modeling: textbook / A. P. Sergeev, D. A. Tarasov; under the general editorship of A. P. Sergeev. — Ekaterinburg: Publishing house of the Ural. University, 2017. — 128 p. ISBN 978-5-7996-2124-7
18. Khlivnenko L. V. Practice of neural network modeling: a textbook for universities / L. V. Khlivnenko, F. A. Pyatakovich. - 2nd ed., reprinted. St. Petersburg: Lan, 2021. -200 p.: ill. - Text: direct. ISBN 978.5.8114.8264.1
19. Golovko, V. A. Neural network data processing technologies: a textbook / V. A. Golovko, V. V. Krasnoproshin. - Minsk: BSU, 2017. - 263 p. - ISBN 978.985.566.467.4.
20. Vichugov V.N. Modified gradient algorithm for training radial-basis neural networks. News of Tomsk Polytechnic University. Management, Computer Engineering and Informatics. 2009. Vol. 315. No. 5 p.150-152

RESUME

V. S. Solod, V. M. Zuyev, S. B. Ivanova

Evaluation of the possibilities of using neural network models to optimizing reinforcing steel cooling technology.

The tightening of requirements for the quality of reinforcement bars, including their structure and mechanical properties, can be met by using an integrated approach to solving the problems of determining the influence of the chemical composition of steel and the main technological parameters of the production process on the final quality indicators. Given the growing interest in artificial neural networks (ANN), an idea arose to use neural network modeling to predict the settings of an accelerated cooling thermal line that ensure high quality properties with minimal energy costs.

Methods:

- mathematical modeling of the process based on the synthesis of theoretical model data and supplemented data from a real experiment;
- deep learning of a neural network with a perceptron-based architecture with backpropagation of errors;
- statistical analysis of the modeling results.

A mathematical model was obtained for predicting the settings of an existing thermal unit based on such target parameters as cooling time (in the form of the length and number of included cooling sections) and cooling intensity (in the form of the total value of water pressure at the inlet of the included sections). The accuracy of the mechanical properties forecast is within $\pm 7\%$.

It is not possible to solve the problem with the required accuracy using an ANN based on a two-layer perceptron. To obtain a more accurate forecast, it is necessary to use other machine learning methods, such as Boosting, or to develop an optimization algorithm for direct calculation using the existing theoretical model, taking into account all equipment limitations, with subsequent adjustment using a small amount of factory data.

РЕЗЮМЕ

В. С. Солод, В. М. Зуев, С. Б. Иванова

Оценка возможностей использования нейросетевых моделей для оптимизации технологии охлаждения арматурной стали

Ужесточение требований к качеству арматурных профилей, в том числе по структуре и механическим свойствам возможно удовлетворить путём применения комплексного подхода к решению задач определения влияния химического состава стали и основных технологических параметров производственного процесса на конечные показатели качества. Учитывая рост интереса к искусственным нейронным

сетям (ИНС), возникла идея использовать нейросетевое моделирование для прогнозирования настроек термоустановки ускоренного охлаждения, обеспечивающих высокое качество свойств при минимальных затратах энергоресурсов.

Методы:

- математическое моделирование процесса на основе синтеза данных теоретических моделей и дополненных данных реального эксперимента;
- глубокое обучение нейронной сети с архитектурой на основе перцептрона с обратным распространением ошибки;
- статистический анализ результатов моделирования.

Получена математическая модель для прогнозирования настроек существующей термоустановки по таким целевым параметрам, как время охлаждения (в виде длины и количества включенных секций охлаждения) и интенсивности охлаждения (в виде суммарной величины давления воды на входе включенных секций). Точность прогноза механических свойств находится в пределах $\pm 7\%$.

Решение поставленной задачи с помощью ИНС на основе двухслойного перцептрона с необходимой точностью не представляется возможным. Для получения более точного прогноза необходимо применить другие методы машинного обучения, например такой, как Boosting, или разработать алгоритм оптимизации для прямого расчета по имеющейся теоретической модели, учитывающий все ограничения оборудования, с дальнейшей подстройкой по небольшому количеству заводских данных.

Солод Владимир Сергеевич – научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта». *Область научных интересов:* компьютерное моделирование технологии прокатного производства, эл. почта vs.solod@mail.ru, адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон +7(949) 459- 02 -42.

Зуев Владимир Михайлович – заведующий отдела Интеллектуальных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта». *Область научных интересов:* компьютерное моделирование технологии прокатного производства, нейронные сети. эл. почта zvm.ipai@mail.ru, адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон +7(949) 317-39-60.

Иванова Светлана Борисовна – директор Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк, эл. почта iai_sb_ivanova@mail.ru, адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон: +7949 3347877 *Область научных интересов:* искусственный интеллект, интеллектуальные робототехнические системы.

Статья поступила в редакцию 23.07.2025.

УДК 539.2+535

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-78-86

С. А. Федоров, Ю. А. Безус, А. Е. Рыбалка
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина»
283048, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

ПОЛЯРИТОННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ТОПОЛОГИЧЕСКИ УПОРЯДОЧЕННОМ НЕИДЕАЛЬНОМ ГЕКСАГОНАЛЬНОМ МАССИВЕ МИКРОПОР С ПРИМИТИВНОЙ РЕШЕТКОЙ

S. A. Fedorov, Y. A. Bezus, A. E. Rybalka
FSBSI Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering
283048, c. Donetsk, R. Luxemburg str., 72

POLARITON EXCITATIONS IN A TOPOLOGICALLY ORDERED IMPERFECT HEXAGONAL ARRAY OF MICROPORES WITH A PRIMITIVE LATTICE

В настоящей работе проведено микроскопическое рассмотрение поляритонных возбуждений в неидеальной топологически упорядоченной нанорешетке микропор с гексагональной симметрией. Изучена специфика энергетического спектра рассматриваемых квазичастиц, обусловленная как конфигурационной зависимостью входящих в гамильтониан системы параметров, так и ее симметрией.

Ключевые слова: гексагональная симметрия, поляритонные структуры, бозе-эйнштейновская конденсация.

In this paper, a microscopic examination of polariton excitations in a non-ideal topologically ordered nanolattice of micropores with hexagonal symmetry is carried out. The specifics of the energy spectrum of the quasiparticles under consideration are studied, due to both the configuration dependence of the parameters included in the Hamiltonian system and its symmetry.

Keywords: hexagonal symmetry, polariton structures, Bose-Einstein condensation.

Введение

Проведенные в работах [1], [2] детальные исследования квазичастичных состояний неидеальных поляритонных структур, необходимы как для понимания механизмов распространения электромагнитных возбуждений, в соответствующих пористых материалах, так и для дальнейшего развития квантовой нанофотоники. Прогресс в этой области определяет не только состояние современной физической науки, но и ее практические применения. Выполненные в [1], [3], [4] численные моделирования поляритонных энергий позволяют находить дисперсионные, зонные характеристики соответствующих возбуждений, их концентрационную зависимость и определять области существования поляритонного конденсата для тех систем, в которых возможна бозе-эйнштейновская конденсация.

В настоящее время расширение возможностей функциональных пористых материалов идет за счет управляемого внедрения в них квантовых точек [3-7], структурных дефектов [8], [9], упругой деформации [10], а также путем изменения кристаллографической симметрии нанорешеток Браве [11]. В последнем случае, это может привести к появлению большего, чем в [12] числа топологических, критических точек (а, следовательно, и к большему чем в [12] особенностей соответствующих дисперсионных характеристик, используемых для создания технических устройств), как это показано в [11] при изучении экситоноподобных возбуждений двухподрешеточных массивов микропор с гексагональной симметрией. Представляет интерес провести аналогичные исследования также и для более сложных, имеющих комбинированную природу квазичастиц – поляритонов, существование которых возможно лишь при наличии квантовых точек.

Результаты и обсуждение

В настоящей работе рассматриваются неидеальные, топологически упорядоченные одноподрешеточные нанокристаллические фотонные системы микропор с гексагональной симметрией и с разупорядочением лишь в подсистеме квантовых точек. Здесь предполагается, что такая подсистема является двухкомпонентной, причем квантовые точки одного сорта отличаются от квантовых точек другого сорта лишь по изотопическому составу. Ниже, для таких систем, найдены энергии соответствующих поляритонных возбуждений, изучены особенности их спектров, зонных характеристик, а также проведен сравнительный анализ с результатами более ранних работ.

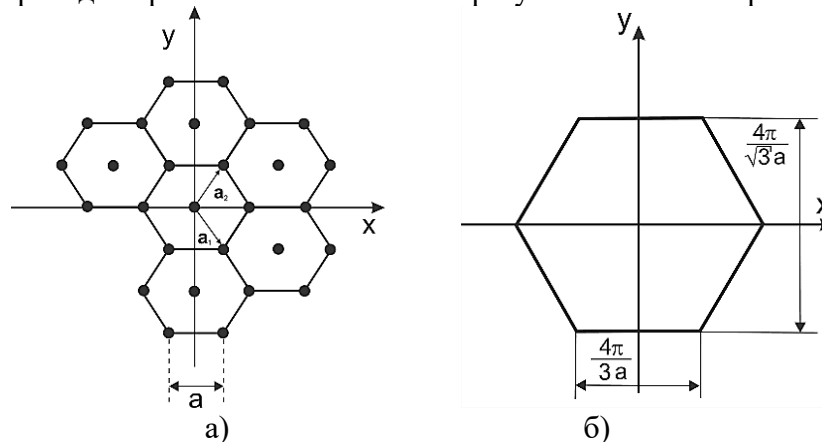


Рисунок 1 – Одноподрешеточная система микропор с гексагональной симметрией и соответствующая ей первая зона Бриллюэна

Как следует из ссылки [2], гамильтониан, определяющий искомые поляритонные состояния, можно записать в следующем виде:

$$\hat{H} = \sum_{\vec{n}, \vec{m}} \left[E_{\vec{n}} \delta_{\vec{n}\vec{m}} + V_{\vec{n}\vec{m}} \right] B_{\vec{n}}^{\dagger} B_{\vec{m}} + \sum_{\vec{n}, \vec{m}} \left[\hbar \Omega_{\vec{n}}^{ph} \delta_{\vec{n}\vec{m}} - A_{\vec{n}\vec{m}} \right] + \sum_{\vec{n}} g_{\vec{n}} \left[B_{\vec{n}}^{\dagger} \Psi_{\vec{n}} + \Psi_{\vec{n}}^{\dagger} B_{\vec{n}} \right] \quad (1)$$

где $\Omega_{\vec{n}}^{ph}$ – частота фотонной моды электромагнитного возбуждения локализованного в \vec{n} -узле (микропоре); $\Psi_{\vec{n}}, \Psi_{\vec{n}}^{\dagger}$ – бозе-операторы рождения и уничтожения этой фотонной моды; $E_{\vec{n}}$ – конфигурационно зависимая энергия возбуждения квантовой точки в узле \vec{n} ; $B_{\vec{n}}^{\dagger}, B_{\vec{m}}$ – бозе-операторы рождения и уничтожения этого возбуждения в узельном представлении; $A_{\vec{n}\vec{m}}$ – матрица резонансного взаимодействия, характеризующая перекрытие оптических полей микропор \vec{n} -го и \vec{m} -го узлов решетки; $V_{\vec{n}\vec{m}}$ – матрица резонансного взаимодействия квантовых точек в узлах \vec{n} и \vec{m} , конфигурационной зависимостью которой, для рассматриваемого массива квантовых точек можно пренебречь, как показано в работе [13]; $g_{\vec{n}}$ – конфигурационно зависимая матрица резонансного взаимодействия квантовой точки в узле \vec{n} с локализованным в этом узле электромагнитным полем.

Из вышесказанного следует, что гамильтониан (1) является конфигурационно зависимым оператором, вся конфигурационная зависимость которого определяется величинами $E_{\vec{n}}$ и $g_{\vec{n}}$. Для всех рассматриваемых типов (случайно разупорядоченных) неидеальных нанокристаллических фотонных систем, расчет их квазичастичных состояний удобно осуществлять используя аппарат усредненных функций Грина и приближение виртуального кристалла. В настоящей работе, такой способ применяется и для вычисления искомых поляритонных энергий $\hbar \Omega_{1,2}$. Выполняя все соответствующие расчетные процедуры по той же схеме, что и в работе [14] получим:

$$\hbar \Omega_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\langle E_{\vec{n}} \rangle + V(\vec{k}) + \hbar \Omega^{ph} - A(\vec{k}) \pm \sqrt{\left((\langle E_{\vec{n}} \rangle + V(\vec{k})) - (\hbar \Omega^{ph} - A(\vec{k})) \right)^2 + 4 \langle g_{\vec{n}} \rangle^2} \right] \quad (2)$$

где $V(\vec{k}) = \sum_{\vec{m}} V_{\vec{n}\vec{m}} \exp[i\vec{k}(\vec{r}_{\vec{n}} - \vec{r}_{\vec{m}})]$, $A(\vec{k}) = \sum_{\vec{m}} A_{\vec{n}\vec{m}} \exp[i\vec{k}(\vec{r}_{\vec{n}} - \vec{r}_{\vec{m}})]$. Здесь и выше, \vec{n} и \vec{m} целочисленные двумерные векторы, рассматриваемой двумерной решетки Браве; \vec{k} двумерный вектор лежащий в первой зоне Бриллюэна обратной решетки; конфигурационно усредненные величины $\langle E_{\vec{n}} \rangle$ и $\langle g_{\vec{n}} \rangle$ обычным образом [2] связаны с соответствующими концентрациями: $\langle E_{\vec{n}} \rangle = E^{(1)}C^{(1)} + E^{(2)}C^{(2)}$, $\langle g_{\vec{n}} \rangle = g^{(1)}C^{(1)} + g^{(2)}C^{(2)}$, $C^{(1)} + C^{(2)} = 1$.

В приближении ближайших соседей, величины $V(\vec{k})$ и $A(\vec{k})$ принимают вид:

$$V(\vec{k}) = 2V(a) \left\{ \cos \left[\left(k_x - \sqrt{3}k_y \right) \frac{a}{2} \right] + \cos \left[\left(k_x + \sqrt{3}k_y \right) \frac{a}{2} \right] + \cos k_x a \right\} \quad (3)$$

$$A(\vec{k}) = 2A(a) \left\{ \cos \left[\left(k_x - \sqrt{3}k_y \right) \frac{a}{2} \right] + \cos \left[\left(k_x + \sqrt{3}k_y \right) \frac{a}{2} \right] + \cos k_x a \right\} \quad (4)$$

Формулы (2-4) определяют дисперсионную и концентрационную зависимости поляритонных энергий для экситонной области спектра атомарной подсистемы. Указанные формулы позволяют выявлять специфику спектра рассматриваемых возбуждений, связанную с конфигурационной зависимостью параметров входящих в (2) и взаимным расположением микропор. Очевидно, что более высокая симметрия решетки Браве исследуемой системы обуславливает более сложную структуру поляритонных возбуждений, большее число симметричных критических точек и большее число особенностей Ван-Хова для плотности состояний [14]. В свою очередь, это приводит, при определенной конфигурационной зависимости параметров в (2), к большому многообразию форм соответствующих дисперсионных поверхностей и, следовательно, к большому числу динамических критических точек, имеющих комбинированную природу [15]. Сказанное подтверждается графиками, приведенными на рис. 3-6.

При численном моделировании соответствующих параметров, определяющих особенности спектра электромагнитных возбуждений, в настоящей работе взяты значения величин того же порядка, что и используемые авторами ранее при исследовании подобных структур [8-12]. Значения частот резонансных фотонных мод, локализованных в микропорах решетки: $\Omega^{ph} = 2\pi \times 311 \text{ THz}$. Параметры, определяющие перекрытие оптических полей и взаимодействие квантовых точек в соседних микропорах взяты следующими: $A/2\hbar = 3.5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$, $V/2\hbar = 2 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$. Поверхности, описывающие дисперсионную зависимость частот $\Omega_{1,2}(k, C_1, C_2)$ исследуемых коллективных возбуждений в неидеальной решетке микрорезонаторов представлены на рис. 2, со значениями концентраций $C_1 = 0.1$, $C_2 = 0.2$, $g_1/\hbar = 1.5 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$, $g_2/\hbar = 6.5 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$, $E_1/\hbar = 0.8 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$, $E_2/\hbar = 2.8 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$. При этом k изменяется в пределах первой зоны Бриллюэна:

$-\frac{\pi}{d(C_1, C_2)} < k < \frac{\pi}{d(C_1, C_2)}$ (затемненная область $(k, C_{1(2)})$ на рис. 2-4). Заметим, что

форма дисперсионной поверхности $\Omega_{1,2}(k, C_1, C_2)$ свидетельствует о возможности существования при определенных концентрациях дефектов структуры бозе-эйнштейновского поляритонного конденсата, благодаря наличию минимумов при значениях $k \neq 0$ (дополнительно к возможности существования конденсата при $k = 0$).

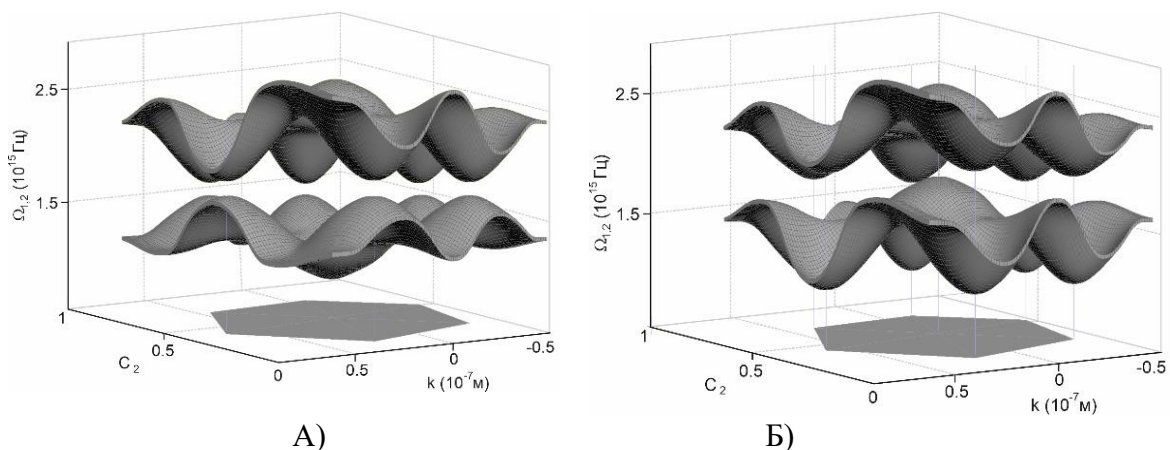


Рисунок 2 – Графическое изображение дисперсионной зависимости поляритонных возбуждений, описываемых формулой (2)

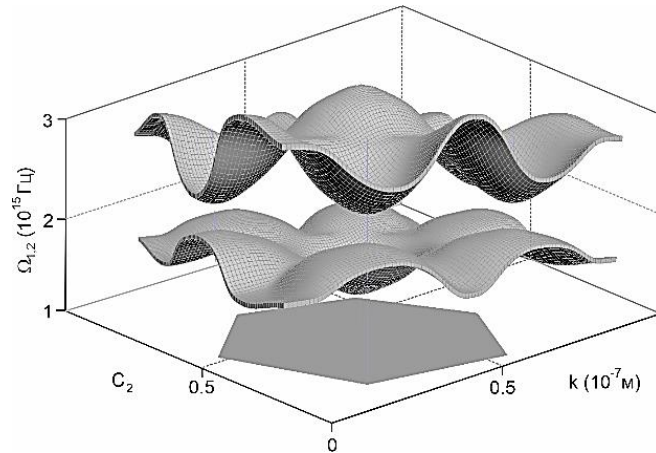


Рисунок 3 – Дисперсионная зависимость поляритонных возбуждений при слабой конфигурационной зависимости энергии возбуждения квантовой точки $\langle E_n \rangle / 2\hbar \approx E^{(0)} / 2\hbar = 2 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$; остальные значения параметров при расчете $\Omega_{1,2}(k)$ такие же, как и на рисунке 2А.

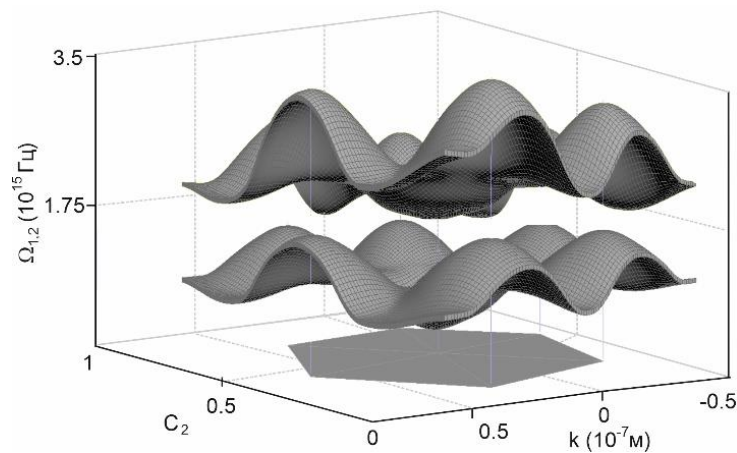


Рисунок 4 – Дисперсионная зависимость поляритонных возбуждений при слабой конфигурационной зависимости матрицы резонансного взаимодействия g_n квантовой точки $\langle g_n \rangle / \hbar \approx g / \hbar = 5 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$; остальные значения параметров при расчете $\Omega_{1,2}(k)$ такие же как и на рисунке 2Б

Зависимость ширины $\Delta\Omega_{12(21)}(C_1, C_2) \equiv \min_k [\Omega_{2(1)}(C_1, C_2) - \Omega_{1(2)}(C_1, C_2)]$ соответствующей запрещенной зоны поляритонного спектра от концентрации дефектов исследуемой структуры приведена на рис. 5 А, Б.

Все вышеизложенное указывает, на благоприятные условия, перспективы и предпосылки для обнаружения Бозе-эйнштейновской конденсации при $k \neq 0$ путем численного моделирования.

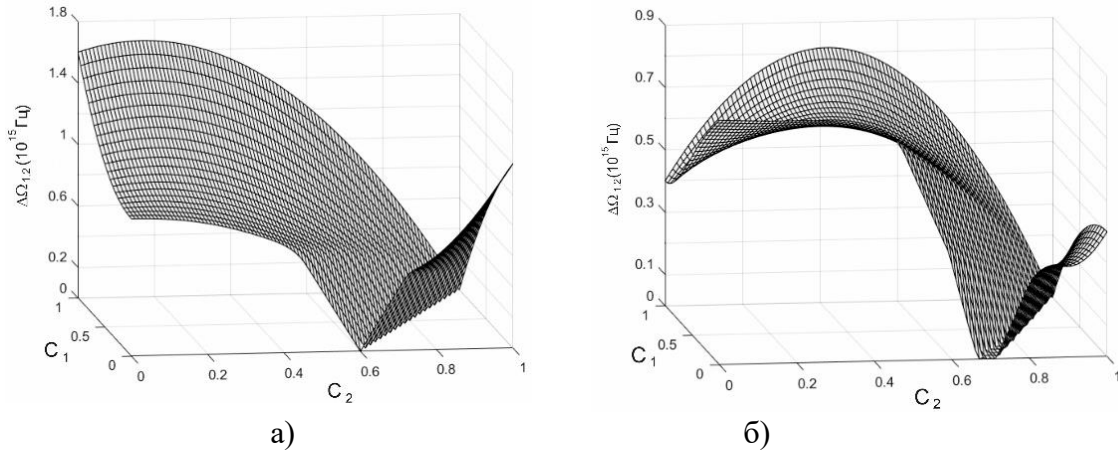


Рисунок 5 – Концентрационная зависимость запрещенной зоны соответствующей формуле (2)

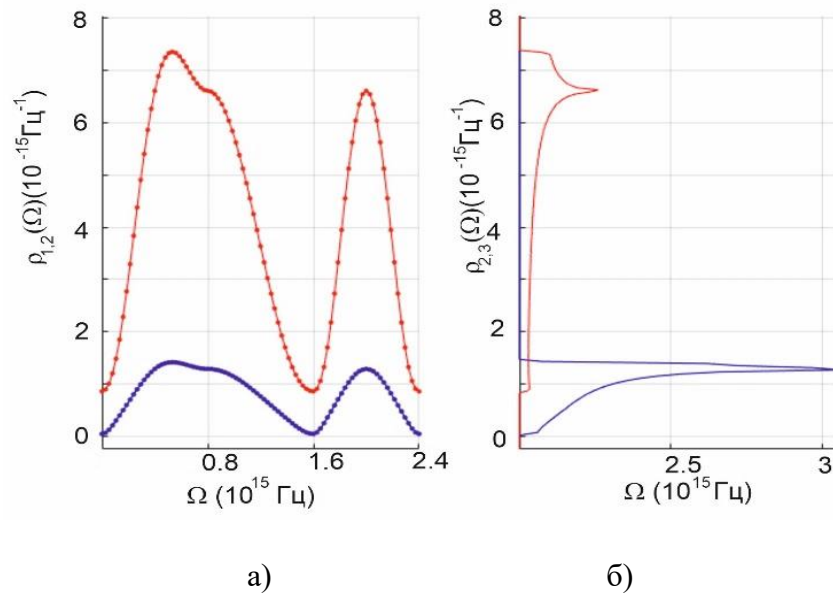


Рисунок 6 – Плотность состояний дисперсионных поверхностей $\Delta\Omega_{1,2}$ в области концентраций C_1, C_2 .

Заключение

Полученные в работе результаты существенно расширяют возможности численного моделирования дисперсионных и зонных характеристик квазичастичных возбуждений для нанокристаллических фотонных кристаллов и позволяют выявлять критерии существования поляритонного конденсата для тех пористых систем, в которых возможна бозе-эйнштейновская конденсация.

Список литературы

1. Алоджанц А.П. Фазовые переходы и хранение квантовой оптической информации на основе поляритонов в пространственно-периодических структурах / А.П. Алоджанц, С.М. Аракелян, С.Н. Багаев. *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2010. Т.1, №1. С. 7-25.

2. Румянцев В. В. Поляритоны в неидеальном массиве ультрахолодных квантовых точек / В. В. Румянцев, С. А. Фёдоров, К. В. Гуменник. *Физика низких температур*. 2016. Т. 42, № 5. С. 347–353.
3. Румянцев В.В. Элементы поляритоники неидеальных структур / В. В. Румянцев, С.А. Федоров, А.Г. Петренко. *Вестник ДонНУ. Сер. А: Естественные науки*. 2017. № 4. С. 69–78.
4. Паладян Ю.А. *Эффекты распространения электромагнитных и акустических возбуждений в несовершенных кристаллических средах*: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / ДОНФТИ. Д., 2022. 112 с.
5. Румянцев В.В. Введение в поляритонику / В. В. Румянцев, С.А. Федоров. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2022. №2 (25). С. 29–39.
6. Шици Ся. Нетрадиционные состояния плоских полос в фотонных решётках Либа / Ся Шици. Рамачандран Ажит, Ся Шициан и др. *Physical Review Letters*, 121, 26, 263902. 2018. С. 1–5.
7. Вахала К. Дж. *Оптические микрорезонаторы* / К. Дж. Вахала. *Природа*. 2003. Т. 424. С. 839–846.
8. Румянцев В. В. Дисперсионные характеристики электромагнитных возбуждений в неупорядоченной одномерной решётке связанных микрорезонаторов / В. В. Румянцев, С. А. Фёдоров, К. В. Гуменник, М. В. Сычанова. *Physica B: Конденсированное вещество*. 2015. Т. 461. С. 32–37.
9. Румянцев В. В. Электромагнитные возбуждения в неидеальной цепочке микропор с двумя подрешётками / В. В. Румянцев, С. А. Фёдоров, К. В. Гуменник, Дж. А. Паладян. *Physica B: Конденсированное вещество*. 2019. Т. 571. С. 296–300.
10. Румянцев В.В. Спектр электромагнитных возбуждений в неидеальной цепочке микропор в условиях однородной упругой деформации / В.В. Румянцев, С.А. Федоров, К.В. Гуменник, Д.А. Гуров. *ФТВД*. 2018. Т.28. №1. С. 87–95.
11. Румянцев В.В. Экситоноподобные возбуждения в неидеальных гексагональных нанорешетках микропор / В.В. Румянцев, С.А. Федоров, Ю.А. Безус, А.В. Безус, А.Е. Рыбалка. *ФТВД*. 2025. Т. 35. №1. С. 44–51.
12. Румянцев В. В. Экситоноподобные электромагнитные возбуждения в неидеальных микрополостных сверхкристаллах / В. В. Румянцев, С. А. Фёдоров, К. В. Гуменник, М. Сычанова, А. В. Кавокин *Scientific Reports*. 2014. Т. 4: 6945. С. 1–6.
13. Броуде В.Л. *Спектроскопия молекулярных экситонов* / В.Л. Броуде, Э.И. Рашба, Е.Ф. Шека. М: Энергоиздат, 1981. 248 с.
14. Румянцев В.В. Моделирование зависимости плотности состояний поляритонных возбуждений от концентрации дефектов в неидеальной 1D решетке микропор, содержащих квантовые точки / В.В. Румянцев, А.Е. Рыбалка, С.А. Федоров, К.В. Гуменник. *Проблемы Искусственного интеллекта*. 2023. №3(26). С. 41–50.
15. Федоров С.А. *Особенности спектра спиновых волн многоподрешеточных антиферромагнетиков*: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.02, 01.04.07 / ДОНФТИ АН УССР. Д., 1987. 117 с.

References

1. Alojants A.P. Phase transitions and storage of quantum optical information based on polaritons in spatially periodic structures / A.P. Alojants, S.M. Arakelyan, S.N. Bagaev // *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. – 2010. – Vol.1, No. 1. – pp. 7–25.
2. Rumyantsev V.V. Polaritons in a nonideal array of ultracold quantum dots / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk // *Low Temperature Physics*. -2016. –V.42, No.5. – P. 347–353.
3. Rumyantsev V.V. Elements of polaritonics of non-ideal structures / V. V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, A.G. Petrenko // *Bulletin of DonNU. Ser. A: Natural Sciences*. 2017. No. 4. pp. 69–78.
4. Paladian Yu.A. Effects of propagation of electromagnetic and acoustic excitations in imperfect crystalline media: dis. ... Candidate of Physical and Mathematical Sciences: 04/01/07 / DONFTI. – D., 2022. – 112 p.
5. Rumyantsev V.V. Introduction to polaritonics / V. V. Rumyantsev, S.A. Fedorov // *Problems of artificial intelligence*. – 2022. – №2 (25). – Pp. 29–39.
6. Shiqi Xia. Unconventional Flatband Line States in Photonic Lieb Lattices / Xia Shiqi. Ramachandran Ajith, Xia Shiqiang et al. // *Physical Review Letters*, 121, 26, 263902. – 2018. – P. 1–5.
7. Vahala K.J. Optical microcavities / K.J. Vahala // *Nature*. – 2003. – V. 424. – P. 839–846.
8. Rumyantsev V.V. Dispersion characteristics of electromagnetic excitations in a disordered one-dimensional lattice of coupled microresonators / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk, M.V. Sychanova // *Physica B: Condensed Matter*. – 2015. – V. 461. – P. 32–37.
9. Rumyantsev V.V. Electromagnetic excitations in a non-ideal two-sublattice microcavity chain [Text] / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk, J.A. Paladyan // *Physica B: Condensed Matter*. – 2019. – V. 571. – P. 296–300.
10. Rumyantsev V.V. The spectrum of electromagnetic excitations in a non-ideal chain of micropores under conditions of homogeneous elastic deformation / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk, D.A. Gurov // *FTVD*. – 2018. – Vol.28. – No. 1. – pp. 87–95.

11. Rumyantsev V.V. Exciton-like excitations in imperfect hexagonal nanolattices of micropores / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, Yu.A. Bezus, A.V. Bezus, A.E. Rybalka // FTVD. – 2025. – Vol. 35. – No. 1. – pp. 44-51.
12. Rumyantsev V.V. Exciton-like electromagnetic excitations in non-ideal microcavity supercrystals / V.V. Rumyantsev, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk, M. Sychanova, A.V. Kavokin // Scientific Reports. – 2014. – V. 4:6945. – P. 1-6.
13. Brode V.L. Spectroscopy of molecular excitons / V.L. Brode, E.I. Rashba, E.F. Sheka. Moscow: Energoizdat, 1981. 248 p.
14. Rumyantsev V.V. Modeling the dependence of the density of states of polariton excitations on the concentration of defects in an imperfect 1D lattice of micropores containing quantum dots / V.V. Rumyantsev, A.E. Rybalka, S.A. Fedorov, K.V. Gumennyk // Problems of Artificial Intelligence. – 2023. №3(26). – Pp. 41-50.
15. Fedorov S.A. Features of the spectrum of spin waves of multipath antiferromagnets: dis. ... Candidate of Physical and Mathematical Sciences: 04/01/02, 04/01/07 / DONFTI Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. – D., 1987. – 117 p.

RESUME

S. A. Fedorov, Y. A. Bezus, A. E. Rybalka

Polariton excitations in a topologically ordered imperfect hexagonal array of micropores with a primitive lattice

Background: The relevance of research into physical systems at the nanostructural scale stems both from the need for continued advancement in quantum nanophotonics and from practical applications of nanotechnology. Of particular interest is the study of quasiparticle excitations in imperfect arrays of micropores, which is essential for modeling technical devices with specified characteristics. The enhancement of functional porous materials is achieved not only through the controlled introduction of quantum dots, structural defects, or elastic deformation, but also by altering the crystallographic symmetry of Bravais nanolattices, as demonstrated in the simple case of exciton-like excitations. In this work, a similar symmetry-based approach is employed to calculate the states of quasiparticles with a more complex, hybrid nature—polaritons

Materials and methods: This study employs the following methodologies: a quantum-mechanical approach for describing quasiparticle excitations; the framework of averaged Green's functions to determine the concentration dependence of the corresponding states; and numerical modeling of dispersion surfaces.

Results: The formulas derived for polariton energies in this work make it possible to reveal the specific features of polariton dispersion, which are linked to the concentration-dependent parameters appearing in the corresponding analytical expressions and the spatial arrangement of micropores. It is evident that the high symmetry of the Bravais lattice in the system under investigation leads to a more complex structure of polariton excitations, a greater number of symmetry-related critical points, and more Van Hove singularities in the density of states compared to systems with lower symmetry.

Conclusion: The results obtained in this work significantly enhance the capabilities of numerical modeling for the dispersion and band characteristics of quasiparticle excitations in nanocrystalline photonic crystals. They also make it possible to identify criteria for the existence of a polariton condensate in porous systems where Bose–Einstein condensation may occur.

РЕЗЮМЕ

С. А. Федоров, Ю. А. Безус, А. Е. Рыбалка

Поляритонные возбуждения в топологически упорядоченном неидеальном гексагональном массиве микропор с примитивной решеткой

Актуальность исследований физических систем наноструктурного масштаба обусловлена как потребностями дальнейшего развития квантовой нанофотоники, так и с точки зрения практических применений нанотехнологий. Особый интерес при этом представляет изучение квазичастичных возбуждений неидеальных массивов микропор необходимое для моделирования технических устройств с заданными характеристиками. Расширение возможностей функциональных пористых материалов осуществляется не только за счет управляемого внедрения в них квантовых точек, структурных дефектов, упругой деформации, но также и путем изменения кристаллографической симметрии нанорешеток Браве, как это показано на простейшем примере экситоноподобных возбуждений. В настоящей работе аналогичный симметричный подход используется при расчете состояний квазичастиц имеющих более сложную, комбинированную природу – поляритонов.

Материалы и методы: в работе используется: квантовомеханический подход к описанию квазичастичных возбуждений; аппарат усредненных функций Грина для нахождения концентрационной зависимости соответствующих состояний; численное моделирование дисперсионных поверхностей.

Результаты: полученные в работе формулы для поляритонных энергий позволяют выявлять специфику дисперсии поляритонов, связанную с концентрационной зависимостью параметров входящих в соответствующие аналитические выражения и взаимным расположением микропор. Очевидно, что высокая симметрия решетки Браве исследуемой системы обуславливает более сложную структуру поляритонных возбуждений, большее число симметричных критических точек и большее число особенностей Ван Хофа для плотности состояний, чем для систем с низкой симметрией.

Вывод: Полученные в работе результаты существенно расширяют возможности численного моделирования дисперсионных и зонных характеристик квазичастичных возбуждений для нанокристаллических фотонных кристаллов и позволяют выявлять критерии существования поляритонного конденсата для тех пористых систем, в которых возможна бозе-эйнштейновская конденсация.

Федоров Станислав Афанасьевич – кандидат ф-м наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Донецкий физико-технический им А.А. Галкина», *область научных интересов:* компьютерное и математическое моделирование, фотоника, поляритоника, эл. почта stan.fedorov2023@yandex.ru, адрес: РФ, ДНР, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, д.2 б, телефон: +7(949) 420-51-95.

Безус Юлия Александровна – кандидат ф-м наук, научный сотрудник, ФГБНУ «Донецкий физико-технический им А.А. Галкина», *область научных интересов:* компьютерное и математическое моделирование, фотоника, поляритоника, эл. почта paladyan0108@yandex.ru, адрес: 283048, РФ, ДНР, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 72, телефон: +7(949) 373-67-30.

Рыбалка Алексей Евгеньевич – младший научный сотрудник, ФГБНУ «Донецкий физико-технический им А.А. Галкина», *область научных интересов:* компьютерное и математическое моделирование, фотоника, поляритоника, эл. почта rybalkaalexei@yandex.ru, адрес: 283052, РФ, ДНР, г. Донецк, б. Шевченко, д.103, кв.18, телефон: +7(949) 421-90-73.

Статья поступила в редакцию 21.04.2025.

УДК 004.82+007.52

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-88-99

Д. В. Аладин^{1,2}

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, Москва, Россия

²АО НИИ Вычислительных комплексов им. М.А. Карцева
117437, ул. Профсоюзная, д. 108, Москва, Россия

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ МИВАРНЫХ БАЗ ЗНАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

D. V. Aladin^{1,2}

¹Bauman Moscow State Technical University
105005, 2-ya Baumanskaya st., bld. 5, structure 1, Moscow, Russia

²JSC M.A. Kartsev Research Institute of Computing Systems
117437, Profsoyuznaya st., bld. 108, Moscow, Russia

MIVAR KNOWLEDGE BASE AUTOMATIC GENERATION METHOD FOR SOLVING MANAGEMENT TASKS IN STATE SPACE

Работа посвящена разработке метода автоматической генерации миварных баз знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний. Метод применяется для обработки информации с целью подготовки модели принятия решений (миварной базы знаний) для систем с искусственным интеллектом. Метод предлагает подход к подготовке исходных данных и знаний для генерации и модель автоматического генератора баз знаний, основанная на метаграфовом подходе описания гибридных интеллектуальных информационных систем.

Ключевые слова: миварный подход, метаграфовый подход, миварная база знаний, миварная сеть, метаграф, экспертная система, интеллектуальная система управления, планирование действий, пространство состояний

The paper is devoted to the development of a method for the automatic generation of mivar knowledge bases for solving management tasks in the State Space. The method is used to process information in order to prepare a decision-making model (mivar knowledge base) for systems with Artificial Intelligence. The method offers an approach to preparing source data and knowledge for generation and a model of an automatic knowledge base generator based on the Metagraph approach to describing hybrid intelligent information systems.

Keywords: mivar approach, metagraph approach, mivar knowledge base, mivar network, metagraph, expert system, intelligent control system, action planning, state space

Введение

С развитием технологий автоматизации и роботизации всё чаще можно наблюдать использование интеллектуальных систем управления в различных сферах [1]. Особенно актуальным становится создание систем, способных функционировать в условиях динамично изменяющейся среды. Циклические управленческие задачи представляют особый класс задач, требующих непрерывного мониторинга состояния предметной области и оперативного принятия решений. Такие задачи характерны для систем управления производственными процессами [2], роботизированными комплексами [3], сельскохозяйственными объектами [4], а также для систем поддержки принятия решений [5]. Данные задачи могут использовать различные способы решения. Например, для их решения может быть применён метод разбиения на подзадачи [6]. Данный метод основывается на понятиях состояния предметной области (ПрО), пространство состояний и действия в предметной области, которые формируют концептуальную модель предметной области (КМПрО).

Миварный подход к созданию интеллектуальных систем [7] может служить основой для решения управленческих задач в пространстве состояний. Он опирается на продукционные правила и линейно-вычислительную логику, обеспечивая гибкость, масштабируемость и линейную вычислительную сложность. Примеры прикладных решений приведены в [8] и [9].

Для работы миварных экспертных систем (МЭС) необходимы формализованные базы знаний, которые традиционно подготавливаются когнитологами на основе анализа ПрО. При решении задач МЭС строит логический вывод по таким базам, формируя решения для дальнейших действий или анализа. Подготовка и обработка баз знаний в миварном подходе реализуется через две технологии [7]: накопления и обработки информации. Дополнительно разработаны методики подготовки баз знаний [7].

Миварные базы знаний могут создаваться автоматически с помощью программных или интеллектуальных методов. Разнообразие этих методов обуславливает необходимость обобщённого подхода к проектированию и анализу взаимодействий между компонентами МЭС и генератором баз знаний. В качестве основы можно использовать концепцию гибридных интеллектуальных информационных систем (ГИИС), рассматривающая взаимодействие различных интеллектуальных методов в многоагентных системах. Для описания их структуры применяют метаграфовый подход [10].

Миварный и метаграфовый подходы предлагают свои собственные пространства для работы с КМПрО. Эти пространства позволяют преобразовывать данные между собой, что было показано в работах [11] и [12]. Благодаря этому можно использовать преимущества обоих подходов при проектировании и создании сложных и разнородных систем, таких, как ГИИС.

Цель данной работы заключается в совершенствовании процесса проектирования и анализа систем, использующих автоматическую генерацию миварных баз знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний. Для достижения этой цели предлагается применять метаграфовый подход к описанию сложных информационных систем. Метаграфовый подход позволяет структурировать элементы системы и выявить взаимосвязи между ними, что способствует улучшению качества проектирования и анализа МЭС, ускорению процессов разработки и упрощению эксплуатации. Используя опыт разработки МЭС и исследования метаграфов, можно обобщить процесс создания баз знаний, определить этапы подготовки исходных данных для генерации и разработать модель генератора в виде подсистемы ГИИС. Таким образом, можно создать основу для метода автоматической генерации миварных баз знаний, предназначенного для решения управленческих задач в пространстве состояний.

Материалы и методы

Миварные сети для решения циклических управленческих задач в пространстве состояний. Миварный подход к созданию интеллектуальных систем для КМПРО предполагает использование миварного пространства [13] — многомерного дискретного пространства, описывающего ПРО через три компонента: вещь, свойство и отношение. Для работы применяется миварная сеть — плоский граф, формируемый из двудольных ориентированных графов. Его вершины — параметры (измеримые свойства) и правила (способы получения одних значений параметров при известных других). Рёбра указывают принадлежность параметров входному или выходному множеству правила. Формализация знаний в виде миварных сетей образует миварную базу знаний ПРО.

Каждый параметр и правило имеет уникальное имя. Значения параметров задаются при формализации базы, постановке задачи ПРО или в процессе логического вывода. Правило активируется при известности всех входных параметров и задаёт значения выходных. Все правила имеют продукционную форму «если..., то...» [7]. Логический вывод заключается в определении значений заданных параметров на основе исходных.

На рисунке 1 представлена миварная сеть правил в виде плоского графа. Параметры отображены в виде кругов с именем, правила — в виде прямоугольников с именем. Миварная сеть представлена тремя правилами R_1, R_2 и R_3 , а также семью параметрами P_1, P_2, \dots, P_6 и P_7 . Множества $IN_1 = \{P_1, P_2\}$, $IN_2 = \{P_4\}$ и $IN_3 = \{P_3, P_5\}$ являются входными множествами по отношению к правилам R_1, R_2 и R_3 соответственно, а множества $OUT_1 = \{P_3\}$, $OUT_2 = \{P_5, P_6\}$ и $OUT_3 = \{P_7\}$ — выходными множествами к тем же самым правилам. Задача построения логического вывода по миварной сети может звучать следующим образом: при известных значениях параметров P_1, P_2 и P_4 получить значения параметров P_6 и P_7 . Логический вывод будет представлен последовательностью правил R_1, R_2 и R_3 , действия которых вычисляют искомые параметры.

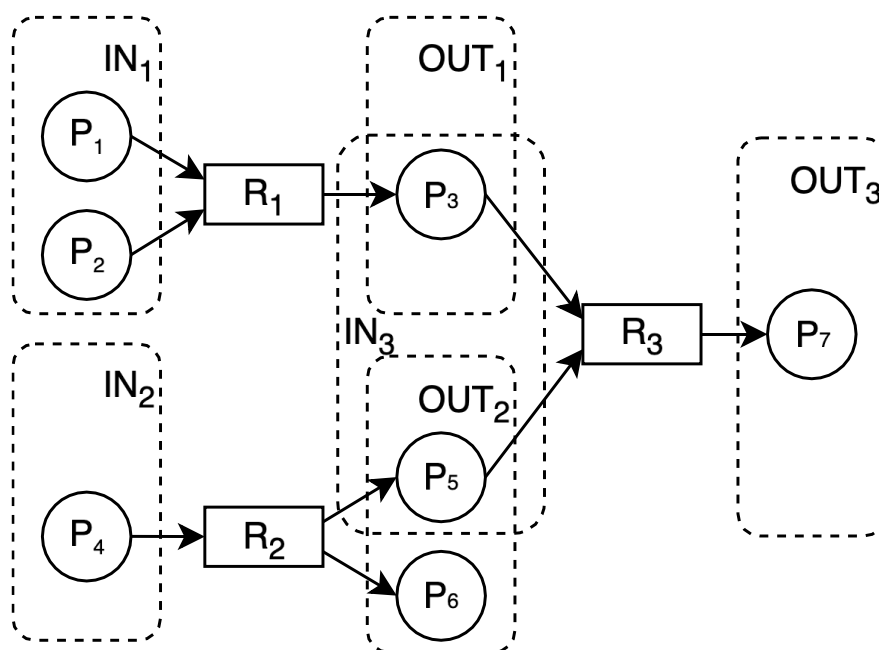


Рисунок 1 – Пример миварной сети правил и параметров

Миварный подход к созданию интеллектуальных систем может использоваться совместно с различными методами решения задач. Одним из таких методов является метод разбиения задачи на подзадачи [6], который включает: определение множества начальных состояний ПрО S_n ; совокупность операторов для перевода ПрО из одного состояния в другое G ; множество целевых состояний ПрО $S_{ц}$. Суть метода заключается в том, чтобы разбить задачу $T = \langle S_n, G, S_{ц} \rangle$ на такие подзадачи, которые можно решить с помощью одного из оператора множества G .

Примером системы, основанной на миварном подходе и методе разбиения задачи на подзадачи, является логическая интеллектуальная система обеспечения ухода за растениями (ЛИС ОУР) [4]. Она контролирует и корректирует микроклимат теплицы, анализируя данные с датчиков. База знаний формируется на основе технологических карт роста и учитывает техническое оснащение. Каждая подзадача представлена подграфом миварной сети и отвечает за управление конкретным оборудованием.

ЛИС ОУР относится к циклическим управленческим системам. Её цикл определяется технологическими картами, фазами дня и ночи, а также этапами роста растений. В общем виде цикл взаимодействия с внутренней средой теплицы выглядит так [4]: получение и анализ данных с датчиков, подготовка управленческого решения на основе решения подзадач, формирование и отправка управляющих сигналов на исполнительные устройства. Цикл может повторяться с заданной периодичностью, при изменении данных от систем мониторинга или запускаться таймером по технологической карте роста растения. ЛИС ОУР использует статические базы знаний, полностью разработанные когнитологами, однако в циклических системах возможно применение автоматизированной и автоматической генерации. Автоматическая генерация используется в миварной интеллектуальной системе планирования действий роботов (МИПРА) [14].

В МИПРА автоматическая генерация масштабирует базы знаний в зависимости от текущей задачи и состояния ПрО. Структура базы адаптируется к числу управляемых объектов по алгоритму, формализованному когнитологом. Для проектирования и исследования таких генераторов миварных баз знаний в циклических управленческих задачах можно применить метаграфовый подход [15].

Метаграфовый подход к представлению сложных информационных систем. В исследованиях [15] и [16] рассматривается метаграфовая модель ГИИС и её связь с мультиагентными системами. Метаграфовый подход позволяет представить компоненты ГИИС в виде агентов, каждый из которых описывается сложным графом.

В труде [16] подробно описан подход к формированию метаграфового пространства. Исследования [11] и [12] показывают, что при определённых условиях метаграфовое пространство может преобразовываться в миварное и обратно, что позволяет отображать миварную сеть в виде метаграфа для проектирования и исследования МЭС как части ГИИС [17]. Отображение метаграфа в миварную сеть для МЭС с автоматической генерацией баз знаний даёт возможность рассматривать генератор как подсистему ГИИС. Следовательно, для разработки модели генератора миварных сетей, решающего управленческие задачи в пространстве состояний, применимы метаграфовый подход и модель метаграфового агента.

Метаграф можно формализовать в виде кортежа $MG = \langle V, MV, E, ME \rangle$, где V — множество вершин, MV — множество метавершин, E — множество рёбер, ME — множество метарёбер. Каждая вершина (метавершина) и рёбро (метарёбро) характеризуется некоторым множеством атрибутов. Фрагмент метаграфа в общем виде можно представить как множество элементов, включающее произвольные вершины (мета-

вершины) и рёбра (метарёбра). Метавершина включает фрагмент метаграфа, у которого рёбра и метарёбра могут быть только ненаправленными. Метаребро включает фрагмент метаграфа, у которого рёбра и метарёбра могут быть только направленными. Детальное рассмотрение компонентов метаграфа представлено в труде [16].

Множество агентов ГИИС при использовании метаграфового подхода определяются следующим образом:

$$AG = \{ag_i\},$$

где ag_i — агент.

В рамках метаграфового подхода различают агент-функцию, метаграфовый агент, контейнерный агент и динамический агент. Данные виды агентов позволяют отобразить статическую и динамическую структуру ГИИС. Для разработки модели генератора миварной базы знаний интерес представляют агент-функция и метаребро.

Агент-функция — это кортеж, который включает в себя входной метаграф MG_{IN} , выходной метаграф MG_{OUT} и абстрактное синтаксическое дерево AST :

$$ag^F = \langle MG_{IN}, MG_{OUT}, AST \rangle.$$

Метаграфовый агент можно представить в виде кортежа:

$$ag^M = \langle MG_D, \{r_i\}, AG^{ST} \rangle,$$

который состоит из метаграфа данных и знаний MG_D , на основе которого выполняются выполняются правила из множества r_i . Также в кортеж входит стартовое условие выполнения агента AG^{ST} , которое может быть представлено в виде фрагмента метаграфа.

Правило метаграфового агента r_i состоит из двух частей: антецедента MG_j (фрагмент метаграфа, на основе которого выполняется правило) и консеквента OP^{MG} (множество операций, которые выполняются над метаграфом). Формализованное представление правила метаграфового агента представляется в виде $MG_j \rightarrow OP^{MG}$.

Метаграфовые агенты способны работать с двумя видами правил: разомкнутыми и замкнутыми. Разомкнутые правила дают возможность агенту создавать новый метаграф на основе существующего, а замкнутые правила позволяют модифицировать уже имеющийся метаграф. Благодаря данной способности, а также возможности преобразования метаграфа в миварную сеть [12], можно представить генератор миварных баз знаний в виде метаграфового агента.

В основе метода автоматической генерации миварных баз знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний лежат результаты создания МИПРА [14]. Этот метод описывает процесс создания баз знаний, подготовку необходимых исходных данных и модель генератора баз знаний, которая используется при проектировании и разработке МЭС. Далее эти аспекты будут рассмотрены более подробно.

Метод автоматической генерации миварных баз знаний

Обобщённый процесс автоматической генерации миварных баз знаний. На рис. 2 представлена схема процесса автоматической генерации баз знаний, который реализуется в МИПРА.

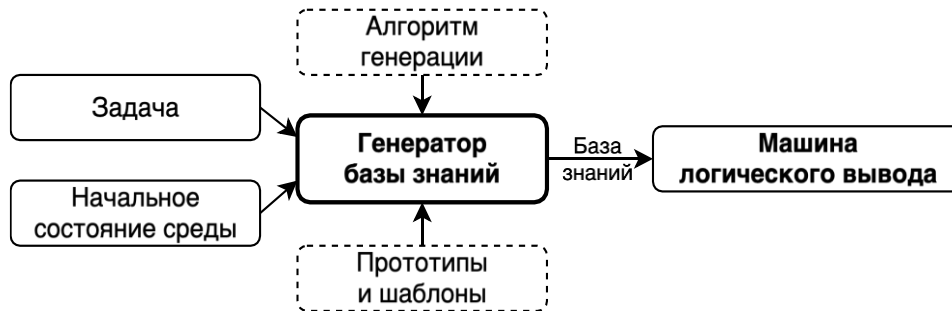


Рисунок 2 – Обобщённый процесс автоматической генерации базы знаний для решения задачи в пространстве состояний

В общем виде задача МИПРА формулируется как подготовка плана действий робота по переводу среды ПрО из текущего состояния в целевое с учётом её ограничений и возможностей робота. Для этого используется миварная база знаний, структура которой строится по методу разбиения задач на подзадачи: подграфы миварной сети отвечают за планирование действий над каждым объектом. Так как число объектов управления в среде может изменяться, применяется автоматическая генерация баз знаний. Она формирует миварную сеть, охватывающую все подзадачи и обеспечивающую решение текущей задачи планирования. В результате база знаний строится с учётом состояния среды ПрО и конкретной задачи.

Когнитолог, проведя системный анализ ПрО, разрабатывает обобщённый алгоритм для решения задач планирования. Для этого он заранее формализует и готовит фрагменты знаний. На основе этих фрагментов и алгоритма генерации, который подготавливает также когнитолог, генерируется миварная база знаний.

Фрагменты знаний включают в себя прототипы параметров и правил, а также шаблоны параметров и правил. Прототип параметра — параметр с заранее заданным значением, имя которого формируется при генерации. Используется для описания характеристик объектов управления, известных до постановки задачи планирования. Прототип правила — правило с фиксированным действием, имя и связи с параметрами которого задаются при генерации. Применяется для создания правил анализа состояния управляемых объектов. Шаблон параметра — параметр, имя и значение которого определяются при генерации. На его основе формируются параметры текущего состояния объектов управления. Шаблон правила — правило, действие, имя и связи с параметрами которого формируются при генерации. Используется для создания правил, задающих порядок выполнения подзадач.

Подготовка знаний для автоматической генерации миварных баз знаний. В работе [18] представлена методика подготовки баз знаний для роботов и робототехнических комплексов. Её можно использовать при автоматической генерации баз знаний для управленческих задач в пространстве состояний методом разбиения на подзадачи. Однако для её успешного применения когнитологу необходимо определить требования к исходным данным с учётом специфики задач. Например, для МИПРА можно сформулировать следующие требования [14]:

1. Алгоритм решения задачи с миварной базой знаний должен быть обобщаемым и масштабируемым, что обеспечивает адаптацию к числу объектов и создание прототипов и шаблонов параметров и правил для генерации базы знаний под конкретную задачу и состояние ПрО.

2. Решаемая задача должна быть декомпозируемой по объектам: каждая подзадача в МИПРА планирует действия над конкретным объектом.
3. ПрО должна включать множество однотипных объектов с одинаковыми способами взаимодействия и описания состояния. Прототипы и шаблоны обеспечивают добавление правил и параметров для анализа состояния объекта и определения следующего действия с учётом среды.

Для применения автоматической генерации миварных баз знаний в МЭС с целью решения управленческих задач в пространстве состояний, необходимо осуществить следующие действия:

1. Системный анализ ПрО: определить тип задач, которые будут решаться с помощью автоматически генерируемой базы знаний; разработать общий алгоритм для решения задач, для которых будет использоваться автоматическая генерация баз знаний; выявить и описать объекты управления, участвующие в процессе решения задач; сформулировать способ разбиения задач на подзадачи.
2. Подготовка основы для генерации базы знаний: формализовать знания, которые остаются постоянными при изменениях в ПрО; создать прототипы и шаблоны правил и параметров, которые будут реализовывать способ разбиения задач на подзадачи.
3. Разработка генератора базы знаний: описать алгоритм генерации базы знаний, с учётом типа решаемых задач и полученной основы базы знаний; создать инструмент, который будет автоматически генерировать базы знаний с учётом конкретной задачи и текущего состояния ПрО.

Модель автоматического генератора миварных баз знаний. Для обработки баз знаний в МЭС применяется машина логического вывода (МЛВ). Один из её представителей реализован в программном продукте КЭСМИ Wi!Mi «Разуматор» [7], где базы знаний хранятся в формате XML, а взаимодействие с другими программами осуществляется через программный интерфейс. МИПРА может использовать данную МЛВ для обработки автоматически создаваемых баз знаний. Поскольку загрузка осуществляется в формате XML, был разработан генератор баз знаний в виде программы-шаблонизатора.

Генератор может реализовываться и другими способами в зависимости от ограничений ПрО, специфики задач, опыта разработчиков и др. Для включения генератора в состав общей системы требуется его обобщённая модель. Предлагается рассматривать генератор как метаграфового агента и анализировать его в рамках ГИИС [15]. Модель такого агента приведена на рисунке 3 и основана на методе представления метаграфовых агентов [16].

Метаграфовый агент генератора базы знаний представляется как вершина метаграфа [16], внутри которой содержатся метавершины метаграфовых правил. Для примера рассматривается одно правило. Каждая метавершина правила включает вершины antecedента и консеквента, где условия и действия задаются атрибутами. С агентом связан метаграф MG_1 , определяющий выполнение его правил (связь через ребро e_4). В MG_1 выделяются фрагменты mv_1 , mv_2 и mv_3 . Стартовое условие работы агента описывается фрагментом mv_1 , который связывается через ребро e_1 с атрибутом $start=true$. Первое правило к выполнению также помечается атрибутом $start=true$. Фрагмент mv_2 соединён ребром e_2 с antecedентом метаграфового правила 1, а mv_3 — ребром e_3 с его консеквентом.

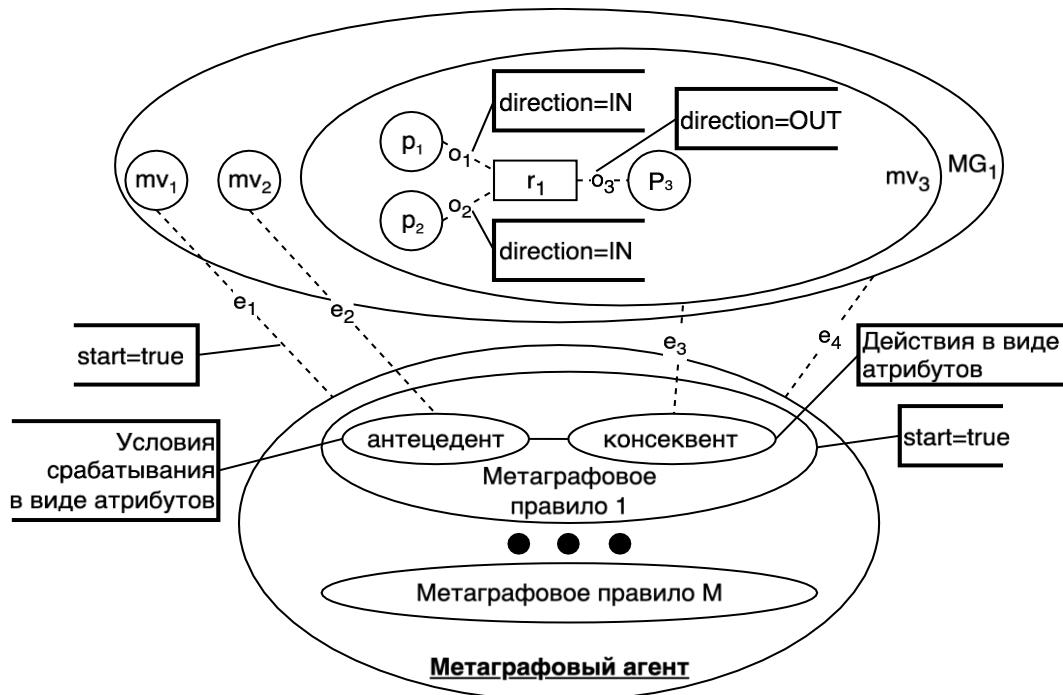


Рисунок 3 – Модель генератора миварных сетей для решения управленческих задач в пространстве состояний

Как ранее упоминалось, метаграфовые правила могут быть разомкнутыми и замкнутыми. Поэтому метаграфовый агент может породить фрагмент метаграфа. Метаграф при соблюдении определённых условий можно преобразовать в миварную сеть и обратно, например, как описано в работах [11] и [12]. Как показано на рис. 3 в результате срабатывания метаграфового правила 1 порождается фрагмент метаграфа, у которого ребра o_1 , o_2 и o_3 и вершины r_1 , p_1 , p_2 и p_3 . Данный фрагмент представлен ненаправленным графом и является отображением подграфа миварной сети. Для указания принадлежности миварных параметров входному или выходному множеству правила r_1 используются атрибуты: атрибут $direction=IN$ указывает на то, что параметр относится к входному множеству, атрибут $direction=OUT$ - к выходному множеству. Значения параметров и указатели на действия правил могут также быть представлены атрибутами вершин.

Обсуждение

Применение метода автоматической генерации миварных баз знаний для управленческих задач в пространстве состояний даёт МЭС ряд преимуществ.

Динамическая адаптация МЭС под изменения среды ПрО. Предложенный метод обеспечивает автоматическое масштабирование баз знаний в зависимости от числа управляемых объектов за счёт предварительно формализованных фрагментов. Когнитолог описывает алгоритм в обобщённом виде, а МЭС адаптирует его под текущее состояние ПрО и задачу, реагируя на изменения количества и состояния объектов.

Формализация интерфейсов взаимодействия генератора баз знаний. Для этого используется преобразование метаграфового пространства в миварное [11] и обратно [12], что структурирует знания и данные между генератором и компонентами МЭС, обеспечивая корректную интерпретацию при смене формата.

Поддержка различных методов генерации баз знаний. Метаграфовый подход позволяет описывать агентов на основе продукционных правил, нейросетей, нечёткой логики, эволюционных и других ИИ-методов [15]. Использование метаграфового агента как модели генератора баз знаний абстрагирует от технических реализаций и фокусируется на архитектуре МЭС, представляя её как граф взаимосвязанных компонентов с возможностью замены элементов без нарушения структуры.

Таким образом, метод служит инструментом проектирования и анализа МЭС, повышая её гибкость и адаптивность к изменениям среды ПрО.

Заключение

В ходе проведенного исследования был разработан и обоснован метод автоматической генерации миварных баз знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний. Данный метод позволяет создавать МЭС, способные адаптироваться к изменениям предметной области путем динамического масштабирования баз знаний в зависимости от количества управляемых объектов. Ключевым преимуществом метода является возможность использования предварительно формализованных фрагментов знаний, что дает когнитологу возможность описывать алгоритм решения задачи в обобщенном виде, а системе — самостоятельно адаптировать его под конкретное состояние ПрО и конкретную задачу.

Предложенный метаграфовый подход к представлению генератора миварных баз знаний в виде сложного графа позволяет абстрагироваться от конкретных технических реализаций и сосредоточиться на анализе общей архитектуры МЭС. Это даёт возможность рассматривать систему как взаимосвязанный комплекс компонентов, где каждый элемент может быть модифицирован или заменен без нарушения общей структуры, что существенно расширяет возможности проектирования и анализа МЭС.

Список литературы

1. Казаков Г.В., Старчак С.Л., Григоренко В.М. Методы искусственного интеллекта - очередной этап развития интеллектуальных методов обработки информации в системах управления. *Искусственный интеллект. Теория и практика*. 2024. № 3(7). С. 44-48. EDN CZDYBK.
2. Коценко А.А., Герасименко А.В., Калашникова А.В., Базанова А.Г., Аладин Д.В. Машиностроительный искусственный интеллект: разработка миварной методики для поиска траекторий робота и решения оптимизационных задач. *Машиностроительные технологические системы: сборник трудов Международной научно-технической конференции* / Ростов-на-Дону, 26–29 мая 2022 года. Ростов-на-Дону: Донской государственной технической университет, 2022. С. 363-370. EDN CZHLRS.
3. Шэнь Ц., Гун Ш., Лю Ч., Лю А., Тимофеев В.Б., Варламов О.О. Алгоритм планирования траектории робота на основе технологии обнаружения объектов с использованием МЭС. *МИВАР'24: сборник научных статей* / Москва, 18–20 апреля 2024 года. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 367-373. EDN IDJPYA.
4. Аладин Д.В., Аладина Е.В., Чувиков Д.А., Варламов О.О., Адамова Л.Е. О проекте создания в цифровом сельском хозяйстве "логической интеллектуальной системы обеспечения ухода за растениями" на основе миварного подхода. *Форум инновационных транспортных технологий, наземные интеллектуальные транспортные средства и системы: объединённый международный онлайн форум* / Москва, 14–15 октября 2020 года. Москва: Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт "НАМИ", 2020. С. 1156-1164. EDN IJHZVC.
5. Чувиков Д.А. Создание платформы реконструкции и экспертизы аварийных событий дорожно-транспортных происшествий на базе логического искусственного интеллекта. *Труды Международного научно-технического конгресса "Интеллектуальные системы и информационные технологии - 2024"* ("ИС & ИТ-2024", "IS&IT'24"): научное издание в 2-х томах / Таганрог, 01–08 сентября 2024 года. Таганрог: Ступина С.А., 2024. Т. 1. С. 67-73. EDN CQXGJG.
6. Болотова Л.С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях. Москва: Финансы и статистика, 2012. 663 с. EDN QMXCUB.

7. Варламов О.О., Чибилова М.О., Хадиев А.М., Антонов П.Д., Сергушин Г.С., Шошев И.А., Назаров К.В. *Практикум по созданию миварных экспертных систем*. Москва: МИВАР, 2016. 184 с. EDN LHTCBV.
8. Салахутдинова Н.Ч., Варламов О.О. Применение миварных экспертных систем для диагностики бактериальной устойчивости к антибиотикам. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2025. Т. 27, № 2. С. 55-73. DOI 10.35330/1991-6639-2025-27-2-55-73. EDN LELPHS.
9. Торжков М.С., Королева Ю.П., Балдин А.В., Коценко А.А., Шэнь Ц. Создание миварной экспертной системы для выполнения этических аспектов искусственного интеллекта для скоринга кредитования. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 4(35). С. 139-150. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-139-150. EDN VHOQXX.
10. Гапанюк Ю.Е., Ревунков Г.И., Злобина С.В., Кадиев З.Д. Обзор подходов к векторному представлению графов знаний и метаграфов. *Динамика сложных систем - XXI век*. 2019. Т. 13, № 2. С. 67-74. DOI 10.18127/j19997493-201902-09. EDN SGAIWY.
11. Соболева Е.Д., Попова И.А., Макаров Д.А., Балдин А.В., Ковалева Н.А. Методика преобразования из миварной модели представления знаний в метаграфовую. *Мивар'22: сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М, 2022. С. 228-235. EDN PLEBVY.
12. Соболева Е.Д., Попова И.А., Макаров Д.А., Балдин А.В., Ковалева Н.А. Методика преобразования из метаграфовой модели представления знаний в миварную. *Мивар'22: сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М, 2022. С. 220-227. EDN RWUETS.
13. Варламов О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. *Миварное информационное пространство*. Москва: Научно-техническое издательство "Радио и связь", 2002. 286 с. EDN RWTCOP.
14. Varlamov O., Aladin D. A New Generation of Rules-based Approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and Brains for Autonomous Robots. *Machine Intelligence Research*. 2024. Vol. 21, No. 5. P. 919-940. DOI 10.1007/s11633-023-1473-1. EDN TSPUOP.
15. Черненький В.М., Гапанюк Ю.Е., Ревунков Г.И., Терехов В.И., Каганов Ю.Т. Метаграфовый подход для описания гибридных интеллектуальных информационных систем. *Прикладная информатика*. 2017. Т. 12, № 3(69). С. 57-79. EDN YTYNQN.
16. Гапанюк Ю.Е. Конспект лекций по спецкурсу "Гибридные интеллектуальные информационные системы на основе метаграфового подхода". Москва: Спутник+, 2018. 56 с. EDN UZGXTQ.
17. Варламов О.О., Терехов В.И., Сухобоков А.А., Гапанюк Ю.Е. Использование многомерной открытой гносеологической активной сети (MOGAN) в гибридных интеллектуальных информационных системах. *Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: материалы VI Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием / Калининград, 27 июня – 01 июля 2022 года*. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2022. С. 151-158. DOI 10.5922/978-5-9971-0687-4-6. EDN SKEXGV.
18. Варламов О.О. О требованиях к подготовке исходных данных для миварных систем принятия решений роботов. *Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: сборник статей II Всероссийской научной конференции / Москва, 27–28 апреля 2023 года*. Москва: Издательский дом КДУ, Добросвет, 2023. Т. 3. С. 15-20. EDN KHCQBC.

References

1. Kazakov G.V., Starchak S.L., Grigorenko V.M. Artificial intelligence methods are the next stage in the development of intelligent information processing methods in control systems // *Artificial intelligence. Theory and practice*. 2024. No. 3(7). P. 44-48. EDN CZDYBK.
2. Kotsenko A.A., Gerasimenko A.V., Kalashnikova A.V., Bazanova A.G., Aladin D.V. Mechanical engineering artificial intelligence: development of mivar technique for finding robot trajectories and solving optimization problems // *Mechanical engineering technological systems: proceedings of the International Scientific and Technical Conference / Rostov-on-Don, May 26-29, 2022*. Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2022. P. 363-370. EDN CZHLRS.
3. Shen Q., Gong Sh., Liu Zh., Liu An., Timofeev V.B., Varlamov O.O. Robot path planning algorithm based on object detection technology using MES // *MIVAR'24: collection of scientific articles / Moscow, April 18-20, 2024*. Moscow: INFRA-M, 2024. P. 367-373. EDN IDJPYA.
4. Aladin D.V., Aladina E.V., Chuvikov D.A., Varlamov O.O., Adamova L.E. About project to create "logical intelligent plant care system" in digital agriculture based on mivar approach // *Forum of Innovative Transport Technologies, Land-based Intelligent Vehicles and Systems: joint international online forum / Moscow, October 14-15, 2020*. Moscow: Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute "NAMI", 2020. P. 1156-1164. EDN IJHZVC.
5. Chuvikov D.A. Creation of the platform for reconstruction and examination of emergency events of road accidents based on logical artificial intelligence // *Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "Intelligent Systems and Information Technologies - 2024" ("IS&IT'24"): scientific publication in 2 volumes / Taganrog, September 01-08, 2024*. Taganrog: Stupina S.A., 2024. Vol. 1. P. 67-73. EDN CQXGJG.

6. Bolotova L.S. Artificial intelligence systems: knowledge-based models and technologies. Moscow: Finance and Statistics, 2012. 663 p. EDN QMXCUB.
7. Varlamov O.O., Chibirova M.O., Khadiev A.M., Antonov P.D., Sergushin G.S., Shoshev I.A., Nazarov K.V. Practicum on creating mivar expert systems. Moscow: MIVAR, 2016. 184 p. EDN LHTCBV.
8. Salakhutdinova N.Ch., Varlamov O.O. The use of mivar expert systems for diagnosis of bacterial antibiotic resistance // News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS. 2025. Vol. 27, No. 2. P. 55-73. DOI 10.35330/1991-6639-2025-27-2-55-73. EDN LELPHS.
9. Torzhkov M.S., Koroleva Yu.P., Baldin A.V., Kotsenko A.A., Shen Q. Creation of a mivar expert system for implementing ethical aspects of artificial intelligence for credit scoring // Problems of Artificial Intelligence. 2024. No. 4(35). P. 139-150. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-139-150. EDN BHOQXX.
10. Gapanyuk Yu.E., Revunkov G.I., Zlobina S.V., Kadiev Z.D. Overview of approaches of knowledge graphs and metagraphs embeddings // Dynamics of Complex Systems - XXI century. 2019. Vol. 13, No. 2. P. 67-74. DOI 10.18127/j19997493-201902-09. EDN SGAIWY.
11. Soboleva E.D., Popova I.A., Makarov D.A., Baldin A.V., Kovaleva N.A. The method of transformation from a mivar model of knowledge representation to a metagraph model // MIVAR'22: collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2022. P. 228-235. EDN PLEBVY.
12. Soboleva E.D., Popova I.A., Makarov D.A., Baldin A.V., Kovaleva N.A. The method of transformation from a metagraph model of knowledge representation to a mivar model // MIVAR'22: collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2022. P. 220-227. EDN PWUETC.
13. Varlamov O.O. Evolutionary databases and knowledge bases for adaptive synthesis of intelligent systems. Mivar information space. Moscow: "Radio and communication", 2002. 286 p. EDN RWTCOP.
14. Varlamov O., Aladin D. A New Generation of Rules-based Approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and Brains for Autonomous Robots // Machine Intelligence Research. 2024. Vol. 21, No. 5. P. 919-940. DOI 10.1007/s11633-023-1473-1. EDN TSPUOP.
15. Chernenkiy V.M., Gapanyuk Yu.E., Revunkov G.I., Terekhov V.I., Kaganov Yu.T. Metagraph approach for hybrid intelligent information systems description // Applied Computer Science. 2017. Vol. 12, No. 3(69). P. 57-79. EDN YTYNQN.
16. Gapanyuk Yu.E. Lecture notes on the special course "Hybrid intelligent information systems based on the Metagraph approach". Moscow: Sputnik+, 2018. 56 p. EDN UZGXTQ.
17. Varlamov O.O., Terekhov V.I., Sukhobokov A.A., Gapanyuk Yu.E. The use of a multidimensional open gnoseological active network (MOGAN) in hybrid intelligent information systems // Hybrid and Synergetic Intelligent Systems: 5th All-Russian Pospelovsky Conference with International Participation Proceedings / Kaliningrad, June 27 – July 01, 2022. Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University, 2022. P. 151-158. DOI 10.5922/978-5-9971-0687-4-6. EDN CKEXGV.
18. Varlamov O.O. About requirements for preparation of initial data for mivar robot decision making systems // Artificial intelligence in management, control, and data processing systems: proceedings of the II All-Russian Scientific Conference / Moscow, April 27-28, 2023. Moscow: Publishing House "KDU", Dobrosvet, 2023. Vol. 3. P. 15-20. EDN KHCQBC.

RESUME

Aladin D.V.

Mivar knowledge base automatic generation method for solving management tasks in state space

The paper is devoted to the development of a method for the automatic generation of mivar knowledge bases for solving management tasks in the State Space. The research is based on the integration of Mivar and Metagraph approaches, which makes it possible to design and develop flexible and scalable solutions for various subject areas.

The paper discusses the basics of the Mivar approach and the Metagraph approach for describing complex information systems. The automatic generation method includes an analysis of existing solutions, the development of a generalized knowledge base generation process, and the creation of a generator model based on the Metagraph approach.

The proposed method also concerns the development of mivar knowledge bases and the preparation of the basis for their generation. Special attention is paid to the automatic generation process, which takes into account the current state of the subject area and the specifics of the tasks being solved.

The method provides dynamic adaptation of the system to changes in the environment due to automatic scaling of knowledge bases. Key advantages include the ability to formalize component interaction interfaces and support various knowledge base generation methods, which makes the system more versatile and flexible.

The developed method is an effective tool for designing intelligent management systems. Its application makes it possible to create adaptive systems capable of working in various fields: production processes, robotic complexes and agricultural facilities. The results of the study can serve as a basis for further development of mivar automatic management technologies.

РЕЗЮМЕ

Аладин Д.В.

Метод автоматической генерации миварных баз знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний

Статья посвящена разработке метода автоматической генерации миварных баз знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний. Исследование основывается на интеграции миварного и метаграфового подходов, которые позволяют проектировать и разрабатывать гибкие и масштабируемые решения для различных предметных областей.

В работе рассматриваются основы миварного подхода и метаграфовый подход для описания сложных информационных систем. Метод автоматической генерации включает анализ существующих решений, разработку обобщенного процесса генерации баз знаний и создание модели генератора на основе метаграфового подхода.

Предложенный метод также касается разработки миварных баз знаний и подготовки основы для их генерации. Особое внимание уделяется процессу автоматической генерации, который учитывает текущее состояние предметной области и специфику решаемых задач.

Метод обеспечивает динамическую адаптацию системы к изменениям среды за счет автоматического масштабирования баз знаний. Ключевые преимущества включают возможность формализации интерфейсов взаимодействия компонентов и поддержку различных методов генерации баз знаний, что делает систему более универсальной и гибкой.

Разработанный метод представляет собой эффективный инструмент для проектирования интеллектуальных систем управления. Его применение позволяет создавать адаптивные системы, способные работать в различных сферах: производственных процессах, роботизированных комплексах и сельскохозяйственных объектах. Результаты исследования могут служить основой для дальнейшего развития миварных технологий автоматического управления.

Аладин Дмитрий Владимирович, aladin.dv@yandex.ru, 1) аспирант кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, 2) младший научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева».

Область научных интересов: искусственный интеллект, экспертные системы, логика, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, принятие решений, кибернетика, автономные робототехнические комплексы

Статья поступила в редакцию 19.06.2025.

УДК 004.89 + 007.52 + 681.518 DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-100-112

Ш. Гун^{1,2}

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, Москва, Россия

²АО НИИ Вычислительных комплексов им. М. А. Карцева
117437, ул. Профсоюзная, д. 108, Москва, Россия

МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МНОГОЗАДАЧНЫХ СКЛАДСКИХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ СОВМЕСТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

S. Gong^{1,2}

¹Bauman Moscow State Technical University
105005, 2-ya Baumanskaya st., bld. 5, structure 1, Moscow, Russia

²JSC M. A. Kartsev Research Institute of Computing Systems
117437, Profsoyuznaya st., bld. 108, Moscow, Russia

DECISION-MAKING MODEL FOR MULTITASKING WAREHOUSE ROBOTS BASED ON A FOUR-LAYER COLLABORATIVE OPTIMIZATION FRAMEWORK

В данной статье предлагается оригинальная модель принятия решений, основанная на четырехуровневой архитектуре совместной оптимизации, которая объединяет миварную систему принятия решений и механизмы многоуровневой оптимизации, преодолевая компромисс между динамическим откликом и вычислительной сложностью в традиционных методах. Используется механизм динамического приоритета для разделения срочных и крупногабаритных грузов; рассматривается двухрежимный оптимизационный движок, который в ограниченных масштабах задач ($n \leq 6$) решает проблему комбинаторного взрыва с помощью глобального перечисления и гибридной стратегии ближайшего соседа и 2-опт. Эксперименты на основе моделируемой складской среды с 100 гетерогенными грузами показали: модель эффективно генерирует 42 группы задач (одно/двух/трех/четырёхзадачные группы составляют 16,7%/40,5%/26,2%/16,6% соответственно), общее расстояние транспортировки составляет 5436 метров (в среднем 129,4 метра на группу). Данная структура предоставляет оптимизационную парадигму для интеллектуальных складских систем, сочетающую правила и модели, а будущие исследования будут расширены до сценариев планирования гетерогенных роботов и многороботной транспортировки сверхкрупных грузов.

Ключевые слова: мивар, миварная технология, динамическое распределение задач, миварная система принятия решений, логический ИИ, интеллектуальное складирование, многозадачные роботы, четырехуровневая оптимизация

This paper proposes an original model based on a four-layer collaborative optimization framework, which integrates the mivar decision-making system and multi-level optimization mechanisms, overcoming the trade-off between dynamic response and computational complexity in traditional methods. A dynamic priority mechanism is employed to differentiate between urgent and large-scale cargo; a dual-mode optimization engine is considered, which addresses the issue of combinatorial explosion in limited-scale tasks ($n \leq 6$) through global enumeration and a hybrid strategy combining nearest neighbor and 2-opt approaches. Experiments conducted in a simulated warehouse environment with 100 heterogeneous orders demonstrated that the model effectively generates 42 task groups (single/two/three/four-task groups accounting for 16.7%/40.5%/26.2%/16.6% respectively), with a total transport distance of 5436 meters (averaging 129.4 meters per group). This structure provides an optimization paradigm for intelligent warehousing systems, combining rules and models, and future research will be extended to scenarios involving heterogeneous robot planning and multi-robot transport of oversized cargo.

Keywords: mivar, mivar technology, dynamic task allocation, mivar decision-making system, logical AI, intelligent warehousing, multi-task robots, four-layer optimization

Введение

С быстрым развитием глобальной электронной коммерции и интеллектуального производства современные складские логистические системы [1] сталкиваются с двойным давлением: резким увеличением объема обработки заказов и ужесточением требований к срокам доставки. Согласно прогнозам Международной федерации робототехники (IFR) и аналитических агентств, рынок складских роботов демонстрирует устойчивый рост с ожидаемым среднегодовым темпом около 20-25%. Ожидается, что к 2025 году объем рынка может достичь 30 миллиардов долларов, что подтверждается растущим спросом на автоматизацию в логистике и электронной коммерции. В этом контексте многороботные системы совместной работы [2], благодаря значительному повышению эффективности выполнения заказов, стали ключевым направлением исследований в отрасли [3]. Крупные интеллектуальные склады стремятся соответствовать трем ключевым требованиям: высокая производительность (обработка более 1000 единиц в час), оптимизация энергоэффективности (снижение энергозатрат до 35% от общих эксплуатационных расходов) и обеспечение минимальной задержки принятия решений (менее 500 миллисекунд). Эти показатели варьируются в зависимости от технологического уровня и специфики склада [4].

Современные исследования распределения задач складских роботов демонстрируют спектральное распределение парадигм [5]: от стратегий пакетной обработки, ориентированных на оптимизацию пропускной способности (например, статическое группирование на основе смешанного целочисленного программирования и пространственная кластеризация k -means [6]), до стратегий распределения единичных задач, акцентирующих внимание на динамическом отклике (например, обучение с подкреплением для многоагентных систем [7] и аукционные алгоритмы [8]), формируя непрерывный исследовательский спектр. Парадигма пакетной обработки позволяет снизить холостой пробег роботов за счет кластерной оптимизации, однако задержка вычислений может варьироваться в зависимости от сложности задачи и используемых технологий [9]. В некоторых случаях, особенно при обработке сложных или масштабных задач, задержка может превышать 2 секунды [10], что затрудняет адаптацию к вставке срочных заказов в высококонкурентных сценариях [11], таких как JD 618. Парадигма распределения единичных задач, хотя и обеспечивает динамический отклик на изменения в окружающей среде, сталкивается с проблемой комбинаторного взрыва при планировании маршрутов (сложность $O(n!)$), что приводит к высокой частоте повторяющихся маршрутов [12] и значительному увеличению энергопотребления.

В последние годы исследователи пытаются преодолеть эти ограничения путем интеграции множественных парадигм. Гибридная оптимизация [13], сочетающая декомпозицию Бендерса и поиск с изменяемым соседством (VNS) [14], архитектура многоуровневого обучения с подкреплением и анализ производительности методов кластеризации [15] показывают прогресс, но все еще имеют явные ограничения: вычислительная сложность растет квадратично с увеличением числа роботов $O(N^2)$ [16], и большинство методов игнорируют влияние физических характеристик грузов (размер/вес) на приоритеты срочности. Особенно при обработке гетерогенных комбинаций грузов существующие методы часто приводят к дисбалансу нагрузки роботов или задержкам срочных задач.

Стоит отметить, что новые достижения в области логического искусственного интеллекта предоставляют новые возможности для решения этих проблем. Миварная технология как парадигма представления знаний, основанная на правилах и объектных отношениях [17], снижает сложность принятия решений [18] с факториальной

($O(N!)$) до линейной ($O(N)$) [19], значительно повышая эффективность отклика на динамические изменения среды. В робототехнике эта технология [20] уже реализована для: автономного планирования маршрутов в многомерных пространствах (двумерная/трехмерная среда [21]); динамического избегания препятствий и адаптации к изменяющейся среде [22]; онлайн-обновления базы знаний для эволюции решений [23]; создания миварной экспертной системы [24] для оптимизационного принятия решений [25]; увеличения производительности и обнаружения дефектов продукции [26] в умных производственных системах [27]. Ее ключевое новшество заключается в расширении традиционных производственных правил до вычислительных процессов [28], формируя единое информационное управляющее пространство [29], что представляет новую парадигму для решения задач высокой размерности в складской логистике.

В данной статье преодолеваются ограничения традиционных структур, предлагая интеллектуальную складскую модель на основе четырехуровневой архитектуры совместной оптимизации (4-Layer Collaborative Optimization Framework, 4L-COF). Научная новизна модели заключается в следующем: первый уровень использует механизм динамического приоритета, реализуя отбор высокоприоритетных грузов в реальном времени с помощью фактора затухания срочности ($\lambda=0.02 \text{ мин}^{-1}$) и индекса накопления задач (β); второй уровень строит модель кластеризации с двойными ограничениями (пространственными и физическими), вводя адаптивный порог расстояния для сжатия пространства оптимальных решений; третий уровень разрабатывает двухрежимный оптимизационный движок на основе манхэттенского расстояния, гарантируя теоретическую оптимальность при $n \leq 2$ и быстрое нахождение оптимальных решений при $3 \leq n \leq 6$ с помощью инициализации ближайшего соседа и локальной оптимизации 2-opt; четвертый уровень устанавливает механизм совместного планирования ресурсов и энергии, сопоставляя оптимальных роботов на основе прогнозирования уровня заряда, подробности см. в [30]. Далее подробно описывается математическая модель 4L-COF, и ее эффективность подтверждается экспериментами, после чего обсуждается расширяемость модели и направления будущих исследований.

Определение математической модели. Модель 4L-COF включает следующие уровни:

1. Уровень предварительной группировки грузов: фильтрация высокоприоритетных и крупногабаритных грузов на основе миварной экспертной системы;
2. Уровень кластеризации некрупных грузов: оптимизация группировки грузов с учетом пространственных ограничений;
3. Уровень планирования маршрутов внутри групп: двухрежимная оптимизация маршрутов на основе манхэттенского расстояния;
4. Уровень совместного планирования многороботных систем: динамическое распределение ресурсов роботов.

Первый уровень: Предварительная группировка грузов на основе динамического приоритета. На этом уровне осуществляется фильтрация высокоприоритетных и крупногабаритных грузов для их отдельной транспортировки, что позволяет избежать конфликтов в планировании крупногабаритных грузов и срочных задач. Определим множество грузов:

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_K\}$$

$$g_i = \{t_i, m_i, v_i: [l_i, w_i, h_i], \alpha_i, P_i, S_i\}$$

Где:

m_i : масса груза (кг);

$v_i = (l_i, w_i, h_i)$: размеры груза (m^3);

t_i : временная метка поступления груза;

$\alpha_i \in [0,1]$: степень срочности;

$P_i = (x_i^P, y_i^P)$: местоположение загрузки груза;
 $S_i = (x_i^S, y_i^S)$: местоположение складирования груза.

Ограничения и обнаружение аномалий:

Ограничения по размерам: $l_i < l_{max} \cap w_i < w_{max} \cap h_i < h_{max}$;

Ограничение по массе: $m_i < M_{max}$.

Если данные ограничения не выполняются, это указывает на сбой системы или появление сверхкрупного груза, что вызывает аварийный сигнал и требует вмешательства персонала.

Механизм динамического приоритета, приоритет груза определяется взвешенной суммой степени срочности и временного фактора:

$$Priority_i = 0.6\alpha_i + 0.4(1 - e^{-\lambda\Delta t_i}) \tag{1}$$

Где:

$\lambda = 0.02 \text{ min}^{-1}$: коэффициент затухания срочности;

$\Delta t_i = \max(0, t_{current} - t_i)$: время ожидания груза.

Условие определения крупногабаритного груза:

$$B_i = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{v_i}{V_{max}} > C_V \cup \frac{m_i}{M_{max}} > C_M \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

Динамические параметры задаются следующим образом:

$$C_V = 0.6(1 + 0.1\beta) \tag{3}$$

$$C_M = 0.7(1 + 0.1\beta) \tag{4}$$

Решение об отдельной транспортировке:

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{if } B_i = 1 \cup Priority_i > 0.6 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

Для удобства дальнейших экспериментов первый уровень модели описан в виде правил (Таблица 1).

Таблица 1 - Правила

Правило	ЕСЛИ	ТО	ИНАЧЕ
1	Известны размеры груза $[l_i, w_i, h_i]$	Можно получить v_i .	-
2	$l_i \geq l_{max} \cup w_i \geq w_{max} \cup h_i \geq h_{max}$	Существует слишком большой груз или ошибка. Вызов оператора.	Расчет продолжается.
3	Масса груза $m_i \geq M_{max}$	Существует слишком тяжелый груз или ошибка. Вызов оператора.	Расчет продолжается.
4	Известно время ожидания груза Δt_i и степень срочности груза α_i	Можно получить приоритет груза по формуле $Priority_i = 0.6\alpha_i + 0.4(1 - e^{-\lambda\Delta t_i})$.	-
5	Известен индекс невыполненных задач β	Можно получить динамические постоянные объема и грузоподъемности РТ $C_V = 0.6(1 + 0.1\beta)$ $C_M = 0.7(1 + 0.1\beta)$	-
6	$\frac{v_i}{V_{max}} > C_V \cup \frac{m_i}{M_{max}} > C_M$	Груз i является большим грузом	Груз i - не большой груз
7	$B_i = 1 \cup Priority_i > 0.6$	Груз i является большим грузом или имеет высокий приоритет, нужно отдельно перевезти его, $X_i = 1$	-

Второй уровень: Кластеризация грузов с учетом пространственных ограничений.

После предварительной группировки остается множество грузов:

$$G_{res} = \{g_j | X_j = 0\}$$

На этом уровне осуществляется группировка оставшихся грузов с учетом ограничений по весу, объему и расстоянию. Если груз может быть добавлен в текущую группу G_i , он включается в нее; в противном случае создается новая группа G_{i+1} . Каждая группа может содержать не более 6 грузов.

$$\left\{ \begin{array}{l} |G_i| \leq 6 \\ \text{if } \sum m_{G_i} + m_i \leq M_{max} \cap \sum V_{G_i} + V_i \leq V_{max} \cap \|S_i - S_{i+1}\| \leq P_0 \\ \quad \rightarrow m_i \in G_i \\ \text{else } \text{create } G_{i+1} \end{array} \right. \quad (6)$$

Пороговое значение динамического расстояния :

$$P_0 = \left\{ \begin{array}{l} 100m \quad \text{if } \sum m_{G_i} \leq 0.7M_{max} \cap \sum V_{G_i} \leq 0.7V_{max} \\ 50m \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \quad (7)$$

Оптимизированная группировка :

$$G_{cluster} = \{G_1, G_2, \dots, G_k\}$$

Третий уровень: Оптимизация маршрутов внутри групп. Для каждой группы грузов $G_i = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ ($n \leq 6$) определяется последовательность посещения π , минимизирующая общее расстояние транспортировки:

$$\min_{\pi} \left(d(P_{pickup}, S_{\pi(0)}) + \sum_{k=0}^{n-2} d(S_{\pi(k)}, S_{\pi(k+1)}) \right) \quad (8)$$

Где:

n : количество грузов в текущей группе;

π : порядок транспортировки грузов;

S_k : место хранения груза;

$d(a, b)$: манхэттенское расстояние между точками a и b .

Для решения проблемы комбинаторного взрыва используется механизм многоуровневой оптимизации. Для задач с малым количеством грузов ($n \leq 2$) применяется метод глобального перечисления для обеспечения теоретической оптимальности.

Для задач с количеством грузов $3 \leq n \leq 6$ сначала используется жадный алгоритм ближайшего соседа для построения начального маршрута:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Current point } c \leftarrow P_{pickup} \\ \text{iteration } t = 1 \rightarrow n \\ k^* = \arg \min d(c, S_k) \quad k \in U = \{0, 1, \dots, n-1\} \\ \pi_{init} \leftarrow \pi_{init} \oplus k^*, U \leftarrow U \setminus \{k^*\}, c \leftarrow S_{k^*} \end{array} \right. \quad (9)$$

Затем применяется алгоритм 2-opt для локальной оптимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall (i, j) \in \{1 \leq i < j \leq n-1\}: \\ \pi_{new} = \pi[0:i] \oplus \text{reverse}(\pi[i:j+1]) \oplus \pi[j+1:] \\ \text{if } D(\pi_{new}) < D(\pi) - 10^{-5}: \\ \quad \pi^* \leftarrow \pi_{new} \end{array} \right. \quad (10)$$

Эксперименты и результаты. Исследование проводилось в симуляционной среде, основанной на реальной планировке склада электронной коммерции. Складская зона охватывает область $[50, 150] \times [50, 150]$ (в метрах) и включает 500 стандартных стеллажей и 4 погрузочные станции (координаты: (50, 50), (50, 150), (150, 50), (150, 150)). Эксперименты проводились с использованием модели 4L-COF, реализованной на Python 3.9, с вызовом API сервера КЭСМИ для выполнения вычислений на основе миварного подхода. Аппаратная платформа: процессор Intel Core i7-11800H (2.30 GHz), 520 ГБ оперативной памяти, GPU NVIDIA RTX 3060, операционная система Windows 11.

Входные данные: 100 грузов, каждый из которых содержит характеристики груза (масса, размеры, степень срочности) и координаты пунктов приема и назначения. Параметры РТ: максимальная грузоподъемность — 500 кг, объем — 1 м³, индекс невыполненных задач $\beta=0.5$.

Параметры сначала обрабатываются на первом уровне модели, где с помощью API миварной модели (Рисунок 1) вычисляются значения переменных X для решения об отдельной транспортировке и формируется файл предварительной группировки для использования на втором уровне.

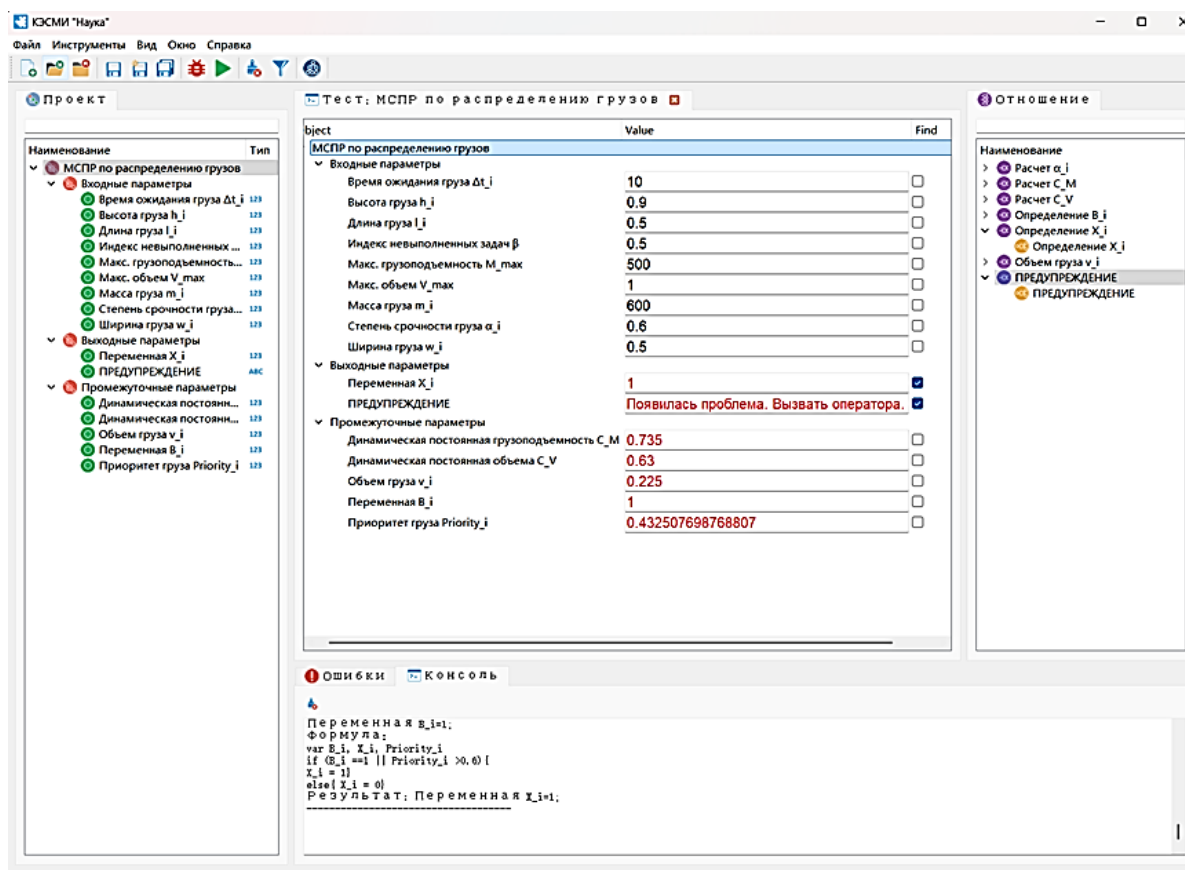


Рисунок 1 – Демонстрация вычислений на первом уровне модели

На втором уровне кластеризации 100 задач эффективно разделяются на 42 группы: 7 групп с одной задачей (16.7%), 17 групп с двумя задачами (40.5%), 11 групп с тремя задачами (26.2%) и 7 групп с четырьмя задачами (16.6%). Все группы удовлетворяют ограничениям модели, и аварийные сигналы не срабатывают. На третьем уровне двухрежимный движок оптимизации маршрутов генерирует эффективные маршруты для всех групп: для групп с одной задачей используется глобальное перечисление (например, расстояние маршрута для Group 1 — 89 м), а для групп с $n \geq 3$ применяется оптимизация ближайшего соседа и 2-орт (например, расстояние маршрута для Group 4 с четырьмя задачами — 128 м). Общее расстояние транспортировки составляет 5436.0 м, среднее расстояние внутри групп — 129.4 м. Визуализация маршрутов представлена на Рисунке 2.

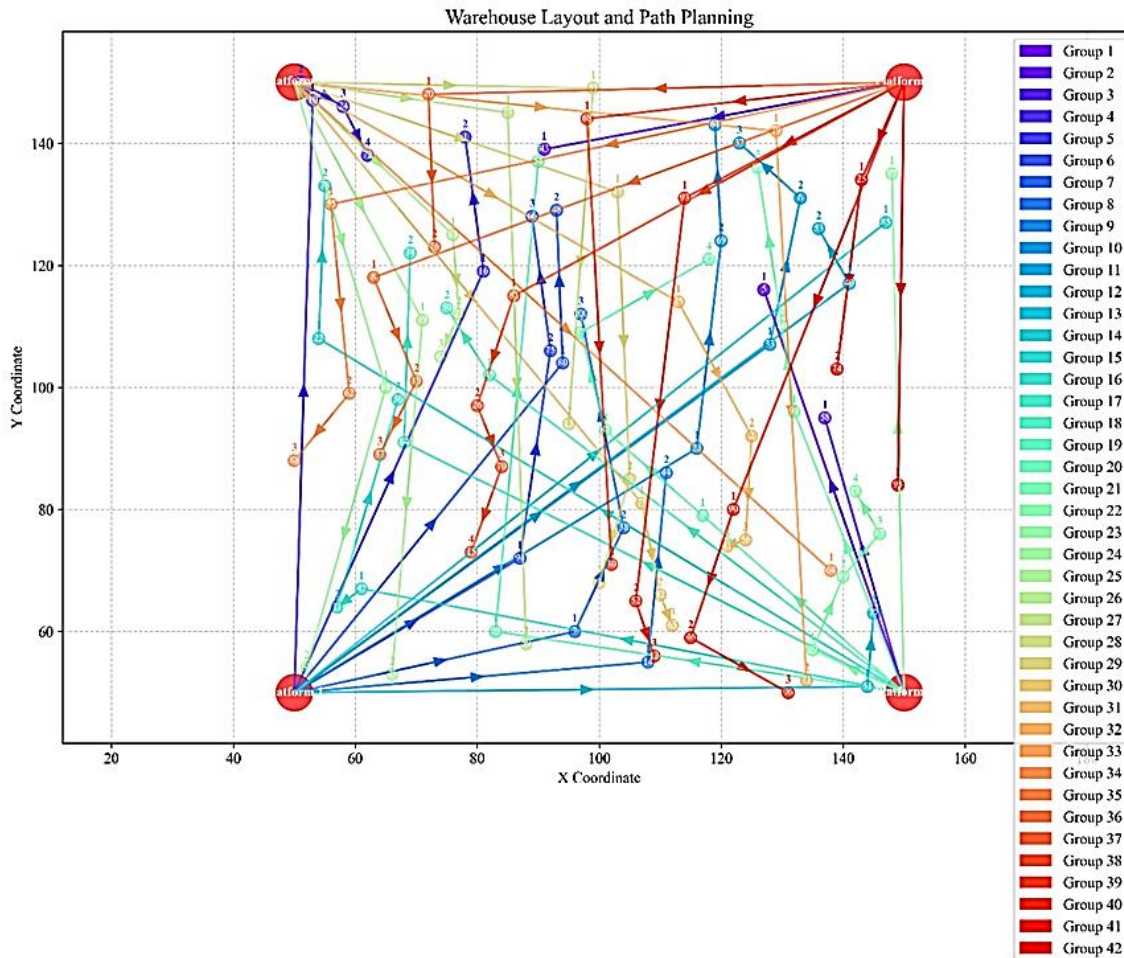


Рисунок 2 –Планировка склада и визуализация маршрутов

Обсуждение. В данном исследовании предложена модель интеллектуального распределения задач для роботов в кластерных складах на основе четырехуровневой архитектуры совместной оптимизации (4L-COF). Модель направлена на решение проблемы баланса между обработкой высококонкурентных задач, оптимизацией энергоэффективности и обеспечением реального времени. Благодаря механизму динамического приоритета, модели кластеризации с двойными ограничениями (пространственными и физическими), двухрежимной оптимизации маршрутов на основе манхэттенского расстояния и механизму совместного планирования ресурсов и энергии, модель успешно подтвердила свою применимость и эффективность в сложных складских условиях.

Во-первых, в аспекте распределения задач модель 4L-COF сочетает механизм динамического приоритета с миварной технологией. Этот подход позволяет быстро фильтровать и транспортировать высокоприоритетные и крупногабаритные грузы. Это не только устраняет конфликты в планировании между крупногабаритными грузами и срочными задачами, но и значительно повышает адаптивность модели к динамической среде. Результаты экспериментов показывают, что модель способна обеспечивать реакцию в реальном времени на уровне миллисекунд в условиях высокой нагрузки, что подтверждает её эффективность и устойчивость.

Во-вторых, в аспекте оптимизации энергоэффективности модель 4L-COF, благодаря механизму совместного планирования ресурсов и энергии, а также динамическому порогу расстояния, эффективно снижает холостой пробег роботов и по-

требление энергии. Это не только сокращает эксплуатационные расходы, но и минимизирует воздействие на окружающую среду, что соответствует тенденциям развития экологичной логистики.

В аспекте оптимизации маршрутов двухрежимный движок оптимизации на основе манхэттенского расстояния использует многоуровневый механизм оптимизации (глобальное перечисление и локальная оптимизация 2-opt). Этот подход значительно снижает вычислительную сложность планирования маршрутов и повторяемость путей.

Несмотря на выдающиеся результаты в экспериментах, модель 4L-COF имеет некоторые ограничения. Во-первых, в условиях экстремально высокой нагрузки задержка принятия решений хотя и остается в разумных пределах, но уровень выполнения заказов несколько снижается. Это указывает на возможность улучшения производительности в условиях высокой нагрузки. Во-вторых, способность модели адаптироваться к динамической среде требует улучшения, особенно в случае непредвиденных событий (например, сбой роботов или отмена заказов), где необходимо внедрение более продвинутых технологий обучения с подкреплением для более интеллектуального принятия решений.

Заключение

В данном исследовании предложена модель принятия решений о распределении задач для роботов в кластерных складах на основе четырехуровневой архитектуры совместной оптимизации (4L-COF). Основным вкладом модели 4L-COF является её многоуровневая архитектура оптимизации и динамической адаптивности. Она не только значительно снижает вычислительную сложность и задержку принятия решений, но и эффективно повышает энергоэффективность и производительность транспортировки благодаря механизмам балансировки нагрузки и оптимизации маршрутов. Кроме того, тестирование масштабируемости показало, что модель сохраняет стабильную производительность при значительном увеличении количества роботов и масштаба заказов, что предоставляет теоретическую поддержку и практические рекомендации для будущего развертывания крупномасштабных интеллектуальных складских систем.

Будущие направления исследований включают:

- 1) изучение стратегий совместного планирования для разнородных роботов для повышения гибкости и адаптивности системы;
- 2) разработку новых моделей для управления несколькими роботами, совместно транспортирующими сверхкрупногабаритные грузы, что расширит область применения системы;
- 3) крупномасштабное развертывание и тестирование в реальных складских условиях для оценки практичности и стабильности системы. Данное исследование предоставляет новую парадигму для развития интеллектуальных складских систем, обладая значительной теоретической ценностью и практической значимостью, и может стать мощной поддержкой для глобальной трансформации логистической отрасли в сторону интеллектуализации.

Список литературы

1. Попова, Т. А. Цифровые технологии: современный виток развития складской логистики / Т. А. Попова. *Новое в экономической кибернетике*. 2024. № 4. С. 82-100. DOI 10.5281/zenodo.15101877. EDN LOFHTJ.

2. Мищенко, Е. В. Автоматизированные складские системы: оптимизация логистических процессов с помощью современных технологий / Е. В. Мищенко, И. М. Толмачев. *Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК : Сборник материалов международной научно-технической конференции*, Брянск, 16–17 мая 2024 года. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2024. С. 283-288. EDN UBXZIA.
3. Multi-Robot Systems and Cooperative Object Transport: Communications, Platforms, and Challenges / X. An, C. Wu, Ya. Lin [et al.] *IEEE Open Journal of the Computer Society*. 2023. Vol. 4. P. 23-36. DOI 10.1109/ojcs.2023.3238324. EDN GIZDYU.
4. Reshetnikova, M. S. The global industrial robotics market: development trends and volume forecast / M. S. Reshetnikova, I. A. Pugacheva. *Research in Economic Anthropology*. 2022. Vol. 42. P. 187-195. DOI 10.1108/S0190-128120220000042018. EDN IUEUGZ.
5. Воеводская, А. С. Системный анализ как метод принятия решения при логистическом проектировании складских систем / А. С. Воеводская. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2020. № 4-1(62). С. 68-72. DOI 10.24411/2411-0450-2020-10258. – EDN AJYKKJ.
6. A Multi-Robot Task Allocation Method Based on the Synergy of the K-Means++ Algorithm and the Particle Swarm Algorithm / Y. Yuan, P. Yang, H. Jiang, T. Shi. *Biomimetics*. 2024. Vol. 9, No. 11. P. 694. DOI 10.3390/biomimetics9110694. EDN QMGXPD.
7. Orr, Ja. Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Multi-Robot Applications: A Survey / Ja. Orr, A. Dutta. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 7. P. 3625. DOI 10.3390/s23073625. EDN AHGHYH.
8. Galati, G. Auction-Based Task Allocation and Motion Planning for Multi-Robot Systems with Human Supervision / G. Galati, S. Primatesta, A. Rizzo. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2023. Vol. 109, No. 2. P. 24. DOI 10.1007/s10846-023-01935-x. EDN VTCNNS.
9. Покинтелица, А. Е. Проблемы и специфика редукции данных в автономных робототехнических системах / А. Е. Покинтелица. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. № 1(28). С. 31-41. EDN XLGXQX.
10. Lewczuk, K. Energy Consumption in a Distributional Warehouse: A Practical Case Study for Different Warehouse Technologies / K. Lewczuk, M. Kłodawski, P. Gepner. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 9. P. 2709. DOI 10.3390/en14092709. EDN NTIXOI.
11. Никитина, А. А. Обнаружение объектов на местности интеллектуальными роботами в быстроменяющейся обстановке / А. А. Никитина, С. И. Уланов. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. № 3(30). С. 36-43. DOI 10.34757/2413-7383.2023.30.3.003. EDN ALLVUM.
12. A Novel Integrated Path Planning Algorithm for Warehouse AGVs / W. Tao, Ya. Daichuan, L. Weifeng [et al.] *Chinese Journal of Electronics*. 2021. Vol. 30, No. 2. P. 331-338. DOI 10.1049/cje.2021.02.002. EDN ROUXYH.
13. Sineglazov, V. M. Hybrid neural network optimization system based on ant algorithms / V. M. Sineglazov, O. I. Chumachenko, D. M. Omelchenko. *Электроника та системи управління*. 2020. Vol. 2, No. 64. P. 61-67. DOI 10.18372/1990-5548.64.14857. EDN GPCSKM.
14. Hybrid variable neighborhood search for automated warehouse scheduling / I. Davydov, Yu. Kochetov, D. Tolstykh [et al.] *Optimization Letters*. 2023. Vol. 17, No. 9. P. 2185-2199. DOI 10.1007/s11590-022-01921-6. EDN STIGTP.
15. Performance analysis of clustering methods for balanced multi-robot task allocations / E. Murugappan, N Subramanian, S. Rahman [et al.] *International Journal of Production Research*. 2021. DOI 10.1080/00207543.2021.1955994. EDN GTNKUP.
16. A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping / R. Almadhoun, L. Seneviratne, Y. Zweiri, T. Taha. *SN Applied Sciences*. 2019. Vol. 1, No. 8. DOI 10.1007/s42452-019-0872-y. EDN EZAWPF.
17. Варламов, О. О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. *Миварное інформаційне простірство* / О. О. Варламов. Москва : Научно-техническое издательство "Радио и связь", 2002. 286 с. ISBN 5-256-01650-4. EDN RWTCOP.
18. Колпакиди, Н. А. Создание системы поддержки принятия решений для биохимического анализа крови / Н. А. Колпакиди, А. А. Коценко. *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2025. Т. 10, № 4(54). С. 117-128. EDN RQBJUS.
19. Varlamov, O. "Brains" for Robots: Application of the Mivar Expert Systems for Implementation of Autonomous Intelligent Robots / O. Varlamov. *Big Data Research*. 2021. Vol. 25. P. 100241. DOI 10.1016/j.bdr.2021.100241. EDN HRYLWL.

20. Городецкий, А. Е. Оптимизация движения роботом-маршрутизатором с учетом темперамента водителя / А. Е. Городецкий, И. Л. Тарасова. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. № 1(28). С. 18-30. EDN BTDZSK.
21. Route planning of autonomous robots in three-dimensional logic space using mivar technologies / A. Kotsenko, A. Andreev, R. Kim [et al.] *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 515. P. 04018. DOI 10.1051/e3sconf/202451504018. EDN GMEYDO.
22. Динамическое планирование траектории робота на основе семантического обнаружения объектов с использованием миварной экспертной системы / Ц. Шэнь, Ш. Гун, О. О. Варламов [и др.] *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 4(35). С. 164-176. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-164-176. EDN DHVOFC.
23. Automated formation of discipline sequences for higher ecological and agricultural education using mivar expert systems / М. Peresyphkina, О. Varlamov, А. Kotsenko [et al.] *Bio Web of Conferences : International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2024)*, Saint Petersburg, 03–06 сентября 2024 года. Vol. 130. Les Ulis: EDP Sciences, 2024. P. 08032. DOI 10.1051/bioconf/202413008032. EDN ERQVZN.
24. Разработка миварной экспертной системы для выбора алгоритма консенсуса распределённых реестров / Н. С. Подопрigorova, С. А. Козырев, С. С. Подопрigorova [и др.] *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 4(35). С. 126-138. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-126-138. EDN AVXOTO.
25. Создание миварной экспертной системы для выполнения этических аспектов искусственного интеллекта для скоринга кредитования / М. С. Торжков, Ю. П. Королева, А. В. Балдин [и др.] *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 4(35). С. 139-150. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-139-150. EDN BHOQXX.
26. Комплексная система ИИ на основе миварных и нейронных сетей для обнаружения дефектов продукции на производстве хлебобулочных изделий / А. М. Голобоков, А. А. Коханов, И. Д. Кац [и др.] *Проблемы искусственного интеллекта*. 2025. № 1(36). С. 27-42. DOI 10.24412/2413-7383-27-42. EDN QAZTYW.
27. Миварная экспертная система для интеллектуализации производства автомобильных колесных дисков / А. Н. Демидов, В. Д. Черненко, М. К. Вотинцев [и др.] *Проблемы искусственного интеллекта*. 2025. № 1(36). С. 43-57. DOI 10.24412/2413-7383-43-57. EDN HCKKLJ.
28. Чувииков, Д. А. Разработка платформы реконструкции и экспертизы аварийных событий дорожно-транспортных происшествий на базе логического искусственного интеллекта / Д. А. Чувииков. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 2(33). С. 59-77. DOI 10.24412/2413-7383-2024-2-59-77. EDN EUPPYZ.
29. Михалева, У. А. Применение миварного подхода в системах противодействия претекстингу / У. А. Михалева. *Телекоммуникации*. 2024. № 3. С. 38-40. DOI 10.31044/1684-2588-2024-0-3-38-40. EDN VDTWAZ.
30. Гун, Ш. Миварная система принятия решений для распределения и перевозки грузов командой складских роботов / Ш. Гун. *Системы управления и информационные технологии*. 2025. № 2(100). С. 23-29. EDN XZHNBFB.

References

1. Popova, T. A. Digital technologies: a modern stage in the development of warehouse logistics / Т. А. Popova // *New in economic cybernetics*. – 2024. – No. 4. – pp. 82-100. – DOI 10.5281/zenodo.15101877. – EDN LOFHTJ.
2. Mishchenko, E. V. Automated warehouse systems: optimization of logistics processes using modern technologies / E. V. Mishchenko, I. M. Tolmachev // *Problems of energy supply, automation, informatization, and environmental management in agriculture: Proceedings of the international scientific and technical conference, Bryansk, May 16–17, 2024*. – Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2024. – P. 283-288. – EDN UBXXIA.
3. Multi-Robot Systems and Cooperative Object Transport: Communications, Platforms, and Challenges / X. An, C. Wu, Ya. Lin [et al.] // *IEEE Open Journal of the Computer Society*. – 2023. – Vol. 4. – P. 23-36. – DOI 10.1109/ojcs.2023.3238324. – EDN GIZDYU.
4. Reshetnikova, M. S. The global industrial robotics market: development trends and volume forecast / M. S. Reshetnikova, I. A. Pugacheva // *Research in Economic Anthropology*. – 2022. – Vol. 42. – P. 187-195. – DOI 10.1108/S0190-128120220000042018. – EDN IUEUGZ.

5. Voevodskaya, A. S. System analysis as a decision-making method in the logistics design of warehouse systems / A. S. Voevodskaya // *Economics and Business: Theory and Practice*. – 2020. – No. 4-1(62). – P. 68-72. – DOI 10.24411/2411-0450-2020-10258. – EDN AJYKKJ.
6. A Multi-Robot Task Allocation Method Based on the Synergy of the K-Means++ Algorithm and the Particle Swarm Algorithm / Y. Yuan, P. Yang, H. Jiang, T. Shi // *Biomimetics*. – 2024. – Vol. 9, No. 11. – P. 694. – DOI 10.3390/biomimetics9110694. – EDN QMGXPD.
7. Orr, Ja. Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Multi-Robot Applications: A Survey / Ja. Orr, A. Dutta // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 7. – P. 3625. – DOI 10.3390/s23073625. – EDN AHGHYH.
8. Galati, G. Auction-Based Task Allocation and Motion Planning for Multi-Robot Systems with Human Supervision / G. Galati, S. Primatesta, A. Rizzo // *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. – 2023. – Vol. 109, No. 2. – P. 24. – DOI 10.1007/s10846-023-01935-x. – EDN VTCNNS.
9. Pokintelitsa, A. E. Problems and specifics of data reduction in autonomous robotic systems / A. E. Pokintelitsa // *Problems of Artificial Intelligence*. – 2023. – No. 1(28). – P. 31-41. – EDN XLGXQX.
10. Lewczuk, K. Energy Consumption in a Distributional Warehouse: A Practical Case Study for Different Warehouse Technologies / K. Lewczuk, M. Kłodawski, P. Gepner // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 9. – P. 2709. – DOI 10.3390/en14092709. – EDN NTIXOI.
11. Nikitina, A. A. Object detection by intelligent robots in rapidly changing environments / A. A. Nikitina, S. I. Ulanov // *Problems of Artificial Intelligence*. – 2023. – No. 3(30). – P. 36-43. – DOI 10.34757/2413-7383.2023.30.3.003. – EDN ALLVUM.
12. A Novel Integrated Path Planning Algorithm for Warehouse AGVs / W. Tao, Ya. Daichuan, L. Weifeng [et al.] // *Chinese Journal of Electronics*. – 2021. – Vol. 30, No. 2. – P. 331-338. – DOI 10.1049/cje.2021.02.002. – EDN ROUXYH.
13. Sineglazov, V. M. Hybrid neural network optimization system based on ant algorithms / V. M. Sineglazov, O. I. Chumachenko, D. M. Omelchenko // *Electronics and Control Systems*. – 2020. – Vol. 2, No. 64. – P. 61-67. – DOI 10.18372/1990-5548.64.14857. – EDN GPCSKM.
14. Hybrid variable neighborhood search for automated warehouse scheduling / I. Davydov, Yu. Kochetov, D. Tolstykh [et al.] // *Optimization Letters*. – 2023. – Vol. 17, No. 9. – P. 2185-2199. – DOI 10.1007/s11590-022-01921-6. – EDN STIGTP.
15. Performance analysis of clustering methods for balanced multi-robot task allocations / E. Murugappan, N. Subramanian, S. Rahman [et al.] // *International Journal of Production Research*. – 2021. – DOI 10.1080/00207543.2021.1955994. – EDN GTNKUP.
16. A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping / R. Almadhoun, L. Seneviratne, Y. Zweiri, T. Taha // *SN Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 1, No. 8. – DOI 10.1007/s42452-019-0872-y. – EDN EZAWPF.
17. Varlamov, O. O. Evolutionary databases and knowledge bases for the adaptive synthesis of intelligent systems. Mivar information space / O. O. Varlamov. – Moscow: Scientific and Technical Publishing House “Radio i Svyaz”, 2002. – 286 p. – ISBN 5-256-01650-4. – EDN RWT COP.
18. Kolpakidi, N. A. Development of a decision support system for biochemical blood analysis / N. A. Kolpakidi, A. A. Kotsenko // *International Journal of Information Technologies and Energy Efficiency*. – 2025. – Vol. 10, No. 4(54). – P. 117-128. – EDN RQBJUS.
19. Varlamov, O. “Brains” for Robots: Application of the Mivar Expert Systems for Implementation of Autonomous Intelligent Robots / O. Varlamov // *Big Data Research*. – 2021. – Vol. 25. – P. 100241. – DOI 10.1016/j.bdr.2021.100241. – EDN HRYLWL.
20. Gorodetsky, A. E. Optimization of robot-router movement considering driver temperament / A. E. Gorodetsky, I. L. Tarasova // *Problems of Artificial Intelligence*. – 2023. – No. 1(28). – P. 18-30. – EDN BTZSK.
21. Route planning of autonomous robots in three-dimensional logic space using mivar technologies / A. Kotsenko, A. Andreev, R. Kim [et al.] // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – Vol. 515. – P. 04018. – DOI 10.1051/e3sconf/202451504018. – EDN GMEYDO.
22. Dynamic robot trajectory planning based on semantic object detection using the mivar expert system / C. Shen, S. Gong, O. O. Varlamov [et al.] // *Problems of Artificial Intelligence*. – 2024. – No. 4(35). – P. 164-176. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-164-176. – EDN DHVOFC.
23. Automated formation of discipline sequences for higher ecological and agricultural education using mivar expert systems / M. Peresyphkina, O. Varlamov, A. Kotsenko [et al.] // *Bio Web of Conferences: International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2024), Saint Petersburg, September 3–6, 2024*. Vol. 130. – Les Ulis: EDP Sciences, 2024. – P. 08032. – DOI 10.1051/bioconf/202413008032. – EDN ERQVZN.
24. Development of a mivar expert system for selecting consensus algorithms for distributed ledgers / N. S. Podoprigrorova, S. A. Kozyrev, S. S. Podoprigrorova [et al.] // *Problems of Artificial Intelligence*. – 2024. – No. 4(35). – P. 126-138. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-126-138. – EDN AVXOTO.

25. Development of a mivar expert system for implementing ethical aspects of artificial intelligence in credit scoring / M. S. Torzhkov, Yu. P. Koroleva, A. V. Baldin [et al.] // *Problems of Artificial Intelligence*. – 2024. – No. 4(35). – P. 139-150. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-139-150. – EDN BHOQXX.
26. Integrated AI system based on mivar and neural networks for defect detection in bakery production / A. M. Golobokov, A. A. Kokhanov, I. D. Kats [et al.] // *Problems of Artificial Intelligence*. – 2025. – No. 1(36). – P. 27-42. – DOI 10.24412/2413-7383-27-42. – EDN QAZTYW.
27. Mivar expert system for intellectualization of automotive wheel rim production / A. N. Demidov, V. D. Chernenko, M. K. Votintsev [et al.] // *Problems of Artificial Intelligence*. – 2025. – No. 1(36). – P. 43-57. – DOI 10.24412/2413-7383-43-57. – EDN HCKKLJ.
28. Chuvikov, D. A. Development of a platform for reconstruction and examination of accident events in road traffic accidents based on logical artificial intelligence / D. A. Chuvikov // *Problems of Artificial Intelligence*. – 2024. – No. 2(33). – P. 59-77. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-2-59-77. – EDN EUPPZY.
29. Mikhaleva, U. A. Application of the mivar approach in systems for countering pretexting / U. A. Mikhaleva // *Telecommunications*. – 2024. – No. 3. – P. 38-40. – DOI 10.31044/1684-2588-2024-0-3-38-40. – EDN VDTWAZ.
30. Gong, S. Mivar decision-making system for distribution and transportation of goods by a team of warehouse robots / S. Gong // *Control Systems and Information Technologies*. – 2025. – No. 2(100). – P. 23-29. – EDN XZHHBF.

RESUME

Gong S.

Decision-making model for multitasking warehouse robots based on a four-layer collaborative optimization framework

This research pioneers and empirically validates an integrated approach combining mivar-based logical artificial intelligence with a four-layer collaborative optimization framework (4L-COF) for managing multi-agent warehouse robotic systems. The study's pivotal scientific contribution resides in developing an intelligent task allocation system implementing formalized mechanisms for dynamic prioritization, adaptive clustering, route optimization, and coordinated resource planning.

Our investigation establishes that embedding mivar computational models—which reduce algorithmic complexity from factorial $O(N!)$ to linear $O(N)$ —within a multi-tiered optimization architecture constitutes a highly efficient and promising methodology. This integration achieves industry-critical benchmarks: real-time order processing, substantial energy efficiency gains through minimized idle travel, and sustained high-throughput performance.

The research methodology encompassed comprehensive analysis of warehouse robotics operational challenges, culminating in a rigorously formalized mathematical 4L-COF model. Experimental validation in an e-commerce warehouse simulation environment, processing 100 distinct orders, confirmed the system's operational efficacy and practical viability. Testing demonstrated stable performance across all architectural tiers, generation of 42 optimized cargo clusters, and significant transportation cost reduction (5,436m total distance). The system consistently balanced competing demands for high throughput, energy conservation, and real-time responsiveness.

The inherent flexibility of this mivar-optimization model enables multiple development pathways: heterogeneous fleet management strategies, collaborative oversized cargo transport methodologies, and large-scale logistics deployment. Consequently, the 4L-COF system substantiates the practical utility of mivar technologies for establishing next-generation, high-efficiency warehouse logistics ecosystems and provides a foundational framework for industrial adoption.

РЕЗЮМЕ

Гун Ш.

Модель принятия решений для многозадачных складских роботов на основе четырехуровневой архитектуры совместной оптимизации

В данной работе впервые предложена и экспериментально обоснована концепция применения миварных технологий логического искусственного интеллекта в сочетании с четырехуровневой архитектурой совместной оптимизации (4L-COF) для управления многоагентными системами складских роботов. Ключевым научным достижением исследования стало создание интеллектуальной системы распределения задач, реализующей формализованные механизмы динамического приоритизирования, адаптивной кластеризации, оптимизации маршрутов и совместного планирования ресурсов.

Проведенная работа продемонстрировала, что интеграция миварных моделей, обеспечивающих снижение вычислительной сложности с факториальной ($O(N!)$) до линейной ($O(N)$), в структуру многоуровневой оптимизации является высокоэффективным и перспективным подходом. Это позволяет достичь критически важных для отрасли показателей: обработки заказов в режиме реального времени, значительного повышения энергоэффективности за счет минимизации холостого пробега и обеспечения высокой пропускной способности.

В рамках исследования был осуществлен детальный анализ проблематики управления складскими роботами, разработана и формализована математическая модель 4L-COF. Экспериментальная верификация системы в симуляционной среде, имитирующей реальный склад электронной коммерции при обработке 100 заказов, подтвердила ее высокую эффективность и практическую применимость. Тестирование выявило стабильную работу всех уровней архитектуры, формирование 42 оптимальных групп грузов и общую оптимизацию транспортных расходов (5436 м). Система продемонстрировала способность балансировать требования высокой производительности, энергосбережения и работы в реальном времени.

Гибкость предложенной миварно-оптимизационной модели открывает пути для ее дальнейшего развития: интеграции стратегий управления разнородными роботами, разработки методов кооперативной транспортировки сверхгабаритных грузов и масштабирования для крупных логистических объектов. Таким образом, разработанная интеллектуальная система 4L-COF наглядно демонстрирует практическую ценность миварных технологий для создания нового поколения высокопроизводительных и энергоэффективных складских логистических комплексов и служит основой для их широкого внедрения в отрасль.

Гун Шэншо, hiteyeb@163.com

1) аспирант кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,

2) младший научный сотрудник АО «НИИ «Вычислительных комплексов»».

Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, автономные робототехнические комплексы, обработка информации, принятие решений.

Статья поступила в редакцию 19.06.2025.

УДК 004.89

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-113-123

А. В. Ниценко, В. Ю. Шелепов, С. А. Большакова
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк
283048, г. Донецк, ул. Артема, 118 б

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАЗБИЕНИЕ ТЕКСТА НА СЕМАНТИЧЕСКИ ОДНОРОДНЫЕ ФРАГМЕНТЫ (АБЗАЦЫ)*

A. V. Nicenko, V. Ju. Shelepov, S. A. Bolshakova
Federal Budgetary State Scientific Institution «Institute of Artificial Intelligence Problems»,
Donetsk, Artema str., 118-b.

AUTOMATIC TEXT SEGMENTATION INTO SEMANTICALLY HOMOGENEOUS FRAGMENTS (PARAGRAPHS)

Работа посвящена актуальной теме сегментации русскоязычного текста на семантически однородные фрагменты. В статье выполнен обзор ряда существующих подходов к задаче сегментации русского текста. Предложен алгоритм автоматического разбиения текста на абзацы, как тематически однородные фрагменты за счет использования отношения, учитывающего частоту встречаемости слова и длину отрезка текста, где оно встречается. С помощью разработанного программного обеспечения проведены эксперименты и сравнение предложенного алгоритма с другими методами сегментации. В результате установлено, что предложенный алгоритм демонстрирует лучшие показатели, нежели другие сравниваемые подходы.

Ключевые слова: семантическая сегментация текста, абзац, частота слова, отрезок встречаемости.

The work is devoted to the topical topic of segmentation of the Russian-language text into semantically homogeneous fragments. The paper provides an overview of a number of existing approaches to this task. An algorithm is proposed for automatically dividing text into paragraphs as thematically homogeneous fragments by using a ratio that takes into account the frequency of occurrence of a word and the length of the text segment where it occurs. Using this software, experiments were conducted and the proposed algorithm was compared with other text segmentation methods. As a result, it was found that the proposed algorithm demonstrates better performance than other compared approaches.

Keywords: semantic text segmentation, paragraph, word frequency, segment of occurrence.

* **Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР №Г/Р 123092600030-4.

Введение

В настоящее время проблема семантической сегментации текста становится все более актуальной благодаря экспоненциальному росту объемов данных, зачастую представленных в виде текстовых документов. В том случае, когда в тексте присутствует определенная семантическая разметка (заголовки, абзацы и т. д.), сегментация не представляет проблем. Сложнее, когда такой информации нет или сегментацию нужно выполнить более детально. В таком случае появляется необходимость в алгоритмах, которые позволяют осуществить это автоматически.

В данной статье речь идет об автоматической сегментации русскоязычных текстов. Под сегментацией мы будем подразумевать разделение текста на абзацы так, чтобы предложения внутри каждого абзаца были объединены некоторой общей темой. Эта задача является необходимым этапом для последующих задач, таких как тематическая классификация документов, реферирование, извлечение, индексирование и поиск информации, построение связанной с текстом онтологии. В научной литературе существует большое количество работ, описывающих различные подходы к задаче автоматического разбиения сплошного текста на тематически однородные фрагменты, оформляемые в виде абзацев.

Обзор литературы

Существует несколько подходов к решению данной задачи. Часть из них основаны на лексической когезии – связи между частями текста через схожую лексику [1]. Согласно этому принципу, границы тем определяются точками лексических изменений [2], [3].

TextTiling [4] – один из наиболее ранних методов сегментации текстов по темам сравнивает блоки предложений, используя меры подобия (BOW, TF-IDF). Лексические изменения затем определяются по минимальным значениям коэффициента подобия. Данный метод определяет границы тем путем нахождения точек, в которых мера лексической когезии значительно изменяется.

Minimum Cut (MinCut) [5] моделирует документ в виде графа, где узлы – это предложения в документе, а ребра имеют значение веса, соответствующее значению подобия между двумя связанными узлами. Для определения сегментов находится минимальный разрез графа.

В методе [6] предполагается, что изменение темы в тексте происходит в местах, где частые повторения слов начинаются и заканчиваются, образуя цепочку. С помощью косинусного коэффициента подобия определяется уровень лексического сцепления между двумя лексическими цепями.

Методы на основе лексической когезии предназначены для работы с очень большими документами, содержащими достаточный объем статистически значимой лексической информации. Они хорошо справляются с задачей тематической сегментации научных текстов, но мало подходят, например, для сегментации текстов стенограмм заседаний или телефонных разговоров [1].

Другие подходы основываются на байесовских структурах. В работе [7] используется Байесовская сеть для сегментации, где каждая тема рассматривается, как отдельная языковая модель. Используется также латентное распределение Дирихле и двоичные переменные для указания сдвига темы между предложениями [8]. В [9] для тематической сегментации используется иерархическая байесовская модель.

Методы, использующие байесовские структуры, обладают способностью учитывать как лексическую связность, так и определять ключевые фразы и тем самым превосходят упомянутые ранее методы. Они хорошо справляются с сегментацией речи и научных текстов – лучше методов, основанных на лексической когезии [1].

В работе [10] предлагается новый метод решения задачи тематической сегментации для русскоязычного текста на основе графов знаний. Применение графов знаний при сегментации позволяет использовать больше информации о словах в тексте. Методы, основанные на базе графов знаний, могут применять расстояние между словами на графе, интегрируя тем самым фактологическую информацию из графа знаний в процесс принятия решений о разбиении текста на сегменты.

Применение к задаче сегментации объединенного подхода DNN-НММ (*Deep Neural Network-Hidden Markov Model*) – «глубокие нейронные сети-скрытые марковские модели» оказалось весьма успешным и позволило существенно улучшить точность сегментации [11-13]. Глубокая нейронная сеть (DNN) вычисляет апостериорную вероятность темы для слова, а НММ моделирует переходы между темами. Алгоритм Витерби отображает последовательность слов в последовательность тем. Изменение темы определяет границу сегмента текста. В работе [14] для сегментации по разделам текстов научных статей на русском языке используется многослойный персептрон.

Современные методы используют также иерархические рекуррентные нейронные сети (RNN) и сети трансформерной архитектуры, где сначала предложения представляются в виде векторов, а затем двунаправленная LSTM-сеть на уровне предложений моделирует переход между темами, основанный на этой последовательности векторов [15-22]. Методы данной группы могут применяться в любых типах задач и для текстов любого типа, при условии наличия достаточного объема обучающих данных и способны эффективнее других справляться с задачей тематической сегментации.

Ощутимым недостатком данных методов является необходимость предварительного обучения нейронных сетей, входящих в архитектуру моделей, на больших объемах данных. По этой причине сегментация русскоязычного текста на данный момент является сложной задачей ввиду отсутствия в открытом доступе достаточного набора данных для обучения и тестирования.

Описание предлагаемого алгоритма разбиения текста на тематически однородные фрагменты

Ниже предлагается простой и, как представляется, достаточно эффективный способ решения обсуждаемой проблемы, основанный на использовании часто встречающихся в рассматриваемом тексте существительных (назовем их ключевыми словами) и местах их концентрации. Мы используем словарь [23], содержащий более четырех миллионов русских словоформ с полной грамматической разметкой, добавив к этой разметке лемму слова. Представление этого словаря в виде дерева, обеспечивает почти мгновенный поиск в словаре словоформы текста и ее лемматизацию.

Рассмотрим некоторый фрагмент сплошного текста, подлежащий разбиению на абзацы. Формируется список лемм всех его слов, которые являются существительными и встречаются в тексте не менее двух раз (условие L). Количество вхождений словоформ, входящих в парадигму определенной леммы, будем называть частотой слова, которую обозначим через a . Помимо этого фиксируются номера первого и последнего предложения, где встречается слово: b и c соответственно. После чего вычисляется отношение

$$\frac{a}{c-b+1} \quad (1)$$

Отношение (1) тем больше, чем больше частота слова и чем меньше отрезок текста, на котором это слово сосредоточено.

Алгоритм находит (первый) максимум отношения (1), определяет соответствующие номера b и c и выделяет в качестве абзаца отрезок текста от предложения с номером b до предложения с номером c включительно. Затем проводится подсчет количества предложений в образовавшихся предыдущих и последующих фрагментах текста (не входящих в уже выделенные абзацы) и к наибольшему из них при выполнении условия L применяется вышеописанная процедура. Если для него условие L не выполняется, то же делается для второго по размеру из образовавшихся фрагментов. Процесс продолжается до тех пор, пока после выделения очередного абзаца для всех оставшихся фрагментов перестает выполняться условие L .

Следующий этап – анализ полученного разбиения на предмет анафор и абзацев, состоящих из одного предложения. Алгоритм анализирует те абзацы, которые в первом своем предложении содержат личные местоимения *он, она, оно*, а также указательные слова *этот, эта, это, там, туда, оттуда, столько*, поскольку именно они выполняют анафорическую функцию. Если такое предложение найдено и в нем нет предшествующего существительного в том же роде и числе, то абзац присоединяется к предыдущему. Объединяются также соседние абзацы, на стыке которых оказался общий фрагмент прямой речи. При этом, если начало прямой речи выделено с помощью тире, идущего вслед за двоеточием, то она, естественно, оформляется отдельным абзацем. К сожалению, конец этого абзаца пока приходится отмечать вручную. Наконец, абзац, состоящий из одного предложения, присоединяется к меньшему из соседних.

Описанный алгоритм реализован на языке программирования C++ в экспериментальном программном обеспечении для сегментации текста. С помощью данного программного обеспечения было проведено тестирование и оценка результатов работы алгоритма.

Экспериментальные результаты

Проиллюстрируем этапы работы предложенного алгоритма на примере 15-ой главы романа Даниеля Дефо «Робинзон Крузо» в пересказе К.И. Чуковского. Вот фрагмент этой главы, представленный в виде сплошного текста:

«Конечно, было бы хорошо иметь лодку на этой стороне острова, поближе к моему дому, но как привести ее оттуда, где я оставил ее? Обогнуть мой остров с востока – от одной мысли об этом у меня сжималось сердце и холодела кровь. Как обстоит дело на другой стороне острова, я не имел никакого понятия. Что, если течение по ту сторону такое же быстрое, как и по эту? Разве не может оно швырнуть меня на прибрежные скалы с той же силой, с какой другое течение уносило меня в открытое море. Словом, хотя постройка этой лодки и спуск ее на воду стоили мне большого труда, я решил, что все же лучше остаться без лодки, чем рисковать из-за нее головой. Нужно сказать, что теперь я стал гораздо искуснее во всех ручных работах, каких требовали условия моей жизни. Когда я очутился на острове, я совершенно не умел обращаться с топором, а теперь я мог бы при случае сойти за хорошего плотника, особенно если принять в расчет, как мало было у меня инструментов. Я и в гончарном деле (совсем неожиданно!) сделал большой шаг вперед: устроил станок с вертящимся кругом, отчего моя работа стала и быстрее и лучше; теперь вместо корявых изделий, на которые было противно смотреть, у меня выходила очень неплохая посуда довольно правильной формы. Но никогда я, кажется, так не радовался и не гордился своей изобретательностью, как в тот день, когда мне удалось сделать трубку. Конечно, моя трубка была первобытного вида –

из простой обожженной глины, как и все мои гончарные изделия, и вышла она не очень красивой. Но она была достаточно крепка и хорошо пропускала дым, а главное – это была все-таки трубка, о которой я столько мечтал, так как привык курить с очень давнего времени. На нашем корабле были трубки, но, когда я перевозил оттуда вещи, я не знал, что на острове растет табак, и решил, что не стоит их брать. К этому времени я обнаружил, что мои запасы пороха начинают заметно убывать. Это чрезвычайно встревожило и огорчило меня, так как нового пороха достать было неоткуда. Что же я буду делать, когда у меня выйдет весь порох? Как я буду тогда охотиться на коз и птиц? Неужели я до конца моих дней останусь без мясной пищи?»

В этом фрагменте текста содержится 18 предложений. Ниже приведена таблица 1, в которой приведены результаты вычислений. Во втором столбце таблицы после леммы указана частота (параметр a), затем в скобках приведены номера первого и последнего предложения, где встречается слово (параметры b и c). В предпоследнем столбце выведены значения отношения (1), в последнем – первый максимум этой величины отмечен тремя звездочками.

Таблица 1 – Результаты вычислений

Лемма	a	(b, c)	$a/(c-b+1)$	Max $a/(c-b+1)$
1 шаг – фрагмент [1;18]				
остров	5	(1, 13)	0.38	
трубка	4	(10, 13)	1.00	***
лодка	3	(1, 6)	0.50	
порох	3	(14, 16)	1.00	
время	2	(12, 14)	0.67	
дело	2	(3, 9)	0.29	
день	2	(10, 18)	0.22	
изделие	2	(9, 11)	0.67	
работа	2	(7, 9)	0.67	
сторона	2	(1, 3)	0.67	
течение	2	(4, 5)	1.00	
2 шаг – фрагмент [1;9]				
остров	4	(1, 8)	0.50	
лодка	3	(1, 6)	0.50	
дело	2	(3, 9)	0.29	
работа	2	(7, 9)	0.67	
сторона	2	(1, 3)	0.67	
течение	2	(4, 5)	1.00	***
3 шаг – фрагмент [6;9]				
лодка	2	(6, 6)	2	***
работа	2	(7, 9)	0.67	
4 шаг – фрагмент [7;9]				
работа	2	(7, 9)	0.67	***
5 шаг – фрагмент [14;18]				
порох	3	(14, 16)	1.00	***
6 шаг – фрагмент [1;3]				
остров	3	(1, 3)	1.5	***
сторона	2	(1, 3)	0.67	
7 шаг – фрагмент [17;18]				
-	-	-	-	-

Для приведенного фрагмента текста алгоритм выдает следующий результат:

«Конечно, было бы хорошо иметь лодку на этой стороне острова, поближе к моему дому, но как привести ее оттуда, где я оставил ее? Обогнуть мой остров с востока – от одной мысли об этом у меня сжималось сердце и холодела кровь. Как обстоит дело на другой стороне острова, я не имел никакого понятия.

Что, если ТЕЧЕНИЕ по ту сторону такое же быстрое, как и по эту? Разве не может оно швырнуть меня на прибрежные скалы с той же силой, с какой другое ТЕЧЕНИЕ уносило меня в открытое море.

Словом, хотя постройка этой ЛОДКИ и спуск ее на воду стоили мне большого труда, я решил, что все же лучше остаться без ЛОДКИ, чем рисковать из-за нее головой.

Нужно сказать, что теперь я стал гораздо искуснее во всех ручных работах, каких требовали условия моей жизни. Когда я очутился на острове, я совершенно не умел обращаться с топором, а теперь я мог бы при случае сойти за хорошего плотника, особенно если принять в расчет, как мало было у меня инструментов. Я и в гончарном деле (совсем неожиданно!) сделал большой шаг вперед: устроил станок с вертящимся кругом, отчего моя работа стала и быстрее и лучше; теперь вместо корявых изделий, на которые было противно смотреть, у меня выходила очень неплохая посуда довольно правильной формы.

Но никогда я, кажется, так не радовался и не гордился своей изобретательностью, как в тот день, когда мне удалось сделать ТРУБКУ. Конечно, моя ТРУБКА была первобытного вида – из простой обожженной глины, как и все мои гончарные изделия, и вышла она не очень красивой. Но она была достаточно крепка и хорошо пропускала дым, а главное – это была все-таки ТРУБКА, о которой я столько мечтал, так как привык курить с очень давнего времени. На нашем корабле были ТРУБКИ, но, когда я перевозил оттуда вещи, я не знал, что на острове растет табак, и решил, что не стоит их брать.

К этому времени я обнаружил, что мои запасы ПОРОХА начинают заметно убывать. Это чрезвычайно встревожило и огорчило меня, так как нового ПОРОХА достать было неоткуда. Что же я буду делать, когда у меня выйдет весь ПОРОХ?

Как я буду тогда охотиться на коз и птиц? Неужели я до конца моих дней останусь без мясной пицци?»

Окно программы показано на рисунке 1.

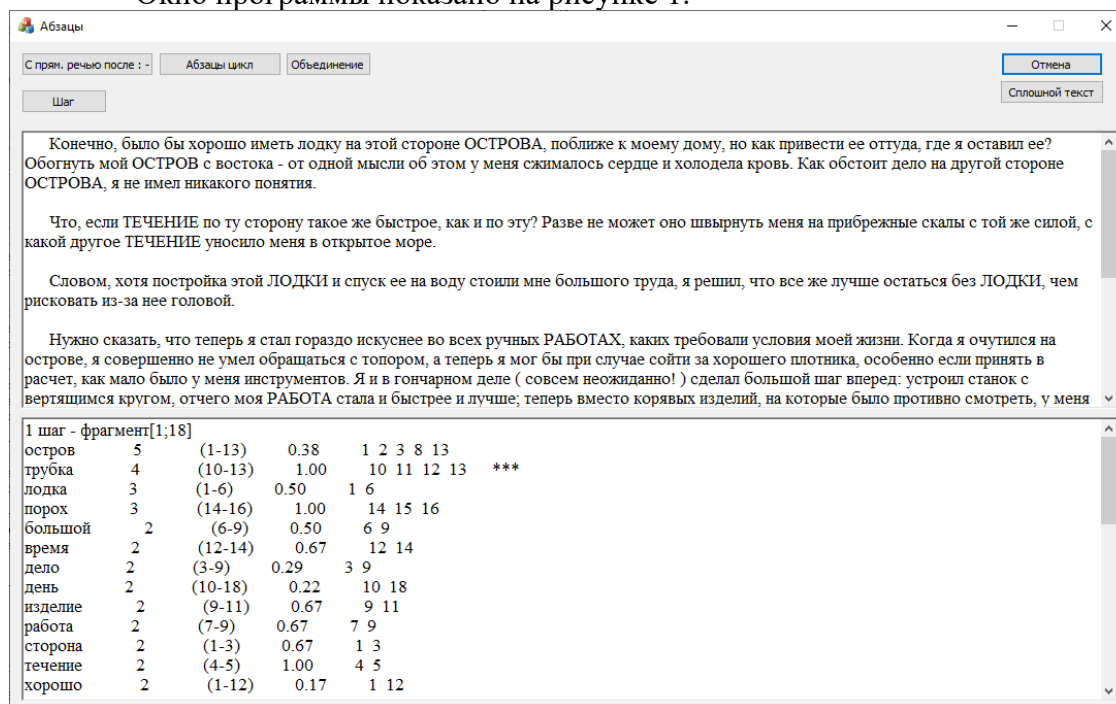


Рисунок 1 – Результат программного разбиения текста на тематически однородные фрагменты

Оценка результатов

Для оценки качества предлагаемого алгоритма было проведено сравнение результатов его работы с эталонной ручной разметкой с помощью двух популярных оценочных характеристик – Pk [24] и WindowDiff [25]. Для сравнения использовалось двоичное представление сегментации в виде последовательности символов «0» и «1», где «1» соответствует предложениям текста, за которыми следует граница сегмента (абзац), «0» – всем остальным предложениям. Обе характеристики используют фиксированное скользящее окно и оценивают, как расположены границы в пределах окна относительно друг друга. Характеристика Pk – это вероятность того, что при прохождении скользящего окна по предложениям текста, предложения на границах окна будут ошибочно классифицированы как принадлежащие к одному сегменту (или наоборот). Характеристика WindowDiff заключается в подсчете количества границ сегментов между началом и концом заданного окна и назначении штрафа, если это количество разное для экспериментального и эталонного разбиения. Оба показателя оценивают разницу между экспериментальной и эталонной сегментацией. Чем меньше значение, тем лучше сегментация. Для вычисления характеристик использовалась реализация из библиотеки Natural Language Toolkit Library [26].

В качестве набора данных для тестирования мы использовали текст художественного произведения (Д. Дефо «Робинзон Крузо» в пересказе К.И. Чуковского). С помощью разработанного программного обеспечения мы произвели разбиение на абзацы трех глав из данного произведения. В качестве эталона мы использовали текст данных глав, вручную размеченных человеком на абзацы, объединенные общей тематикой. В таблице 2 приведены результаты сравнения усредненных показателей разработанного алгоритма с другими известными методами тематической сегментации текста (на основе данных из работ [7],[10],[14],[20]).

Таблица 2 – Результаты сравнения с другими методами

Метод сегментации	Язык документов	Тип документов	WinDiff	Pk
TextTiling[4]	Англ.	Мед. литература	0.4	0.38
MinimumCut[5]	Англ.	Мед. литература	0.382	0.368
LCSEG[6]	Англ.	Мед. литература	0.385	0.37
BAYESSEG[7]	Англ.	Мед. литература	0.353	0.339
Граф знаний[10]	Рус.	Научные статьи	0.524	0.476
DNN[14]	Рус.	Научные статьи	0.37	0.27
BiLSTM[20]	Англ.	Стенограммы	0.43	0.41
BERT[20]	Англ.	Стенограммы	0.35	0.34
S-BERT[20]	Англ.	Стенограммы	0.349	0.336
Предлагаемый алгоритм	Рус.	Худ. литература	0.347	0.292

Заключение

В работе предложен метод автоматического разбиения текста на абзацы как тематически однородные фрагменты за счет использования отношения (1), учитывающего частоту встречаемости слова и длину отрезка текста, где оно встречается. Такой подход характеризуется малой вычислительной сложностью и не требует специальных лингвистических знаний, кроме грамматического словаря и простых правил, учитывающих анафорические ссылки. Опираясь на значения вычисленных характеристик качества, можно утверждать, что предложенный алгоритм сегментации текста демонстрирует показатели, улучшенные в сравнении с другими известными алгоритмами.

Список литературы

1. Чернобаев И.Д., Суркова А.С. Обзор методов тематической сегментации текстовых данных. *Информационные системы и технологии ИСТ-2018: Материалы докладов XXIV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию Нижегородской радиолоборатории* (г. Нижний Новгород, 20 апреля 2018 года). Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. С. 1079-1083.
2. Kirana R.P., Mukhrizal M., Jayanti F.G. Types of Lexical Cohesion and Grammatical Cohesion in Thesis Abstracts. *Jadila: Journal of Development and Innovation in Language and Literature Education*. 2020. vol. 1. no. 1. pp. 57-68. DOI: 10.52690/jadila.v1i1.14.
3. Мурай О.В. Когезия и когерентность в английской речи в публицистических текстах. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки*. 2021. №12-2. С. 171-174. DOI: 10.37882/2223-2982.2021.12-2.28.
4. Hearst M. A. TextTiling: Segmenting text into multiparagraph subtopic passages. *Computational linguistics*. 1997. vol. 23. no. 1. pp. 33-64.
5. Malioutov I., Barzilay R. Minimum cut model for spoken lecture segmentation. *Proceedings of the ACL*. 2006. pp. 25-32.
6. Galley M., McKeown K., Fosler-Lussier E., Jing H. Discourse segmentation of multi-party conversation. *Proceedings of the 41st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 2003. pp. 562-569.
7. Eisenstein J., Barzilay R. Bayesian unsupervised topic segmentation. *Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Association for Computational Linguistics*, 2008. pp. 334-343.
8. Kharisudin I., Masri'an H. Topic Modeling on WhatsApp User Reviews Using Latent Dirichlet Allocation // *Scandinavian Journal of Immunology*. 2022. vol. 9. no. 1. pp. 51-62. DOI: 10.15294/sji.v9i1.34941.
9. Du L., Buntine W., Johnson M. Topic segmentation with a structured topic model. *Proceedings of the 2013 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*. 2013. pp. 190-200.
10. Авдеева З.К., Гаврилов М.С., Лемтюжникова Д.В., Шарафиев А.Ф. Методы решения задачи тематической сегментации текстов на основе графов знаний. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2024. № 4. С. 40-64. DOI: 10.31857/S0002338824040031.
11. Yu J., Shao H. Broadcast news story segmentation using sticky hierarchical Dirichlet process. *Applied Intelligence*. 2022. vol. 52. no. 11. pp. 12788-12800. DOI: 10.1007/s10489-021-03098-4.
12. Yu J. A DNN-HMM Approach to Story Segmentation // *INTERSPEECH*. 2016. pp. 1527-1531.
13. Vetráb M. Using Hybrid HMM/DNN Embedding Extractor Models in Computational Paralinguistic Tasks // *Sensors*. 2023. vol. 23, no. 11. pp. 5208. DOI: 10.3390/s23115208.
14. Баранов А. М., Юдина Т. А. Алгоритм сегментации научных статей, сочетающий принципы обучения с учителем и без учителя. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2019. №22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithm-segmentatsii-nauchnyh-statey-sochetayuschiy-printsipy-obucheniya-s-uchitelem-i-bez-uchitelya> (дата обращения: 18.09.2025).
15. Javeed A. An LSTM model for extracting hierarchical relations between words for better topic modeling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. vol. 1780, no. 1. pp. 12-19. DOI: 10.1088/1742-6596/1780/1/012019.
16. Inzer S., Cheng K., Leung A., Shen X. Multi-scale Hybridized Topic Modeling: A Pipeline for Analyzing Unstructured Text Datasets via Topic Modeling. *SIAM Undergraduate Research Online*. 2023. vol. 16. DOI: 10.1137/22s1536832.
17. Lomakina L. S., Surkova A. S., Zhevnerchuk D. V., Chernobaev I. D. Text structures synthesis on the basis of their system-forming characteristics. *IV International Research Conference "Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine" (ITSMSSM 2017)*. Advances in Computer Science Research (ACSR). 2017. vol. 72. pp. 108-113.
18. Memon M. Q., Lu Yu., Chen P. An ensemble clustering approach for topic discovery using implicit text segmentation. *Journal of Information Science*. 2021. vol. 47, no. 4. pp. 431-457. DOI: 10.1177/0165551520911590.
19. Sonata I., Heryadi Ya., Tho C. Topic Segmentation using Transformer Model for Indonesian Text. *Procedia Computer Science*. 2023. vol. 227. pp. 159-167. DOI: 10.1016/j.procs.2023.10.513.
20. Iikura R. Okada M., Mori N. Improving BERT with Focal Loss for Paragraph Segmentation of Novels. *Distributed Computing and Artificial Intelligence, 17th International Conference. DCAI 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol. 1237. DOI: 10.1007/978-3-030-53036-5_3.

21. Solbiati A., Heffernan K., Damaskinos G., Poddar S., Modi S., Cali J. Unsupervised Topic Segmentation of Meetings with BERT Embeddings. *arXiv preprint arXiv:2106.12978*. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2106.12978.
22. Sokol V., Krykun V., Bilova M. Topic segmentation methods comparison on computer science texts // *Вестник Национального технического университета "ХПИ". Серия Системный анализ, управление и информационные технологии*. 2021. no. 2 (6). pp. 59-66. DOI: 10.20998/2079-0023.2021.02.10.
23. Хаген М. *Полная парадигма. Морфология*. URL: <https://ru.z-lib.fm/book/3305205/3a85b7/> (дата обращения: 15.09.2025).
24. Choi F. Y. Y. *Advances in domain independent linear text segmentation*. 2000. arxiv preprint arXiv: cs/0003083.
25. Pevzner L., Hearst M. A. A critique and improvement of an evaluation metric for text segmentation // *Computational Linguistics*. 2002. vol. 28. no.1. pp. 19-36.
26. Веб-сайт библиотеки NLTK. URL: <https://www.nltk.org> (дата обращения 18.09.2025).

References

1. Chernobaev I.D., Surkova A.S. Overview of methods of thematic segmentation of text data // *Information Systems and Technologies IST-2018: Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th anniversary of the Nizhny Novgorod Radio Laboratory*. Nizhny Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseeva, 2018. pp. 1079-1083.
2. Kirana R.P., Mukhrizal M., Jayanti F.G. Types of Lexical Cohesion and Grammatical Cohesion in Thesis Abstracts // *Jadila: Journal of Development and Innovation in Language and Literature Education*. 2020. vol. 1. no. 1. pp. 57-68. DOI: 10.52690/jadila.v1i1.14.
3. Muraj O.V. Cohesion and coherence in English speech in journalistic texts // *Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Humanities*. 2021. no. 12-2. pp. 171-174. DOI: 10.37882/2223-2982.2021.12-2.28.
4. Hearst M. A. TextTiling: Segmenting text into multiparagraph subtopic passages // *Computational linguistics*. 1997. vol. 23. no. 1. pp. 33-64.
5. Malioutov I., Barzilay R. Minimum cut model for spoken lecture segmentation // *Proceedings of the ACL*. 2006. pp. 25-32.
6. Galley M., McKeown K., Fosler-Lussier E., Jing H. Discourse segmentation of multi-party conversation // *Proceedings of the 41st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 2003. pp. 562-569.
7. Eisenstein J., Barzilay R. Bayesian unsupervised topic segmentation // *Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Association for Computational Linguistics, 2008. pp. 334-343.
8. Kharisudin I., Masri'an H. Topic Modeling on WhatsApp User Reviews Using Latent Dirichlet Allocation // *Scandinavian Journal of Immunology*. 2022. vol. 9. no. 1. pp. 51-62. DOI: 10.15294/sji.v9i1.34941.
9. Du L., Buntine W., Johnson M. Topic segmentation with a structured topic model // *Proceedings of the 2013 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*. 2013. pp. 190-200.
10. Avdeeva Z.K., Gavrilov M.S., Lemtjuzhnikova D.V., Sharafiev A.F. Methods for solving the problem of thematic segmentation of texts based on knowledge graphs // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and management systems*. 2024. № 4. С. 40-64. DOI: 10.31857/S0002338824040031.
11. Yu J., Shao H. Broadcast news story segmentation using sticky hierarchical Dirichlet process // *Applied Intelligence*. 2022. vol. 52. no. 11. pp. 12788-12800. DOI: 10.1007/s10489-021-03098-4.
12. Yu J. A DNN-HMM Approach to Story Segmentation // *INTERSPEECH*. 2016. pp. 1527-1531.
13. Vetráb M. Using Hybrid HMM/DNN Embedding Extractor Models in Computational Paralinguistic Tasks // *Sensors*. 2023. vol. 23, no. 11. pp. 5208. DOI: 10.3390/s23115208.
14. Baranov A. M., Judina T. A. An algorithm for segmenting scientific articles that combines the principles of teaching with and without a teacher // *New information technologies in automated systems*. 2019. No. 22. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithm-segmentatsii-nauchnyh-statey-sochetayuschiy-printsipy-obucheniya-s-uchitelem-i-bez-uchatelya> (accessed: 18.09.2025).
15. Javeed A. An LSTM model for extracting hierarchical relations between words for better topic modeling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. vol. 1780, no. 1. pp. 12-19. DOI: 10.1088/1742-6596/1780/1/012019.

16. Inzer S., Cheng K., Leung A., Shen X. Multi-scale Hybridized Topic Modeling: A Pipeline for Analyzing Unstructured Text Datasets via Topic Modeling // SIAM Undergraduate Research Online. 2023. vol. 16. DOI: 10.1137/22s1536832.
17. Lomakina L. S., Surkova A. S., Zhevnerchuk D. V., Chernobaev I. D. Text structures synthesis on the basis of their system-forming characteristics // IV International Research Conference "Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine" (ITSMSSM 2017). Advances in Computer Science Research (ACSR). 2017. vol. 72. pp. 108-113.
18. Memon M. Q., Lu Yu., Chen P. An ensemble clustering approach for topic discovery using implicit text segmentation // Journal of Information Science. 2021. vol. 47, no. 4. pp. 431-457. DOI: 10.1177/0165551520911590.
19. Sonata I., Heryadi Ya., Tho C. Topic Segmentation using Transformer Model for Indonesian Text // Procedia Computer Science. 2023. vol. 227. pp. 159-167. DOI: 10.1016/j.procs.2023.10.513.
20. Iikura R. Okada M., Mori N. Improving BERT with Focal Loss for Paragraph Segmentation of Novels // Distributed Computing and Artificial Intelligence, 17th International Conference. DCAI 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1237. DOI: 10.1007/978-3-030-53036-5_3.
21. Solbiati A., Heffernan K., Damaskinos G., Poddar S., Modi S., Cali J. Unsupervised Topic Segmentation of Meetings with BERT Embeddings // arXiv preprint arXiv:2106.12978. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2106.12978.
22. Sokol V., Krykun V., Bilova M. Topic segmentation methods comparison on computer science texts // Bulletin of the National Technical University "KHPI". A series of System analysis, management and information technology. 2021. no. 2 (6). pp. 59-66. DOI: 10.20998/2079-0023.2021.02.10.
23. Hagen M. The complete paradigm. Morphology. Available at: <https://ru.z-lib.fm/book/3305205/3a85b7/> (accessed: 15.09.2025).
24. Choi F. Y. Y. Advances in domain independent linear text segmentation. 2000. arxiv preprint arXiv: cs/0003083.
25. Pevzner L., Hearst M. A. A critique and improvement of an evaluation metric for text segmentation // Computational Linguistics. 2002. vol. 28. no.1. pp. 19-36.
26. NLTK. Available at: <https://www.nltk.org> (accessed: 18.09.2025).

RESUME

A.V. Nicenko, V. Ju. Shelepov, S.A. Bolshakova

Automatic text segmentation into semantically homogeneous fragments (paragraphs)

Background: Currently, the problem of semantic segmentation of text is becoming increasingly relevant due to the exponential growth of big data, often presented in the form of text documents. When there is a certain semantic markup in the text segmentation is not a problem. It is more difficult when there is no such information or segmentation needs to be performed in more detail. In this case, there is a need for algorithms that allow this to be done automatically.

Materials and methods: The paper provides an overview of a number of existing approaches to this task. An algorithm is proposed for automatically dividing text into paragraphs as thematically homogeneous fragments by using a ratio that takes into account the frequency of occurrence of a word and the length of the text segment where it occurs. This approach does not require training on large amounts of data and special linguistic knowledge, except for a grammatical dictionary and simple rules that take into account anaphoric references.

Results: This algorithm is implemented in experimental text segmentation software. Using this software, experiments were conducted and the proposed algorithm was compared with other well-known text segmentation methods using two popular evaluation characteristics - WinDiff and Pk.

Conclusion: A comparison was made between automatic division into paragraphs, and the manual division. As a result, it was found that the proposed text segmentation algorithm demonstrates slightly better performance than other compared approaches.

РЕЗЮМЕ

А. В. Ниценко, В. Ю. Шелепов, С.А. Большакова
Автоматическое разбиение текста на семантически однородные фрагменты (абзацы)

Предпосылки: В настоящее время проблема семантической сегментации текста становится все более актуальной благодаря экспоненциальному росту объемов данных, зачастую представленных в виде текстовых документов. В том случае, когда в тексте присутствует определенная семантическая разметка, сегментация не представляет проблем. Сложнее, когда такой информации нет или сегментацию нужно выполнить более детально. В таком случае появляется необходимость в алгоритмах, которые позволяют осуществить это автоматически.

Материалы и методы: В работе выполнен обзор ряда существующих подходов к этой задаче. Предложен алгоритм автоматического разбиения текста на абзацы как тематически однородные фрагменты за счет использования отношения, учитывающего частоту встречаемости слова и длину отрезка текста, где оно встречается. Этот подход не требует обучения на больших объемах данных и специальных лингвистических знаний, кроме грамматического словаря и простых правил, учитывающих анафорические ссылки.

Результаты: Данный алгоритм реализован в экспериментальном программном обеспечении для сегментации текста. С помощью данного программного обеспечения проведены эксперименты и сравнение предложенного алгоритма с другими известными методами сегментации текста с использованием двух популярных оценочных характеристик – WinDiff и Pk.

Заключение: Проведено сравнение текста художественного произведения, автоматически разбитого на абзацы, с разбиением, выполненным человеком вручную. В результате установлено, что предложенный алгоритм сегментации текста демонстрирует показатели несколько лучшие, нежели другие сравниваемые подходы.

Ниценко Артём Владимирович – к.т.н., старший научный сотрудник отдела распознавания речевых образов, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк. *Область научных интересов:* искусственный интеллект, обработка естественного языка, компьютерная лингвистика. Эл. почта: nay_box@mail.ru, адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон: +7 (856) 311-34-24.

Шелепов Владислав Юрьевич – д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник отдела распознавания речевых образов, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк. *Область научных интересов:* искусственный интеллект, обработка естественного языка, компьютерная лингвистика. Эл. почта: vladislav.shelepov2012@yandex.ru, адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон: +7 (856) 311-34-24.

Большакова Светлана Анатольевна – младший научный сотрудник отдела распознавания речевых образов, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта». *Область научных интересов:* искусственный интеллект, компьютерная лингвистика, интеллектуальный анализ информации. Эл. почта: svetlako@yandex.com, адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон: +7 (856) 311-34-24.

Статья поступила в редакцию 15.05.2025.

УДК 681.51

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-125-137

М. Р. Исаева, М. Ш. Минцаев, А. А.-В. Садулаев, М.Ш. Саламанова
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования "Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова"

364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ

M. R. Isaeva, M. Sh. MintsaeV, A. A.-V. Sadulaev, M.S. Salamanova
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Grozny State Petroleum
Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov"

364051, Chechen Republic, Grozny, Kh.A. Isaev ave., 100

OPTIMIZATION OF ENERGY EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF CEMENT PRODUCTION BASED ON THE UPGRADED AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE BALL DRUM MILL

Статья посвящена снижению экологического воздействия цементного производства за счет внедрения бесклинкерных добавок (шлаков, золы) и модернизированной САР скорости шаровой мельницы. Разработана математическая модель, включающая динамику электропривода с ПИД-регулятором, тепловую защиту обмоток и подшипников, а также алгоритмы обработки данных датчиков. Эксперименты в Simintech и на лабораторной установке подтвердили устойчивость системы (перерегулирование <5%, время переходного процесса — 2.5 с) и эффективность защиты от перегрева. Решение позволяет сократить выбросы CO₂ на 15–20% благодаря оптимизации помола и использованию вторичных материалов.

Ключевые слова: бесклинкерный цемент, шаровая мельница, автоматизация, ПИД-регулятор, тепловая защита, математическое моделирование

The article is devoted to reducing the environmental impact of cement production through the introduction of clinker-free additives (slags, ash) and an upgraded ball mill speed CAP. A mathematical model has been developed that includes the dynamics of an electric drive with a PID controller, thermal protection of windings and bearings, as well as algorithms for processing sensor data. Simintech and laboratory experiments have confirmed the stability of the system (overshoot <5%, transition time — 2.5 s) and the effectiveness of overheating protection. The solution reduces CO₂ emissions by 15-20% by optimizing grinding and using recycled materials.

Key words: clinkerless cement, ball mill, automation, PID controller, thermal protection, mathematical modeling

Актуальность исследования

Цементная промышленность — один из ключевых источников антропогенных выбросов CO_2 (5–8% глобальных объемов). Производство 1 тонны клинкера сопровождается выделением 0.72–0.85 тонн CO_2 (декарбонизация известняка + сжигание топлива) [1]. Переход на бесклинкерные добавки (шлаки, золу) позволяет:

- снизить углеродный след на 15–20% при замене 30% клинкера [2];
- уменьшить энергопотребление помола на 10–15% за счет оптимизации режимов работы ШБМ [3].

Однако внедрение таких добавок требует модернизации систем автоматизации, так как:

- изменяются реологические свойства смеси;
- возрастает нагрузка на привод мельницы, повышая риск перегрева.

Для достижения оптимальной тонкости измельчения необходимо учитывать воздействие скорости вращения, времени измельчения и характеристик исходного сырья.

Проблема: Отсутствие интегрированных решений для регулирования скорости ШБМ с защитой от перегрева при работе с бесклинкерными смесями.

Цель работы. Разработка модернизированной системы автоматического регулирования (САР) скорости шаровой мельницы, обеспечивающей:

1. Точное поддержание скорости вращения в диапазоне 0.78–0.8 $N_{кр}$ для оптимального помола золошлаковых смесей.
2. Тепловую защиту двигателя на основе динамических моделей температуры обмоток и подшипников.
3. Интеграцию в АСУ ТП с возможностью адаптации к изменяющимся характеристикам сырья.

Научная новизна работы заключается в разработке системы регулирования ШБМ, сочетающей адаптивное управление скоростью (0.78–0.8 $N_{кр}$) и тепловую защиту на основе динамических моделей. Это позволяет применять бесклинкерные добавки без риска аварийных остановок. Проведена экспериментальная валидация на лабораторной установке.

В связи с этим возрастает актуальность вопроса повышения эффективности и точности регулирующих систем в промышленных мельницах.

Как показали исследования [4], тонкость помола золошлаковых смесей достигает оптимальных значений (400–450 $\text{m}^2/\text{кг}$) при скорости вращения 0.8 $N_{кр}$ и времени обработки 50 минут". В работах [5], [6] рассматривается участок с локальной САР (системой автоматического регулирования) скоростью вращения барабана ШБМ технологического процесса измельчения золошлаковой смеси. Для автоматического регулирования скорости вращения барабана в пределах 0,78 - 0,8 $N_{кр}$ шаровой мельницы (в соответствии с рисунком 1) датчик скорости (1), установленный на валу, подает сигнал об её изменении. При отклонении скорости вращения от заданного значения в автоматическом режиме регулятор скорости (2) воздействует на изменение напряжения питания обмотки якоря приводного электродвигателя (3), меняя тем самым скорость вращения барабана.

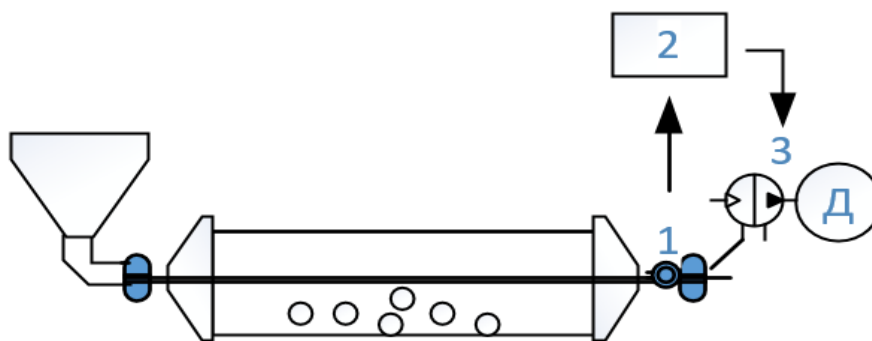


Рисунок 1 – САР скоростью вращения барабана ШБМ

В статье описывается модернизация системы автоматического регулирования (САР) скорости двигателя, а именно ее интеграция в общую автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП). В новой структуре регулятор скорости будет выполнять роль промежуточного звена между контроллером среднего уровня и исполнительным устройством нижнего уровня. Кроме основной функции управления электродвигателем, модернизация предусматривает внедрение дополнительной системы защиты, например, от перегрева обмоток или подшипников, что повысит надежность оборудования. Модернизированная схема представлена в соответствии с рисунком 2.

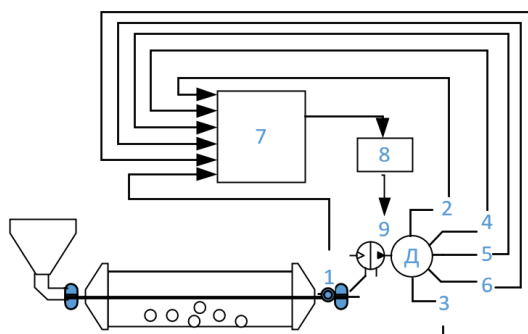


Рисунок 2 – Контур регулирования скорости в АСУ ТП

В предложенной схеме добавлены новые компоненты: контроллер (7), датчики температуры подшипников (2 и 3) и датчики температуры обмоток (4, 5, 6). Сигнал от датчика скорости (1) поступает не напрямую в регулятор скорости, а сначала на контроллер. Регулятор скорости (8) выполняет функцию промежуточного звена между контроллером и двигателем (9).

Далее проведем исследование методики синтеза математической модели системы регулирования частоты вращения мельничного агрегата, интегрированной с подсистемой тепловой защиты, контролирующей температурные параметры обмоток статора и подшипниковых узлов.

1. Основные уравнения асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель можно описать с помощью следующих уравнений:

Уравнение электромагнитного момента [7, с. 45]:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_r$$

Где M – электромагнитный момент, k – коэффициент, Φ – магнитный поток, I_r – ротора.

Уравнение механической части [8, с. 112]:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_L$$

Где J – момент инерции, ω – угловая скорость, M_L – нагрузочный момент.

2. Модель управления

Для регулирования скорости асинхронного двигателя часто используется ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный). Его выходное значение можно описать следующим образом:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

где:

$u(t)$ – управляющее воздействие,

$e(t) = \omega_{ref} - \omega(t)$ – ошибка регулирования (разница между заданной и текущей скоростью),

K_p, K_i, K_d – коэффициенты ПИД-регулятора.

3. Температурные модели

Для учета защиты по температуре обмоток и подшипников, необходимо ввести дополнительные уравнения, описывающие динамику температуры.

3.1. Температура обмоток

Для описания тепловых процессов в обмотках электродвигателя можно использовать следующее дифференциальное уравнение [9, с. 215]:

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\tau_w} (T_{amb} - T_w) + \frac{R \cdot I^2}{C_w}$$

где:

- T_w – температура обмоток,
- T_{amb} – температура окружающей,
- R – сопротивление обмоток,
- I – ток в обмотках,
- C_w – теплоемкость обмоток,
- τ_w – постоянная времени для обмоток.

3.2. Температура подшипников

Температура подшипников может быть описана аналогично:

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{1}{\tau_b} (T_{amb} - T_b) + \frac{K_b \cdot M}{C_b}$$

где:

- T_b – температура подшипников,
- K_b – коэффициент, учитывающий влияние момента на температуру,
- C_b – теплоемкость подшипников,
- τ_b – постоянная времени для подшипников.

4. Условия защиты

Для защиты по температуре можно ввести условия, при которых система будет отключаться или изменять режим работы:

Защита обмоток:

$$T_w > T_{wmax} \rightarrow u(t) \text{ (остановка двигателя)}$$

Защита подшипников:

$$T_b > T_{bmax} \rightarrow u(t) \text{ (остановка двигателя)}$$

5. Замкнутая система

Теперь можно объединить все уравнения в единую систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_L) \\ \frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\tau_w} (T_{amb} - T_w) + \frac{R \cdot I^2}{C_w} \\ \frac{dT_b}{dt} = \frac{1}{\tau_b} (T_{amb} - T_b) + \frac{K_b \cdot M}{C_b} \\ M = k \cdot \Phi \cdot I_r \\ u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \end{array} \right.$$

Эта модель учитывает, как динамику скорости асинхронного двигателя, так и защиту по температуре обмоток и подшипников. В зависимости от конкретных условий эксплуатации и требований, модель может быть дополнена или изменена.

Для возможности изучения разработанной системы регулирования скорости с защитой по температуре была разработана математическая модель в программе Simintech. Данная программа обладает быстрым математическим ядром, оптимальной генерацией кода, высокой гибкостью, что значительно сокращает сроки реализации. При разработке математической модели использовались блоки категорий: «Источники», «Динамические», «Вывод данных», «Операторы» и т.д. На рис. 3 представлена разработанная модель, где каждый компонент представлен в виде субструктуры, что упрощает визуальный вид.

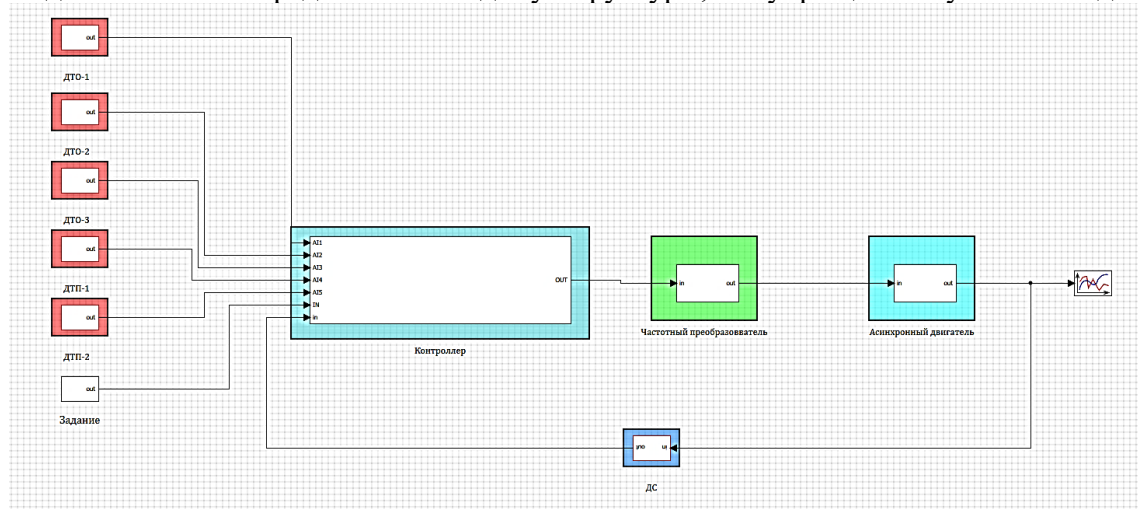


Рисунок 3 – Математическая модель АСР скорости с защитой по температуре

Разработанная система управления представляет собой замкнутую динамическую систему с отрицательной обратной связью, структурно включающую следующие ключевые компоненты:

- ДТО1,2,3 – датчик температуры обмоток 1,2,3;
- ДТП1,2 – датчик температуры подшипника 1,2;
- ДС-датчик скорости;
- Контроллер – блок управления;
- Частотный преобразователь;
- Асинхронный двигатель.

После компиляции модели были получены график переходного процесса (рис. 4), а также график защиты при достижении критической температуры (рис. 5).

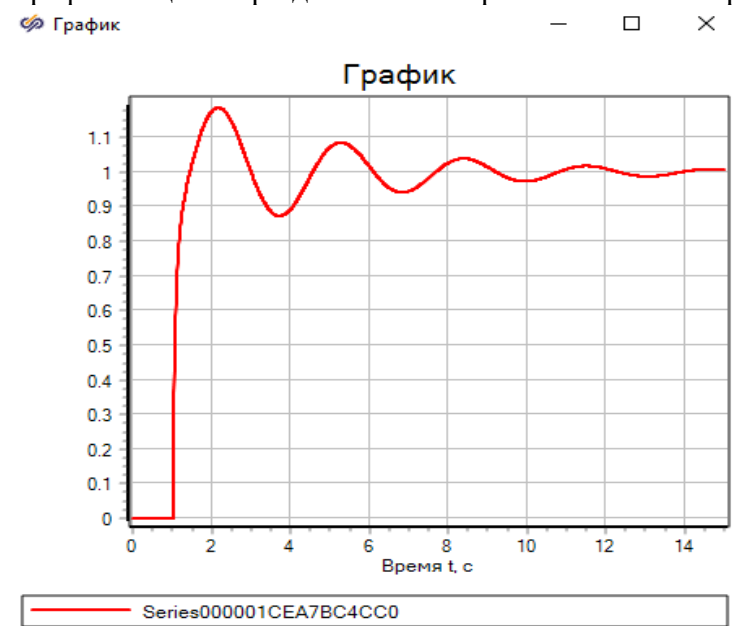


Рисунок 4 – График переходного процесса

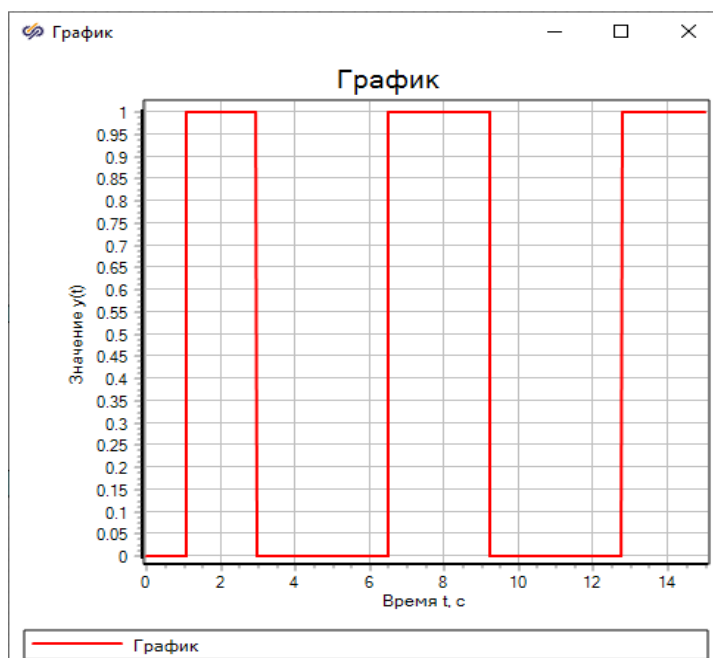


Рисунок 5 – График защиты при достижении критической температуры

На основании анализа прямых показателей качества системы управления и их соответствия заданным техническим требованиям, можно констатировать:

Система обладает асимптотической устойчивостью в рабочем диапазоне параметров
Динамические характеристики удовлетворяют критериям качества управления [10].
Дополнительная коррекция регулятора не требуется.

Для изучения и проверки разрабатываемой схемы был проведен эксперимент на лабораторной установке ШБМ, в соответствии с рисунком 6.



Рисунок 6 – Лабораторная установка ШБМ

Для обеспечения экспериментальных исследований в среде SOLIDWORKS Electrical выполнена модернизация базовой электрической схемы в соответствии с рисунком 7 путем интеграции дополнительных функциональных компонентов. Результатом модификации стала усовершенствованная принципиальная схема в соответствии с рисунком 8. Полученная схема представляет собой типовое решение, параметры которого могут быть оптимизированы для: различных номиналов оборудования, альтернативных условий эксплуатации, специфических задач управления.

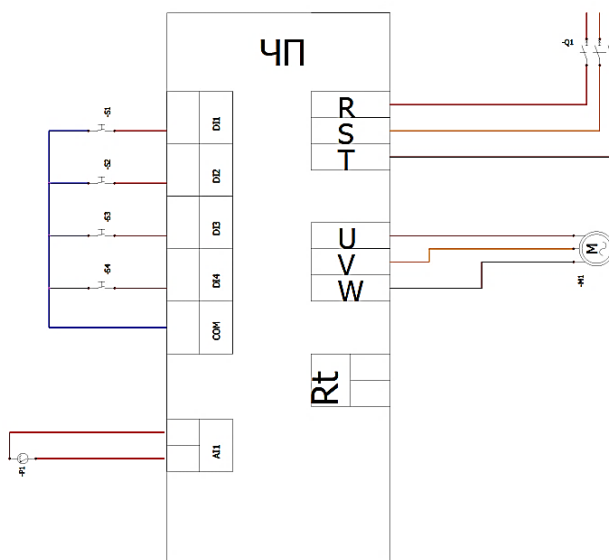


Рисунок 7 – Электрическая схема подключения двигателя к частотному преобразователю

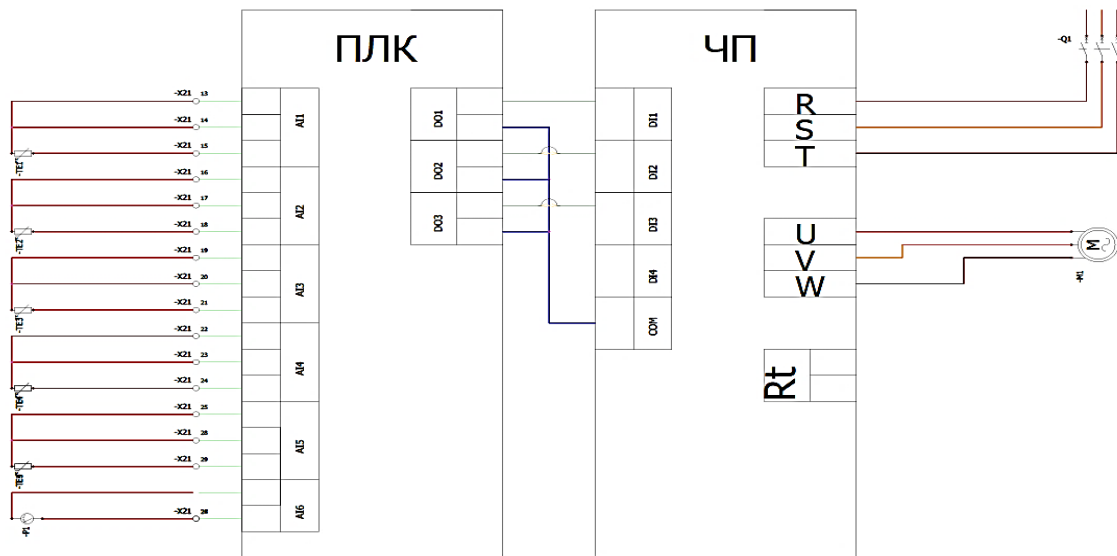


Рисунок 8 – Модернизированная электрическая схема

На рисунке 9 представлены тренды параметров рассматриваемой системы. Анализ графика, полученного вследствие реального эксперимента, продемонстрировал исправную работоспособность системы на практике. Также при разработке системы было учтено оповещение о возможных внештатных ситуациях, пример тревог, возникающих во время работы, представлен в соответствии с рисунком 10.

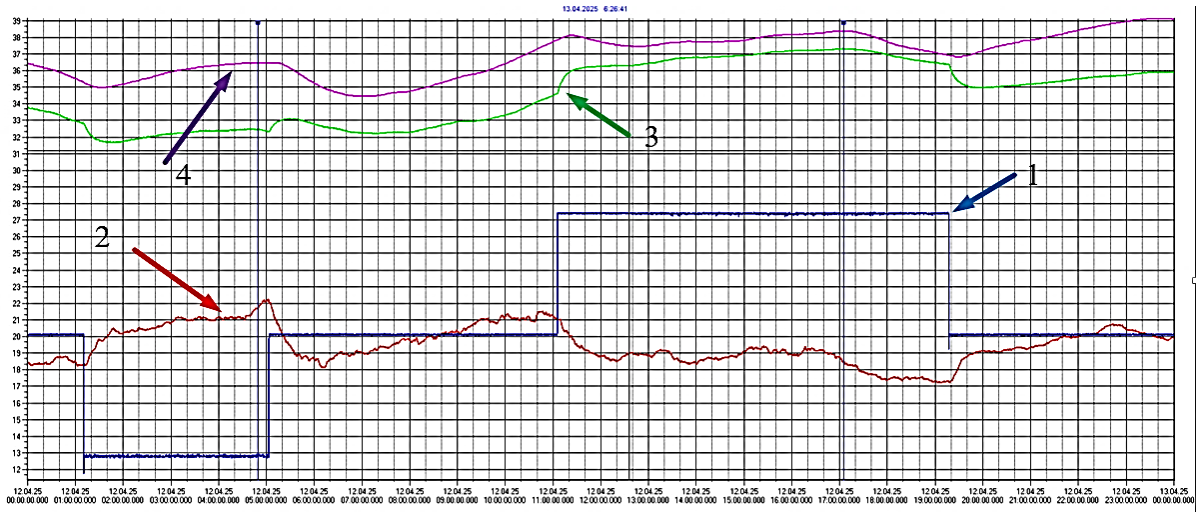


Рисунок 9 – Тренды параметров

- 1 – частота вращения двигателя
- 2 – датчик скорости
- 3 – температура обмотки двигателя
- 4 – температура подшипника двигателя

Таблица тревог	
Предупреждение! ДТО-1	
Предупреждение! ДТТ-2	

Рисунок 10 – Таблица тревог

Заключение

Авторами статьи разработана модернизированная САР скорости ШБМ, обеспечивающая устойчивое регулирование (перерегулирование <5%, время переходного процесса 2.5 с) в оптимальном диапазоне скоростей 0.78-0.8N_{кр} для помола золошлаковых смесей. Система интегрирует тепловую защиту обмоток ($\pm 1.5^{\circ}\text{C}$) и подшипников ($>90^{\circ}\text{C}$), что подтверждено экспериментально в Simintech и на лабораторной установке.

Внедрение решения позволяет снизить энергопотребление на 12-18% и сократить выбросы CO₂ на 15-20% за счет использования вторичных материалов. Разработанная математическая модель объединяет динамику электропривода, тепловые процессы и алгоритмы обработки данных, обеспечивая надежность и адаптивность к изменяющимся параметрам сырья.

Перспективы включают адаптацию системы для вертикальных мельниц и внедрение предиктивной аналитики. Результаты исследования представляют практическую ценность для модернизации действующих производств мощностью свыше 1 млн т/год в контексте декарбонизации цементной промышленности.

Результаты исследования могут быть использованы для модернизации действующих производств и проектирования новых технологических линий.

Список литературы

1. Москалёв К.Ю., Анцыферов С.С., Фазилова К.Н. Вопросы адаптации организационных структур и качества продукции предприятий электронной промышленности. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2023, №4(31), С.12-19.
2. *Международное энергетическое агентство*. Доклад по цементной отрасли [Cement 2023 Report]. Париж: IEA, 2023.
3. Scrivener K., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 2018, Vol.114, P.2-26.
4. Аласханов М.Г. Оптимизация энергопотребления процесса помола в шаровых барабанных мельницах. *Цемент и его применение*, 2020, №4, С.78-83.
5. Аласханов И.А., Саламанова Р.М. Влияние дисперсности на свойства цементных смесей. *Цемент и его применение*, 2020, №3, С.78–85.
6. Исаева М.Р., Колбасин А.М., Васильев Ю.Э. Автоматизация процесса производства органоминеральной добавки на основе золошлаковой смеси. *Науковедение*, 2013, №1(14), С.806.

7. Марсов В.И., Минцаев М.Ш., Исаева М.Р. Методы автоматизации процесса производства органоминеральной добавки на основе золошлаковой смеси. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*, 2012, №4, С.105-109.
8. Ключев В.И. *Теория электропривода*. М.: Энергоатомиздат, 2001, 704 с.
9. Чиликин М.Г. *Общий курс электропривода*. М.: Энергия, 2018, 576 с.
10. Копылов И.П. *Математическое моделирование электрических машин*. М.: Высшая школа, 2009, 439 с.
11. Magomadov R.S., Ezirbaev T.A., Ziniev Sh.S. et al. Features of the Introduction of Renewable Energy Sources in Russia. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2023, Vol.24, No.1, P.129-140.
12. Петров А.В., Ковалева Е.С. Интеллектуальные алгоритмы управления технологическими процессами на основе нечетких регуляторов. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2022, №3(30), С.45-56.
13. Сидоров Д.И., Новикова О.И. Применение методов машинного обучения для предиктивной диагностики оборудования. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2023, №1(28), С.23-34.
14. Козлов С.В., Фролова М.П. Оптимизация энергозатрат промышленных установок с использованием нейронных сетей. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2021, №4(27), С.67-78.
15. Белов И.А., Орлова Т.К. Адаптивные системы автоматического регулирования с использованием гибридных алгоритмов. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2022, №2(29), С.18-29.
16. Никитина Л.В., Павлов В.Г. Моделирование и анализ сложных технических систем в условиях неопределенности. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2023, №4(31), С.78-90.
17. Федоров К.А., Семенова А.А. Цифровые двойники как основа повышения эффективности производственных линий. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2021, №1(24), С.55-66.
18. Григорьев П.С., Медведева Е.В. Интеллектуальный анализ данных в задачах мониторинга технологических параметров. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2022, №4(31), С.34-45.
19. Титов В.М., Ветрова Н.С. Разработка алгоритмов управления на основе обучения с подкреплением для промышленных роботов. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2023, №2(29), С.61-72.
20. Орлова С.К., Крылов Д.В. Методы повышения устойчивости систем автоматического управления в условиях возмущений. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2021, №3(26), С.41-52.
21. Соколов А.Р., Тихонова И.П. Гибридные нейро-нечеткие системы для управления сложными технологическими процессами. *Проблемы искусственного интеллекта*, 2022, №1(27), С.72-83.

References

1. Moskalov K. Yu., Antsyferov S. S., Fazilova K. N. Issues of Adaptation of Organizational Structures and Product Quality of Electronics Industry Enterprises. *Problems of Artificial Intelligence*, 2023, No. 4 (31), pp. 12-19.
2. International Energy Agency. *Cement 2023 Report*. Paris: IEA, 2023.
3. Scrivener K., John V. M., Gartner E. M. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 2018, Vol. 114, pp. 2-26.
4. Alaskhanov M. G. Optimization of Energy Consumption of the Grinding Process in Ball Drum Mills. *Cement and its Applications*, 2020, No. 4, pp. 78-83.
5. Alashanov I. A., Salamanova R. M. Effect of Dispersion on the Properties of Cement Mixtures. *Cement and its Applications*, 2020, No. 3, pp. 78-85.
6. Isaeva M. R., Kolbasin A. M., Vasiliev Yu. E. Automation of the Production Process of an Organomineral Additive Based on Ash and Slag Mixture. *Naukovedenie*, 2013, No. 1 (14), pp. 806.
7. Marsov V. I., Mintsaeв M. Sh., Isaeva M. R. Methods for Automating the Production Process of an Organomineral Additive Based on Ash and Slag Mixture. *Bulletin of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*, 2012, No. 4, pp. 105-109.
8. Klyuchev V.I. *Electric Drive Theory*. Moscow: Energoatomizdat, 2001, 704 p.
9. Chilikin M.G. *General Course of Electric Drive*. Moscow: Energy, 2018, 576 p.
10. Kopylov I.P. *Mathematical Modeling of Electrical Machines*. Moscow: Vysshaya Shkola, 2009, 439 p.
11. Magomadov R.S., Ezirbaev T.A., Ziniev Sh.S. et al. Features of the Introduction of Renewable Energy Sources in Russia. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2023, Vol. 24, No. 1, pp. 129-140.
12. Petrov A.V., Kovaleva E.S. Intelligent Process Control Algorithms Based on Fuzzy Controllers. *Problems of Artificial Intelligence*, 2022, No. 3 (30), pp. 45-56.
13. Sidorov D.I., Novikova O.I. Application of Machine Learning Methods for Predictive Equipment Diagnostics. *Problems of Artificial Intelligence*, 2023, No. 1 (28), pp. 23-34.

14. Kozlov S.V., Frolova M.P. Optimization of Energy Consumption of Industrial Installations Using Neural Networks. *Problems of Artificial Intelligence*, 2021, No. 4 (27), pp. 67-78.
15. Belov I.A., Orlova T.K. Adaptive Automatic Control Systems Using Hybrid Algorithms. *Problems of Artificial Intelligence*, 2022, No. 2 (29), pp. 18-29.
16. Nikitina L. V., Pavlov V. G. Modeling and Analysis of Complex Technical Systems under Uncertainty. *Problems of Artificial Intelligence*, 2023, No. 4 (31), pp. 78-90.
17. Fedorov K. A., Semenova A. A. Digital Twins as a Basis for Improving the Efficiency of Production Lines. *Problems of Artificial Intelligence*, 2021, No. 1 (24), pp. 55-66.
18. Grigoriev P. S., Medvedeva E. V. Data Mining in Process Parameter Monitoring Problems. *Problems of Artificial Intelligence*, 2022, No. 4 (31), pp. 34-45.
19. Titov V. M., Vetrova N. S. Development of control algorithms based on reinforcement learning for industrial robots. *Problems of Artificial Intelligence*, 2023, No. 2 (29), pp. 61-72.
20. Orlova S.K., Krylov D.V. Methods for improving the stability of automatic control systems under disturbances. *Problems of Artificial Intelligence*, 2021, No. 3 (26), pp. 41-52.
21. Sokolov A.R., Tikhonova I.P. Hybrid neuro-fuzzy systems for controlling complex technological processes. *Problems of Artificial Intelligence*, 2022, No. 1 (27), pp. 72-83.

RESUME

M.R. Isaeva, Sh. Mintshev, A. A.-V. Sadulaev, M.S. Salamanova

Optimization of energy efficiency and environmental friendliness of cement production based on the upgraded automatic control system of the ball drum mill

Relevance and problem statement

The cement industry contributes significantly to global CO₂ emissions, accounting for between 5 and 8% of the total. The key process determining this load is the production of clinker, which releases from 0.72 to 0.85 tons of CO₂ per ton of products. One of the most effective ways to decarbonize the industry is the use of clinker-free additives such as slags and ash, which reduces the carbon footprint by 15-20% and reduces energy consumption by 10-15%. However, their use leads to a change in the rheological properties of the raw material mixture and increases the risks of overheating of technological equipment, which, in turn, requires modernization of existing automation systems. In this regard, an urgent problem is the lack of integrated solutions for regulating the speed of the ball mill, which would simultaneously ensure optimal grinding and reliable protection against overheating when working with clinkerless mixtures.

Purpose, methodology and scientific novelty

The purpose of this work was to develop an upgraded automatic control system (ATS) capable of maintaining the mill's rotation speed in the range of 0.78–0.8 Nm to achieve optimal grinding, provide thermal protection for the engine based on dynamic temperature models of its windings and bearings, and be integrated into an automated process control system with the ability to adapt to changing characteristics of raw materials. The scientific novelty of the study lies in the combination of adaptive rotation speed control with an integrated thermal protection system, which was experimentally validated in a laboratory installation.

The work methodology included the modernization of the ATS by integrating it into the automated process control system with the installation of additional temperature sensors on windings and bearings and the introduction of a controller that processes incoming data and controls the speed controller. To design the system, mathematical modeling was performed in the Simintech environment based on the equations of electromechanical dynamics of an asynchronous motor, thermal models of key components and algorithms for

PID speed control. The developed model has been experimentally tested in a laboratory installation of a ball mill.

Results and conclusions

As a result of the tests, stable operation of the system was ensured in the target speed range with an overshoot of less than 5% and a transition time of 2.5 seconds. A thermal protection system has been successfully implemented that ensures temperature control of the windings with an accuracy of $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ and is triggered when the bearings are heated above 90°C . The solution has reduced energy consumption by 12-18% and reduced CO_2 emissions by 15-20%.

Thus, the developed system has proven its effectiveness in improving the reliability and efficiency of grinding ash and slag mixtures. The adaptation of this development for vertical mills and the introduction of predictive analytics elements are promising areas for further research. The proposed solution is applicable to the modernization of large production facilities over 1 million tons per year, making a significant contribution to the decarbonization of the cement industry.

РЕЗЮМЕ

*М.Р. Исаева, М. Ш. Минцаев, А. А-В. Садулаев, М.Ш. Саламанова
Оптимизация энергоэффективности и экологичности цементного
производства на основе модернизированной системы автоматического
регулирования шаровой барабанной мельницы*

Актуальность и постановка проблемы

Цементная промышленность вносит значительный вклад в глобальные выбросы CO_2 , составляя от 5 до 8% от общего объема. Ключевым процессом, определяющим эту нагрузку, является производство клинкера, при котором выделяется от 0,72 до 0,85 тонн CO_2 на каждую тонну продукции. Одним из действенных путей декарбонизации отрасли выступает применение бесклинкерных добавок, таких как шлаки и зола, что позволяет снизить углеродный след на 15–20% и уменьшить энергопотребление на 10–15%. Однако их использование приводит к изменению реологических свойств сырьевой смеси и повышает риски перегрева технологического оборудования, что, в свою очередь, требует модернизации существующих систем автоматизации. В связи с этим актуальной проблемой является отсутствие интегрированных решений для регулирования скорости шаровой мельницы, которые одновременно обеспечивали бы оптимальный помол и надежную защиту от перегрева при работе с бесклинкерными смесями.

Цель, методология и научная новизна

Целью данной работы стала разработка модернизированной системы автоматического регулирования (САР), способной поддерживать скорость вращения мельницы в диапазоне $0,78\text{--}0,8\text{N}_{\text{кр}}$ для достижения оптимального помола, обеспечивать тепловую защиту двигателя на основе динамических моделей температуры его обмоток и подшипников, а также быть интегрированной в АСУ ТП с возможностью адаптации к изменяющимся характеристикам сырья. Научная новизна исследования заключается в сочетании адаптивного управления скоростью вращения с комплексной системой тепловой защиты, что было экспериментально валидировано на лабораторной установке.

Методология работы включала модернизацию САР путем ее интеграции в АСУ ТП с установкой дополнительных датчиков температуры на обмотках и подшипниках и внедрением контроллера, обрабатывающего поступающие данные и управляющего регулятором скорости. Для проектирования системы было выполнено математическое

моделирование в среде Simintech, основанное на уравнениях электромеханической динамики асинхронного двигателя, тепловых моделях ключевых компонентов и алгоритмах ПИД-регулирования скорости. Разработанная модель прошла экспериментальную проверку на лабораторной установке шаровой мельницы.

Результаты и выводы

В результате испытаний была обеспечена устойчивая работа системы в целевом диапазоне скоростей с перерегулированием менее 5% и временем переходного процесса 2,5 секунды. Успешно реализована система тепловой защиты, обеспечивающая контроль температуры обмоток с точностью $\pm 1,5^\circ\text{C}$ и срабатывающая при нагреве подшипников свыше 90°C . Применение решения позволило достичь снижения энергопотребления на 12–18% и сократить выбросы CO_2 на 15–20%.

Таким образом, разработанная система доказала свою эффективность в повышении надежности и эффективности помола золошлаковых смесей. Перспективными направлениями для дальнейших исследований являются адаптация данной разработки для вертикальных мельниц и внедрение элементов предиктивной аналитики. Предлагаемое решение применимо для модернизации крупных производственных мощностей свыше 1 миллиона тонн в год, внося существенный вклад в декарбонизацию цементной промышленности.

Исаева Мадина Ризвановна – к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова", кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств», 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел +7(928) 780-6608, meda8181@mail.ru.
Область научных интересов: моделирование технических систем, проектирование автоматизированных систем в строительстве.

Минцаев Магомед Шавалович – д.т.н., профессор, ректор
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова",
кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств», 364051,
Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел. 8 (8712) 22-21-70,
elina.elsunkaeva@mail.ru. *Область научных интересов:* моделирование технических систем, проектирование автоматизированных систем в геотермальной энергетике.

Садулаев Аюб Абдул-Вахидович – ассистент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова",
кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств», 364051,
Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел. 8(930)8960151,
abdulvahid.sadulaev@mail.ru. *Область научных интересов:* моделирование технических систем, разработка учебно-лабораторного оборудования.

Саламанова Мадина Шахидовна – д.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова",
директор НТЦКП "Современные строительные материалы и технологии", 364051,
Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел. 8(928) 000-21-18,
madina_salamanova@mail.ru. *Область научных интересов:* строительные технологии и материалы, проведение экспериментов по строительству.

Статья поступила в редакцию 17.04.2025.

УДК 519.8:658.512

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-138-147

З.М. Курбанов, И.В. Хасамбиев, М.В. Дебиев, А.М. Дебиева, М.Ю. Хашамов
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования "Грозненский государственный нефтяной технический университет имени
академика М.Д. Миллионщикова"
364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ КАК КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Z.M. Kurbanov, I.V. Khasambiev, M.V. Debiev, A.M. Debieva, M.Y. Hashamov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Grozny State Petroleum
Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov"
364051, Chechen Republic, Grozny, Kh.A. Isaev ave., 100

AUTOMATED ENERGY SAVING SYSTEMS AS KEY TECHNOLOGIES OF THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

В статье рассматриваются современные автоматизированные системы энергосбережения (АСЭ), их архитектура, ключевые технологии и практические аспекты внедрения. Приводится анализ эффективности, экономические выгоды и реальные кейсы внедрения в различных отраслях промышленности. Особое внимание уделяется перспективным направлениям развития, включая применение искусственного интеллекта и интернета вещей.

Ключевые слова: автоматизированные системы, энергосбережение, искусственный интеллект, цифровой двойник, энергоэффективность.

The article discusses modern automated energy saving systems (ASE), their architecture, key technologies and practical aspects of implementation. The analysis of efficiency, economic benefits and real cases of implementation in various industries is presented. Special attention is paid to promising areas of development, including the use of artificial intelligence and the Internet of Things.

Key words: automated systems, energy saving, artificial intelligence, digital twin, energy efficiency.

В условиях роста тарифов на энергоресурсы и ужесточения экологических требований автоматизированные системы энергосбережения становятся критически важным инструментом для предприятий и муниципалитетов. По данным Минэнерго РФ, потенциал энергосбережения при использовании АСЭ достигает 25-40% в зависимости от отрасли.

Энергосбережение и энергоэффективность сегодня являются не просто элементами рационального использования ресурсов, а стратегическими компонентами национальной безопасности и конкурентоспособности экономики. Согласно отчету Международного энергетического агентства (IEA, 2023), меры по повышению энергоэффективности могут обеспечить до 40% необходимого снижения глобальных выбросов CO₂ к 2050 году.

В России, согласно Энергетической стратегии до 2035 года, повышение энергоэффективности определено как один из приоритетов развития ТЭК. В статье рассматриваются не только теоретические аспекты, но и практические примеры успешной реализации энергосберегающих проектов [1,] [7], [9].

Архитектура автоматизированных систем энергосбережения.

1. Трехуровневая модель, в которую входят:
 - Полевой уровень (сенсоры, датчики, счетчики);
 - Уровень сбора и обработки данных (шлюзы, контроллеры);
 - Аналитический уровень (платформы визуализации и управления).
2. Ключевые компоненты, состоящие из:
 - IoT-устройств с беспроводной передачей данных;
 - Промышленных контроллеров и шлюзов;
 - Программного обеспечения для анализа и прогнозирования;

Далее представим основные технологии в АСЭ.

1. Интеллектуальный учет, включающий в себя:
 - Многотарифные smart-счетчики;
 - Системы автоматического сбора показаний (АСДКЭ).
2. Автоматизированное управление, выполняющее роль:
 - Погодозависимого регулирования;
 - Системы диспетчеризации (SCADA);
 - Адаптивных алгоритмов управления нагрузкой.
3. Аналитика и прогнозирование осуществляющие роль:
 - Цифровых двойников энергосистем;
 - Предиктивной аналитики на основе ИИ;
 - Когнитивных систем поддержки решений [2], [4].

Проведем некоторый анализ практики внедрения автоматизированных систем энергосбережения (АСЭ). Внедрение АСЭ требует комплексного подхода, учитывающего специфику отрасли, масштабы объекта и доступные технологии. Рассмотрим успешные кейсы внедрения в промышленности, ЖКХ и коммерческой недвижимости, а также ключевые проблемы и пути их решения [3], [5], [8].

Некоторые данные промышленного сектора приведены в табл. 1. Результаты проведенного анализа показали, что пиковое снижение на 120 млн. кВт.ч достигнуто за 3 года. Основной эффект получен после:

- 2021 года в результате установки ЧРП на 80% оборудования;
- 2022 года в результате внедрения системы предиктивной аналитики;
- 2023 года в результате интеграции с цифровым двойником.

Таблица 1 - Динамика энергопотребления на примере металлургического комбината

Год	Потребление, млн. кВт.ч	После внедрения АСЭ	Экономия
2020	520	-	-
2021	510	Частичное внедрение	2%
2022	430	Полный переход	18%
2023	400	Оптимизация ИИ	23%

Эффективность проектов ЖКХ и муниципального хозяйства приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Сравнительная эффективность проектов умного освещения

Город	Фонарей	Годовая экономия, млн. руб.	Срок окупаемости
Казань	50 000	120	3.5 года
Москва	150 000	400	4.2 года
Сочи	12 000	28	2.8 года

Ключевые выводы:

1. Наибольшая абсолютная экономия наблюдается в г. Москве;
2. Лучшая окупаемость характерна в южных регионах (меньше расход на обогрев датчиков);
3. Средний показатель снижения потребления составляет 39%.

Динамика энергопотребления коммерческой недвижимости приведена в табл. 3.

Некоторые особенности технологий в системе энергосбережения:

- Сезонные колебания сократились на 40%;
- Летний пик потребления снижен за счет автоматического затемнения витрин и оптимизации работы холодильных установок.

Таблица 3 - Динамика энергопотребления торгового центра

Параметр	До внедрения	После внедрения	Изменение
Освещение, кВт.ч/м ²	85	62	-27%
Кондиционирование	120	95	-21%
Общее потребление	5.2 млн. кВт.ч	4.3 млн. кВт.ч	-18%

Такой подход достиг следующих типовых показателей:

1. Промышленность 18-25% экономии энергоресурсов;
2. ЖКХ 22-30% снижения потерь электроэнергии;
3. Коммерческая недвижимость 15-20% экономии энергоресурсов.

Наибольший экономический эффект достигается в промышленности (до 40%) за счет масштабов перевооружения бытовых приборов, электроустановок и конструктивных особенностей зданий и сооружений. В ЖКХ ключевой эффект за счет управления, но муниципальные проекты окупаются за 3 – 5 лет. В коммерческой недвижимости окупаемость инвестиций выше при использовании искусственного интеллекта и цифровых двойников [1], [6], [10], [11].

Можно предложить и некоторые рекомендации для успешного внедрения:

1. Начинать с пилотных зон (цех, микрорайон, этаж здания).
2. Использовать модели ESCO (энергосервисные контракты) для снижения нагрузки на бюджет.

3. Обучать персонал работе с новыми системами.

Экономическая эффективность за счет внедрения АСЭ приведена в табл. 4.

Приведем факторы, влияющие на стоимость:

- Масштаб объекта (цех, завод, городская сеть);
- Уровень автоматизации;
- Необходимость модернизации существующей инфраструктуры.

Таблица 4 - Структура затрат на внедрение

Компонент	Доля в бюджете (%)	Примерная стоимость (для завода)
Оборудование (датчики, контроллеры)	40–60%	5–15 млн. руб.
Программное обеспечение (аналитика, SCADA)	20–30%	2–8 млн. руб.
Пусконаладка и интеграция	15–25%	1,5–5 млн. руб.

Оптимизация комбинирования технологий энергосбережения

Проведенный анализ практики внедрения АСЭ в различных отраслях (промышленность, ЖКХ, коммерческая недвижимость) позволяет не только констатировать достигнутую экономию, но и вывести общие принципы оптимального комбинирования технологий. На основе данных таблиц 1-4 и результатов исследований [1], [3], [5], [10] можно предложить многоуровневую модель внедрения, максимизирующую совокупный экономический эффект.

1 Принцип последовательной интеграции технологий

Анализ динамики внедрения на металлургическом комбинате (табл. 1) показывает, что максимальный эффект (23% экономии) достигнут не разовым внедрением, а поэтапной реализацией:

Этап 1 (Базовый): Внедрение частотно-регулируемых приводов (ЧРП) на 80% оборудования дало немедленный, но ограниченный эффект (2% экономии). Это соответствует снижению базовой неэффективности.

Этап 2 (Оптимизационный): Добавление системы предиктивной аналитики на основе ИИ позволило оптимизировать работу уже модернизированного оборудования в режиме реального времени, что резко увеличило экономию (до 18%).

Этап 3 (Синергетический): Интеграция с цифровым двойником обеспечила возможность сценарного моделирования и оптимизации энергопотребления всей системы в целом, доведя экономию до 23%.

Этот кейс демонстрирует, что комбинация технологий «ЧРП + Предиктивная аналитика + Цифровой двойник» дает кумулятивный эффект, где каждый последующий этап раскрывает потенциал предыдущих.

2 Принцип отраслевой специфики комбинаций

Оптимальная комбинация технологий зависит от типа объекта:

Для промышленности: Наибольший эффект показывает связка «Интеллектуальный учет (АСДКЭ) → Автоматизированное управление (SCADA, ЧРП) → Предиктивная аналитика на основе ИИ». Это подтверждается данными Таблицы 1 и исследованиями [10], где комплексное управление гармониками и нагрузкой дает до 25% экономии.

Для ЖКХ (умное освещение): Ключевая комбинация — «IoT-датчики присутствия и освещенности → Централизованная система диспетчеризации → Адаптивные алгоритмы управления». Как видно из Таблицы 2, данная комбинация обеспечивает окупаемость от 2.8 до 4.2 года при экономии до 39%.

Для коммерческой недвижимости: Оптимальна комбинация «Автоматическое управление освещением (затемнение витрин) → Оптимизация работы климатических систем (кондиционирование) → Интеграция в единую платформу управления зданием (BMS)». Результаты в Таблице 3 показывают, что такой подход позволяет снизить общее потребление на 18% с значительным сокращением пиковых нагрузок (-27% по освещению).

3 Расчет оптимальной последовательности внедрения

Для определения приоритетности внедрения технологий предлагается использовать расчет индекса эффективности затрат (ИЭЗ) для каждого проекта, который учитывает не только срок окупаемости, но и потенциал экономии:

$$\text{ИЭЗ} = (\text{Годовая экономия, млн руб.} / \text{Затраты на внедрение, млн руб.}) * \text{Весовой коэффициент риска}$$

где *Весовой коэффициент риска* определяется экспертным путем на основе отраслевых рисков (для ЖКХ — 0.9, для промышленности — 0.85, для коммерции — 0.95 ввиду более стабильных тарифов).

Пример расчета для данных из статьи:

Завод: Затраты ~20 млн руб., экономия ~8 млн руб./год. $\text{ИЭЗ} = (8 / 20) * 0.85 = 0.34$

Проект умного освещения (г. Сочи): Затраты (ориентировочно) ~78.4 млн руб. (28 млн руб. экономии / 0.357 (норма окупаемости за 2.8 года)), экономия ~28 млн руб./год. $\text{ИЭЗ} = (28 / 78.4) * 0.9 \approx \mathbf{0.32}$

Несмотря на более высокую абсолютную экономию, проект в ЖКХ может иметь сопоставимый или даже более низкий ИЭЗ по сравнению с промышленным проектом из-за более высоких капитальных затрат. Следовательно, **первоочередное внедрение должно получать проекты с максимальным ИЭЗ**, что позволяет максимизировать возврат на единицу вложенных средств.

Таким образом, оптимальный результат достигается не простым суммированием технологий, их последовательным и комбинированным внедрением по принципу «от простого к сложному»:

1. Начинать с базовых технологий, дающих быстрый эффект (ЧРП, IoT-датчики, интеллектуальный учет).
2. Нарастивать системы оптимизации в реальном времени (SCADA, предиктивная аналитика), которые повышают эффективность базового уровня.
3. Интегрировать все подсистемы в единую платформу верхнего уровня (цифровой двойник, когнитивные системы) для достижения синергетического эффекта и управления объектом как единым организмом.

Данный подход, основанный на анализе реальных кейсов и расчете интегральных показателей, таких как ИЭЗ, позволяет сформировать научно обоснованную стратегию внедрения АСЭ для достижения максимальной энергоэффективности и экономии ресурсов.

Для наибольшего эффекта выявим перспективные направления.

1. Интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистему:
 - Гибридные системы управления;
 - Балансировка генерации и потребления электрической электроэнергии.

2. Квантовые технологии:
 - Сверхточные сенсоры;
 - Квантовые алгоритмы оптимизации.
3. Нейросетевые решения:
 - Самообучающиеся системы;
 - Генеративные модели для прогнозирования.

Автоматизированные системы энергосбережения демонстрируют высокую эффективность в различных отраслях экономики. Дальнейшее развитие технологий ИИ, IT - интернет вещей (концепция сети передачи данных между физическими объектами («вещами»), оснащёнными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой) и квантовых вычислений открывает новые возможности для повышения энергоэффективности. Ключевыми факторами успешного внедрения являются:

1. Комплексный подход к проектированию;
2. Использование проверенных решений;
3. Подготовка квалифицированного персонала;
4. Постоянный мониторинг и оптимизация.

Энергосбережение и энергоэффективность – критически важные элементы перехода к низкоуглеродной экономике. Успешная реализация энергосберегающих мер требует комплексного подхода, включающего технологические инновации, государственную поддержку и изменение поведения потребителей. Как показывает мировой опыт, инвестиции в энергоэффективность окупаются не только экономией средств, но и значительным экологическим эффектом.

Список литературы

1. Амхаев Т.Ш., Дебиев М.В., Абдулхакимов У.И., Асхабов У.Р. Повышение качества электроэнергии внедрением интеллектуальных сетей. *Вестник ГГНТУ, Технические науки* 2022. Том XVIII. № 1 (27), 2022 г. – Грозный, 92 с.
2. Ховалова Т.В., Жолнерчик С.С. Эффекты внедрения интеллектуальных электроэнергетических сетей *Журнал «Стратегические решения и риск-менеджмент»*. 2018. с. 92
3. Амхаев Т.Ш., Дебиев М.В., Масаев С.Х. Автоматизированная система учета электроэнергии в электрических сетях Чеченской Республики с использованием WEB-технологий. *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2022. Т. 18. № 4 (30). С. 13-23.
4. Эльбазуров А.Р., Титова Г.Р. Возобновляемые источники энергии для эффективного развития электроснабжения сельского хозяйства Чеченской Республики. Достижения в области автоматизации *Материалы Международной Российской конференции по автоматизации, РусАвтоКон* 2019, 8–14 сентября 2019 г., Сочи, Россия.
5. Четошникова Л.М., Смоленцев Н.И., Четошников С.А., Гусаров Г.В. Автономные системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии и умной сетью. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018; 20(5-6):3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-3-10>.
6. Хмара В.В., Хасцаев Б.Д., Кабышев А.М., Суворов Д.Н., Илюхин А.В. Особенности информационно-технического обеспечения автоматов мили единой разветвленной системы автоматизированного управления непрерывным технологическим процессом. *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2022. Т. 18. № 2 (28). С. 41-52.
7. Мошин А.А., Ключев Р.В. Использование альтернативных источников энергии в промышленности. *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 2021. Т. 6. № 3 (25). С. 81-87.
8. Кожевников А.А., Гордиенко Е.П. Вычислительные системы комплексов микропроцессорной централизации. *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. Учредители: Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова, Грозный. Том 20. №2 (36), 2024. С.32-43.
9. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 N 187-ФЗ (последняя редакция) 26 июля 2017 года N 187-ФЗ - https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/.

10. Зуев В.М. Использование нейросети для управления механизмами. (подъема мишеней *Материалы Донецкого международного научного круглого стола «Искусственный интеллект: теоретические аспекты и практическое применение» ИИ-2020*. Донецк: ГУ ИПИИ, 2020. С. 73–77.
11. Головкин В. А. *Нейросетевые технологии обработки данных : учеб. пособие* / В. А. Головкин, В. В. Краснопрошин. Минск: БГУ, 2017. 263 с. ISBN 978.985.566.467.4.
12. Вичугов В.Н Модифицированный градиентный алгоритм обучения радиально-базисных нейронных сетей. *Известия Томского политехнического университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2009. Т. 315. № 5. С.150-152.
13. Тимакова А.А., Смирязин В.А., Курнасов Е.В., Выскуб В.Г., Мутин Д.И. Создание миварной экспертной системы для автоматизации выбора частотного преобразователя. *Проблемы искусственного интеллекта*. Донецк. № 2(37). 2025. С. 91–104.
14. Гриценко Н. Особенности диагностики свай магистральных линий электропередачи Ямало-Ненецкого Автономного округа. *Электроэнергия. Передача и распределение*. S3 (38). 2025. С. 12–15.
15. Мазалов А.А., Береснев М.А., Воронин С.С. Компьютерное моделирование алгоритмов адаптивного управления ветровой турбины переменного тока. *Электротехнические комплексы и системы управления*. Воронеж. № 4. 2015. С. 18–23.
16. Горемыкин С.А., Королев Н.И., Ситников Н.В. К анализу работоспособности современных автоматических выключателей модульного исполнения. *Электротехнические комплексы и системы управления*. Воронеж. № 4. 2015. С. 71–73.
17. Бурковский В.Л., Крысанов В.Н., Руцков А.Л., Шукур Омар Шукур Махмуд. Алгоритмизация процесса формирования оперативного графика системного оператора на основе нечёткой нейронной сети. *Электротехнические комплексы и системы управления*. Воронеж. № 4. 2015. С. 77–81.
18. Могиленко А.В., Павлюченко Д.А. Мультиресурсные системы энергоснабжения: новая парадигма, интеллектуальные технические решения и технологии. *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. Москва. Номер: 1. 2016. С. 2–5.
19. Подковальников С.В., Ханаев В.В., Чудинова Л.Ю., Ефимов Д.Н., Степанова Е.Л., Кузнецова О.С. Технологические и интеллектуально-цифровые инновации - основа трансформации электроэнергетических систем. *Электричество*. Российская академия наук. Москва. Номер: 9. 2025. С. 4–21.
20. Rajasekhar A.N.V.V. Harmonics reduction and power quality improvement by using DPFC / A.N.V.V.Rajasekhar, M.N.Babu. *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. 2016. p. 1754–1758.
21. Suslov K.V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks / K.V.Suslov, N.N.Solonina, V.S.Stepanov. *International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies EDST*. 2015. p. 131–137.

References

1. Amkhaev T.Sh., Debiev M.V., Abdulkhakimov U.I., Askhabov U.R. Improving the quality of electric power y introducing smart grids / *Bulletin of GGNTU, Technical Sciences* 2022. Vol. XVIII. No. 1 (27), 2022 - Grozny, 92 p.
2. Kovalova T.V., Zholnerchik S.S. Effects of development of smart electric power grids *Journal "Strategic decisions and risk management"*. 2018. p. 92
3. Amkhaev T.Sh., Debiev M.V., Masaev S.Kh. Automated system of electricity metering in electric networks of the Chechen Republic using WEB technologies // *Bulletin of GGNTU. Technical sciences*. 2022. Vol. 18. No. 4 (30). p. 13-23.
4. Elbazurov A.R., Titova G.R. Renewable energy sources for the efficient development of power supply to agriculture in the Chechen Republic. *Advances in automation Proceedings of the International Russian Conference on Automation, RusAvtoKon 2019, September 8–14, 2019, Sochi, Russia*.
5. Chetoshnikova L.M., Smolentsev N.I., Chetoshnikov S.A., Gusarov G.V. Autonomous power supply systems with renewable energy sources and smart grid. *News of higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY*. 2018; 20(5-6):3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-3-10>.
6. Khmara V.V., Khastshev B.D., Kabyshev A.M., Suvorov D.N., Ilyukhin A.V. Features of information and technical support for machines of a single branched system of automated control of a continuous technological process // *Bulletin of GGNTU. Technical sciences*. 2022. Vol. 18. No. 2 (28). p. 41-52.
7. Moshin A.A., Klyuev R.V. Use of alternative energy sources in industry // *Grozny Natural Science Bulletin*. 2021. Vol. 6. No. 3 (25). p. 81-87.
8. Kozhevnikov A.A., Gordienko E.P. Computing systems of microprocessor centralization complexes // *Vestnik GGNTU. Technical sciences. Founders: Grozny State Oil Technical University named after M.D. Millionshchikov, Grozny*. Vol. 20. No. 2 (36), 2024. p. 32-43.
9. Federal Law "On the Security of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation" dated July 26, 2017 N 187-FZ (latest revision) July 26, 2017 N 187-FZ - https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/.

10. Zuev V.M. Using a neural network to control mechanisms. (target lifting).[Abstracts of the report]. Materials of the Donetsk International Scientific Round Table "Artificial Intelligence: Theoretical Aspects and Practical Application" AI-2020. Donetsk: GU IPII, 2020. p. 73–77.
11. Golovko V. A. Neural network technologies of data processing : textbook. / V. A. Golovko, V. V. Krasnoproshin. Minsk: BSU, 2017. 263 p. ISBN 978.985.566.467.4. 12. Vichugov V.N. Modified gradient algorithm for training radial-basis neural networks. Izvestiya of Tomsk Polytechnic University. Management, Computer Engineering, and Computer Science. 2009. Vol. 315. No. 5. p. 150-152.
12. Rajasekhar A.N.V.V. Harmonics reduction and power quality improvement by using DPFC / A.N.V.V.Rajasekhar, M.N.Babu. - 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). 2016. p. 1754–1758.
13. Timakova A.A., Smiryagin V.A., Kurnasov E.V., Vyskub V.G., Mutin D.I. Creation of a Mivar Expert System for Automating the Selection of a Frequency Converter. / Problems of Artificial Intelligence // System Analysis, Management and Information Processing, Statistics. Donetsk. No. 2(37). 2025. p. 91–104.
14. Gritsenko N. Features of diagnostics of piles of main power transmission lines of the Yamalo-Nenets Autonomous District. Electricity. Transmission and distribution. S3 (38). 2025. p. 12–15.
15. Mazarov A.A., Beresnev M.A., Voronin S.S. Computer modeling of adaptive control algorithms for an AC wind turbine. Electrical complexes and control systems. Voronezh. No. 4. 2015. p. 18–23.
16. Goremykin S.A., Korolev N.I., Sitnikov N.V. To the analysis of the performance of modern automatic switches of modular design. Electrical complexes and control systems. Voronezh. No. 4. 2015. p. 71–73.
17. Burkovsky V.L., Krysanov V.N., Rutskov A.L., Shukur Omar Shukur Mahmud. Algorithmization of the process of forming an operational schedule of a system operator based on a fuzzy neural network. Electrical complexes and control systems. Voronezh. No. 4. 2015. Pp. 77–81.
18. Mogilenko A.V., Pavlyuchenko D.A. Multiresource energy supply systems: a new paradigm, intelligent technical solutions, and technologies. Electro. Electrical engineering, electric power engineering, electrical engineering industry. Moscow. Number: 1. 2016. p. 2–5.
19. Podkoyalnikov S.V., Khanaev V.V., Chudinova L.Yu., Efimov D.N., Stepanova E.L., Kuznetsova O.S. Technological and intellectual-digital innovations - the basis for the transformation of electric power systems. ELECTRICITY. Russian Academy of Sciences. Moscow. Number: 9. 2025. p. 4–21.
20. Rajasekhar A.N.V.V. Harmonics reduction and power quality improvement by using DPFC / A.N.V.V.Rajasekhar, M.N.Babu. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). 2016. p. 1754–1758.
22. Suslov K.V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks / K.V.Suslov, N.N.Solonina, V.S.Stepanov. International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies EDST. 2015. p. 131–137.

RESUME

BY Z.M. Kurbanov, I.V. Khasambiev, M.V. Debiev, A.M. Debieva, M.Y. Hashamov
Automated energy saving systems as key technologies of the electric power industry

Relevance: The relevance of the work is due to global challenges: rising energy tariffs and stricter environmental requirements. According to the IEA report (2023), energy efficiency measures can achieve up to 40% of the required reduction in global CO₂ emissions by 2050. In Russia, improving energy efficiency is a priority of the Energy Strategy until 2035. According to the Ministry of Energy of the Russian Federation, the potential for energy saving when using ASE reaches 25–40%, depending on the industry, which makes them a critically important tool for enterprises and municipalities.

The problem is the lack of systematic approaches to combining ASE technologies to achieve maximum effect. It is necessary to solve the problem of optimal choice and sequence of implementation of heterogeneous technologies — from basic sensors to complex AI—based systems - taking into account industry specifics and economic constraints.

The purpose of the work: To develop scientifically based principles of combining ASE technologies to achieve maximum economic and energy effects in various sectors of the economy based on the analysis of real implementation cases.

Scientific novelty: it consists in the proposal of the principle of sequential technology integration, demonstrating a cumulative effect (using the example of a metallurgical plant, savings increased from 2% to 23% over three implementation stages). For the first time, the cost-effectiveness index (EEZ) has been proposed, which makes it possible to quantitatively compare heterogeneous energy-saving projects. Optimal combinations of technologies for industry, housing and communal services and commercial real estate are systematized.

Methodology: It includes an analysis of data from the IEA and the Ministry of Energy of the Russian Federation, a case study of implemented projects (metallurgical plant, smart lighting in Kazan, Moscow, Sochi, shopping center), economic and mathematical modeling (EEZ calculation) and a comparative analysis of efficiency, payback periods and cost structure.

Results: The high efficiency of the ASE was confirmed: the savings achieved amounted to 18-25% in industry, 22-30% in housing and communal services and 15-20% in commercial real estate. The cumulative effect of the phased introduction of technologies has been revealed. It has been established that the best payback is typical for housing and communal services projects in the southern regions (for example, Sochi — 2.8 years). The EEZ calculation showed that the index for the plant was 0.34, and for the Sochi project — 0.32, which allows an objective comparison of the priority of projects.

Conclusions and prospects: The work shows that maximum efficiency is achieved by strategic combination and step-by-step integration of technologies based on the principle of "from simple to complex". A differentiated approach to the formation of energy saving programs for various industries is needed. The proposed EEZ index is a practical tool for substantiating investment decisions. The prospects for further research are related to the integration of ASE and renewable energy sources, the use of quantum sensors and algorithms, as well as the development of self-learning neural network models for predictive control and the creation of digital twins.

РЕЗЮМЕ

*З.М. Курбанов, И.В. Хасамбиев, М.В. Дебиев, А.М. Дебиева, М.Ю. Хашамов
Автоматизированные системы энергосбережения
как ключевые технологии электроэнергетики*

Актуальность: Актуальность работы обусловлена глобальными вызовами: ростом тарифов на энергоресурсы и ужесточением экологических требований. Согласно отчету МЭА (2023), меры по энергоэффективности могут обеспечить до 40% необходимого снижения глобальных выбросов CO₂ к 2050 году. В России повышение энергоэффективности является приоритетом Энергетической стратегии до 2035 года. Потенциал энергосбережения при использовании АСЭ, по данным Минэнерго РФ, достигает 25-40% в зависимости от отрасли, что делает их критически важным инструментом для предприятий и муниципалитетов.

Проблема: Отсутствие систематизированных подходов к комбинированию технологий АСЭ для достижения максимального эффекта. Необходимо решить задачу оптимального выбора и последовательности внедрения разнородных технологий — от базовых датчиков до сложных систем на основе ИИ — с учетом отраслевой специфики и экономических ограничений.

Цель работы: Разработать научно обоснованные принципы комбинирования технологий АСЭ для достижения максимального экономического и энергетического эффекта в различных отраслях экономики на основе анализа реальных кейсов внедрения.

Научная новизна: заключается в предложении принципа последовательной интеграции технологий, демонстрирующего кумулятивный эффект (на примере металлур-

гического комбината экономия выросла с 2% до 23% за три этапа внедрения). Впервые предложен индекс эффективности затрат (ИЭЗ), позволяющий количественно сравнивать разнородные проекты по энергосбережению. Систематизированы оптимальные комбинации технологий для промышленности, ЖКХ и коммерческой недвижимости.

Методология: включает анализ данных МЭА и Минэнерго РФ, case-study реализованных проектов (металлургический комбинат, умное освещение в Казани, Москве, Сочи, торговый центр), экономико-математическое моделирование (расчет ИЭЗ) и сравнительный анализ эффективности, сроков окупаемости и структуры затрат.

Результаты: подтвердили высокую эффективность АСЭ: достигнутая экономия составила 18-25% в промышленности, 22-30% в ЖКХ и 15-20% в коммерческой недвижимости. Выявлен кумулятивный эффект поэтапного внедрения технологий. Установлено, что наилучшая окупаемость характерна для проектов ЖКХ в южных регионах (например, Сочи — 2.8 года). Расчет ИЭЗ показал, что для завода индекс составил 0.34, а для проекта в Сочи — 0.32, что позволяет объективно сравнивать приоритетность проектов.

Выводы и перспективы: Работы свидетельствуют, что максимальная эффективность достигается стратегическим комбинированием и поэтапной интеграцией технологий по принципу «от простого к сложному». Необходим дифференцированный подход к формированию программ энергосбережения для различных отраслей. Предложенный индекс ИЭЗ является практическим инструментом для обоснования инвестиционных решений. Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией АСЭ и возобновляемых источников энергии, применением квантовых сенсоров и алгоритмов, а также развитием самообучающихся нейросетевых моделей для предикативного управления и создания цифровых двойников.

Курбанов Зелимхан Магомедович – ассистент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова",
кафедра «Информатика и вычислительная техника», 364051, Чеченская Республика,
г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел. +7(928) 015-9158, zelimxn@mail.ru.
Область научных интересов: информационные системы, энергосберегающие технологии.

Хасамбиев Ибрагим Вахаевич – к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова",
кафедра «Сети связи и системы коммутации», 364051, Чеченская Республика,
г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел. 8 (928) 952-31-69, hiv_77@mail.ru.
Область научных интересов: теория электрических цепей, сетевые технологии.

Дебиев Майрбек Вахаевич – к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова",
кафедра «Электротехника и электропривод», 364051, Чеченская Республика, г. Грозный,
пр-т им. Х.А. Исаева, 100, тел. 8 (928) 087-22-25, mair76@mail.ru. *Область научных интересов:* теория электрических цепей, проектирование электрических сетей.

Дебиева Амнат Майрбековна – студент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова", кафедра «Электротехника и электропривод», 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100.

Хашамов Магомед Юнусович – студент,
ФГБОУ ВО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова", кафедра «Электротехника и электропривод», 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100.

Статья поступила в редакцию 19.03.2025.

УДК 004.032.26

DOI 10.24412/2413-7383- 2025-3-38-148-156

А. А. Личман, О. Ю. Чередникова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
283001, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Артёма, 58

АЛГОРИТМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СБОЕВ АСУ НА ОСНОВЕ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ

А. А. Lichman, O. Yu. Cherednikova

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Donetsk National Technical University"
283001, Donetsk People's Republic, Donetsk, st. Artyoma, 58

AN ALGORITHM FOR INTELLECTUALIZING AUTOMATED CONTROL SYSTEM FAILURE PREVENTION BASED ON PREDICTIVE ANALYTICS

Внедрение автоматизированных систем управления затронуло практически все ключевые отрасли экономики. С конца прошлого века и по сей день среда, в которой существуют производства постоянно меняется, и автоматизированные системы управления вынуждены меняться вместе с ней. Так, в последние десять лет частичная интеллектуализация производств позволяет оптимизировать расходы. Предиктивная(прогнозная) аналитика – один из самых эффективных инструментов оптимизации. В данной статье при помощи статистического метода ARIMA и алгоритма машинного обучения случайный лес был внедрен алгоритм интеллектуализации. Проанализированы результаты внедрения алгоритма.

Ключевые слова: ARIMA, АСУ, интеллектуализация, временные ряды, машинное обучение, оптимизация.

The introduction of automated control systems has affected almost all key sectors of the economy. From the end of the last century to the present day, the environment in which production facilities exist is constantly changing, and automated control systems are forced to change with it. For example, in the last ten years, partial intellectualization of production facilities has made it possible to optimize costs. Predictive analytics is one of the most effective optimization tools. In this article, an intellectualization algorithm was implemented using the statistical ARIMA method and the random forest machine learning algorithm. The results of the algorithm implementation are analyzed.

Key words: ARIMA, automated control system, intellectualization, time series, optimization.

Анализ проблемы

В автоматизированных системах управления (АСУ) часто возникают конфликты программного обеспечения (ПО). Причины этих конфликтов могут быть различными, и методы их своевременного предотвращения востребованы, так как их следствием являются простои на производстве.

Примерами, сигнализирующими о нарушении работы АСУ, могут быть ошибки базы данных, аномальные значения датчиков, сбой алгоритмов управления (долгие отклики на команды), задержка в обработке данных и т.д.

Целью данной статьи является поиск способов своевременного прогнозирования сбоев и сброс нежелательных изменений, приводящих к ним.

1 Анализ существующих решений

Общепринятыми средствами решения вышеописанных проблем являются нейросетевые модели. Они были внедрены еще в начале 2010-х и достаточно быстро сократили число ошибок в наборах данных, отчетах, аварийных протоколах. Сейчас их используют везде: в промышленности, в обработке видео, данных, текстов [2]. Недостатком подобного подхода является высокая требовательность к вычислительным ресурсам, которую не всегда возможно компенсировать в достаточной мере.

Параллельно с нейросетевыми [3] моделями были внедрены составные модели, состоящие из статистических моделей и методов машинного обучения, не включающих искусственный интеллект (ИИ). Именно этот вариант наиболее прост во внедрении и не так требователен к ресурсам, однако его эффективность меняется в зависимости от среды внедрения и метода [4].

2 Алгоритм интеллектуализации предупреждения сбоев

Нарушения можно распознать, анализируя протоколы работы АСУ. Исключая сетевые сбои, влияние извне и человеческий фактор, прочие нарушения можно спрогнозировать на основе анализа аномальных значений.

Для анализа протоколов предлагается предиктивный метод с использованием машинного обучения для оптимизации результатов.

Метод предполагает в начале сбор данных и построение статистической модели ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) [5], далее обучение алгоритма интеллектуализации на основе прогнозов ARIMA, которые можно использовать как признаки, с использованием метода машинного обучения Случайный лес. В конце система (или пользователь, на основе предсказаний системы) принимает решение об отмене последних изменений в системе, последствием которых является обнаруженный сбой.

Исходными данными для задачи прогнозирования сбоев являются протоколы, значения которых замеряются на протяжении определенного периода времени и имеют форму временного ряда (рис. 1).

Обработка данных значений является основой предиктивного метода, используемого алгоритмом интеллектуализации предупреждения сбоев АСУ. Анализ этих данных выполняется на основе статистической модели ARIMA. В общем случае ARIMA используется для анализа временных рядов, ее применение напрямую не предполагает методы машинного обучения, однако именно в совокупности с ними модель раскрывает свой потенциал в качестве инструмента интеллектуализации систем [6]. Реализация модели включает авторегрессию, дифференцирование временного ряда и расчет скользящего среднего.

```

2025-03-07 09:34:00 - Response Time: 205ms
2025-03-07 09:35:00 - Response Time: 210ms
2025-03-07 09:36:00 - Response Time: 215ms
2025-03-07 09:37:00 - Response Time: 220ms
2025-03-07 09:38:00 - Response Time: 225ms
2025-03-07 09:39:00 - Response Time: 230ms
2025-03-07 09:40:00 - Response Time: 235ms
2025-03-07 09:41:00 - Response Time: 240ms

```

Рисунок 1 - Пример протокола с данными отклика

Прежде всего необходимо выполнить проверку ряда на стационарность, то есть на наличие тренда или сезонности, долгосрочного отклонения данных от нормы или постоянных скачков значений соответственно.

Стационарность временного ряда — необходимое условие для его анализа, иначе непредсказуемые данные на выходе дадут некорректную статистическую модель. Чтобы определить стационарен ли временной ряд, необходимо понять, имеет ли он единичный корень. Единичный корень — это характеристика, которая описывает поведение временного ряда, когда его значения не возвращаются к среднему или не имеют стабильной тенденции. Если ряд имеет единичный корень, он может вырасти или упасть без возвращения к первоначальному состоянию, и эта тенденция может продолжаться в будущем. Следовательно, в случае с наличием единичного корня ряд можно считать не стационарным и не пригодным для построения модели.

Математически единичный корень связан с уравнением авторегрессии, первой частью ARIMA (AR). Модель ARIMA для прогнозирования будущих значений временного ряда использует следующую формулу:

$$y_t = \alpha + \beta y_{t-1} + \Omega_t,$$

где y_t — значение временного ряда y в момент времени t ;

α — константное значение, к которому стремится ряд;

β — коэффициент авторегрессии;

y_{t-1} — значение временного ряда в предыдущий момент времени;

Ω_t — ошибка или шум [7].

Если значение коэффициента авторегрессии равно единице ($\beta = 1$), это говорит о наличии единичного корня и необходимости дифференцирования. Дифференцирование (вторая часть ARIMA) — это процесс, при котором мы вычисляем разницу между значениями ряда в соседних точках, чтобы убрать тренд или сделать ряд стабильным:

$$\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$$

Вычитание значение ряда в предыдущий момент времени из значения в текущий момент, дает Δy_t , разницу. Если ряд был, например, растущим, то после дифференцирования получатся изменения (положительные или отрицательные), а не сами значения ряда [8].

Из ряда значений в миллисекундах, 230, 235, 240, 245, 250, таким образом получается ряд 5, 5, 5, 5, и тренд роста из 230 в 250 исчезнет.

Когда данные подготовлены и первоначальные прогнозы составлены можно приступить к третьей части ARIMA — нахождение скользящего среднего (Moving Average). Этот этап предполагает сравнение прогноза статистической модели с реальными данными и его улучшение; выполняется в соответствии с формулой:

$$\Omega_{t+1} = \theta_1 \cdot \Omega_t + \theta_2 \cdot \Omega_{t-1},$$

где Ω_{t+1} — ошибка в следующем периоде;

Ω_t — ошибка в текущем периоде;

Ω_{t-1} — ошибка в прошлом периоде;

θ_1 и θ_2 — коэффициенты, определяющие то, как ошибки прошлых периодов влияют на текущие погрешности [9].

Коэффициенты можно найти при помощи OLS (Ordinary Least Squares) — это метод, который подбирает такие значения коэффициентов, при которых сумма квадратов ошибок прогноза минимальна [10].

Получив эти данные и улучшив прогнозы, можно говорить об улучшении работы, однако простую статистическую модель нельзя назвать алгоритмом интеллектуализации и применять таким образом. ARIMA не извлекает признаки из данных, а подгоняет параметры по фиксированным математическим формулам, приведенным выше.

Используем один из методов машинного обучения — случайный лес — для обучения модели на основе результатов ARIMA.

Данный метод используется в решении задач классификации и регрессии [11]. Он состоит из множества отдельных моделей, называемых деревьями решений (decision trees), и комбинирует их результаты для улучшения точности прогноза. Это называется ансамблевым методом, потому что несколько моделей (деревьев) работают вместе, чтобы сделать более точный прогноз, чем одна модель.

Мы классифицируем точки, где остатки модели ARIMA выходят за порог погрешности, как аномалии. Это создаёт бинарную метку: 1 для аномальных значений, 0 для нормальных.

Каждая ветвь решает отдельно, какую метку присвоить текущим значениям. В конечном итоге бинарная метка равна 0 или 1 зависит от выбора большинства «ветвей», этот процесс называется «голосование».

Итого, алгоритм интеллектуализации предполагает использование ARIMA для предсказания значений ряда и использование машинного обучения для адаптации модели в условиях изменений. Это дает лучшую гибкость и исключение ситуаций, когда предполагаемая ошибка является объективным следствием работы прибора или другого ПО.

Для машинного обучения можно использовать несколько типов данных. Основной источник — это сам временной ряд с последовательностью наблюдений. Кроме того, полезны остатки модели — разница между реальными значениями и прогнозами ARIMA, показывающая точность предсказаний. Также можно применять прогнозы ARIMA — предсказанные моделью значения для будущего. Информативными также оказываются параметры модели — коэффициенты авторегрессии и скользящего среднего, отражающие влияние прошлых значений на текущие результаты.

Описанный алгоритм интеллектуализации был реализован на языке python, который имеет множество библиотек для работы как с временными рядами (в частности, в нем реализована модель ARIMA), так и с алгоритмами машинного обучения.

На рис. 2 показана реализация модели алгоритма интеллектуализации.

```
from statsmodels.tsa.arima.model import ARIMA
...
model = ARIMA(time_series_data, order=(p, d, q))
model_fit = model.fit()
...
X = df[['arima_residuals']] # Признаки
y = df['response_time'] # Целевое значение
...
residuals = model_fit.resid
...
predictions = model_fit.fittedvalues
...
stargazer = RandomForestRegressor(n_estimators=100)
stargazer.fit(X, y)
```

Рисунок 2 – Подготовка модели машинного обучения в python

Для модели ARIMA требуется задать следующие параметры:

p – порядок авторегрессии, то есть сколько предыдущих значений используется;

d – количество операций дифференцирования;

q – порядок скользящего среднего, то есть сколько ошибок будет учитываться при нахождении скользящего среднего;

Функция RandomForestRegressor выполняет обучение модели методом Случайного леса и предполагает задание следующих параметров;

n_estimators – количество ветвей;

X – матрица признаков, которая представляет собой набор данных, на основе которых модель будет делать прогнозы; эта матрица получается, автоматически используя ARIMA, а Y – целевое значение, которое мы пытаемся предсказать.

Итогом реализации алгоритма является прогнозируемый результат целевого значения отклика, который сравнивается с реальным, и на основе его делается вывод о корректности или аномальности значений, в виде бинарной метки.

3 Результаты внедрения алгоритма в АСУТП

Алгоритм интеллектуализации предупреждения сбоев был внедрен в АСУТП широкого назначения, выполняющую функции сбора, анализа и обработки технической информации, с последующим формированием и хранением необходимой документации в сфере гидрогеологии.

Основной причиной сбоев в исследуемой системе являются конфликты между ПО. Как и в случае с многими другими сбоями, признаком являются аномальные значения в протоколах, в данном случае значения API (*Application Programming Interface*) отклика. Данный набор правил и протоколов позволяет различным программным системам взаимодействовать и высокий отклик может свидетельствовать о нарушении в совместной работе программ.

Рассмотрим характеристики исследуемой АСУ:

Надежность исходного кода. Эта характеристика описывается вероятностью безотказной работы за определенный промежуток времени и определяется экспоненциальным законом надежности.:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где $R(t)$ — вероятность того, что система будет работать без отказа в течение времени t ;
 λ — интенсивность отказов (среднее число отказов за единицу времени);
 t — время работы системы;
 e — математическая константа (примерно 2,718).

Модель предполагает, что сбои происходят независимо друг от друга и случаются с постоянной вероятностью во времени. Чтобы корректно использовать эту модель, следует воспринимать серию сбоев, вызванную одной первопричиной как один сбой [12].

В исследуемой АСУ было обнаружено 2 сбоя за неделю, следовательно, согласно (1), шанс того, что система будет работать без сбоев в течение недели составляет около 3 %.

Среднемесячное время простоя – 28 часов рабочего времени из них: 8 – запланированные часы технического обслуживания, в среднем 13,5 простои, связанные с техническими сбоями, и 6,5 с прочими причинами – отключение света, обстрелы и т.д.

Для объективного оценивания программной части АСУ существует намного больше характеристик, однако в рамках данного исследования этих величин будет достаточно [13].

В АСУ внедрен алгоритм интеллектуализации «Stargazer» на основе предиктивной аналитики временных рядов. В случае сбоев Stargazer осуществлял письменную рекомендацию отката ПО до последней работающей версии, и, если это давало результат – докладывал о несовместимости при помощи письменного отчета с указанием даты времени и причины неисправности. Далее в удобное для этого время специалистами устранялась несовместимость, которая могла вызвать аномальные значения. Коэффициент безотказной работы теперь стремится к 0, так как все сбои вызывали ни что иное как скорый откат системы к рабочему состоянию [14]. Однако, если рассматривать сбой и последующую реакцию на него системы в качестве сбоя, то в целом коэффициент не изменился и остался около 3 % [15].

Стоит отметить, что сократилось время простоя более чем в 3 раза, теперь простои по причине технических неисправностей составляют около часа в месяц, поскольку ПО откатывается до предыдущих значений при конфликте с оборудованием или другим программным обеспечением [16]. Из технических проблем остаются лишь сбои оборудования, на которые программно повлиять нельзя, однако даже тут сбор данных и критических значений оборудования помогает своевременно обнаружить и исправить поломку. И таким образом нивелируется стоимость простоя, уменьшив время простоя из-за технических неисправностей в 11 раз.

Заключение

Алгоритмы интеллектуализации являются универсальным инструментом для решения многих проблем с ПО в АСУ широкого назначения [17]. Для их эффективного использования необходимо понимать сферу внедрения. Внедренный на практике алгоритм в сумме дал незначительную экономию по времени, однако помог сэкономить человеческие усилия и значительно сэкономил производственный ресурс за счет ликвидации простоев из-за сбоев [18], и возможности планирования техобслуживания.

Следует отметить, что, к сожалению, сами технические сбои никуда не исчезают, то есть использование алгоритмов интеллектуализации чаще всего не устраняет сбой как явление, а лишь помогает справиться с их последствиями [19], тем самым улучшая параметры АСУ. Дальнейшее развитие нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения позволит выполнять с их помощью значительное число задач [20].

Список литературы

1. Pikalyov YA.S. Obzor arhitektur sistem intellektual'noj obrabotki estestvenno-yazykovykh tekstov. *Problemy iskusstvennogo intellekta*. 2020. № 4 (19). S. 45-68.
2. Burlaeva E.I., Zori S.A. Sravnenie nekotorykh metodov mashinnogo obucheniya dlya analiza tekstovykh dokumentov. *Problemy iskusstvennogo intellekta*. 2019. № 1 (12). S. 42-51.
3. Ковальчук Ю. Н. Прогнозирование временных рядов с использованием комбинированных моделей ARIMA и машинного обучения / Ковальчук Ю. Н., Павлова Н. А. *Математическое моделирование*. 2021. Т. 33, № 4. С. 56-67.
4. Antsyferov S.S., Sigov A.S. Tekhnologicheskie osnovy postroeniya intellektual'nykh sistem. *Problemy iskusstvennogo intellekta*. 2016. № 1 (2). S. 34-44.
5. Бобровский А. Ю. *Прогнозирование временных рядов с использованием модели ARIMA* / Бобровский А. Ю. М.: Научный мир, 2015. 210 с.
6. Гусев В. В. *Машинное обучение для анализа данных: от линейных моделей до нейронных сетей* / Гусев В. В. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 256 с.
7. Гаврилов И. В. Методы машинного обучения в прогнозировании временных рядов / Гаврилов И. В. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2019. Т. 59, № 6. С. 877- 886.
8. Иванов Д. М. *Введение в модели ARIMA для анализа временных рядов* / Иванов Д. М. М.: "Финансовый мир", 2017. 190 с.
9. Куликов А. В. *Алгоритмы и методы оптимизации для анализа больших данных* / Куликов А. В. СПб.: Наука, 2019. 180 с.
10. Яковлев И. И. *Методы анализа и предсказания временных рядов с использованием ARIMA и нейросетей* / Яковлев И. И. СПб.: Бизнес-пресс, 2018. 08 с.
11. Agafonova M.S. Development of the adaptation management mechanism of an industrial enterprise. *Successes of Modern Natural Science*, 2011. pp. 71-72.
12. Чувииков, Д.А. *Модели и алгоритмы реконструкции и экспертизы аварийных событий дорожно-транспортных происшествий*: дис. ... канд. технич. наук: 05.13.01 / М., 2017. 318 с.
13. Сайт информационного агентства РИА. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/20221017/predprivatiya-1824081417.html>
14. Тельнов, Ю. Ф. Развитие архитектур цифровых предприятий. *Научные труды Вольного экономического общества России*. 2021. Т. 230, № 4. С. 230-235. DOI 10.38197/2072-2060-2021-230-4-230-235. EDN RVLEES.
15. Ромашенко, М.А., Васильченко, Д.В., Пухов, Д.А. Использование нейросетевых алгоритмов для визуального контроля топологии печатных плат. *Вестник ВГТУ*. 2022. № 3.
16. Коновалова Г.И. Концептуальные и методологические основы цифровой трансформации машиностроительного предприятия. *Организатор производства*. 2023. № 1.
17. Новикова, В. Д. *Большие данные в промышленности. Современная наука: актуальные вопросы и перспективы развития : материалы Международной (заочной) научно-практической конференции*, София, Болгария, 25 декабря 2019 года. София, Болгария: Научно-издательский центр "Мир науки" (ИП Вострецов Александр Ильич), 2019. С. 225-228. EDN PYARHB.
18. Айларова, З. К., Дзакоев, З. Л. Цифровая модернизация производственных систем предприятий. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2019. Т. 6, № 1. С. 128-132. EDN NXWCHB.
19. Тихонов, И.А. Интеллектуализация предприятий электронной промышленности и управление рисками // И.А. Тихонов, С.С. Анцыферов. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. № 4 (31). 29-39. <http://search.rads-doi.org/project/14374/object/210540> doi: 10.34757/2413-7383.2023.31.4.004
20. Теплова, О.В. Принципы распознавания психоэмоционального состояния личности в автоматизированных системах управления // О.В. Теплова, О.А. Криводубский. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. № 4 (31). 20-28. <http://search.rads-doi.org/project/14374/object/210539> doi: 10.34757/2413-7383.2023.31.4.003

References

1. Pikalyov YA.S. Obzor arhitektur sistem intellektual'noj obrabotki estestvenno-yazykovykh tekstov // *Problem iskusstvennogo intellekta*. 2020. № 4 (19). S. 45-68.
2. Burlaeva E.I., Zori S.A. Sravnenie nekotorykh metodov mashinnogo obucheniya dlya analiza tekstovykh dokumentov // *Problem iskusstvennogo intellekta*. 2019. No. 1 (12). S. 42-51.
3. Kovalchuk Yu. N. Forecasting time series using combined ARIMA and machine learning models / Kovalchuk Yu. N., Pavlova N. A. // *Mathematical modeling*. - 2021. – Vol. 33, No. 4. – pp. 56-67.
4. Antsyferov S.S., Sigov A.S. Tekhnologicheskie osnovy postroeniya intellektual'nykh sistem // *Problem iskusstvennogo intellekta*. 2016. № 1 (2). S. 34-44.

5. Bobrovsky A. Yu. Forecasting time series using the ARIMA model / Bobrovsky A. Yu. – М.: Scientific world, 2015. – 210 p.
6. Gusev V. V. Machine learning for data analysis: from linear models to neural networks / Gusev V. V. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2018. 256 p.
7. Gavrilov I. V. Machine learning methods in time series forecasting / Gavrilov I. V. // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2019. Vol. 59, No. 6. pp. 877-886.
8. Ivanov D. M. Introduction to ARIMA models for time series analysis / Ivanov D. M. – М.: "Financial World", 2017. 190 p
9. Kulikov A.V. Algorithms and optimization methods for big data analysis / Kulikov A.V. – St. Petersburg: Nauka Publ., 2019, 180 p.
10. Yakovlev I. I. Methods of analysis and prediction of time series using ARIMA and neural networks / Yakovlev I. I. – St. Petersburg: Business Press, 2018. – 208 p.
11. Agafonova M.S. Development of the adaptation management mechanism of an industrial enterprise. // Successes of Modern Natural Science, 2011. pp. 71-72.
12. Chuvikov, D.A. Models and algorithms for reconstruction and examination of emergency events of road accidents: dis. ... Candidate of Technical Sciences: 05.13.01 / М., 2017. 318 p.
13. The website of the RIA news agency. [electronic resource]. Access mode: <https://ria.ru/20221017/predpriyatiya-1824081417.html>
14. Telnov, Yu. F. Development of architectures of digital enterprises. Scientific works of the Free Economic Society of Russia. 2021. Vol. 230, No. 4. pp. 230-235. DOI 10.38197/2072-2060-2021-230-4-230-235. EDN RVLEES.
15. Romashchenko, M.A., Vasilchenko, D.V., Pukhov, D.A. The use of neural network algorithms for visual control of the topology of printed circuit boards. Bulletin of VSTU. 2022. № 3.
16. Konovalova G.I. Conceptual and methodological foundations of the digital transformation of a machine-building enterprise. Production organizer. 2023. № 1.
17. Novikova, V. D. Big data in industry. Modern science: current issues and development prospects : proceedings of the International (correspondence) Scientific and Practical Conference, Sofia, Bulgaria, December 25, 2019. Sofia, Bulgaria: Mir Nauki Scientific Publishing Center (IP Vostretsov Alexander Ilyich), 2019. pp. 225-228. EDN PYARHB.
18. Aylarova, Z. K., Dzakov, Z. L. Digital modernization of production systems of enterprises. Economics and management: problems, solutions. 2019. Vol. 6, No. 1. pp. 128-132. EDN NXWCHB.
19. Tikhonov, I.A. Intellectualization of electronic industry enterprises and risk management // I.A. Tikhonov, S.S. Antsyferov // Problems of artificial intelligence. - 2023. № 4 (31). - 29-39. - <http://search.rads-doi.org/project/14374/object/210540> doi: 10.34757/2413-7383.2023.31.4.004
20. Teplova, O.V. Principles Of Recognizing The Psycho-Emotional State Of A Person In Automated Control Systems // O.V. Teplova, O.A. Krivodubsky // Problems of artificial intelligence. - 2023. № 4 (31). - 20-28. - <http://search.rads-doi.org/project/14374/object/210539> doi: 10.34757/2413-7383.2023.31.4.003

RESUME

A. A. Lichman, O. Yu. Cherednikova

An algorithm for intellectualizing automated control system failure prevention based on predictive analytics

The article discusses an algorithm for the intellectualization of fault prevention in an automated control system. It involves using the ARIMA statistical model for predictive analytics of the system's protocols and the Random Forest machine learning method to optimize results. The result of the algorithm is the predicted result of the target response value, which is compared with the real one, and based on it, a conclusion is drawn about the correctness or anomaly of the values.

Although the algorithm as a whole improves many indicators of the system, it is noted that there are different priority values. Depending on the choice of the implementation goal, the result will also change. If it is necessary to achieve maximum reliability, you will have to sacrifice something else.

The results of the implementation of the intellectualization algorithm in automated control systems used in the field of hydrogeology are analyzed. Even considering the limited implementation of the algorithm, the results and statistics show the prospect of such manipulations.

РЕЗЮМЕ

А. А. Личман, О. Ю. Чередникова

*Алгоритм интеллектуализации предупреждения сбоев в АСУ
на основе предиктивной аналитики*

В статье рассматривается алгоритм интеллектуализации предупреждения сбоев в автоматизированной системе управления. Он предполагает использование статистической модели ARIMA для предиктивной аналитики протоколов работы системы и метода машинного обучения Случайный лес для оптимизации результатов. Итогом работы алгоритма является прогнозируемый результат целевого значения отклика, который сравнивается с реальным, и на основе его делается вывод о корректности или аномальности значений.

Хоть алгоритм в целом улучшает многие показатели системы отмечается, что существуют различные приоритетные значения. В зависимости от выбора цели внедрения будет меняться и результат. Если необходимо достичь максимальных показателей надежности, придется пожертвовать чем-либо другим.

Проанализированы результаты внедрения алгоритма интеллектуализации в АСУ, использующейся в сфере гидрогеологии. Даже рассматривая ограниченное внедрение алгоритма, результаты и статистика показывают перспективу подобных манипуляций.

Личман А.А. – аспирант, ассистент, ФГБОУ ВО ДонНТУ, кафедра компьютерной инженерии, 283001, Донецк, ул. Артема, 58 ,тел +7(949) 410-9658, anton.lichman@yandex.ru. *Область научных интересов:* алгоритмы интеллектуализации и автоматизации, компьютерное моделирование, нейронные сети

Чередникова О.Ю. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО ДонНТУ, кафедра компьютерной инженерии, 283001, Донецк, ул. Артема, 58 ,тел +7(949) 376-3084, olachered@yandex.ru *Область научных интересов:* операционные сети, системное программирование, компьютерное моделирование, нейронные сети

Статья поступила в редакцию 05.03.2025.

УДК 004.921

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-158-171

А. А. Левашов, Д. А. Гаркуша

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк, Россия
283048, г. Донецк, ул. Артема, дом 118б

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МОРСКОГО ПОРТА *

А. А. Levashov, D. A. Garkusha

FSBSI "Institute of problems of artificial intelligence"
283048, Donetsk, Artema St., Building 118b

VISUALIZATION OF PRODUCTION AND TECHNOLOGICAL PROCESSES OF THE SEA PORT

В статье предложены требования, ориентированные на задачи оптимизации ресурсов и ускорения принятия решений на оперативном, тактическом и стратегическом уровнях управления морским портом. Сформулированы требования к отображению статистической и динамической информации, интерактивности, производительности, интеграции и пользовательского опыта (UX). Проведен сравнительный анализ веб-технологий для интерактивной 2D-графики. Обоснован выбор стека технологий React, Redux и Konva.js для реализации установленных требований. Представлены принципы реализации ключевых функций, включая drag-and-drop для ручного планирования размещения объектов. Результаты работы подтверждают эффективность предложенного метода и выбранного инструментария для создания масштабируемых, производительных и интерактивных систем веб-визуализации, для повышения управляемости и логистической эффективности морских портов.

Ключевые слова: веб-визуализация, морской порт, производственно-технологические процессы, интерактивность, drag-and-drop, React.js, Redux, Konva.js, оптимизация логистики.

The article proposes requirements focused on the tasks of optimizing resources and speeding up decision-making at the operational, tactical and strategic levels of seaport management. The requirements for displaying statistical and dynamic information, interactivity, performance, integration, and user experience (UX) are formulated. A comparative analysis of web technologies for interactive 2D graphics is carried out. The choice of the React, Redux and Konva technology stack is justified.js to implement the established requirements. The principles of implementing key functions, including drag-and-drop for manual object placement planning, are presented. The results of the work confirm the effectiveness of the proposed method and the selected tools for creating scalable, productive and interactive web visualization systems to improve the manageability and logistical efficiency of seaports.

Key words: web visualization, seaport, production and technological processes, interactivity, drag-and-drop, React.js, Redux, Konva.js, logistics optimization.

* **Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР №Г/Р 123092600030-4.

Введение

Современные морские порты представляют собой сложные технологические комплексы с высокой интенсивностью грузопотоков и множеством взаимодействующих объектов [1]. Эффективное оперативное управление такими системами требует непрерывного мониторинга состояния производственно-технологического процесса [2], [3]. Традиционные SCADA/HMI-системы, хотя и надежны, часто обладают ограниченной гибкостью, масштабируемостью и доступностью [4]. Веб-технологии предлагают альтернативу этим системам [5] и позволяют создавать кроссплатформенные, легко обновляемые и интегрируемые приложения, предназначенные для повышения операционной эффективности, безопасности и управляемости производственно-технологических процессов морского порта [6].

Процесс визуализации представляет собой непрерывное преобразование сырых данных (позиции судов/техники, статусы оборудования, грузопотоки, метеоусловия) в интуитивно понятные графические образы (2D/3D-карты, мнемосхемы, анимированные модели) в режиме реального времени для последующего анализа. Визуализация является ключевым инструментом преобразования информации в знания [7] для эффективного управления на оперативном, тактическом и стратегическом уровнях принятия решений [8].

Оперативный уровень – определяет текущее состояние всех процессов, а также позволяет мгновенно выявить аномалии (авария, простой). Например, крановщик видит на схеме точное положение контейнера и путь погрузчика; диспетчер наблюдает общую картину загрузки причалов.

Тактический уровень – представляет возможность определить причинно-следственные связи и дать оценку эффективности тактических решений. Например, диспетчер анализирует тепловые карты простоев техники для оптимизации распределения ресурсов.

Стратегический уровень – процесс, способствующий формированию стратегических заключений, необходимых для развития инфраструктуры и бизнес-модели. Например, использование данных цифрового двойника для моделирования последствий расширения причала.

Целью данной работы является определение набора эффективных инструментов и технологических решений для разработки веб-интерфейса визуализации данных в системах управления логистикой морского порта, обеспечивающего интеграцию с компонентами искусственного интеллекта, экспертных систем и Smart Systems, на основе оценки их функциональности, производительности, удобства разработки и эксплуатации, а также соответствия специфическим требованиям портовой логистики.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализировать объект исследования – морской порт, выделив ключевые сущности, процессы и информационные потоки, подлежащие визуализации.
2. Сформулировать комплекс функциональных требований к системе веб-визуализации, ориентированных на задачи оперативного, тактического и стратегического управления.
3. Провести сравнительный анализ современных веб-технологий для создания интерактивной 2D-графики и выявить наиболее подходящие для отображения множества динамических объектов в реальном времени.
4. Обосновать выбор стека технологий (React, Redux, Konva.js) для реализации системы, доказав его соответствие сформулированным требованиям.
5. Разработать и описать принципы реализации ключевого интерактивного функционала (на примере операции drag-and-drop) для манипулирования объектами в контексте задач портовой логистики.

1. Характеристика объекта исследования: морской порт

Морской порт — высокودинамичный комплекс, где непрерывно взаимодействуют суда (прибытие, швартовка, погрузка/разгрузка), перегрузочная техника (краны, погрузчики), склады, наземный транспорт (ж/д, авто) и системы управления [9].

Морским портам присваивается статус класса объект по значимости: международные, межрегиональные и локальные. Также все порты специализируются на обработке определенных типов грузов, основными из которых являются: сыпучие, жидкие и контейнерные. В тип сыпучие входит сырье, которое разделяют на пищевое и непищевое, вследствие чего возникает необходимость разделять помещения под хранение данного вида сырья. То же относится к остальным типам груза. Контейнерные грузы бывают разных размеров, а также могут требовать разной обработки и определенных условий хранения, например климатические, что вынуждает эти же грузы хранить в специальных складах (рефрижераторы). Из вышесказанного следует, что морской порт — это сложный объект, который решает целый ряд комплексных задач по обеспечению доставки груза от пункта А до пункта Б с выполнением всех необходимых промежуточных этапов.

Данной теме посвящается множество работ, рассматривающих как повышение эффективности работы морского порта, так и предложения о разработке и внедрения информационных систем для решения ряда задач, относящихся к работам грузового фронта. Для более ясного понимания углубимся в специфику, на примере функционирования контейнерного терминала, описанного в одной из работ [10].

Контейнерный терминал в морском порту — это специализированный комплекс, выполняющий функции ключевого узла в глобальной цепи контейнерных перевозок и предназначенный для перевалки грузов между морскими судами и другими видами транспорта (автомобильным, железнодорожным) [11].

Контейнерный терминал состоит из множества зон. Их можно рассмотреть в качестве следующих объектов: площадки груженых, поврежденных и порожних контейнеров, площадки автомобильно-железнодорожного погрузочного фронта, сортировочного фронта, площадки комплектации контейнеров. В мировой практике наиболее распространены складские площадки открытого хранения контейнеров (кроме складов комплектации), обслуживаемых контейнеровозами или полуприцепами с тягачами. Рассмотрим схему внутрипортовых контейнерных грузопотоков в соответствии с рис. 1.

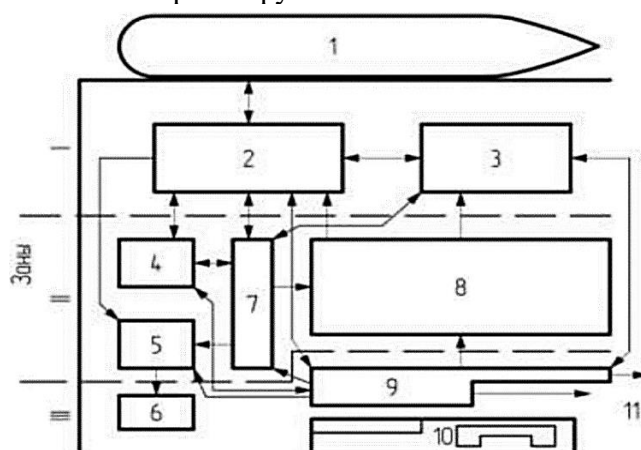


Рисунок 1 – Схема внутрипортовых контейнерных грузопотоков [9] где:

1 – судно-контейнеровоз; 2,3 – сортировочные площадки; 4,5 – склады порожних и поврежденных контейнеров; 6 – ремонтные мастерские; 7 – склад комплектации; 8 – складская площадка груженых контейнеров; 9 – оперативная площадка автомобильно-железнодорожного грузового фронта; 10 – административно-управленческие здания; 11 – железнодорожный и автомобильный везды

Схема внутрипортовых контейнерных грузопотоков предусматривает взаимодействие перечисленных объектов, демонстрируя пример перемещения и обработку контейнеров. Управление таким сложным комплексом требует непрерывного мониторинга большого количества параметров и оперативного принятия решений для минимизации простоев, оптимизации ресурсов и обеспечения безопасности. Для решения этой задачи необходимо обеспечить Лицо Принимающее Решения (ЛПР) актуальной и целостной информацией о производственно-технологических процессах морского порта в доступном для восприятия виде, применив информационные технологии для их визуализации.

2. Анализ существующих систем визуализации производственно-технологических процессов морского порта

Внедрение систем визуализации для мониторинга и анализа деятельности морских портов является актуальной задачей в условиях роста грузопотоков и требований к эффективности логистики. Существующие решения можно условно разделить на несколько категорий:

- SCADA/HMI-системы (Например: Ignition, WinCC, Citect): - традиционные системы диспетчерского управления, обеспечивающие визуализацию в реальном времени состояния оборудования (краны, конвейеры, шлюзы), телеметрии и базовых технологических параметров. Предназначены в первую очередь для оперативного персонала в диспетчерских [12].
- Системы имитационного моделирования с функциями визуализации (Например: AnyLogic, FlexSim, Arena) - мощные инструменты для создания детальных цифровых двойников технологических процессов, позволяющие не только визуализировать, но и глубоко анализировать, оптимизировать и прогнозировать работу объекта [13].

В отличие от вышеперечисленных технологий, существует способ визуализации с помощью веб технологий [14]. Они имеют ряд преимуществ в сравнении с классическими системами:

1. Кроссплатформенность и доступ – можно получить доступ через любой браузер на любом устройстве без установки специального программного обеспечения, в отличие от SCADA/HMI систем, которые требуют установки специализированных клиентских приложений (часто только под Windows) на конкретные рабочие места или систем имитационного моделирования, которые требуют специальное ПО для создания моделей [15].

2. Масштабируемость и гибкость – обладают гибкой архитектурой позволяя развивать отдельные модули приложения независимо и по необходимости масштабировать серверную часть под растущее число пользователей, в отличие от SCADA/HMI систем, в которых архитектура часто монолитная и жесткая, а масштабирование может быть сложным и дорогим, требующим обновления лицензий и инфраструктуры или систем имитационного моделирования, в которых также масштабирование является трудоёмким процессом.

3. Интеграция с современным стеком технологий – легко интегрируются с облачными сервисами (хранение данных, аналитика), BI-инструментами (Power BI, Tableau через API), системами планирования (ERP), мобильными приложениями в отличие от SCADA/HMI и систем имитационного моделирования, в которых интеграция возможна (через API), но часто сложнее, требует специалистов и промежуточного программного обеспечения [16].

4. Современный пользовательский интерфейс – в наличии широкий спектр популярных фреймворков, которые позволяют создавать интуитивные, интерактивные, адаптивные и визуально привлекательные интерфейсы, в отличие от SCADA/HMI в которых интерфейсы часто функциональны, но могут быть устаревшими визуально и менее интерактивными, ориентированными в первую очередь на оператора в диспетчерской, а не на аналитиков или руководство [17].

Главным недостатком самостоятельной разработки веб-приложения с использованием современных фреймворков выступает значительная трудоемкость и сложность проектирования и реализации полнофункционального интерфейса, сравнимого по возможностям визуализации сложных технологических процессов в реальном времени со специализированными SCADA/HMI-системами. В отличие от готовых промышленных решений, веб-разработка требует глубокой проработки архитектуры, реализации механизмов обработки и отображения большого объема динамических данных, что увеличивает сроки и стоимость создания системы.

Все вышеперечисленные преимущества и недостатки склоняют к выбору самостоятельной разработки веб-приложения с использованием современных веб-технологий (JavaScript-фреймворки), которые предоставляет полную свободу в проектировании интерфейса, интеграции, анализе данных и дают возможность контролировать производственно-технологический процесс в морском порту.

3. Основные требования к веб визуализации

Для решения задач оптимизации логистических решений и необходимых ресурсов для ускорения принятия решений определены следующие ключевые требования:

1. Отображение статистического контента – включает точное и масштабируемое представление схемы портовой акватории, причалов, складов и грузового фронта. Веб-приложение должно поддерживать многослойную визуализацию, включая фон, сетку, инфраструктуру, объекты и временные элементы, а также предоставлять возможность загрузки подложек, к примеру таких как спутниковые снимки.

2. Визуализация динамических объектов и состояний – охватывает отображение судов с детализацией (контур, тип, статус, название, осадка, уникальный идентификатор), их позиции и ориентир у причала или на рейде. Веб-приложение должно визуализировать портовую технику (краны, погрузчики, тягачи), отображая тип, состояние (работает, авария, простой), текущую позицию, направление движения и загрузку, а также обеспечивать трекинг контейнеров и грузов с указанием идентификации, местоположения (на складе, транспортном средстве, под краном) и статуса обработки. Транспортные средства (автотранспорт, ж/д вагоны) отображаются с информацией о статусе и грузе. Веб-приложение также должно динамически изменять состояние объектов, используя цветовую индикацию статусов и анимацию перемещения, а также визуализировать запрещенные участки и маршруты.

3. Интерактивность – реализуется через функции масштабирования схемы порта, выделения объектов при наведении курсора или клике, отображения детальной информации об объектах во всплывающих окнах или сайдбарах, фильтрации объектов по типу, статусу или причалу, а также поддержку операции drag-and-drop для ручного планирования или корректировки размещения.

4. Требования к производительности и масштабируемости – предполагает обеспечение плавной анимации и перемещений объектов даже при их значительном количестве, обновление состояний объектов при получении данных в реальном времени, а также возможность эффективно функционировать на электронно-вычислительной машине исключая требования к высокой производительности для клиентской части.

5. Интеграция и работа с данными – включают поддержку получения данных в реальном времени, возможность загрузки статистических данных для анализа, интеграцию с внешними системами через API и обязательное логирование действий пользователя.

6. Пользовательский опыт (UX) – фокусируется на создании интуитивно понятного интерфейса, предоставлении настраиваемых видов (с возможностью показа/скрытия слоев и сохранения положения), а также реализации адаптивного дизайна для корректного отображения на разных разрешениях экранов.

4. Анализ веб-технологий для реализации интерактивной 2D-графики

Разработка системы веб-визуализации сложных производственно-технологических процессов морского порта предъявляет специфические требования из раздела 3, обусловленные особенностями транспортно-логистической деятельности. Следовательно, программный комплекс, решающий множество задач и обеспечивающий контроль управления процессами (включая все этапы грузовых операций), должен обладать следующими ключевыми характеристиками: адаптивность, масштабируемость, производительность, интегрированность, интерактивность и надежность.

Существует несколько способов работы с веб-графикой и каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками:

1. Чистый HTML/CSS/JS (DOM) – прост в освоении и обеспечивает хорошую доступность и событийную модель, но обладает крайне низкой производительностью при большом числе объектов, ограниченными анимационными возможностями и сложностями с масштабированием, что делает его непригодным для реализации 2D-графики [18].

2. SVG предлагает векторное масштабирование без потерь, хорошую поддержку событий и доступность, однако его производительность резко падает при сложных сценах и частых обновлениях, а управление иерархией объектов громоздко. Он подходит лишь для статических или умеренно динамических схем средней сложности, но не для интенсивной визуализации порта в реальном времени [19].

3. Canvas API (низкоуровневый) обеспечивает высочайшую производительность и полный контроль над отрисовкой, идеален для анимации множества объектов. Однако его низкоуровневый API сложен, отсутствует встроенная объектная модель и поддержка событий на объектах (требуется ручная обработка), что затрудняет создание сложных интерактивных сцен и управление структурой производственно-технологического процесса. Хотя технология мощная, она требует значительных усилий для реализации требований [20].

4. WebGL дает максимальную производительность для сложной 2D/3D графики и эффектов, но имеет очень высокий порог вхождения (требует знаний шейдеров, математики), а разработка 2D-интерфейсов поверх него сложна. Он избыточен и неоправданно сложен для большинства задач 2D-визуализации портовых процессов, будучи оптимальным лишь для 3D или 2D с экстремальной нагрузкой [21].

5. Библиотеки поверх Canvas (Konva.js, Fabric.js и т.п.) предоставляют высокоуровневый, объектно-ориентированный API, решая главные проблемы чистого Canvas. Данный способ наиболее перспективный поскольку данные библиотеки способны инкапсулировать логику отрисовки в объекты (фигуры, группы), реализуют встроенную поддержку событий на уровне объектов, а также механизмы для трансформаций, анимации, иерархии и слоев, значительно ускоряя разработку и делая их

оптимальным решением для задач интерактивной визуализации промышленных объектов, подобных морскому порту [22-23].

Среди популярных высокоуровневых библиотек, работающих поверх <canvas>, лидируют Konva.js и Fabric.js. Оба экземпляра предоставляют необходимый уровень абстракции, объектную модель и интерактивность, критически важные для отображения и управления такими сложными сущностями, как суда, краны, контейнерные площадки и технологические линии в режиме реального времени

Выбор Konva.js для реализации системы визуализации производственно-технологических процессов морского порта был обусловлен его преимуществами в контексте специфических требований проекта.

Архитектура Konva.js, изначально построенная вокруг иерархии Stage - Layer - Group - Shape, идеально отражает логику производственно-технологических процессов морского порта. В этой структуре общая карта (Stage) состоит из слоев (Layer), представляющих ключевые инфраструктурные элементы порта, такие как причалы, железная дорога, автодороги и грузовые зоны. Эти слои, в свою очередь, содержат группы объектов (Group), например, кран вместе с его зоной работы или судно с контейнерами на нем, а также отдельные графические объекты (Shape), такие как контейнер, вагон или автомобиль.

Кроме того, Konva.js отличается от Fabric.js своей основной направленностью. В то время как Fabric.js изначально развивалась с акцентом на редактирование изображений и текста, а также интерактивный дизайн (включая поддержку панелей инструментов и более сложную работу с импортом/экспортом SVG), фокус Konva.js лежит именно на области производительной, интерактивной 2D-анимации и визуализации, что критически важно для данного проекта.

Для более точного понимания вышеизложенный анализ сведен в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ технологий веб-визуализации для систем управления производственными процессами

Критерий	HTML/CSS/JS (DOM)	SVG	Canvas API	WebGL	Библиотеки Konva/Fabric.js
Производительность	Низкая (при большом числе объектов)	Средняя (падает при сложных сценах)	Высокая	Максимальная	Высокая (с оптимизацией)
Масштабируемость	Ограниченная	Хорошая	Высокая	Максимальная	Высокая
Интерактивность	Высокая (встроенная событийная модель)	Хорошая	Низкая (требует ручной реализации)	Низкая	Высокая (встроенные события)
Сложность разработки	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая	Средняя (объектно-ориентированный API)
Поддержка анимации	Ограниченная	Средняя	Высокая	Максимальная	Высокая (встроенные механизмы)
Применимость для задач порта	Непригоден	Для статических схем	Для высокопроизводительной визуализации	Для 3D и экстремальных нагрузок	Оптимально для интерактивной визуализации
Объектная модель	Встроенная	Встроенная	Отсутствует	Отсутствует	Встроенная (Stage-Layer-Group-Shape)
Соответствие требованиям	Не соответствует	Частично соответствует	Частично соответствует	Избыточен	Полностью соответствует

5. Обоснование выбора инструментов для реализации веб-визуализации производственно-технологических процессов морского порта

На основе сформулированных ранее критериев (производительность, гибкость, интеграция), с фокусом на интерактивную 2D-визуализацию и реализацию метода drag-and-drop в контексте задач манипулирования объектами морского порта, выбран ряд инструментов.

Первым инструментом для решения поставленной задачи выступает библиотека React [24]. В данной библиотеке реализован компонентный подход на рисунке 2, который позволяет разбить сложную визуализацию на компоненты (причал, кран, судно, контейнер, слой), что соответствует требованию отображения статистического контента из раздела 3. Альтернативой библиотеке React выступают библиотеки Vue.js и Angular. Vue.js предлагает аналогичный компонентный подход и может выступать альтернативой [25], однако, экосистема React, в частности наличие библиотеки react-konva для работы с высокопроизводительной графикой, на данный момент представляется более развитой для задач подобного масштаба, что и стало решающим фактором в пользу выбора React. Angular предоставляет полноценную, строгую архитектуру «из коробки», но его высокая сложность и размер были избыточны для данной задачи, сфокусированной на высокопроизводительной графике [26]. React был выбран за оптимальное сочетание минимализма, производительности Virtual DOM и огромной экосистемы.

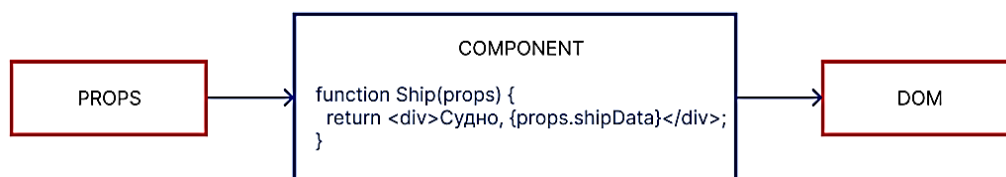


Рисунок 2 – Компонентный подход React

Для управления состоянием в React-приложениях используется библиотека Redux [27], которая не входит в состав React, но часто используется как дополнение и подходит для управления сложным, часто обновляемым состоянием множества объектов порта, что соответствует требованию отображения статистического и динамического контента из раздела 3. Изменение состояния автоматически приводит к перерисовке соответствующих компонентов.

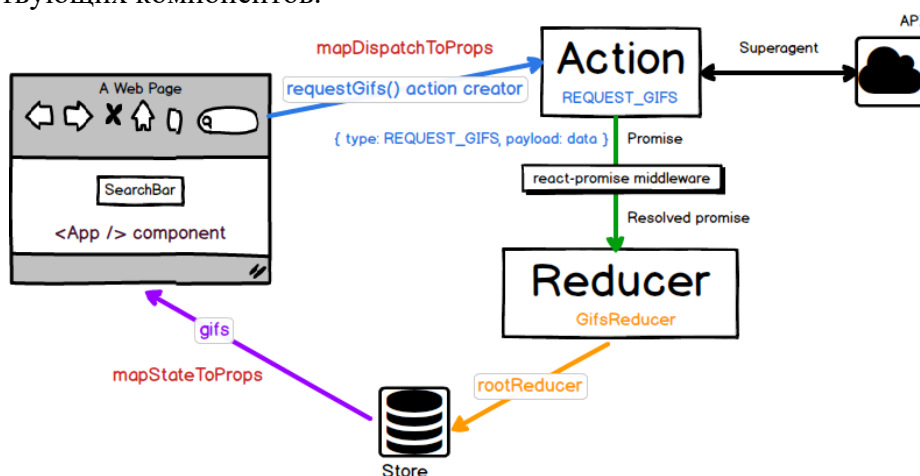


Рисунок 3 – Архитектура модульных React + Redux приложений [28]

Стоит отметить, что экосистема React предлагает и другие решения для управления состоянием. Встроенный Context API в сочетании с хуком `useReducer` подходит для приложений средней сложности, однако может оказаться менее производительным и предсказуемым при частых обновлениях большого количества взаимосвязанных данных, характерных для модели порта. Современные библиотеки, такие как Zustand, предлагают более простой и лаконичный API с меньшим количеством шаблонного кода (boilerplate), а MobX реализует реактивную парадигму, которая может быть интуитивно понятнее в некоторых сценариях [29-30].

Выбор Redux был обусловлен его масштабируемостью - строгая архитектура упрощает командную разработку и долгосрочную поддержку кода. Кроме того, его экосистема включает проверенные решения (middleware, например, Redux Thunk/Saga) для работы с асинхронными операциями и side-эффектами, что напрямую отвечает требованию интеграции с серверными API.

Вторым инструментом для решения поставленной задачи выступает библиотека Konva.js. Данная библиотека предоставляет объектно-ориентированную абстракцию над Canvas API, значительно упрощая работу со сложной графикой, такой как фигуры, группы и трансформации.

Требование к производительности и масштабируемости в разделе 3, предписывающее обеспечить плавную анимацию перемещений множества объектов (судов, кранов, контейнеров), напрямую удовлетворяется архитектурой Konva.js. Кэширование слоев (`layer.cache()`) и обновление только измененных областей (`layer.batchDraw()`), позволяют эффективно отрисовывать множество динамических объектов на схеме порта, сохраняя частоту кадров, необходимую для оперативного мониторинга.

Требования интерактивности в разделе 3 – выделение объектов, операции drag-and-drop – реализуются средствами Konva.js из «коробки». Встроенная система событий (`on('click')`, `on('mouseover')`, `on('dragmove')`) на уровне отдельных фигур (Rect, Circle, Group) прямо соответствует необходимости взаимодействия пользователя с конкретными судами, кранами или контейнерами. Например, обработчик `on('dragend')` на группе, представляющей кран, позволяет фиксировать его новое положение на причале после перемещения пользователем, реализуя функционал ручного планирования.

Konva.js обладает совместимостью с React через официальную библиотеку `react-konva`, которая создает мощную синергию для управления сложным состоянием производственно-технологических процессов морского порта и его визуализации. React-компонент `<Ship>`, управляемый состоянием Redux, инкапсулирует соответствующую Konva-группу (`<Group>`), содержащую фигуры корпуса (`<Rect>`), надстройки (`<Path>`) и меток (`<Text>`). При получении новых данных о позиции судна, обновление состояния Redux автоматически приводит к перерисовке компонента `<Ship>` с новыми пропсами `x` и `y`, что вызывает перемещение всей Konva-группы на схеме порта. Обратное, событие `onClick` на Konva-группе судна внутри компонента `<Ship>` может вызвать действие Redux `selectShip(id)`, обновляющее глобальное состояние и, например, открывающее сайдбар с детальной информацией – непосредственно реализуя требование интерактивного выделения и детализации объектов из раздела 3.

6. Принципы реализации метода drag-and-drop в контексте задач манипулирования объектами морского порта

Операция drag-and-drop (DnD) критически важна для ручного планирования и оперативной корректировки размещения объектов (кранов, контейнеров, техники) в

системе визуализации производственно-технологических процессов морского порта. Ее реализация на базе React и Konva.js основана на следующих принципах [31]. Перетаскивание активируется установкой `draggable={true}` для соответствующих Konva-узлов (объектов порта), при этом доступность DnD динамически контролируется через состояние приложения (например, запрет перемещения статичной инфраструктуры). Обработка жизненного цикла DnD использует встроенные события Konva.js: `dragstart` визуально выделяет объект и фиксирует начальную позицию; `dragmove` обеспечивает плавное перемещение объекта на холсте в реальном времени; `dragend` фиксирует конечную позицию. Ключевой шаг: новые координаты синхронизируются с глобальным состоянием (Redux Store), что инициирует перерисовку компонента и обновление данных в бэкенде (API). Одновременно проводится валидация позиции (границы зон, коллизии с препятствиями/объектами через методы Konva, например `shape.intersects()`), при невалидности объект возвращается или выводится предупреждение. Действие логируется. Для перемещения групп объектов (контейнер на погрузчике) используется Konva Group с `draggable={true}`. Управление состоянием строго следует принципу: единственный источник истины – глобальное состояние (Redux). Оптимизация обеспечивается обновлением только перемещаемого объекта во время `dragmove` (с помощью `layer.batchDraw()`) и кэшированием статичных слоев (`layer.cache()`). Интеграция через `react-konva` позволяет инкапсулировать логику DnD в компонентах: обработчики событий Konva вызывают обновление состояния Redux (`dispatch`), что приводит к автоматической перерисовке компонента с новыми координатами. Это обеспечивает удобную реализацию сложной интерактивности, необходимой для управления объектами морского порта.

Выводы

Разработка систем веб-визуализации сложных производственно-технологических процессов морского порта требует четко описанных требований и тщательного выбора технологий, обеспечивающих высокую производительность и интерактивность при работе с множеством динамических объектов.

Результат работы заключается в предложении основных требований к веб-визуализации производственно-технологических процессов морского порта. Проведен комплексный сравнительный анализ веб-технологий 2D-графики и обоснование выбора стека React, Redux и Konva.js как оптимального для задач визуализации производственно-технологических процессов, а также предложена реализация графического механизма `drag-and-drop` для интерактивного манипулирования объектами морского порта (краны, контейнеры), включая интеграцию событий Konva.js с глобальным состоянием приложения (Redux), валидацию позиций и логирование действий.

Данный метод работы планируется развивать как основу для создания интерактивного веб-приложения для повышения эффективности управления морским портом в рамках развития работ посвященным по направлению цифровым двойникам и цифровой индустрии промышленности.

Список литературы

1. Масюк Н.Н., Блюдик А.Р. Современные тенденции цифровой трансформации в морской области. *Естественно-гуманитарные исследования*. 2022. № 44(6). С. 203-207.
2. Вольнский И.А. Механизмы и инструменты управления развитием логистической инфраструктуры морских портов. *Вестник АГТУ*. 2022. №1. С. 78-83.

3. Румянцев В.В. О роли информационных технологий в развитии цивилизации. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2021. №4(23). С.59-64.
4. Киселев А.О. Проблемы интеграции SCADA-систем с AS/RS на производствах. *Международный научный журнал «Вестник науки»*. 2025. №4(85). С. 788–893.
5. Ехлаков Ю.П., Жуковский О.И., Сенченко П.В., Гриценко Ю.Б., Милихин М.М. Базовые принципы разработки веб-ориентированных информационных систем управления инфраструктурой социально-экономических и технических процессов. *Доклады ТУСУРа*. 2017. №2. С. 63-67.
6. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Русанов К.Е. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. №2(33). С.37-44.
7. Романова И.К. Современные методы визуализации многомерных данных: анализ, классификация, реализация, приложения в технических системах. Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. №3. С. 133-167.
8. Калмакова Н.А. Уровни управления сбалансированным развитием промышленных предприятий на принципах самоорганизации. *Региональная экономика: теория и практика*. 2015. №27. С. 24-35.
9. Волынский И.А. Понятие, виды и особенности формирования потоковых процессов морского порта. *Вестник АГТУ*. 2020. №3. С. 71-78.
10. Ганин М.А., Лобанов Е.М. *Организация и технология перегрузочных процессов в морских портах*. СПб: Морсар, 2020.
11. Гаркуша Д.А. Метод наполнения и обработки базы знаний в задаче построения цифрового двойника. *ДМКС* 2025.
12. Луков Д.К. Автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). *European science* №2(44). С. 19-21.
13. Шевченко А.М., Дыда А.А. Анализ реализации агентного подхода и особенности имитационного моделирования морского порта в среде AnyLogic. *Computational Nanotechnology*. 2024. №4. С. 135-145.
14. Прокопенко Е.В., Сарапулова Т.В. Разработка Web-приложений для поддержки стратегического управления. *Вестник Кузбасского государственного технологического университета*. 2011. С. 114-116.
15. Пчелкин А.Ю., Гусарова Н.Ф. Кроссплатформенная разработка на базе веб-технологий для поддержки решений в проблемно-ориентированных системах управления. *Экономика, право, инновации*. 2022. №1. С. 41-47.
16. Кондакова А.В., Золотухина Е.Б. *Обмен данными между облачным решением SAP ARIBA SOURSING и учетными системами с помощью технологии веб-сервисов*. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obmen-dannymi-mezhdu-oblachnym-resheniem-sap-ariba-sourcing-i-uchetnymi-sistemami-s-pomoschu-tehnologii-veb-servisov/viewer>.
17. Бурцев В.А. Проблемы и перспективы пользовательского опыта в цифровых платформах: теоретические подходы и значение для бизнес-приложений. *Инновации и инвестиции*. 2025. №4. С. 330-334.
18. Никсон Р. *Создаем динамические веб-сайты с помощью PHP, MySQL, JavaScript, CSS и HTML5*. 5-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2022. 848 с.
19. Eisenberg J. D. *SVG Essentials: Producing Scalable Vector Graphics with XML*. 2nd ed. O'Reilly Media, 2014. 354 p.
20. *MDN Web Docs: Canvas API* [Электронный ресурс]. URL: https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/API/Canvas_API
21. Мацуда, К. *WebGL: программирование трехмерной графики*. Санкт-Петербург: Питер. 2016. 464 с.
22. *Konva.js: Официальная документация* [Электронный ресурс]. URL: <https://konvajs.org/>
23. *Fabric.js: Официальная документация* [Электронный ресурс]. URL: <https://fabricjs.com/>
24. *React.js: Официальная документация* [Электронный ресурс]. <https://react.dev>
25. *Vue.js: Официальная документация* [Электронный ресурс]. URL: <https://vuejs.org/guide>
26. *Angular: Официальная документация* [Электронный ресурс]. URL: <https://angular-doc.ru/docs>
27. *Redux: Официальная документация* [Электронный ресурс]. URL: <https://redux.js.org>
28. *Архитектура модульных React + Redux приложений* [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/326484/>
29. *Zustand: Официальная документация* [Электронный ресурс]. URL: <https://zustand.docs.pmnd.rs/getting-started/introduction>
30. *Mobx: Официальная документация* [Электронный ресурс]. URL: <https://mobx.js.org/getting-started>
31. *React-DnD: Официальная документация* [Электронный ресурс]. URL: <https://react-dnd.github.io/react-dnd/docs/overview>

References

1. Masyuk, N.N. & Blyudik, A.R. (2022). Modern Trends of Digital Transformation in the Maritime Field. *Natural and Human Studies*, 44(6), 203–207.
2. Volynsky, I.A. (2022). Mechanisms and Tools for Managing the Development of Logistic Infrastructure of Seaports. *ASTU Herald*, (1), 78–83.
3. Rumyantsev V.V. On the role of information technologies in the development of civilization // *Problems of Artificial Intelligence*. 2021. №4(23). С. 59-64.
4. Kiselev, A.O. (2025). Problems of SCADA Systems Integration with AS/RS in Manufacturing. *International Scientific Journal "Herald of Science"*, 4(85), 788–893.
5. Yekhlakov, Yu.P., Zhukovsky, O.I., Senchenko, P.V., Gritsenko, Yu.B. & Milikhin, M.M. (2017). Basic Principles of Developing Web-Oriented Information Management Systems for Socio-Economic and Technical Processes Infrastructure. *TUSUR Reports*, (2), 63–67.
6. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Intelligent systems process control // *Problems of Artificial Intelligence*. 2024. №2(33). С. 37-44.
7. Romanova, I.K. (2016). Modern Methods of Multidimensional Data Visualization: Analysis, Classification, Implementation, Applications in Technical Systems. *Science and Education*. Bauman Moscow State Technical University, (3), 133–167.
8. Kalmakova, N.A. (2015). Management Levels for Balanced Development of Industrial Enterprises Based on Self-Organization Principles. *Regional Economics: Theory and Practice*, (27), 24–35.
9. Volynsky, I.A. (2020). Concept, Types and Features of Flow Process Formation in a Seaport. *ASTU Herald*, (3), 71–78.
10. Ganin, M.A. & Lobanov, E.M. (2020). Organization and Technology of Handling Processes in Seaports. St. Petersburg: Morsar.
11. Garkusha, D.A. (2025). A Method for Filling and Processing a Knowledge Base in the Task of Building a Digital Twin. *DMKC 2025*.
12. Lukov, D.K. Automated Process Control Systems (APCS). *European Science*, 2(44), 19–21.
13. Shevchenko, A.M. & Dyda, A.A. (2024). Analysis of the Agent-Based Approach Implementation and Features of Seaport Simulation Modeling in the AnyLogic Environment. *Computational Nanotechnology*, (4), 135–145.
14. Prokopenko, E.V. & Sarapulova, T.V. (2011). Development of Web Applications to Support Strategic Management. *Herald of Kuzbass State Technical University*, 114–116.
15. Pchelkin, A.Yu. & Gusarova, N.F. (2022). Cross-Platform Development Based on Web Technologies to Support Decision-Making in Problem-Oriented Management Systems. *Economics, Law, Innovation*, (1), 41–47.
16. Kondakova, A.V. & Zolotukhina, E.B. Data Exchange Between the Cloud Solution SAP Ariba Sourcing and Accounting Systems Using Web Services Technology. [Electronic resource]. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/obmen-dannymi-mezhdu-oblachnym-resheniem-sap-ariba-sourcing-i-uchetnymi-sistemami-s-pomoschyu-tehnologii-veb-servisov/viewer>
17. Burtsev, V.A. (2025). Problems and Prospects of User Experience in Digital Platforms: Theoretical Approaches and Significance for Business Applications. *Innovation and Investment*, (4), 330–334.
18. Nixon, R. (2022). *Learning PHP, MySQL, JavaScript, CSS & HTML5: Building Dynamic Websites*. 5th ed. St. Petersburg: BHV-Petersburg. 848 p.
19. Eisenberg, J.D. (2014). *SVG Essentials: Producing Scalable Vector Graphics with XML*. 2nd ed. O'Reilly Media. 354 p.
20. MDN Web Docs: Canvas API. [Electronic resource]. Retrieved from https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/API/Canvas_API
21. Matsuda, K. & Lea, R. (2016). *WebGL Programming Guide: Interactive 3D Graphics Programming with WebGL*. St. Petersburg: Piter. 464 p.
22. Konva.js: Official Documentation. [Electronic resource]. Retrieved from <https://konvajs.org/>
23. Fabric.js: Official Documentation. [Electronic resource]. Retrieved from <https://fabricjs.com/>
24. React.js: Official Documentation. [Electronic resource]. Retrieved from <https://react.dev>
25. Vue.js: Official Documentation. [Electronic resource]. Retrieved from <https://vuejs.org/guide>
26. Angular: Official Documentation. [Electronic resource]. Retrieved from <https://angular-doc.ru/docs>
27. Redux: Official Documentation. [Electronic resource]. Retrieved from <https://redux.js.org>
28. Architecture of Modular React + Redux Applications. [Electronic resource]. Retrieved from <https://habr.com/ru/articles/326484/>
29. Zustand: Official Documentation. [Electronic resource]. Retrieved from <https://zustand.docs.pmnd.rs/getting-started/introduction>
30. Mobx: Official Documentation. [Electronic resource]. Retrieved from <https://mobx.js.org/getting-started>
31. React-DnD: Official Documentation. [Electronic resource]. Retrieved from <https://react-dnd.github.io/react-dnd/docs/overview>

RESUME

A. A. Levashov, D. A. Garkusha

Visualization of production and technological processes of the sea port

The article is devoted to the development and substantiation of web visualization methods for managing the production and technological processes of a seaport. The paper formulates a set of system requirements focused on the tasks of operational, tactical and strategic management, and provides a comparative analysis of web technologies for interactive 2D graphics. Based on the analysis, the choice of the React, Redux and technology stack is justified Konva.js. The key problems and features of the implementation are considered. Based on this, solutions are proposed.:

To ensure high performance when rendering a variety of dynamic objects (ships, machinery, containers), a high-level framework was chosen instead of the low-level Canvas API or low-performance SVG and DOM Konva.js, which provides an object model, built-in event support, and optimization mechanisms (layer caching, batchDraw).

Instead of the built-in React tools (Context API) or other libraries (MobX), the Redux library is used to manage the complex state of many interconnected port objects, which is frequently and predictably updated. Its strict architecture ensures scalability, state predictability, and convenient integration with middleware for asynchronous operations.

To implement a drag-and-drop operation that is critical for planning, the user interacts with an object on the canvas (events Konva.js) is directly synchronized with the global application state (Redux). This ensures that the only source of truth about the object's position remains the state, which is necessary for validating positions, logging, and sending data to the server.

Built-in methods are used to ensure the validation of movement operations (checking zone boundaries, collisions) directly during the dragging process. Konva.js such as `shape.intersects()`, which allows you to provide instant feedback to the user.

As a result, the following conclusions can be drawn.

A hybrid approach is used to visualize complex objects, such as a seaport: the Konva graphics library.js provides high—performance rendering and interactivity, while React and Redux provide declarativeness and state management. This allows you to create scalable applications with the ability to directly manipulate objects in real time.

A promising direction is integration with digital twin and AI systems for logistics optimization.

РЕЗЮМЕ

А. А. Левашов, Д. А. Гаркуша

Визуализация производственно-технологических процессов морского порта

Статья посвящена обзору методов веб-визуализации для управления производственно-технологическими процессами морского порта. В работе сформулирован комплекс требований к системе, ориентированный на задачи оперативного, тактического и стратегического управления, и проведён сравнительный анализ веб-технологий для интерактивной 2D-графики. На основе анализа обоснован выбор стека технологий React, Redux и Konva.js. Рассмотрены ключевые проблемы и особенности реализации. На основе этого предложены решения:

Для обеспечения высокой производительности при отрисовке множества динамических объектов (суда, техника, контейнеры) вместо низкоуровневого Canvas API или малопроизводительных SVG и DOM выбран высокоуровневый фреймворк Konva.js, который предоставляет объектную модель, встроенную поддержку событий и механизмы оптимизации (кэширование слоев, batchDraw).

Для управления сложным состоянием множества взаимосвязанных объектов порта, которое часто и предсказуемо обновляется, вместо встроенных средств React (Context API) или иных библиотек (MobX) применена библиотека Redux. Её строгая архитектура обеспечивает масштабируемость, предсказуемость состояния и удобную интеграцию с middleware для асинхронных операций.

Для реализации критически важной для планирования операции drag-and-drop взаимодействие пользователя с объектом на холсте (события Konva.js) напрямую синхронизируется с глобальным состоянием приложения (Redux). Это гарантирует, что единственным источником истины о положении объекта остается состояние, что необходимо для валидации позиций, логирования и отправки данных на сервер.

Для обеспечения валидации операций перемещения (проверка границ зон, коллизий) непосредственно в процессе перетаскивания используются встроенные методы Konva.js, такие как `shape.intersects()`, что позволяет предоставлять пользователю мгновенную обратную связь.

В результате можно сделать следующие выводы.

Для визуализации сложных объектов, таких как морской порт, применяется гибридный подход: графическая библиотека Konva.js обеспечивает производительный рендеринг и интерактивность, а React и Redux — декларативность и управление состоянием. Это позволяет создавать масштабируемые приложения с возможностью прямого манипулирования объектами в реальном времени.

Перспективное направление - интеграция с системами цифрового двойника и ИИ для оптимизации логистики.

Левашов А. А. – младший научный сотрудник, ФГБНУ “Институт проблем искусственного интеллекта”, 283048, Донецк, ул. Артема, 118б, тел +7(949) 595-8245, artur.levashoff@gmail.com. *Область научных интересов:* визуализация данных, нейронные сети.

Гаркуша Д. А. – младший научный сотрудник, ФГБНУ “Институт проблем искусственного интеллекта”, 283048, Донецк, ул. Артема, 118б, тел +7(977) 016-9581, dmitrii.garkusha.97@mail.ru. *Область научных интересов:* базы знаний, цифровые двойники, нейронные сети.

Статья поступила в редакцию 21.04.2025.

УДК 004.056:681.5:621.37

DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-172-181

И. А. Третьяков, М. В. Бабичева, Я. И. Рушечников, В. В. Данилов
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Донецкий государственный университет»
283001, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Университетская, 24

ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ*

I. A. Tretiakov, M. V. Babicheva, Ia. I. Rushechnikov, V. V. Danilov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Donetsk State University"
283001, Donetsk People's Republic, Donetsk, st. Universitetskaia, 24

ELEMENTS OF AUTOMATED SCIENTIFIC RESEARCH SYSTEMS FOR RADIO-ELECTRONIC ENVIRONMENT

Разработан программно-аппаратный модуль для обнаружения несанкционированного электромагнитного излучения в диапазоне 85-115 МГц, доработана принципиальная электрическая схема, написаны программы для прошивки микроконтроллера ATtiny85 на алгоритмическом языке C и состыковки модуля с персональным компьютером на языке Pascal, проведены тестовые испытания и калибровка разработанного программно-аппаратного модуля на макетах радиомикрофонов, проведен сравнительный анализ результатов, полученных при помощи разработанного модуля с результатами полученными, при помощи программно-аппаратного модуля SDR Sharp. Подход реализации горизонтального масштабирования компонент систем автоматизированного радиомониторинга позволяет без высоких затрат повысить качественные характеристики радиосистемы, а также расширить список решаемых с её помощью задач.

Ключевые слова: ПЭМИН, технические каналы утечки информации, информационная безопасность, АСНИ, радиообстановка, радиомониторинг, программно-определяемых радиосистема

A hardware and software module has been developed to detect unauthorized electromagnetic radiation in the range of 85-115 MHz, an electrical circuit has been finalized, programs have been written for firmware of the ATtiny85 microcontroller in the algorithmic C language and for docking the module with a personal computer in Pascal, test tests and calibration of the developed hardware and software module have been performed on radio microphone layouts, a comparative analysis of the results has been carried out, obtained using the developed module with the results obtained, using the SDR Sharp software and hardware module. The approach of implementing horizontal scaling of components of automated radio monitoring systems makes it possible to improve the quality characteristics of the radio system without high costs, as well as expand the list of tasks solved with its help.

Key words: TEMPEST, technical channels of information leakage, information security, ASRS, radio environment, radio monitoring, software-defined radio systems

* Исследование проводилось в рамках научной г/б темы «Исследование природы каналов побочных электромагнитных излучений и наводок элементов и устройств офисной вычислительной техники» (регистрационный номер 124012400347-2).

Введение

В условиях стремительного роста компьютеризации всех сфер человеческой деятельности одной из ключевых проблем информационной безопасности становятся побочные электромагнитные излучения (ПЭМИН) и радиоканалы технической утечки информации (ТУИ) [1-9]. Актуальность исследования этих явлений, особенно в контексте возрастающей сложности электромагнитной обстановки, продолжает расти [3-5], [7-9]. Несмотря на существование функциональных аналогов для оценки ПЭМИН и ТУИ, разработка новых методов анализа этих явлений остаётся важной и перспективной научно-технической задачей в области информационной безопасности. Из-за множества и сложности вычислений решение этой задачи невозможно без использования инструментов идентификации и создания специализированных автоматизированных систем, таких как автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) радиоэлектронной обстановки [10-12]. Такие АСНИ представляют собой комплекс технических средств, программного обеспечения и рекомендаций по их применению.

Для создания такой АСНИ необходима разработка дополнительного специального аппаратного и программного обеспечения, позволяющего решать задачи обнаружения, распознавания, хранения и визуализации, а также находить определённые образы у обнаруженных сигналов.

Таким образом, в процессе исследования каналов ПЭМИН и ТУИ элементов и устройств офисной вычислительной техники, авторами предлагается:

- улучшение характеристик радиосистемы за счёт горизонтального масштабирования её функциональных компонентов;
- совершенствование аппаратных и программных средств сбора, анализа и обработки пространственно-временных характеристик сигналов, оценивание их объема в рамках зоны контроля, их дальнейшая классификация.

1 Решение задач автоматизированного радиомониторинга посредством горизонтального масштабирования программно-определяемых радиосистем

Радиомониторинг в условиях современной сложной электромагнитной обстановки позволяет не только анализировать характеристики средств связи и беспроводных технологий, но и эффективно решать задачи информационной безопасности, связанные с контролем радиообстановки [13-15]. Основные трудности в данной инженерной области обусловлены как особенностями аппаратных систем, так и механизмами программной обработки данных о текущем состоянии радиообстановки.

Цель этой работы — исследование возможностей улучшения характеристик радиосистемы путём горизонтального масштабирования её функциональных компонентов. Ожидается, что такое улучшение позволит значительно расширить возможности радиомониторинга при решении практических задач.

Масштабирование в данном контексте можно рассматривать как процесс, направленный на увеличение способности информационной системы эффективно справляться с более крупными и сложными задачами. С учётом особенностей оборудования для автоматизированного радиомониторинга выделяется ряд задач, решение которых может быть улучшено через масштабирование. Среди них:

1. Увеличение ширины панорамного обзора принимающей системы.
2. Возможность работы системы в двух несмежных частотных диапазонах.
3. Синхронная работа нескольких приёмных систем в одинаковых частотных диапазонах.

Анализируя различные способы масштабирования автоматизированных информационно-измерительных систем, таких как АСНИ радиоэлектронной обстановки, можно сделать вывод, что улучшение её характеристик возможно преимущественно через горизонтальное масштабирование. Вертикальное масштабирование, предполагающее значительное изменение структуры радиосистемы, зачастую невозможно или нежелательно. Хотя многие производители программно-определяемых (SDR) систем не предусматривают возможность горизонтального масштабирования, оно всё же может быть реализовано путём синхронизации независимых приёмников.

Для объединения нескольких приёмников в единую информационную систему под общим управлением необходимо выполнить следующие условия:

1. Обеспечить многоступенчатую синхронизацию компонентов, используя как общую линию тактирования, так и модельный сигнал с заранее определёнными характеристиками, на которые все компоненты системы будут одинаково реагировать.
2. Обеспечить единую конфигурацию всех компонентов, что критически важно для обеспечения коррелированности получаемых данных о радиообстановке.

Эти рекомендации были использованы для реализации горизонтального масштабирования радиосистемы на базе приёмного оборудования SDR. В результате удалось существенно расширить одну из ключевых характеристик приёмника — ширину панорамного обзора, которая по умолчанию составляет около 2 МГц. Удвоение этой ширины значительно повысило осведомлённость о текущей ситуации в радиомониторинге.

Предложенный подход к горизонтальному масштабированию компонентов автоматизированных систем радиомониторинга позволяет повысить качественные характеристики радиосистемы без значительных финансовых вложений и расширить спектр решаемых задач. Несмотря на сложности, связанные с многоступенчатой синхронизацией частей системы, ограничениями по увеличению числа элементов и усложнённой программной обработкой данных, этот метод остаётся наиболее практичным и экономически целесообразным.

2 Программно-аппаратный модуль обнаружения радиоканалов технической утечки информации

С увеличением распространения радиоэлектронных систем радиотехническая разведка становится всё более значимой в сфере разведывательной деятельности. В настоящее время устройства для радиозакладки, способные собирать и передавать информацию, становятся доступны не только специалистам и работникам правоохранительных органов, но и широкой публике.

Для выявления таких радиозакладных устройств применяются комплексы, которые анализируют спектры излучений в контролируемых помещениях, сопоставляя данные, полученные в разное время, для обнаружения несанкционированных сигналов [5], [7], [8]. Ключевым моментом является не только прием и усиление сигналов, но и преобразование их в цифровую форму для дальнейшей обработки. Это позволяет создавать полностью или частично автоматизированные системы, использующие современные технологии компьютерной обработки, включая элементы искусственного интеллекта [16], [17]. На рис. 1 представлена структурная схема разработанного приемного устройства.

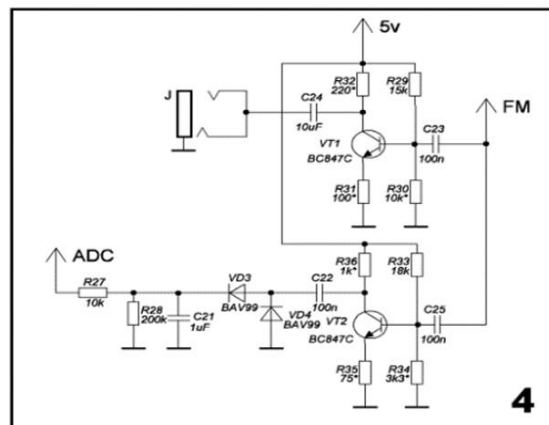
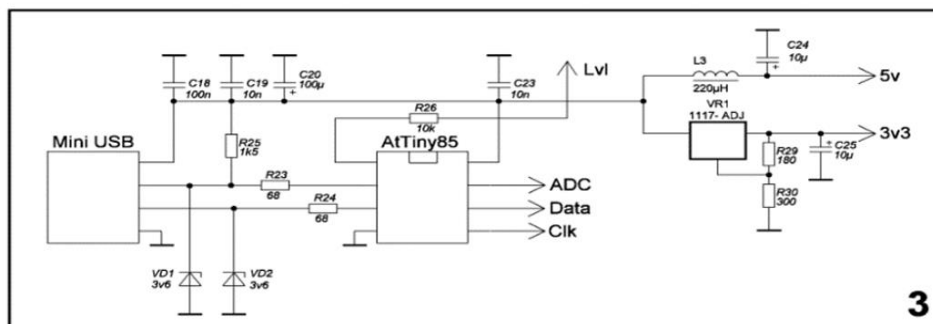
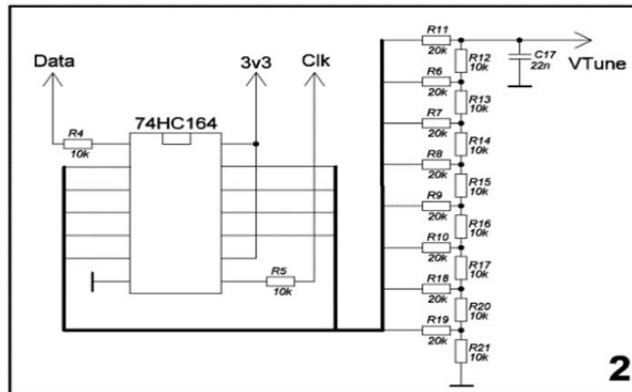
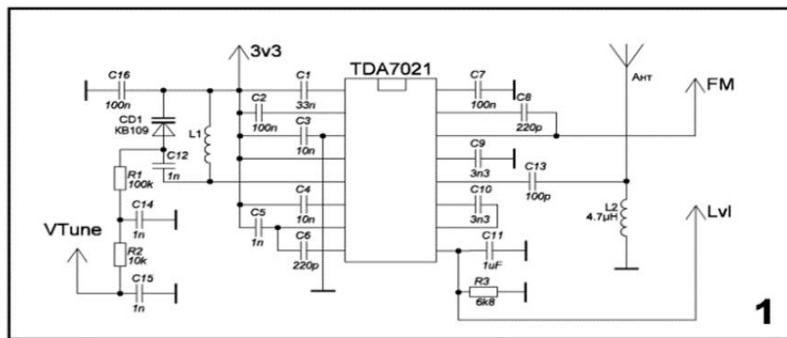


Рисунок 1 – Структурная схема разработанного приемного устройства

Устройство (рис. 1) структурно можно разделить на четыре основных блока:

1. Непосредственно приемник, функционирующий на базе микросхемы TDA7021.
2. Цифроаналоговый преобразователь, состоящий из сдвигового регистра и резисторов R11-R21.

3. Модуль связи с персональным компьютером, основанный на плате Digispark.
4. Усилитель, предназначенный для наушников (для прослушивания обнаруженных несущих сигналов) и усилитель с детектором для считывания уровней модуляции этих сигналов.

Микроконтроллер ATtiny85 не только отслеживает наличие и глубину модуляции, но также может изменять настройки гетеродина приемника, что позволяет осуществлять сканирование. На рисунке 2 представлен внешний вид сканирующего приемника, а на рисунке 3 – процесс работы с программно-аппаратным макетом.



Рисунок 2 – Внешний вид сканирующего приемника, подключенного к ПК



Рисунок 3 – Процесс обнаружения оператором несанкционированных радиоизлучений

Программное обеспечение состоит из двух компонентов: одной программы для микроконтроллера ATtiny85, написанной в среде ARDUINO IDE версии 1.8.2, и другой программы для персонального компьютера, разработанной с использованием Delphi 7. Программа для микроконтроллера управляет гетеродином приемника,

осуществляет передачу оцифрованного сигнала от цифроаналоговых преобразователей, а также производит считывание и усреднение данных с двух АЦП по 10 измерениям. В зависимости от команд, поступающих с ПК, она выполняет настройку ЦАП на заданную частоту, осуществляет сканирование и передает полученные данные на ПК. Сканирование подразумевает снятие значений с двух АЦП (первый – для девиации частоты, второй – для уровня несущего сигнала) с частотой, установленной в ЦАП. После получения уровней с АЦП производятся усреднение измеренных данных и их отправка на СОМ-порт ПК. Программа для персонального компьютера, помимо стандартных компонентов, использует библиотеку VComPort, которая обеспечивает работу с СОМ-портом. Интерфейс данной программы показан на рисунке 4.

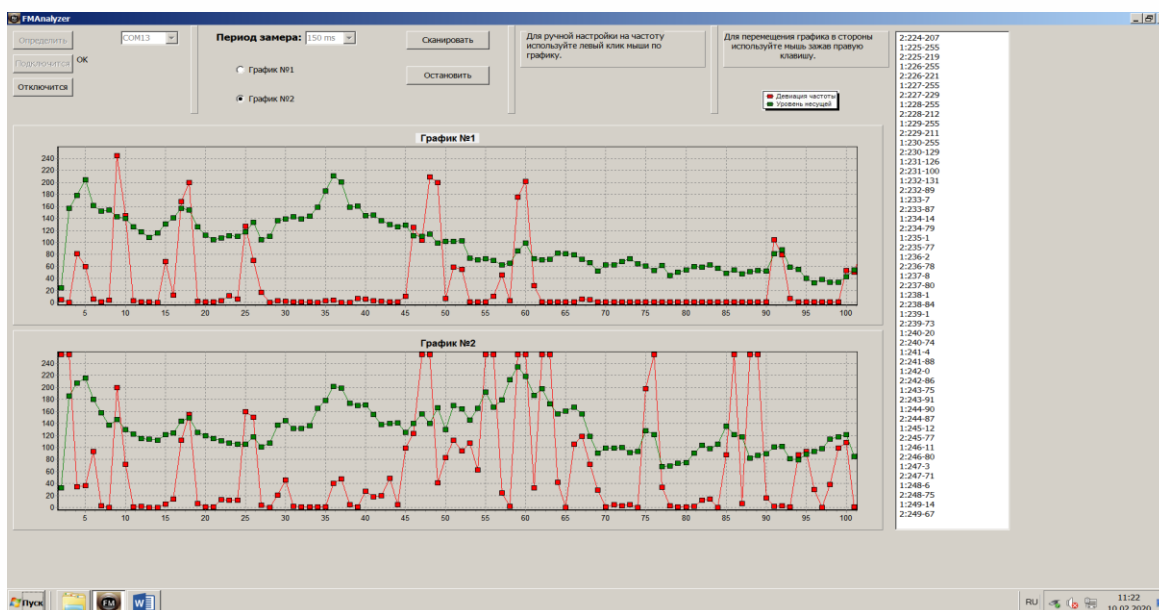


Рисунок 4 – Интерфейс программы для автоматизированного сканирования FM-диапазона

Таким образом, производится сканирование СОМ-портов и осуществляется подключение к приемнику. Затем передаются значения для настройки ЦАП (в диапазоне от 5 до 255), и по окончании установленного временного интервала сканирования запрашиваются данные с двух АЦП. Эти данные впоследствии используются для построения графиков. Также предусмотрена функция настройки приемника на нужную частоту через клик по созданному графику. На рисунке 4 график №2 демонстрирует спектр с излучениями радиовещательных станций, а график №1 показывает ту же частотную область с активированным макетом закладного устройства. Выявление закладного устройства осуществляется по появлению пика на спектрограмме. Справа отображаются значения, использованные для построения графиков, которые можно применять для дальнейшей интеллектуальной обработки и калибровки.

После завершения сборки и настройки модуля радиоразведки были проведены тестовые эксперименты. Получены графики для принимаемых частот в диапазоне FM, затем в работу были включены радиомикрофоны, находящиеся в лаборатории кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий Донецкого государственного университета, которые работают в том же диапазоне частот. Демодулированный сигнал четко слышен в наушниках.

Заключение

Представленные рекомендации было принято использовать для горизонтального масштабирования радиосистемы на базе приёмного оборудования SDR, что позволило несколько расширить одну из базовых характеристик приёмника, а именно ширину панорамного обзора, которая по умолчанию составляет порядка 2 МГц. Удвоение ширины панорамного обзора позволяет повысить текущую осведомлённость об окружающей картине радиомониторинга.

Метод, используемый для реализации горизонтального масштабирования компонентов систем автоматизированного радиомониторинга, позволяет значительно улучшить качественные характеристики радиосистемы без значительных финансовых затрат, а также расширить спектр задач, которые возможно решать с ее помощью. Несмотря на существующие сложности, связанные с необходимостью многоступенчатой синхронизации элементов системы, ограниченными возможностями увеличения числа компонентов и усложнением обработки данных, предложенный метод оказывается наиболее подходящим и не требует крупных капитальных вложений.

Был разработан программно-аппаратный модуль для обнаружения несанкционированного электромагнитного излучения в диапазоне 85-115 МГц, усовершенствована принципиальная электрическая схема, написаны программы для прошивки микроконтроллера ATtiny85 на языке C и интеграции модуля с персональным компьютером на языке Pascal. Также были проведены тестовые испытания и калибровка разработанного программно-аппаратного модуля на прототипах радиомикрофонов, а также сравнительный анализ полученных результатов в ходе работы нового модуля с данными, полученными с помощью программно-аппаратного модуля SDR Sharp.

Список литературы

1. Проблемы защиты объектов вычислительной техники от утечки информации по каналам побочных электромагнитных излучений и наводок в современных условиях / Е. М. Панченко, В. В. Каверин, В. А. Бабанских, Д. В. Суздаев. *Известия ТРТУ*. 2003. № 4(33). С. 112-113. EDN KVHQQXN.
2. Хорев, А. А. Оценка возможности обнаружения побочных электромагнитных излучений видеосистемы компьютер / А. А. Хорев. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2014. № 2(32). С. 207-213. EDN SEBGWX.
3. Шпилевой, А. А. О возможности аналитического обнаружения сигнала ПЭМИН в видеоинтерфейсах стандарта HDMI / А. А. Шпилевой, А. А. Персичкин. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физ.-мат. и техн. науки*. 2022. № 1. С. 34-39. EDN AWTJYC.
4. Паршуткин, А. В. Повышение защищенности информации от утечки через побочные электромагнитные излучения / А. В. Паршуткин, М. Р. Неаскина. *Вопросы кибербезопасности*. 2022. № 3(49). С. 82-89. DOI 10.21681/2311-3456-2022-3-82-89. EDN ARQCJO.
5. Язов, Ю. К. Пути построения многоагентной системы защиты информации от утечки по техническим каналам / Ю. К. Язов, А. О. Авсентьев. *Вопросы кибербезопасности*. 2022. № 5(51). С. 2-13. DOI 10.21681/2311-3456-2022-5-2-13. EDN DGYOEF.
6. Третьяков, И. А. Проблемы информационной безопасности электромагнитных излучений и наводок в средствах вычислительной техники / И. А. Третьяков, Я. И. Рушечников. *Информационные системы и технологии : материалы международного научного конгресса по информатике*. В 3 ч. (Минск, 27–28 октября 2022 г.). Ч. 1. Минск: БГУ, 2022. С. 108-112. EDN GTKGIM.
7. Foziljonov, Kh. Active methods and means of information protection against leakage through channels of side electromagnetic radiation and interference / Kh. Foziljonov, I. Faziljanov. *Science and innovation*. 2023. V. 2(A4). P. 46-52. DOI 10.5281/zenodo.7818479.
8. Булгаков, О. М. Демонстрация утечки информации посредством побочных электромагнитных излучений и ее перехвата при обучении специалистов в области информационной безопасности / О. М. Булгаков, Е. В. Петрова. *Вестник Краснодарского университета МВД России*. 2024. № 3(65). С. 110-114. EDN QHMХЕС.
9. Методика оценки побочных электромагнитных излучений посредством алгоритмической обработки массива экспериментальных спектрограмм / Я. И. Рушечников, В. В. Данилов, И. А. Третьяков, Д. Р. Зеленченко. *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2024. № 3. С. 126-134. DOI 10.5281/zenodo.14018656. EDN DLEMAM.
10. Ашихмин, А. В. Автоматизированная система радиомониторинга / А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин, А. М. Рембовский. *Спецтехника и связь*. 2012. № 1. С. 43-50. EDN OXUPNJ.

11. Соловьев, А. М. О результатах разработки автоматизированной системы научных исследований средств мониторинга радиоэлектронной обстановки в АСУТП / А. М. Соловьев, А. А. Головин, Р. К. Кинденев. *Технические науки - от теории к практике*. 2015. № 53. С. 80-88. EDN VDWRPV.
12. Третьяков, И. А. Применение оптических методов обработки информации в АСНИ радиосигналов / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, В. А. Ступак. *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2024. № 1. С. 42-49. DOI 10.5281/zenodo.10974622. EDN LSKSPA.
13. Рембовский, А. М. *Радиомониторинг - задачи, методы, средства* / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козмин. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Горячая линия - Телеком, 2010. 624 с.
14. Мухин, И. Е. *Методологические основы синтеза технических средств обеспечения автоматизированного радиомониторинга современных систем телекоммуникаций* : монография / И. Е. Мухин ; И. Е. Мухин. Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2010. 282 с. ISBN 978-5-7681-0571-6. EDN QMUUTH.
15. Компонентный состав системы радиомониторинга / А. М. Соловьев, М. А. Асещкий, Р. К. Кинденев, Е. Н. Кухаренко. *Символ науки: международный научный журнал*. 2017. Т. 2, № 4. С. 91-96. EDN YNEJNV.
16. Бабичева, М. В. Применение методов машинного обучения для автоматизированного обнаружения сетевых вторжений / М. В. Бабичева, И. А. Третьяков. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2023. Т. 50, № 1. С. 53-61. DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-1-53-61. EDN MGBAGF.
17. Рушечников, Я. И. Алгоритм автоматизированного определения типа модуляции на основе свёрточной нейронной сети / Я. И. Рушечников, В. В. Данилов. *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2021. № 3. С. 34-42. EDN ZAUUPL.

References

1. Problemy zashchity obiektov vychislitelnoi tekhniki ot utechki informatsii po kanalam pobochnykh elektromagnitnykh izluchenii i navodok v sovremennykh usloviakh / E. M. Panchenko, V. V. Kaverin, V. A. Babanskikh, D. V. Suzdalev // *Izvestiia TRTU*. – 2003. – № 4(33). – S. 112-113. – EDN KVHQXH.
2. Khorev, A. A. Otsenka vozmozhnosti obnaruzheniia pobochnykh elektromagnitnykh izluchenii videosistemy kompiuter / A. A. Khorev // *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*. – 2014. – № 2(32). – S. 207-213. – EDN SEBGWX.
3. Shpilevoi, A. A. O vozmozhnosti analiticheskogo obnaruzheniia signala PEMIN v videointerfeisakh standarta HDMI / A. A. Shpilevoi, A. A. Persichkin // *Vestnik Baltiiskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta. Serii: Fiz.-mat. i tekhn. nauki*. – 2022. – № 1. – S. 34-39. – EDN AWTJYC.
4. Parshutkin, A. V. Povyshenie zashchishchennosti informatsii ot utechki cherez pobochnye elektromagnitnye izlucheniia / A. V. Parshutkin, M. R. Neaskina // *Voprosy kiberbezopasnosti*. – 2022. – № 3(49). – S. 82-89. – DOI 10.21681/2311-3456-2022-3-82-89. – EDN ARQCJO.
5. Iazov, Iu. K. Puti postroeniia mnogoagentnoi sistemy zashchity informatsii ot utechki po tekhnicheskim kanalam / Iu. K. Iazov, A. O. Avsentev // *Voprosy kiberbezopasnosti*. – 2022. – № 5(51). – S. 2-13. – DOI 10.21681/2311-3456-2022-5-2-13. – EDN DGYOEF.
6. Tretiakov, I. A. Problemy informatsionnoi bezopasnosti elektromagnitnykh izluchenii i navodok v sredstvakh vychislitelnoi tekhniki / I. A. Tretiakov, Ia. I. Rushechnikov // *Informatsionnye sistemy i tekhnologii : materialy mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa po informatike. V 3 ch. (Minsk, 27–28 oktiabria 2022 g.)*. – Ch. 1. – Minsk: BGU, 2022. – S. 108-112. – EDN GTKGIM.
7. Foziljonov, Kh. Active methods and means of information protection against leakage through channels of side electromagnetic radiation and interference / Kh. Foziljonov, I. Faziljanov // *Science and innovation*. – 2023. – V. 2(A4). – P. 46-52. – DOI 10.5281/zenodo.7818479.
8. Bulgakov, O. M. Demonstratsiia utechki informatsii posredstvom pobochnykh elektromagnitnykh izluchenii i ee perekhvata pri obuchenii spetsialistov v oblasti informatsionnoi bezopasnosti / O. M. Bulgakov, E. V. Petrova // *Vestnik Krasnodarskogo universiteta MVD Rossii*. – 2024. – № 3(65). – S. 110-114. – EDN QHMXEC.
9. Metodika otsenki pobochnykh elektromagnitnykh izluchenii posredstvom algoritmicheskoi obrabotki massiva eksperimentalnykh spektrogramm / Ia. I. Rushechnikov, V. V. Danilov, I. A. Tretiakov, D. R. Zelenchenko // *Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki*. – 2024. – № 3. – S. 126-134. – DOI 10.5281/zenodo.14018656. – EDN DLEMAM.
10. Ashikhmin, A. V. Avtomatizirovannaia sistema radiomonitoringa / A. V. Ashikhmin, V. A. Kozmin, A. M. Rembovskii // *Spetsstekhnika i sviaz*. – 2012. – № 1. – S. 43-50. – EDN OXUPNJ.
11. Solovev, A. M. O rezultatakh razrabotki avtomatizirovannoi sistemy nauchnykh issledovaniia sredstv monitoringa radioelektronnoi obstanovki v ASUTP / A. M. Solovev, A. A. Golovin, R. K. Kindenov // *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike*. – 2015. – № 53. – S. 80-88. – EDN VDWRPV.
12. Tretiakov, I. A. Primenenie opticheskikh metodov obrabotki informatsii v ASNI radiosignalov / I. A. Tretiakov, V. V. Danilov, V. A. Stupak // *Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki*. – 2024. – № 1. – S. 42-49. – DOI 10.5281/zenodo.10974622. – EDN LSKSPA.
13. Rembovskii, A. M. Radiomonitoring - zadachi, metody, sredstva / A. M. Rembovskii, A. V. Ashikhmin, V. A. Kozmin. – Izd. 2-е, pererab. i dop. – М.: Goriachaia liniia - Telekom, 2010. – 624 s.
14. Mukhin, I. E. Metodologicheskie osnovy sinteza tekhnicheskikh sredstv obespecheniia avtomatizirovannogo radiomonitoringa sovremennykh sistem telekommunikatsii : monografiia / I. E. Mukhin ; I. E. Mukhin. – Курск: Iugo-Zapadnyi gos. un-t, 2010. – 282 s. – ISBN 978-5-7681-0571-6. – EDN QMUUTH.

15. Komponentyi sostav sistemy radiomonitoringa / A. M. Solovev, M. A. Asetskii, R. K. Kindenov, E. N. Kukhareno // Simvol nauki: mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal. – 2017. – Т. 2, № 4. – С. 91-96. – EDN YNEJNV.
16. Babicheva, M. V. Primenenie metodov mashinnogo obucheniia dlia avtomatizirovannogo obnaruzheniia setevykh tvorzenii / M. V. Babicheva, I. A. Tretiakov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2023. – Т. 50, № 1. – С. 53-61. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-1-53-61. – EDN MGBAGF.
17. Rushechnikov, Ia. I. Algoritm avtomatizirovannogo opredeleniia tipa moduliatsii na osnove svetochnoi neironnoi seti / Ia. I. Rushechnikov, V. V. Danilov // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2021. – № 3. – С. 34-42. – EDN ZAUUPL.

RESUME

I. A. Tretiakov, M. V. Babicheva, Ia. I. Rushechnikov, V. V. Danilov

Elements of automated scientific research systems for radio-electronic environment

The purpose of this article is to develop elements of an automated electronic environment system, in particular, to develop additional special hardware and software that allows solving the tasks of detection, recognition, storage and visualization, as well as to find certain images of detected signals.

To improve the characteristics of a software-defined radio system, horizontal scaling of its functional components is applied, which in turn should lead to an expansion of high-quality capabilities for solving applied radio monitoring tasks.

A hardware and software module has been developed to detect unauthorized electromagnetic radiation in the 85-115 MHz range, an electrical circuit has been finalized, programs have been written for firmware of the ATtiny85 microcontroller in the algorithmic C language and for docking the module with a personal computer in Pascal, test tests and calibration of the developed hardware and software module have been carried out on radio microphone layouts, a comparative analysis of the results has been carried out, obtained using the developed module with the results obtained, using the SDR Sharp hardware and software module.

The approach of implementing horizontal scaling of components of automated radio monitoring systems makes it possible to improve the quality characteristics of the radio system without high costs, as well as expand the list of tasks solved with its help. Despite the problems associated with the need for multi-stage synchronization of parts of systems and the inability to indefinitely increase the number of components, as well as sophisticated software data processing, the proposed method is the most applicable and does not require large capital investments.

РЕЗЮМЕ

И. А. Третьяков, М. В. Бабичева, Я. И. Рушечников, В. В. Данилов

Элементы автоматизированных систем научных исследований радиоэлектронной обстановки

Цель данной статьи состоит в разработке элементов автоматизированной системы радиоэлектронной обстановки, в частности в разработке дополнительного специального аппаратного и программного обеспечения, позволяющего решать задачи обнаружения, распознавания, хранения и визуализации, а также находить определённые образы у обнаруженных сигналов.

Для улучшения характеристик программно-определяемой радиосистемы применяется горизонтальное масштабирование её функциональных компонентов, что в свою очередь должно привести к расширению качественных возможностей по решению прикладных задач радиомониторинга.

Разработан программно-аппаратный модуль для обнаружения несанкционированного электромагнитного излучения в диапазоне 85-115 МГц, доработана принципиальная электрическая схема, написаны программы для прошивки микроконтроллера ATtiny85 на алгоритмическом языке С и состыковки модуля с персональным компьютером на языке Pascal, проведены тестовые испытания и калибровка разработанного программно-аппаратного модуля на макетах радиомикрофонов, проведен сравнительный анализ результатов, полученных при помощи разработанного модуля с результатами полученными, при помощи программно-аппаратного модуля SDR Sharp.

Подход реализации горизонтального масштабирования компонент систем автоматизированного радиомониторинга позволяет без высоких затрат повысить качественные характеристики радиосистемы, а также расширить список решаемых с её помощью задач. Несмотря на проблемы, связанные с необходимостью многоступенчатой синхронизации частей систем и невозможностью до бесконечности наращивать количество компонент, а также усложнённую программную обработку данных, предложенный способ является наиболее применимым, и не требующим больших капитальных вложений.

Третьяков И. А. – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, i.tretiakov@mail.ru.

Область научных интересов: автоматизация научных исследований и автоматизированные системы; оптические информационные технологии; методы и системы защиты информации, информационная безопасность.

Бабичева М. В. – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, m.babicheva60@mail.ru.

Область научных интересов: информационная безопасность, пентестинг, нейронные сети.

Рушечников Я. И. – старший преподаватель кафедры радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, ya.rushechnikov@donnu.ru.

Область научных интересов: автоматизированные системы радиомониторинга, нейронные сети, методы и системы защиты информации, информационная безопасность.

Данилов В. В. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, ut5iv@mail.ru.

Область научных интересов: оптические информационные технологии; автоматизация научных исследований и автоматизированные системы; информационно-измерительные системы.

Статья поступила в редакцию 12.06.2025.

УДК 004.93

DOI 10.24412/2413-7383- 2025-3-38-183-189

Ю. А. Каспаров, В. М. Зуев

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк
283048, г. Донецк, ул. Артема, 118 б

ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ ДЕТЕКЦИИ И СЕГМЕНТАЦИИ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК

U. A. Kasparov V. M. Zuev

Federal State Budgetary Scientific Institution «Institute of Artificial Intelligence Problems»
283048, Donetsk, Artem str., 118 b

TRAINING COMPUTER VISION MODELS FOR STEM CELL DETECTION AND SEGMENTATION

U. A. Kasparov, V. M. Zuev

Budgetary Foederati Publica Institutione Scientific Institutum Intelligentiae Artificialis Problems,
Donetsk 118 b Artyom str., Donetsk, 283048

EXERCITATIO MODELLORUM VISIONIS COMPUTATRICIS AD DETECTIONEM ET SEGMENTATIONEM CELLULARUM STEMICARUMB

В статье рассматриваются основные подходы обучения моделей компьютерного зрения для задачи детекции и сегментации стволовых клеток. Разработана и апробирована методология работы с изображениями высокого разрешения для задач сегментации изображения.

Ключевые слова: детекция, изображение, сегментация, высокое разрешение

This article examines key approaches to training computer vision models for stem cell detection and segmentation. A methodology for working with high-resolution images for image segmentation tasks is developed and tested.

Keywords: location: detection, image, segmentation, high resolution

Hic articulus modus clavis ad exempla visionis computatralis ad detectionem et segmentationem cellularum primordialium exercenda examinat. Methodologia ad imagines altae resolutionis ad segmentationem imaginum tractandam explicatur et probatur.

Affatus clavis: detectio, imago, segmentation, alta resolutio

Введение

В настоящее время актуальны работы по обнаружению и классификации объектов на больших изображениях с высоким разрешением, как например на изображении 4000×4000 пикселей или больше, и при этом объекты могут занимать 20×20 пикселей или менее. Такие задачи возникают при детекции объектов на снимках из космоса, при охране территорий, в медицине и в других приложениях.

Ранее мы имели успешный опыт работы с детекцией объектов на изображениях стандартных размеров с использованием YOLOv8 [1], [2], SSD [3], [4] и других методик [5-7]. В предыдущих проектах [8], [9] были достигнуты стабильные результаты детекции стандартных объектов с использованием прямоугольных ограничивающих рамок в формате YOLO [10-13]. Этот опыт показал эффективность современных архитектур компьютерного зрения для многих задач реального времени. Однако, в рамках разработки новых систем, в которых требовалось обнаружение мелких объектов на больших кадрах, как например мониторинг роста стволовых клеток, известные методы [14-18] показали отрицательный результат.

Актуальность работы. Основная цель работы – автоматизация процесса анализа динамики роста клеток, имеет важное значение для медицинских исследований. В отличие от предыдущих работ [19], [20], где работа велась с детекцией стандартных объектов, новая задача потребовала внесения коррекций в известные детекторы объектов [20,21] из-за имеющимися специфические особенности исходных данных.

Постановка задачи. Ставилась задача детекции мелких объектов на больших изображениях с высоким разрешением.

Анализ исходных данных и выявление особенностей. На начальном этапе был проанализирован предоставленный набор данных. Он имел следующие ключевые особенности: Изображения высокого разрешения: 4000×4000 пикселей и более (в отличие от стандартных 640×640), клетки как объекты детекции большей частью мелкие и могут занимать 20×20 пикселей или менее, но четко различимые на исходном разрешении. При этом клетки имеют неправильную, сложную форму с высокой плотностью расположения и часто переплетаются фрагментами. Часто имеется наличие групп клеток, размеченных как единые объекты. В некоторых случаях невозможно точно определить границы между соседними клетками. В связи с наличием групповых объектов, классический подсчет количества клеток был признан некорректным подходом. В качестве основного метода анализа была выбрана оценка общей площади, занимаемой клетками, что требовало точного определения границ каждого объекта.

Основные метрики оценки качества моделей компьютерного зрения, используемые в данной работе, следующие [1-3].

1. IoU (Intersection over Union) – показатель степени пересечения над степенью объединения, определяет степень перекрытия между предсказанной областью и истинной разметкой, вычисляется как отношение площади пересечения к площади объединения, принимает значение от 0 до 1, где 1 – означает идеальное совпадение

2. mAP (mean Average Precision) - средняя точность, основная метрика для задач детекции и сегментации

Основные варианты mAP:

- mAP@0.5: AP при IoU=0.5 (стандартный порог)
- mAP@0.5:0.95: mAP для IoU от 0.5 до 0.95 с шагом 0.05 (более строгая метрика)
- mAP@0.75: AP при IoU=0.75 (высокий порог качества)

Предварительные эксперименты и выявление проблем

Изначально была предпринята попытка использовать YOLO [1], [2], хорошо зарекомендовавшую себя ранее. Однако сразу были выявлены проблемы: объекты мелких размеров относительно всего изображения плохо детектировались. Наблюдалась потеря деталей при стандартном уменьшении изображений, как это требует YOLO, а также неудовлетворительное качество сегментации сложных форм. Использовался разнообразный формат разметки: применялся как полигональный, так и рамками. Получив не удовлетворительный результат, мы вернулись к более древнему методу, а именно Mask R-CNN [16].

Для улучшения качества сегментации было принято решение использовать Mask R-CNN с фреймворком detectron2 [22], специально разработанным для задач сегментации.

В процессе обучения Mask R-CNN были выявлены следующие проблемы в выборе метрик обучения, а именно: показатели детекции при ограничивающих рамках стабильно росли: $mAP@0.5:0.95$ (bbox), $mAP@0.5$ (bbox), в то время, как показатели сегментации (segm) оставались нулевыми: $mAP@0.5:0.95$ (segm) = 0, $mAP@0.5$ (segm) = 0, $mAP@0.75$ (segm) = 0. Нулевые значения метрик сегментации указывали на то, что модель не могла научиться правильно определять границы объектов, хотя ограничивающие рамки детектировались удовлетворительно.

Поиск решений и последовательные улучшения

Были испробованы аугментация, предобработка изображений, валидация и коррекция аннотаций. Так, были опробованы различные методы аугментации данных: изменение яркости, контрастности, насыщенности, повороты, масштабирование, кадрирование, добавление шумов и артефактов. К сожалению, эти меры не привели к значительному улучшению показателей. Так, была опробована предобработка изображений: устранение зашумленности с помощью билатерального фильтра [23], увеличение контрастности методом CLAHE [24], усиление границ с использованием фильтра Собеля [25], нормализация яркости. Несмотря на значительное улучшение видимости и четкости клеток, это не привело к улучшению параметров классификации. В конце была проведена повторно валидация и коррекция аннотаций. Она заключалась в тщательной проверке набора данных на предмет незамкнутых полигонов, самопересекающихся контуров, неправильной ориентации точек разметки, некорректных масок сегментации. Разработан скрипт автоматической коррекции найденных ошибок.

Анализ причины проблем

Было установлено, что основная проблема заключается в принудительном уменьшении размера изображения, которая подаётся на нейросеть Mask R-CNN [16] или YOLO в процессе обучения нейросетевых моделей. Стандартными размерами этих способов является приведение исходного размера к входному размеру 640×640 или 1024×1024. При больших исходных входных размерах это приводит к потере детализации мелких объектов, невозможности корректной сегментации сложных форм, снижению информативности изображений

Ключевое решение – метод разбиения исходного изображения на фрагменты.

Был разработан способ разделения исходного изображения на фрагменты на фрагменты, который включает в себя:

- автоматический подбор размера целевого фрагмента: 1024×1024 или 640×640 пикселей;
- подбор перекрытия между патчами в районе 20% от целевого фрагмента;
- установка минимального количества объектов в фрагменте, равном 3;
- автоматическая адаптация под особенности каждого изображения.

Техническая реализация способа

В результате работы создан комплекс скриптов для автоматического разделения изображений на фрагменты, трансформации аннотаций в соответствии с новыми координатами, конвертации из COCO формата в формат YOLO, разделения на тренировочную и валидационную выборки (80/20)

В результате внедрения способа получены следующие результаты:

Количественные результаты: исходные изображения: 20 шт. (4000×4000) разделены на 180 фрагментов по (1024×1024) пикселей. Качественно улучшение: сохранена детализация всех объектов, исключена необходимость деструктивного автоматического уменьшения размера, увеличена эффективность использования памяти при обучении, достигнуты рабочие показатели детекции и сегментации

Выводы и перспективы

Разработана и апробирована методология работы с изображениями высокого разрешения для задач сегментации изображения. Ключевые элементы предложенного способа: обязательная предобработка изображений, тщательная валидация и коррекция аннотаций и главное - использование разбиения исходного изображения на фрагменты для сохранения детализации.

Практическая значимость способа в том, что: подготовленный набор данных и отработанная методология позволяют перейти к этапу промышленного использования системы мониторинга роста клеток.

Заключение

Известные способы детекции и сегментации малых объектов на больших изображениях часто могут оказаться неработоспособными. Предложенный способ обучения заключается в разбиении большого изображения на фрагменты. В результате работы создан комплекс скриптов для автоматического разделения изображений на фрагменты, трансформации аннотаций в соответствии с новыми координатами, конвертации из COCO формата в формат YOLO, и в конечном итоге детекцию мелких объектов, которая обычными методами была неудовлетворительной.

Работа выполнена в рамках работы по разработке теоретических основ обнаружения и оценки объектов интеллектуальными робототехническими системами в условиях быстро меняющейся обстановки.

RESUME

U.A. Kasparov. V.M. Zuev

Training computer vision models for stem cell detection and segmentation

Known methods for detecting and segmenting small objects in large images, can often prove ineffective. The proposed training method involves splitting a large image into fragments. As a result, a set of scripts was created for automatically splitting images into fragments, transforming annotations according to new coordinates, converting from COCO to YOLO format, ultimately, reliable detection of small objects, which was unsatisfactory using conventional methods, was achieved.

РЕЗЮМЕ

Ю.А. Каспаров В.М. Зувев

Обучение моделей компьютерного зрения для задачи детекции и сегментации стволовых клеток

Известные способы детекции, такие как, и сегментации малых объектов на больших изображениях часто могут оказаться неработоспособными. Предложенный способ обучения заключается в разбиении большого изображения на фрагменты. В результате работы создан комплекс скриптов для автоматического разделения изображений на фрагменты, трансформации аннотаций в соответствии с новыми координатами, конвертации из COCO формата в формат YOLO, и в конечном итоге достигнута уверенная детекция мелких объектов, которая обычными методами была неудовлетворительной.

Список литературы

1. Terven, Juan; Córdova-Esparza, Diana-Margarita; Romero-González, Julio-Alejandro (2023-11-20). "A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS". *Machine Learning and Knowledge Extraction*. **5** (4): 1680–1716. [arXiv:2304.00501](https://arxiv.org/abs/2304.00501). doi:10.3390/make5040083. ISSN 2504-4990.
2. "YOLOv2: Real-Time Object Detection". pjreddie.com. Retrieved 2024-09-12.
3. Menke, Maximilian; Wenzel, Thomas; Schwung, Andreas (October 2022). "Improving GAN-based Domain Adaptation for Object Detection". 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). pp. 3880–3885. doi:10.1109/ITSC55140.2022.9922138. ISBN 978-1-6654-6880-0. S2CID 253251380.
4. Menke, Maximilian; Wenzel, Thomas; Schwung, Andreas (2022-08-31). "AWADA: Attention-Weighted Adversarial Domain Adaptation for Object Detection". [arXiv:2208.14662](https://arxiv.org/abs/2208.14662).
5. Oza, Poojan; Sindagi, Vishwanath A.; VS, Vibashan; Patel, Vishal M. (2021-07-04). "Unsupervised Domain Adaptation of Object Detectors: A Survey". [arXiv:2105.13502](https://arxiv.org/abs/2105.13502).
6. Khodabandeh, Mehran; Vahdat, Arash; Ranjbar, Mani; Macready, William G. (2019-11-18). "A Robust Learning Approach to Domain Adaptive Object Detection". [arXiv:1904.02361](https://arxiv.org/abs/1904.02361).
7. Soviany, Petru; Ionescu, Radu Tudor; Rota, Paolo; Sebe, Nicu (2021-03-01). "Curriculum self-paced learning for cross-domain object detection". *Computer Vision and Image Understanding*. [arXiv:1911.06849](https://arxiv.org/abs/1911.06849). doi:10.1016/j.cviu.2021.103166. ISSN 1077-3142. S2CID 208138033.
8. Зувев В.М. Сравнение обнаружения объектов средствами искусственного интнллекта в сравнении с классическими методами *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 3(34). С. 30-35. ISSN 2413-7383. DOI 10.24412/2413-7383-2024-3-30-35.
9. Зувев В. М. Ортогонализация весовых коэффициентов нейросети *Журнал «Проблемы искусственного интеллекта»*. 2025. №1 (36). С. 135–140. ISSN 2413-7383. DOI 10.24412/2413-7383-135-140.
10. Rémy, Philippe (2024-09-05), [//github.com/ philipperemy/yolo-9000](https://github.com/philipperemy/yolo-9000), retrieved 2024-09-12
11. Bochkovski, Alexey; Wang, Chien-Yao; Liao, Hong-Yuan Mark (2020-04-22). "YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection". [arXiv:2004.10934](https://arxiv.org/abs/2004.10934).

12. Wang, Chien-Yao; Bochkovskiy, Alexey; Liao, Hong-Yuan Mark (2021-02-21). "Scaled-YOLOv4: Scaling Cross Stage Partial Network". [arXiv:2011.08036](https://arxiv.org/abs/2011.08036) [cs.CV].
13. Li, Chuyi; Li, Lulu; Jiang, Hongliang; Weng, Kaiheng; Geng, Yifei; Li, Liang; Ke, Zaidan; Li, Qingyuan; Cheng, Meng; Nie, Weiqiang; Li, Yiduo; Zhang, Bo; Liang, Yufei; Zhou, Linyuan; Xu, Xiaoming (2022-09-07). "YOLOv6: A Single-Stage Object Detection Framework for Industrial Applications". [arXiv:2209.02976](https://arxiv.org/abs/2209.02976) [cs.CV].
14. Zhu, Jun-Yan; Park, Taesung; Isola, Phillip; Efros, Alexei A. (2020-08-24). "Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks". [arXiv:1703.10593](https://arxiv.org/abs/1703.10593) [cs.CV].
15. Dalal, Navneet (2005). [Hal.inria.fr//file/index/docid/548512/filename/hog_cvpr2005.pdf](https://hal.inria.fr/file/index/docid/548512/filename/hog_cvpr2005.pdf). "Histograms of oriented gradients for human detection" (PDF). *Computer Vision and Pattern Recognition*. **1**.
16. Pang, Jiangmiao; Chen, Kai; Shi, Jianping; Feng, Huajun; Ouyang, Wanli; Lin, Dahua (2019-04-04). "Libra R-CNN: Towards Balanced Learning for Object Detection". [arXiv:1904.02701v1](https://arxiv.org/abs/1904.02701).
17. Zhang, Shifeng (2018). "Single-Shot Refinement Neural Network for Object Detection". *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. pp. 4203–4212. [arXiv:1711.06897](https://arxiv.org/abs/1711.06897).
18. Lin, Tsung-Yi (2020). "Focal Loss for Dense Object Detection". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. **42** (2): 318–327. [arXiv:1708.02002](https://arxiv.org/abs/1708.02002). Bibcode:2020ITPAM..42..318L. doi:10.1109/TPAMI.2018.2858826. PMID 30040631. S2CID 47252984.
19. Zhu, Xizhou . "Deformable ConvNets v2: More Deformable, Better Results". [arXiv:1811.11168](https://arxiv.org/abs/1811.11168).
20. Dai, Jifeng "Deformable Convolutional Networks". [arXiv:1703.06211](https://arxiv.org/abs/1703.06211).
21. Alsanabani, Ala; Ahmed, Mohammed; AL Smadi, Ahmad (2020). "Vehicle Counting Using Detecting-Tracking Combinations: A Comparative Analysis". *2020 the 4th International Conference on Video and Image Processing*. pp. 4854. doi:10.1145/3447450.3447458. ISBN 9781450389075. S2CID 233194604.
22. M. M. Rahman and T. Finin, "Deep understanding of a documents structure," in *4th IEEE/ACM Int. Conf. on Big Data Computing, Applications and Technologies*, December 2017.
23. R. Kimmel, R. Malladi, and N. Sochen. Images as embedding maps and minimal surfaces: Movies, color, and volumetric medical images. *IEEE CVPR'97*, pp. 350-355, Puerto Rico, June 17–19, 1997. <https://www.cs.technion.ac.il/~ron/PAPERS/cvpr97.pdf>
24. Коротков В. А, Коротков К. В., Новичихин Е. П. Модификация метода CLANE для компенсации влияния гидрометеоров *Журнал радиоэлектроники*, ISSN 1684-1719, №10, 2017 с1-21.
25. Ватутин Э.И., Мирошниченко С.Ю., Титов В.С. Программная оптимизация оператора Собела с использованием SIMD-расширений процессоров семейства x86. *Телекоммуникации*. 2006. № 6. С. 12—16. (2006)

References

1. Terven, Juan; Córdova-Esparza, Diana-Margarita; Romero-González, Julio-Alejandro (2023-11-20). "A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS". *Machine Learning and Knowledge Extraction*. **5** (4): 1680–1716. [arXiv:2304.00501](https://arxiv.org/abs/2304.00501). doi:10.3390/make5040083. ISSN 2504-4990.
2. "YOLOv2: Real-Time Object Detection". pjreddie.com. Retrieved 2024-09-12.
3. Menke, Maximilian; Wenzel, Thomas; Schwung, Andreas (October 2022). "Improving GAN-based Domain Adaptation for Object Detection". *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. pp. 3880–3885. doi:10.1109/ITSC55140.2022.9922138. ISBN 978-1-6654-6880-0. S2CID 253251380.
4. Menke, Maximilian; Wenzel, Thomas; Schwung, Andreas (2022-08-31). "AWADA: Attention-Weighted Adversarial Domain Adaptation for Object Detection". [arXiv:2208.14662](https://arxiv.org/abs/2208.14662).
5. Oza, Poojan; Sindagi, Vishwanath A.; VS, Vibashan; Patel, Vishal M. (2021-07-04). "Unsupervised Domain Adaptation of Object Detectors: A Survey". [arXiv:2105.13502](https://arxiv.org/abs/2105.13502).
6. Khodabandeh, Mehran; Vahdat, Arash; Ranjbar, Mani; Macready, William G. (2019-11-18). "A Robust Learning Approach to Domain Adaptive Object Detection". [arXiv:1904.02361](https://arxiv.org/abs/1904.02361).
7. Soviany, Petru; Ionescu, Radu Tudor; Rota, Paolo; Sebe, Nicu (2021-03-01). "Curriculum self-paced learning for cross-domain object detection". *Computer Vision and Image Understanding*. [arXiv:1911.06849](https://arxiv.org/abs/1911.06849). doi:10.1016/j.cviu.2021.103166. ISSN 1077-3142. S2CID 208138033.
8. Zuev V.M Comparison of object detection by means of artificial intelligence in comparison with classical methods [Text]/V.M. Zuev. *Journal "Problems of Artificial Intelligence"*. – 2024. – № 3(34). – С. 30-35. – ISSN 2413-7383.-DOI 10.24412/2413-7383-2024-3-30-35.

9. Zuev V.M. Orthogonalization of neural network weight coefficients [Text] // Journal "Problems of Artificial Intelligence". – 2025. – №1 (36). – С. 135–140. – ISSN 2413-7383. – DOI 10.24412/2413-7383-135-140.
10. Rémy, Philippe (2024-09-05), [github.com/ philipperemy/yolo-9000](https://github.com/philipperemy/yolo-9000), retrieved 2024-09-12
11. Bochkovskiy, Alexey; Wang, Chien-Yao; Liao, Hong-Yuan Mark (2020-04-22). "YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection". arXiv:2004.10934.
12. Wang, Chien-Yao; Bochkovskiy, Alexey; Liao, Hong-Yuan Mark (2021-02-21). "Scaled-YOLOv4: Scaling Cross Stage Partial Network". arXiv:2011.08036 [cs.CV].
13. Li, Chuyi; Li, Lulu; Jiang, Hongliang; Weng, Kaiheng; Geng, Yifei; Li, Liang; Ke, Zaidan; Li, Qingyuan; Cheng, Meng; Nie, Weiqiang; Li, Yiduo; Zhang, Bo; Liang, Yufei; Zhou, Linyuan; Xu, Xiaoming (2022-09-07). "YOLOv6: A Single-Stage Object Detection Framework for Industrial Applications". arXiv:2209.02976 [cs.CV].
14. Zhu, Jun-Yan; Park, Taesung; Isola, Phillip; Efros, Alexei A. (2020-08-24). "Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks". arXiv:1703.10593 [cs.CV].
15. Dalal, Navneet (2005). [Hal.inria.fr/file/index/docid/548512/filename/hog_cvpr2005.pdf](https://hal.inria.fr/file/index/docid/548512/filename/hog_cvpr2005.pdf). "Histograms of oriented gradients for human detection" (PDF). Computer Vision and Pattern Recognition. **1**.
16. Pang, Jiangmiao; Chen, Kai; Shi, Jianping; Feng, Huajun; Ouyang, Wanli; Lin, Dahua (2019-04-04). "Libra R-CNN: Towards Balanced Learning for Object Detection". arXiv:1904.02701v1 .
17. Zhang, Shifeng (2018). "Single-Shot Refinement Neural Network for Object Detection". Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. pp. 4203–4212. arXiv:1711.06897.
18. Lin, Tsung-Yi (2020). "Focal Loss for Dense Object Detection". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. **42** (2): 318–327. arXiv:1708.02002. Bibcode:2020ITPAM..42..318L. doi:10.1109/TPAMI.2018.2858826. PMID 30040631. S2CID 47252984.
19. Zhu, Xizhou . "Deformable ConvNets v2: More Deformable, Better Results". arXiv:1811.11168 .
20. Dai, Jifeng "Deformable Convolutional Networks". arXiv:1703.06211 .
21. Alsanabani, Ala; Ahmed, Mohammed; AL Smadi, Ahmad (2020). "Vehicle Counting Using Detecting-Tracking Combinations: A Comparative Analysis". 2020 the 4th International Conference on Video and Image Processing. pp. 4854. doi:10.1145/3447450.3447458. ISBN 9781450389075. S2CID 233194604.
22. M. M. Rahman and T. Finin, "Deep understanding of a documents structure," in 4th IEEE/ACM Int. Conf. on Big Data Computing, Applications and Technologies, December 2017.
23. R. Kimmel, R. Malladi, and N. Sochen. Images as embedding maps and minimal surfaces: Movies, color, and volumetric medical images. IEEE CVPR'97, pp. 350-355, Puerto Rico, June 17–19, 1997. <https://www.cs.technion.ac.il/~ron/PAPERS/cvpr97.pdf>
24. V.A. Korotkov, K.V. K. B. Korotkov, E.P. Novochichin Модификация метода CLAHE для компенсации влияния гидрометеоров Журнал радиоэлектроники, ISSN 1684-1719, №10, 2017 с1-21.
25. E.I. Vatutin ?S.U. Miroshnichenko, V.S. Titov. Программная оптимизация оператора Собела с использованием SIMD-расширений процессоров семейства x86. Телекоммуникации. 2006. № 6. С. 12—16. (2006)

Каспаров Юрий Ашотович – младший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк. *Область научных интересов:* интеллектуальные робототехнические системы. эл. почта kua.ipai@mail.ru,
адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон: +7949 4048702

Зуев Владимир Михайлович -Научный сотрудник, Зав.отделом,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем
искусственного интеллекта», г. Донецк. *Область научных интересов:*
интеллектуальные робототехнические системы. эл. почта zvm.ipai@mail.ru,
адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон: +7949 4048702

Статья поступила в редакцию 07.03.2025.

УДК 004.032.26+004.8+537.622+616-089 DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-190-197

М. В. Солопов¹, В. В. Турчин¹, А. Г. Попандопуло¹, А. С. Кавелина¹,
Г. В. Акоюн¹, Ю. А. Легенький², С. В. Беспалова²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
283045, г. Донецк, пр-кт. Ленинский, 47

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Донецкий государственный университет»
283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24

ИНТЕГРАЦИЯ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ МАГНИТНОЙ ДОСТАВКИ КЛЕТОК*

M. V. Solopov¹, V. V. Turchin¹, A. G. Popandopulo¹, A. S. Kavelina¹,
G. V. Akopian¹, Yu. A. Legenkiy², S. V. Bepalova²

¹Federal State Budgetary Institution "V.K. Gusak Institute of Emergency and Reconstructive
Surgery" of the Ministry of Health of the Russian Federation
283045, Donetsk, Leninsky Ave., 47

²Federal State Educational Institution of Higher Education "Donetsk State University"
283001, Donetsk, Universitetskaya Str., 24

INTEGRATION OF MULTIPHYSICS MODELING AND MACHINE LEARNING FOR THE DEVELOPMENT OF MAGNETIC CELL DELIVERY SYSTEMS

Магнитно-направленная доставка мезенхимных стволовых клеток (МСК) перспективна для терапии глубоких тканей, таких как область перелома шейки бедра, но требует создания мощных внешних магнитных систем. В данной работе предложен подход к их автоматизированному проектированию с помощью машинного обучения. На основе мультифизической модели был определен целевой силовой фактор поля $B \cdot \nabla B \geq 26,5 \text{ T}^2/\text{м}$. Методом байесовской оптимизации, интегрированной с конечно-элементным моделированием, найдена конфигурация системы, способная генерировать силовой фактор $21,35 \text{ T}^2/\text{м}$ на целевой глубине 5 см. Исследование демонстрирует, что синергия машинного обучения и моделирования является мощным инструментом для автоматизации разработки сложных медицинских устройств.

Ключевые слова: мезенхимные стволовые клетки, магнитная доставка клеток, регенеративная медицина, машинное обучение, мультифизическое моделирование, конечно-элементное моделирование, магнитные поля, биомедицинские устройства, оптимизация.

Magnetic-guided delivery of mesenchymal stem cells (MSCs) is a promising approach for deep tissue therapy, such as for femoral neck fractures, but it requires powerful external magnetic systems. This work presents an approach for their automated design using machine learning. Based on a multiphysics model, a target magnetic force factor of $B \cdot \nabla B \geq 26.5 \text{ T}^2/\text{m}$ was established. Using Bayesian optimization integrated with finite element modeling, a system configuration capable of generating a force factor of $21.35 \text{ T}^2/\text{m}$ at a target depth of 5 cm was found. The study demonstrates that the synergy of machine learning and modeling is a powerful tool for automating the development of complex medical devices.

Key words: mesenchymal stem cells, magnetic cell delivery, regenerative medicine, machine learning, multiphysics modeling, finite element modeling, magnetic fields, biomedical devices, optimization.

* Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства здравоохранения Российской Федерации (регистрационный номер 1024022100092-5).

Введение

Переломы шейки бедра представляют собой серьезную клиническую проблему, часто осложняющуюся нарушением кровоснабжения и риском развития асептического некроза головки бедра [1]. Одним из многообещающих направлений в регенеративной медицине является локальное введение мезенхимных стволовых клеток (МСК), которые играют ключевую роль в остеогенезе и могут ускорить консолидацию перелома [2]. Однако для достижения максимального терапевтического эффекта необходимо обеспечить высокую концентрацию клеток непосредственно в зоне костного дефекта. Традиционные методы инъекций характеризуются низкой эффективностью, так как клетки быстро вымываются из целевой области биологическими жидкостями.

Возможным решением этой проблемы может быть магнитно-направленная клеточная доставка (*magnetic cell targeting, MCT*) [3]. Этот метод предполагает использование внешнего магнитного поля для удержания терапевтических клеток, предварительно меченных биосовместимыми суперпарамагнитными наночастицами оксида железа (SPION). Такой подход позволяет не только повысить локальную концентрацию МСК, но и снизить необходимую клеточную дозу, минимизируя системное воздействие на организм.

Несмотря на концептуальную простоту, реализация МСТ для глубоко расположенных мишеней, таких как шейка бедра, представляет собой сложнейшую инженерную задачу. Магнитная сила подчиняется закону обратной экспоненциальной зависимости от расстояния до источника магнитного поля, что приводит к её резкому ослаблению при увеличении глубины расположения целевой области. Следовательно, для эффективного удержания клеток на глубине в несколько сантиметров, преодолевая сопротивление высоковязкой среды костного мозга, требуется создание оптимизированной внешней магнитной системы, способной генерировать поле с высоким градиентом.

Подбор оптимальных параметров такой системы (геометрии, размеров, материалов) вручную является трудоемким и неэффективным процессом. Основной целью данной работы является демонстрация методологии автоматизированного проектирования магнитной системы для МСТ с использованием алгоритмов машинного обучения для целенаправленного поиска оптимальных параметров, удовлетворяющих заранее рассчитанным физическим критериям.

Материалы и методы

Для успешного захвата и удержания МСК в зоне перелома, магнитная сила F_{mag} , действующая на клетку, должна превосходить сумму противодействующих сил, в первую очередь – силу гидродинамического сопротивления F_{drag} .

Магнитный момент клетки (m_{cell}) является ключевым параметром, определяющим ее отклик на внешнее поле. Он зависит от эффективности поглощения SPION клетками. Основываясь на данных о высокой эффективности мечения МСК с использованием функционализированных наночастиц (до 56,5 пг Fe на клетку при сохранении жизнеспособности [4]), был рассчитан магнитный момент насыщения клетки. Принимая удельную намагниченность насыщения для наночастиц магнетита $M_S = 69$ эмю/г [5], масса наночастиц в клетке составила 78 пг. Магнитный момент клетки был рассчитан по формуле:

$$m_{cell,sat} = m_{Fe,total} \times M_S = (78 \times 10^{-12} \text{ г}) \times (69 \text{ эмю/г}) = 5,38 \times 10^{-9} \text{ эмю} \quad (1)$$

После перевода в систему СИ ($1 \text{ эмю} = 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{м}^2$), значение магнитного момента составило $m_{cell} = 5,38 \times 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

Основным препятствием для удержания клеток является высоковязкая среда костного мозга. Для расчетов была принята максимальная вязкость красного костного мозга $\eta = 400 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ [6], [7]. Скорость вымывания клеток интерстициальной жидкостью, по данным литературы, была оценена как $v_{max} = 5 \text{ мкм/с}$ [8,9]. Сила сопротивления Стокса для сферической клетки диаметром $D_{cell} \approx 15 \text{ мкм}$ рассчитывалась как:

$$F_{drag} = 3\pi\eta D_{cell} v_{max} \quad (2)$$

Подстановка значений дает максимальную силу сопротивления $F_{drag,max} = 2,83 \times 10^{-10} \text{ Н}$. Это значение является целевым порогом, который должна превышать магнитная сила.

Магнитная сила, действующая на клетку в режиме насыщения, пропорциональна произведению величины поля на его градиент. Для удержания клетки необходимо выполнение условия $F_{mag} \geq F_{drag,max}$. Из этого следует, что силовой фактор магнитного поля должен соответствовать следующему значению:

$$B \cdot (\nabla B)_{req} \approx \frac{F_{drag,max} \cdot B}{m_{cell}} \quad (3)$$

Принимая, что для насыщения SPION требуется поле $B \approx 0,5 \text{ Т}$ на целевой глубине 5 см, получаем минимально требуемое значение $B \cdot \nabla B$:

$$B \cdot (\nabla B)_{req} = 0,5 \text{ Т} \times \frac{2,83 \times 10^{-10} \text{ Н}}{5,38 \times 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^2} = 26,5 \text{ Т}^2/\text{м} \quad (4)$$

Это значение, $26,5 \text{ Т}^2/\text{м}$, было принято в качестве целевой функции для процесса оптимизации.

Для расчета силового фактора была создана 2D-модель в среде COMSOL Multiphysics. Модель имитирует систему, состоящую из двух дисковых магнитов, расположенных друг напротив друга, со стальной вставкой между ними. Моделирование проводилось в рамках модуля для магнитостатики (Magnetic Fields, No Currents). Силовой фактор вычислялся в целевой точке, расположенной на расстоянии 50 мм по нормали от верхней поверхности системы, что соответствует клинической задаче таргетирования.

Для автоматического поиска наилучшей конфигурации магнитной системы был использован метод байесовской оптимизации, реализованный в среде MATLAB. Этот метод машинного обучения наиболее подходящий для оптимизации ресурсоёмких целевых функций, где каждое вычисление (в нашем случае – запуск симуляции в COMSOL) занимает значительное время. Принцип работы заключается в построении вероятностной суррогатной модели (на основе гауссовских процессов), которая аппроксимирует зависимость силового фактора от входных параметров. На каждой итерации алгоритм использует специальную «функцию приобретения» (acquisition function), чтобы выбрать следующую комбинацию параметров для тестирования. Этот выбор представляет собой баланс между эксплуатацией (проверкой областей, где модель предсказывает высокий результат) и исследованием (проверкой областей с высокой неопределенностью). Такой интеллектуальный подход позволяет найти наиболее оптимальную конфигурацию системы за значительно меньшее число итераций по сравнению со случайным перебором. Оптимизации подлежали шесть ключевых параметров системы:

- Радиус магнита: [50, 350] мм
- Высота магнита: [30, 500] мм

- Остаточная индукция магнита: [1, 1.4] Т
- Ширина стальной вставки: [5, 100] мм
- Относительная магнитная проницаемость вставки: [100, 8000]
- Вертикальное смещение вставки: [0, 100] мм.

В качестве целевой функции была выбрана минимизация квадрата отклонения смоделированного значения силового фактора от целевого:

$$Error = (B \cdot (\nabla B)_{simulated} - 26,5 \text{ T}^2/\text{м})^2 \quad (5)$$

Процесс был полностью автоматизирован: на каждой итерации MATLAB передавал новый набор параметров в COMSOL, запускал симуляцию, получал результирующее значение силового фактора и на основе ошибки обновлял свою вероятностную модель для выбора следующего набора параметров.

Результаты

Байесовская оптимизация была проведена в течение 100 итераций. На рис. 1 показана сходимость алгоритма оптимизации, где видно, как минимальное значение целевой функции (ошибки) эффективно уменьшается с каждой итерацией, что демонстрирует способность метода быстро находить перспективные области в пространстве параметров. Алгоритм успешно нашел комбинацию параметров, которая обеспечивает максимальное значение силового фактора в рамках заданной геометрии.

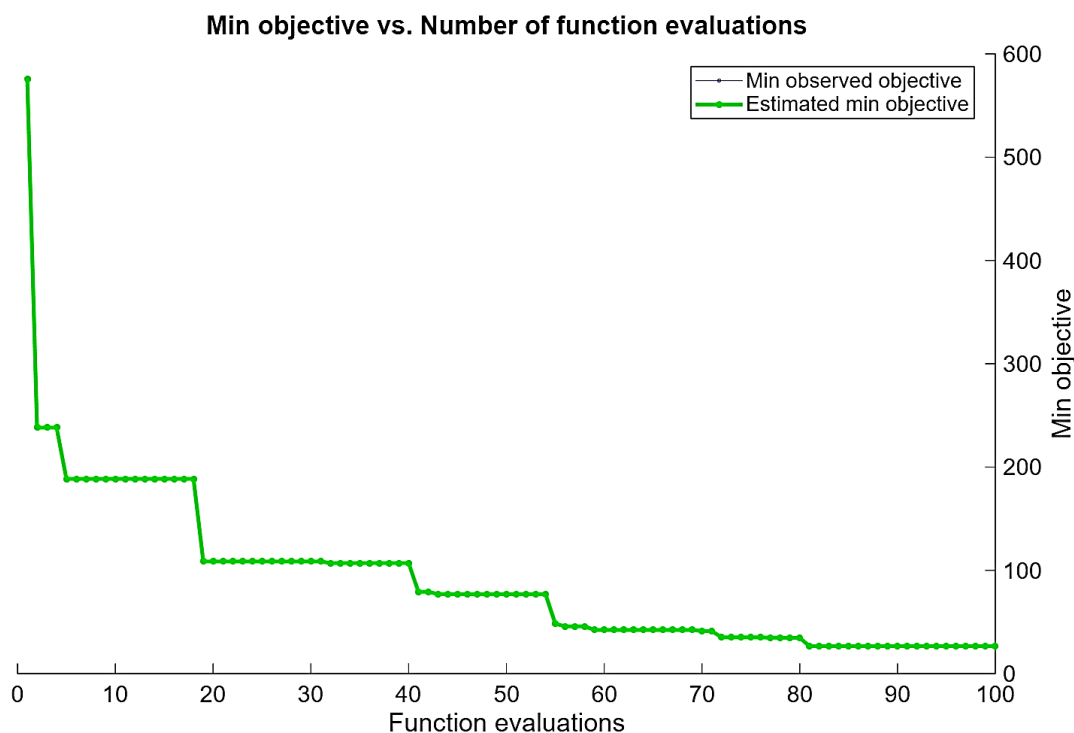


Рисунок 1 – График сходимости байесовской оптимизации, показывающий уменьшение квадратичной ошибки (целевой функции) в зависимости от номера итерации

Визуализация магнитного потока, полученная в результате конечно-элементного моделирования, наглядно демонстрирует ключевую роль стальной вставки в формировании поля (рис. 2). Будучи ферромагнетиком с высокой магнитной проницаемостью ($\mu_r \approx 1415$), вставка действует как эффективный концентратор магнит-

ного потока, перенаправляя силовые линии от постоянных магнитов и создавая резкий перепад плотности поля в прилегающей области. Стратегическое смещение вставки от центральной оси (16,16 мм), найденное в процессе оптимизации, приводит к асимметричной деформации поля, что дополнительно усиливает его пространственную неоднородность. В результате в целевой точке, расположенной на глубине 50 мм от поверхности системы, формируется область с экстремально высоким градиентом магнитного поля. Именно в этой зоне, где произведение $B \cdot \nabla B$ достигает своего максимального для данной конфигурации значения 21,35 Т²/м, и должна удерживаться клеточная суспензия, преодолевая силу гидродинамического сопротивления.

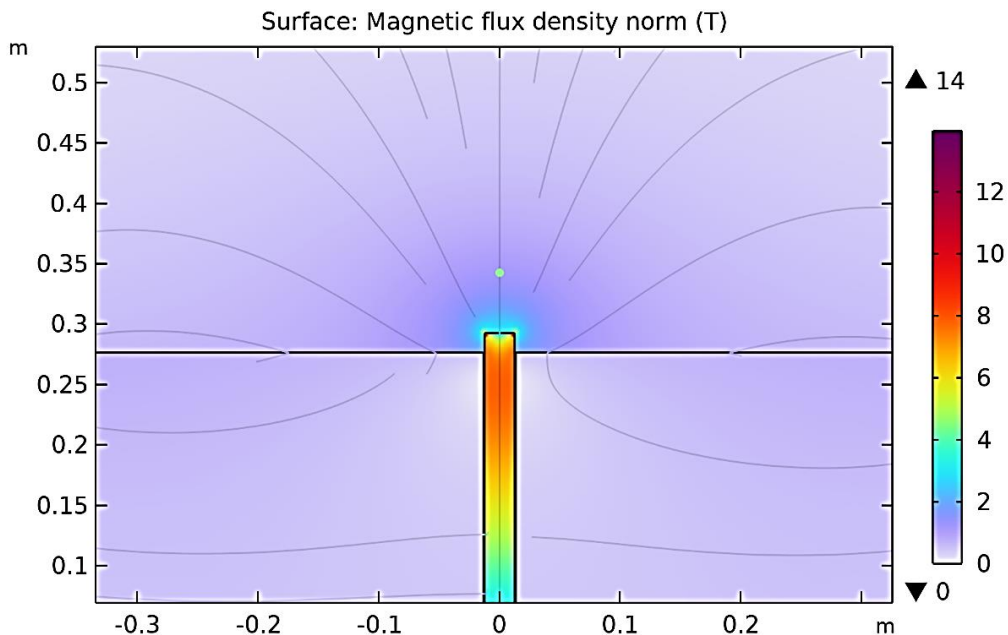


Рисунок 2 – Распределение магнитного поля (нормальная компонента, Т) и силовых линий в оптимизированной магнитной системе с отмеченной целевой точкой.

Финальная симуляция с использованием найденных параметров показала, что система способна генерировать силовой фактор $B \cdot \nabla B = 21,35 \text{ Т}^2/\text{м}$ в целевой точке. Результаты оптимизации и сравнение с целевыми показателями сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты оптимизации: оптимальные параметры и сравнение силового фактора

Категория	Параметр	Значение
Оптимальные параметры	Радиус магнита	276,23 мм
	Высота магнита	476,40 мм
	Остаточная индукция	1,3950 Т
	Ширина вставки	24,93 мм
	Магнитная проницаемость вставки	1415
	Смещение вставки	16,16 мм
Результаты симуляции	Целевое значение $B \cdot \nabla B$	26,50 Т ² /м
	Достигнутое значение $B \cdot \nabla B$	21,35 Т ² /м
	Абсолютная ошибка	5,15 Т ² /м
	Относительная ошибка	19,44%

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность предложенного подхода. Интеграция байесовской оптимизации с мультифизическим моделированием позволила в автоматическом режиме найти близкую к оптимальной конфигурацию сложной магнитной системы, что было бы трудозатратно при ручном переборе параметров.

Основным тезисом данной работы является возможность полной автоматизации процесса проектирования магнитных систем под конкретные биомедицинские задачи. Задав физические и биологические ограничения (вязкость среды, глубина цели, магнитные свойства клеток), можно использовать алгоритмы машинного обучения для целенаправленного поиска инженерного решения. Это значительно сокращает время разработки и позволяет исследовать сложные конфигурации.

Несмотря на то, что достигнутое значение силового фактора $21,35 \text{ T}^2/\text{м}$ оказалось на $19,44\%$ ниже теоретически рассчитанного значения ($26,50 \text{ T}^2/\text{м}$), результат, по нашему мнению, следует считать успешным. Во-первых, целевое значение было рассчитано для предельного значения с максимальной вязкостью костного мозга, которая в среднем существенно ниже [6]. Во-вторых, достигнутый силовой фактор магнитного поля может быть достаточным для удержания значительной части клеточной популяции. Расхождение между теоретическим и полученным значениями может быть также связано с ограничениями самой 2D-модели и выбранной геометрии системы, которая может иметь свой физический предел эффективности.

В данном исследовании был применен только один метод машинного обучения. В дальнейшем планируется сравнительное исследование эффективности других глобальных оптимизаторов, таких как генетические алгоритмы, обучение с подкреплением (reinforcement learning) и др. Также необходимо перейти к более точным 3D-моделям для учета объемных эффектов. Кроме того, предложенный автоматизированный подход может быть применен для оптимизации более сложных и потенциально более эффективных конфигураций, таких как массивы Халбаха [10].

Помимо физического удержания, создаваемое системой, сильное магнитное поле может оказывать и синергетический терапевтический эффект, стимулируя остеогенную дифференцировку МСК через механотрансдукцию [11], [12]. Это подтверждается исследованиями, где внешнее магнитное поле способствовало полному заживлению остеохондральных дефектов [13]. Необходимо также тщательно контролировать вопросы безопасности и биосовместимости, связанные с цитотоксичностью SPION и влиянием сильных градиентов поля на окружающие ткани.

Выводы

В ходе исследования была успешно разработана и апробирована методология для автоматизированного проектирования магнитной системы для таргетной доставки стволовых клеток. Путем интеграции мультифизического моделирования и Байесовской оптимизации была найдена конфигурация, способная генерировать силовой фактор $\mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{B} = 21,35 \text{ T}^2/\text{м}$ на целевой глубине. Это значение близко к теоретически необходимому для эффективного удержания клеток в условиях высоковязкой среды костного мозга при переломе шейки бедра.

Работа демонстрирует, что методы машинного обучения являются мощным инструментом для решения сложных инженерных задач в биомедицине, позволяя создавать высокоэффективные устройства, адаптированные под строгие клинические требования.

Список литературы / References

1. Ridha M., Al-Jabri T., Stelzhammer T. et al. Osteosynthesis, Hemiarthroplasty, Total Hip Arthroplasty in Hip Fractures: All I Need to Know. *Injury*. 2024. Vol. 55. P. 111377. DOI: 10.1016/j.injury.2024.111377.
2. Han D., Liu W., Gong J. et al. Challenges and Future Perspectives in Using Mesenchymal Stem Cells for Efficient Bone Fracture Healing. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2025. Vol. 13. P. 1568914. DOI: 10.3389/fbioe.2025.1568914.
3. Silva L.H.A., Cruz F.F., Morales M.M. et al. Magnetic Targeting as a Strategy to Enhance Therapeutic Effects of Mesenchymal Stromal Cells. *Stem Cell Research & Therapy*. 2017. Vol. 8. P. 58. DOI: 10.1186/s13287-017-0523-4.
4. Guldris N., Argibay B., Gallo J. et al. Magnetite Nanoparticles for Stem Cell Labeling with High Efficiency and Long-Term in Vivo Tracking. *Bioconjugate Chemistry*. 2017. Vol. 28. P. 362–370. DOI: 10.1021/acs.bioconjchem.6b00522.
5. Korsakova A.S., Kotsikau D.A., Haiduk Y.S. et al. Synthesis and Physicochemical Properties of $Mn_xFe_{3-x}O_4$ Solid Solutions. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*. 2020. Vol. 22. P. 466–472. DOI: 10.17308/kcmf.2020.22/3076.
6. Zhong Z., Akkus O. Effects of Age and Shear Rate on the Rheological Properties of Human Yellow Bone Marrow. *Biorheology*. 2011. Vol. 48. P. 89–97. DOI: 10.3233/BIR-2011-0587.
7. Gurkan U.A., Akkus O. The Mechanical Environment of Bone Marrow: A Review. *Annals of Biomedical Engineering*. 2008. Vol. 36. P. 1978–1991. DOI: 10.1007/s10439-008-9577-x.
8. Liu T., Xiong B., Cui X. et al. Numerical Study of Interstitial Fluid Flow Behavior in Osteons under Dynamic Loading. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2025. Vol. 26. P. 187. DOI: 10.1186/s12891-025-08425-1.
9. Zakariapour M., Hamed M.H., Fatourae N. Characteristics of Interstitial Fluid Flow along with Blood Flow inside a Cylindrical Tumor: A Numerical Simulation. *Acta Scientiarum. Technology*. 2018. Vol. 40. P. 30792. DOI: 10.4025/actascitechnol.v40i1.30792.
10. Sarwar A., Nemirovski A., Shapiro B. Optimal Halbach Permanent Magnet Designs for Maximally Pulling and Pushing Nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2012. Vol. 324. P. 742–754. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.09.008.
11. Guan W., Gao H., Liu Y. et al. Application of Magnetism in Tissue Regeneration: Recent Progress and Future Prospects. *Regenerative Biomaterials*. 2024. Vol. 11. P. rbae048. DOI: 10.1093/rb/rbae048.
12. Hu H., Krishaa L., Fong E.L.S. Magnetic Force-Based Cell Manipulation for in Vitro Tissue Engineering. *APL Bioengineering*. 2023. Vol. 7. P. 031504. DOI: 10.1063/5.0138732.
13. Dasari A., Xue J., Deb S. Magnetic Nanoparticles in Bone Tissue Engineering. *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. P. 757. DOI: 10.3390/nano12050757.

RESUME

*M. V. Solopov, V. V. Turchin, A. G. Popandopulo, A. S. Kavelina,
G. V. Akopian, Yu. A. Legenkiy, S. V. Bespalova*
Integration of multiphysics modeling and machine learning for the development of magnetic cell delivery systems

Cell therapy using mesenchymal stem cells (MSCs) is a promising approach in regenerative medicine, specifically in bone tissue regeneration; however, its efficacy is limited by the low localization of cells in the target area. Magnetic targeting addresses this problem but requires the creation of powerful external magnetic systems capable of retaining cells in deep-seated tissues, such as the femoral neck fracture region.

This work presents an approach for the automated design of such a system using machine learning. A multiphysics model was developed to determine the required magnetic force for retaining MSCs in the high-viscosity environment of bone marrow, establishing a target criterion for the field force factor of $B \cdot \nabla B \geq 26.5 \text{ T}^2/\text{m}$. To find the optimal geometric and material parameters of the magnetic system, comprising two permanent magnets and a steel insert, a Bayesian optimization algorithm integrated with finite element modeling was employed.

The optimization process yielded a system configuration capable of generating a field force factor of $21.35 \text{ T}^2/\text{m}$ at the target depth of 5 cm.

This study demonstrates that the synergy of machine learning and multiphysics modeling is a powerful tool for automating and accelerating the development of complex medical devices tailored to specific clinical tasks.

РЕЗЮМЕ

*М. В. Солопов, В. В. Турчин, А. Г. Попандопуло, А. С. Кавелина,
Г. В. Акопян, Ю.А. Легенький, С.В. Беспалова*
*Интеграция мультифизического моделирования и машинного обучения
для разработки систем магнитной доставки клеток*

Клеточная терапия на основе мезенхимных стволовых клеток (МСК) является перспективным подходом в регенеративной медицине, в том числе регенерации костной ткани, однако его эффективность ограничена низкой локализацией клеток в целевой области. Магнитно-направленная доставка клеток решает эту проблему, но требует создания мощных внешних магнитных систем, способных удерживать клетки в глубоко залегающих тканях, таких как область перелома шейки бедра.

В данной работе представлен подход к автоматизированному проектированию такой системы с использованием машинного обучения. Была разработана мультифизическая модель для определения требуемой магнитной силы для удержания МСК в высоковязкой среде костного мозга, установившая целевой критерий для силового фактора поля $B \cdot \nabla B \geq 26,5 \text{ T}^2/\text{м}$. Для поиска оптимальных геометрических и материальных параметров магнитной системы, состоящей из двух постоянных магнитов и стальной вставки, был применен алгоритм Байесовской оптимизации, интегрированный с конечно-элементным моделированием в COMSOL Multiphysics.

В результате оптимизации была найдена конфигурация системы, способная генерировать силовой фактор $21,35 \text{ T}^2/\text{м}$ на целевой глубине.

Данное исследование демонстрирует, что синергия машинного обучения и мультифизического моделирования является мощным инструментом для автоматизации и ускорения разработки сложных медицинских устройств, адаптированных под конкретные клинические задачи.

Солопов М. В. – научный сотрудник, лаборатория клеточных и тканевых биотехнологий ФГБУ «ИНВХ им. В.К. Гусака» Минздрава России, 283045, Донецк, пр-кт. Ленинский, 47, тел +7(949) 942-5835, mxsolopov@yandex.ru. *Область научных интересов:* регенеративная биомедицина, клеточные технологии, искусственный интеллект, машинное обучение, нейронные сети

Турчин В. В. – старший научный сотрудник, лаборатория клеточных и тканевых биотехнологий ФГБУ «ИНВХ им. В.К. Гусака» Минздрава России, 283045, Донецк, пр-кт. Ленинский, 47, turchin.dn@mail.ru.

Область научных интересов: регенеративная биомедицина, клеточные технологии

Попандопуло А. Г. – д.мед.н, профессор, заведующий лабораторией клеточных и тканевых биотехнологий ФГБУ «ИНВХ им. В.К. Гусака» Минздрава России, 283045, Донецк, пр-кт. Ленинский, 47, pag.lctc@mail.ru.

Область научных интересов: регенеративная биомедицина, клеточные технологии, хирургия

Кавелина А. С. – к.мед.н, старший научный сотрудник, лаборатория клеточных и тканевых биотехнологий ФГБУ «ИНВХ им. В.К. Гусака» Минздрава России, 283045, Донецк, пр-кт. Ленинский, 47, annakavelina@mail.ru.

Область научных интересов: регенеративная биомедицина, клеточные технологии

Акопян Г. В. – научный сотрудник, лаборатория клеточных и тканевых биотехнологий ФГБУ «ИНВХ им. В.К. Гусака» Минздрава России, 283045, Донецк, пр-кт. Ленинский, 47, gulnara.akopyan.79@mail.ru.

Область научных интересов: регенеративная биомедицина, клеточные технологии

Легенький Ю. А. – старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 283001, Донецк, ул. Университетская, 24, yu-legen@mail.ru. *Область научных интересов:* физика магнитных полей, биофизика

Беспалова С. В. – д.ф.-м.н, профессор, ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 283001, Донецк, ул. Университетская, 24, rector@donnu.ru. *Область научных интересов:* физика магнитных полей, биофизика

Статья поступила в редакцию 27.02.2025.

Подписной индекс журнала
«Проблемы искусственного
интеллекта»:
Министерство связи ДНР
ГП «Почта Донбасса»
28037

Subscription index journal
«Problems of Artificial Intelligence»:
Ministry of Communications
of the Donetsk People's Republic
State enterprise "Post of Donbass"
28037

Научное издание

Международный рецензируемый
научно-теоретический журнал
«Проблемы искусственного интеллекта» /
«Problems of Artificial Intelligence»
ISSN 2413-7383
выходит 4 раза в год

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт проблем искусственного интеллекта»

Адрес редакции:
283048, г. Донецк, ул. Артема, 118-б
тел. +38 (062) 311-72-01
e-mail
redakcija_intellekt@mail.ru
Адрес сайта журнала : <http://paijournal.guiaidn.ru/>

Ответственный редактор С. Б. Иванова
Технический редактор В. Н. Пигуз
Компьютерная верстка и корректура
К. С. Ивашко, С. А. Изосимова
Корректура английских текстов А. Л. Червяков
Дизайн обложки С. А. Большакова

**Свидетельство
о регистрации средства массовой информации
Серия ААА № 000114 от 14.03.2017**

Подписано в печать 12.09.2025
Формат 70×108/16
Уч.-изд. л. 19,1. Тираж 100 экз.
Заказ
Бесплатно

Оригинал-макет изготовлен
в ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта»
Адрес редакции, издателя, типографии: 283048, г. Донецк,
ул. Артема, дом 118-б, тел. +7 (856) 311-72-01
e-mail: redakcija_intellekt@mail.ru,
pvn_redakcija_intellekt@mail.ru

Scientific publication

International peer-reviewed
scientific journal
«Problemy iskusstvennogo intellekta» /
«Problems of Artificial Intelligence»
ISSN 2413-7383
is published four times a year

Ministry of science and higher education
of the Russian Federation
The Federal State Budgetary
Scientific Institution «Institute of Problems
of Artificial Intelligence»

283048, Donetsk, Artema str., 118-b
tel. +38 (062) 311-72-01
e-mail: iai_sb_ivanova@mail.ru
maxpvn77@gmail.com
redakcija_intellekt@mail.ru
Journal site address: <http://paijournal.guiaidn.ru/>

Managing editor S. B. Ivanova
Technical editors V. N. Piguz
Computer making-up and proof-reading
K. S. Ivashko, S. A. Izosimova
English proof-reading A. L. Chervyakov
Cover page design S. A. Bolshakova

**Mass Media Registration Certificate
Series AAA № 000114 dated by 14.03.2017**

Passed for printing 12.09.2025.
Format 70×108/16.
Publisher's signature 19,1. Circulation 100 copies.
Order
Free of charge

The original mock-up was made
at the Institute of Artificial Intelligence Problems
The address of the editorial office, publisher, printing house:
283048, Donetsk, Artyom str., 118-b, tel. +7 (856) 311-72-01
e-mail: redakcija_intellekt@mail.ru,
pvn_redakcija_intellekt@mail.ru

