

ISSN 2413-7383

Problems of Artificial Intelligence

РА

Международный  
рецензируемый  
научно-теоретический  
журнал

International  
peer-reviewed  
scientific  
journal

**ПРОБЛЕМЫ  
ИСКУССТВЕННОГО  
ИНТЕЛЛЕКТА**

**2025'2(37)**

ISSN 2413-7383

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
научное учреждение «Институт проблем  
искусственного интеллекта»

# ПРОБЛЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

2025 № 2 (37)

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 № 2 (37)

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 № 5 от 19 июня 2025 г.

Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта» /  
«Problems of Artificial Intelligence», ISSN 2413-7383 зарегистрирован в:  
научнометрической 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-Петербург  
(Лицензионный Договор от 29 августа 2023 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 5 dated by 19 June 2025.

Раздел 1  
*Section 1*

Искусственный интеллект  
и машинное обучение

---

*Artificial Intelligence  
and Machine Learning*

УДК 519.4

DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-4-12

М. А. Наумов, А. Ю. Карповский

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «ГБУ Автоматгормаш им. В. А. Антипова»  
Российская Федерация, ДНР, 283003 г. Донецк, пр. Ильича, 93

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ ЗРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОГРАНИЧЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ

M. A. Naumov, A. Y. Karpovsky

Scientific Research and Design Institute for Automation of Mining Machines "GBU Automatgormash named after V. A. Antipov"  
Russian Federation, DNR, 283003 93 Ilyich ave., Donetsk

## METHODS FOR IMPROVING THE ACCURACY OF OBJECT CLASSIFICATION WHEN BUILDING A VISION SYSTEM FOR EXPLORING CONFINED SPACES

В статье рассматриваются методы повышения точности классификации объектов в системах технического зрения, работающих в ограниченных пространствах. Предложены подходы к синтезу нейросетевых моделей на основе логических нейронов и сигмоидальных функций активации, обеспечивающие адаптивность к неполным и зашумлённым данным. Развита концепция фрактальной структуры (ФФС) и кооперативной нейросетевой архитектуры, объединяющей частные модели для улучшения точности решений. Представленные методы повышают интерпретируемость и устойчивость нейросетей, что особенно актуально для интеллектуальных систем навигации и анализа в технически сложных условиях.

**Ключевые слова:** Искусственные нейронные сети, классификация объектов, фрактальная структура нейросети, системы технического зрения, логические нейроны.

The article discusses methods for improving the accuracy of object classification in vision systems operating in confined spaces. Approaches to the synthesis of neural network models based on logical neurons and sigmoidal activation functions are proposed, providing adaptivity to incomplete and noisy data. The concept of fractal structure (FFS) and cooperative neural network architecture, combining private models to improve the accuracy of solutions, has been developed. The presented methods increase the interpretability and stability of neural networks, which is especially important for intelligent navigation and analysis systems in technically difficult conditions.

**Key words:** Artificial neural networks, classification of objects, fractal structure of neural networks, vision systems, logical neurons.

**Целью исследования** является разработка и обоснование методов повышения точности классификации объектов в системах технического зрения, функционирующих в условиях ограниченного пространства и при наличии зашумлённых или неполных исходных данных. Особое внимание уделяется синтезу интерпретируемых и устойчивых нейросетевых моделей, обеспечивающих адаптивность к внешним воздействиям и неопределённости, с использованием логических нейронов, фрактальной структуры и кооперативных архитектур.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Проанализировать существующие подходы к синтезу искусственных нейронных сетей (ИНС) и выявить их ограничения в условиях ограниченного и зашумлённого пространства данных.

2. Исследовать возможности использования логических нейронов и пороговых функций активации для повышения интерпретируемости и формализации логических операций в рамках нейросетевой архитектуры.

3. Разработать метод построения нейросетей с фрактальной структурой (ФФС), обеспечивающей минимизацию ошибки при обучении и устойчивость к недостоверным входным данным.

4. Предложить и обосновать кооперативную нейросетевую архитектуру, объединяющую несколько частных моделей, для повышения точности классификации и устойчивости решений.

5. Оценить эффективность применения сигмоидальных функций активации в логических нейронах для смягчения жёстких переходов и повышения способности моделей к обобщению.

6. Провести теоретическое и экспериментальное обоснование предложенных решений, продемонстрировав их применимость в системах технического зрения, работающих в сложных технических условиях.

С математической точки зрения синтез нейронной сети рассматривается как решение некоторой оптимизационной задачи – поиска такого состояния сети, в котором минимизируется некая функция ошибки  $\varepsilon$ , вычисляемая на основании имеющегося в распоряжении исследователя множества данных (обучающей выборки), которую можно представить в виде [3], [4]:

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^k (\Omega_j(W^t, z^j) - y^j)^2$$

где  $W$  – состояние сети (все весовые коэффициенты всех нейронов, входящих в сеть);  $W_t$  – текущее состояние сети;  $\Omega: z \Rightarrow y$  – отображение, реализуемое нейронной сетью;  $k$  – количество примеров в обучающей выборке;  $y_j$  – требуемое значение выхода для  $j$ -го примера;  $z_j$  – входной вектор для  $j$ -го примера.

Обучение искусственной нейронной сети (ИНС) — это процесс минимизации ошибки  $\varepsilon$  между прогнозируемыми и реальными значениями на обучающей выборке. Обычно используется метод градиентного спуска (например, обратное распространение ошибки), который стремится к минимуму функции ошибки, но часто находит лишь локальные минимумы. Основные проблемы обучения связаны с ограниченностью и нерепрезентативностью данных, особенно при малом объеме выборки, а также с ограничениями самих алгоритмов оптимизации. Кроме того, на качество модели влияет выбор архитектуры сети — числа слоёв, нейронов и их связей. Несмотря на теоретические доказательства аппроксимационных возможностей нейросетей, эти результаты не дают практических методов построения оптимальной архитектуры. На практике разработчику приходится самостоятельно определять:

1. оптимальную топологию сети — как именно будут соединены нейроны;
2. необходимое количество нейронов и их распределение по слоям;
3. выбор функций активации для каждого слоя;
4. подтвердить эффективность и работоспособность полученной архитектуры экспериментально.

Хотя выбор функции активации и оценка качества обучения решаются стандартными методами, проектирование структуры ИНС требует опыта и интуиции, что усложняет процесс. Метод фрактальной структуры (ФФС) предлагает формализованный и быстрый способ синтеза нейросетей с логической интерпретацией и минимальной ошибкой обучения. Однако такие сети могут быть недостаточно гибкими при классификации объектов, находящихся на границах классов, поскольку грубо аппроксимируют сложные границы в пространстве признаков.

Для устранения данного недостатка автором была предложена концепция кооперативной нейросетевой структуры [9]. Согласно этой концепции, несколько ИНС, построенных по методу ФФС, объединяются в единую систему. Каждая отдельная сеть вносит свой вклад в общее решение о принадлежности объекта к заданному классу. Итоговое решение формируется на основе агрегации частных решений с использованием специального нейрона, реализующего функцию объединения. Подобный подход позволяет значительно повысить точность и устойчивость классификации, особенно в условиях недостатка обучающих данных. Он также открывает возможности для параллельной обработки информации и повышения надёжности системы в целом. Однако, несмотря на достигнутые успехи, остаются ситуации, в которых и кооперативная структура оказывается недостаточно точной, особенно при наличии сложных, изрезанных границ между классами. Это подчёркивает необходимость в дальнейшем совершенствовании предложенных методов и их практической верификации. В связи с этим главной задачей настоящего исследования является развитие существующих методов синтеза ИНС с целью повышения их обобщающей способности и устойчивости к различным видам неопределённости.

$$L(x_i) = \gamma(x_i) * \varphi(x_i) + \overline{\gamma(x_i)} * \psi(x_i)$$

где  $x_i$  – входной вектор,  $\gamma$  – результат нейрона первого типа,  $\varphi$  и  $\psi$  – функции ошибок.

При разработке нейронных сетей для задач классификации и логического вывода ключевую роль играют архитектура сети и тип нейронов. Один из подходов предусматривает использование в первом слое нейронов с пороговой функцией активации, реагирующих только при превышении взвешенной суммы входов заданного порога, что позволяет реализовывать простейшие логические условия. В последующих слоях применяются логические нейроны, моделирующие базовые операции "И", "ИЛИ" и "НЕ" через взвешенное суммирование входов и последующее применение пороговой функции, что обеспечивает формализацию логических процессов внутри нейросетевой структуры.

Для лучшего понимания логической природы нейронов можно представить структуру нейросети, реализующей элементарные логические функции, в виде схемы, где:

- два нейрона реализуют функцию логического "И": они активируются только в случае, когда оба входа принимают значение 1;
- один нейрон реализует логическую операцию "ИЛИ": он активируется, если хотя бы один из входов равен 1;
- и ещё один нейрон моделирует логическую операцию "НЕ", инвертируя значение поступающего сигнала.

Такая модульная структура позволяет представить более сложные логические выражения, комбинируя вышеуказанные нейроны в различных конфигурациях. При этом каждая логическая операция легко формализуется через выбор соответствующих весов и порога активации. Например, чтобы реализовать операцию "И" с использованием пороговой функции активации, можно задать веса входов равными 0.5, а порог — 1. В этом случае, только когда оба входа равны 1, сумма весов достигнет порога и нейрон активируется. Подобный подход позволяет не только моделировать логические структуры в рамках нейронных сетей, но и обеспечивает высокий уровень интерпретируемости решений сети. Это особенно ценно в условиях, когда требуется объяснимость результатов, таких как в системах поддержки принятия решений или в экспертных интеллектуальных системах. Таким образом, использование логических нейронов и пороговых функций активации в архитектуре нейросети открывает широкие возможности для построения гибких, интерпретируемых и эффективно обучаемых моделей, особенно в задачах, связанных с логическим выводом, бинарной классификацией и анализом дискретных признаков.

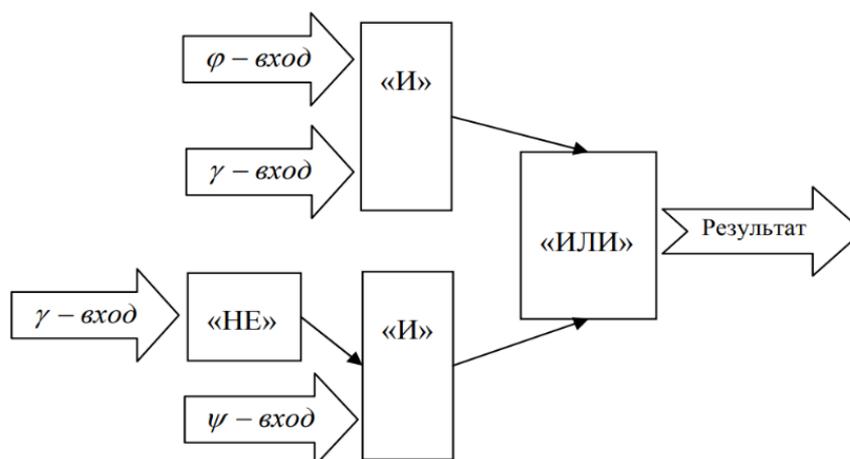


Рисунок 1 - Представление логического нейрона в виде сети с нейронами, реализующими элементарные логические операции

Рассмотрим способы реализации элементарных логических операций, используя в качестве активационной функции нейрона пороговую функцию  $\Phi(x)$  - функцию Хевисайда:

$$\Phi(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Представимость логической операции «И» для двух входов в нейросетевом базисе сводится к существованию коэффициентов  $w_i$  таких, что выполняется неравенство:

$$w_1 \gamma + w_2 \varphi + w_0 \geq 0$$

При проектировании логических нейронов, реализующих элементарные булевы операции, особое внимание уделяется подбору весовых коэффициентов и порогового значения функции активации. Для операций "И" и "ИЛИ" существует бесконечное множество возможных комбинаций весов и порогов, которые позволяют воспроизвести их логическое поведение в рамках нейросетевой модели. Однако, для простоты и наглядности анализа можно использовать конкретные, типовые значения.

Рассмотрим логическую операцию "И" (конъюнкцию). Для реализации этой функции можно задать следующие значения весов:  $w_0 = -1$  (свободный член или смещение),  $w_1 = 0.5$ ,  $w_2 = 0.5$ . Здесь переменные  $\gamma$  и  $\phi$  обозначают входные сигналы, принимающие значения 0 или 1. Суммируя взвешенные входы и прибавляя смещение, получаем выражение:

$$\Phi(x) = \Phi(w_0 + w_1 * \gamma + w_2 * \phi) = \Phi(-1 + 0.5 * \gamma + 0.5 * \phi)$$

Пороговая функция активации  $\Phi(x)$ , например функция Хевисайда, принимает значение 1, если аргумент  $\geq 0$ , и 0 в противном случае. Проверим значения на истинность логической функции "И":

$$\text{Если } \gamma = 0 \text{ и } \phi = 0 \rightarrow \Phi(-1) = 0$$

$$\text{Если } \gamma = 1 \text{ и } \phi = 0 \rightarrow \Phi(-0.5) = 0$$

$$\text{Если } \gamma = 0 \text{ и } \phi = 1 \rightarrow \Phi(-0.5) = 0$$

$$\text{Если } \gamma = 1 \text{ и } \phi = 1 \rightarrow \Phi(0) = 1$$

Таким образом, выход нейрона соответствует таблице истинности операции "И". Аналогично можно сконструировать нейрон, реализующий операцию "ИЛИ" (дизъюнкцию). Для этого зададим веса:  $w_0 = -1$ ,  $w_1 = 1$ ,  $w_2 = 1$ . Подставляя их в выражение функции активации, получим:

$$\Phi(x) = \Phi(-1 + 1 * \gamma + 1 * \phi)$$

Проверим значения:

$$\gamma = 0, \phi = 0 \rightarrow \Phi(-1) = 0$$

$$\gamma = 1, \phi = 0 \rightarrow \Phi(0) = 1$$

$$\gamma = 0, \phi = 1 \rightarrow \Phi(0) = 1$$

$$\gamma = 1, \phi = 1 \rightarrow \Phi(1) = 1$$

Результаты совпадают с истинностной таблицей логической дизъюнкции, что подтверждает корректность выбранных коэффициентов. Следует отметить, что выбор конкретных значений весов не является единственно возможным. Например, при увеличении всех коэффициентов и порога в одинаковое число раз логическая функция сохранится. Это свойство связано с тем, что пороговая функция активации чувствительна лишь к знаку суммарного аргумента, а не к его абсолютной величине.

Такая реализация логических функций с использованием простейших нейронов и пороговой активации даёт возможность интеграции булевой логики в состав нейросетевых моделей. Это особенно полезно при решении задач, требующих формализованной логической обработки информации, а также при построении объяснимых ИНС, где прозрачность внутренних процессов играет ключевую роль.

Для логической операции «НЕ» выражение записывается в виде:

$$w_1 \gamma \geq 0.$$

Реализация логической операции "НЕ" (инверсия) в рамках нейронной сети с использованием пороговой функции активации также представляется достаточно простой и наглядной. Для этого используется однослойный нейрон с одним входом. Основной задачей в данном случае является подбор такого весового коэффициента и значения смещения (порога), которые позволят инвертировать входной сигнал, принимающий значения из множества  $\{0, 1\}$ . Обобщая вышеизложенное, можно записать функцию логического нейрона в нейросетевом базисе:

$$y = \Phi \left[ \Phi \left( \frac{\gamma}{2} + \frac{\phi}{2} - 1 \right) + \Phi \left( \frac{\Phi(-y)}{2} + \frac{\psi}{2} - 1 \right) - 1 \right].$$

Концепция логического нейрона может быть реализована с помощью нейросетей через взвешенное суммирование входов и пороговую функцию активации, например, функцию Хевисайда. Однако такие жёсткие функции плохо работают при наличии шумов и неопределённостей во входных данных, что приводит к ошибкам классификации. Более гибкой альтернативой является сигмоидальная функция активации, обеспечивающая плавное разделение классов и интерпретацию выхода как вероятности. Она лучше справляется с зашумлёнными данными, способствует устойчивому обучению благодаря непрерывной производной и повышает обобщающую способность модели — особенно важную в задачах классификации. В качестве такой функции целесообразно использовать сигмоид, т.е. функцию вида:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-bx}},$$

принимая значения в диапазоне от 0 до 1, график которой показан на рис. 2 для различных значений коэффициента  $b$ . Коэффициент  $b$  определяет, насколько быстро и на каком интервале функция изменяет значение от 0 до 1, и в случае  $b \rightarrow \infty$  функцию (можно рассматривать как пороговую функцию). Таким образом, используя коэффициент  $b$ , можно управлять свойствами синтезируемой нейросетевой структуры.

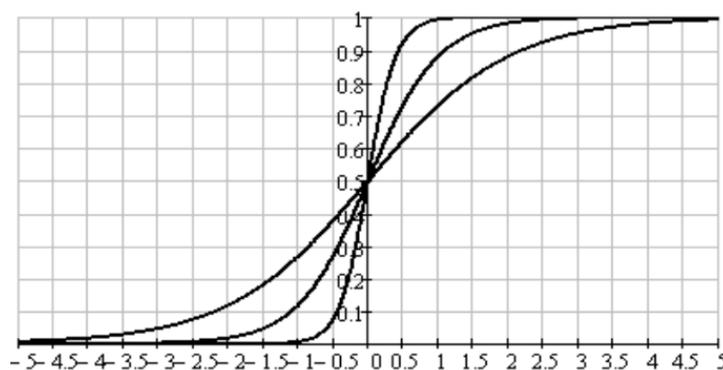


Рисунок 2 - График функции сигмоида для различных значений коэффициента  $b$

## Заключение

На основании изложенного в работе материала, можно утверждать, что для описанного класса задач:

1. Замена пороговой активационной функции каждого входящего в сеть нейрона на сигмоидальную функцию позволяет улучшить качество классификации образов, особенно для случаев, когда они находятся близко к границе областей, занимаемых различными классами.

2. Показана возможность представления используемых в структуре сети специальных логических нейронов в нейросетевом базисе – операцией взвешенного суммирования и нелинейного преобразования результата, что доказывает эквивалентность синтезируемых структур классическим нейронным сетям.

3. Предложенный метод дополняет ранее изложенные в работах [7-9] методы синтеза нейронных сетей и позволяет на данной основе формализовать получение нейросетевых структур для решения задач классификации.

Проведённое исследование продемонстрировало высокую актуальность и важность разработки методов повышения точности классификации в системах технического зрения, ориентированных на работу в ограниченных и структурно сложных

пространствах. В частности, показана практическая ценность применения искусственных нейронных сетей (ИНС) в задачах, где классические методы синтеза моделей сталкиваются с фундаментальными ограничениями — как теоретическими, так и практическими.

## Список литературы

1. *Справочник по теории автоматического управления* [Текст] / А. Г. Александров, В. М. Артемьев, В. Н. Афанасьев и др.; под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с. 2. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст].
2. *Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления: учеб.* / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов, Е. М. Воронов и др.; под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 640 с.
3. *Методы классической и современной теории автоматического управления* [Текст]. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления: учеб. / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов, А. И. Баркин и др.; под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 784 с.
4. *Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления* [Текст]: учеб. / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов, А. И. Гаврилов и др.; под ред. Н. Д. Егупова; изд. 2-ое, стереотипное. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 744 с.
5. Колмогоров, А. Н. *О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиции непрерывных функций одного переменного и сложения Докл. АН СССР.* 1957. Т. 114, №5. С. 953—956.
6. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem. *IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks.* 1987. Vol.3.P. 11—13.
7. Юрков, Д. А. Метод синтеза нейросетевых модельных структур. *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту.* 2009. № 5 (135). С. 115—122.
8. Юрков, Д. А. Синтез нейронных сетей с фрактальной структурой. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2009. № 4-3 (40). С. 39—44.
9. Юрков, Д. А. Классификация на основе кооперативных нейросетевых структур. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2009. №5-3 (41). С. 51—56.
10. Сивак, М. А. Исследование применимости робастных функций потерь в нейронных сетях. *Сборник научных трудов НГТУ.* 2020. № 4. С. 50—58.
11. Сивак, М. А. Оптимизация работы робастной нейронной сети для задачи классификации [Текст] / М. А. Сивак, В. С. Тимофеев. *Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.:* в 9 ч., Новосибирск, 30 нояб. 4 дек. 2020 г. Ч. 2. Изд-во НГТУ, 2020. С. 298—300.
12. Fujimoto, S. *An Equivalence between Loss Functions and Non-Uniform Sampling in Experience Replay* / S. Fujimoto, D. Meger, D. Precup. 2020. URL: <https://inlnk.ru/poZ0mB>.
13. Сивак, М. А. Классификация зашумленных данных при различных объемах выборки [Текст] / М. А. Сивак. *Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.:* в 9 ч., Новосибирск, 6–10 дек. 2021 г. Ч. 2. Изд-во НГТУ, 2021. С. 277—279.
14. Сивак, М. А. Настройка робастных нейронных сетей для решения задачи классификации [Текст] / М. А. Сивак, В. С. Тимофеев. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.* 2021. Т. 24, № 3. С. 26—32.
15. Сивак, М. А. Построение робастных нейронных сетей с различными функциями потерь [Текст] / М. А. Сивак, В. С. Тимофеев. *Системы анализа и обработки данных.* 2021. Т. 82, № 2. С. 67—83.
16. Тимофеев, В. С. Робастная нейронная сеть с простой архитектурой [Текст] / В. С. Тимофеев, М. А. Сивак // *Сибирский журнал индустриальной математики.* 2021. Т. 24, № 4. С. 126—138.
17. Yukang Chen, Yanwei Li, Tao Kong, Lu Qi, Ruihang Chu, Lei Li, Jiaya Jia. Scale-aware Automatic Augmentation for Object Detection // *CVPR.* 2021. P. 9563-9572.
18. Rowel Atienza. Data Augmentation for Scene Text Recognition // *ICCVW.* 2021. P. 1561-1570.
19. Zhun Zhong, Liang Zheng, Guoliang Kang, Shaozi Li, Yi Yang. Random Erasing Data Augmentation // *AAAI.* 2020. P. 13001-13008.
20. Иванов Д. А., Турута Д. В. Применение методов аугментации данных для повышения точности классификации изображений. *Искусственный интеллект и принятие решений.* 2022. № 3. С. 45—56.
21. Talukdar S, Mahato S, Shahfahad Pal S, Liou YA, Rahman A. *Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations—A review.* *Remote Sens* 2020; 12(7): 1135. DOI: 10.3390/rs12071135.

## References

1. Handbook of the theory of automatic control [Text] / A. G. Alexandrov, V. M. Artemyev, V. N. Afanasyev and others; edited by A. A. Krasovskiy. — M.: Nauka, 1987. — 712 p. 2. Methods of classical and modern theory of automatic control [Text]. Vol
2. Statistical dynamics and identification of automatic control systems: textbook / K. A. Pupkov, N. D. Egupov, E. M. Voronov et al.; edited by K. A. Pupkov, N. D. Egupov. — 2nd ed., revised and additional — M.: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2004. — 640 p.
3. Methods of classical and modern theory of automatic control [Text]. Vol. 5. Methods of modern theory of automatic control: textbook / K. A. Pupkov, N. D. Egupov, A. I. Barkin et al.; edited by K. A. Pupkov, N. D. Egupov. — 2nd ed., revised and additional — M.: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2004. 784 p.
4. Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control [Text]: textbook / K. A. Pupkov, N. D. Egupov, A. I. Gavrilov et al.; edited by N. D. Egupov; ed. 2nd, stereotypical. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2002. 744 p.
5. Kolmogorov, A. N. On the representation of continuous functions of several variables in the form of a superposition of continuous functions of one variable and addition [Text] / A. N. Kolmogorov // Dokl. USSR Academy of Sciences. 1957. Vol. 114, No. 5. pp. 953-956.
6. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's mapping neural network theorem [Text] // IEEE standards first Annual Int. Conference on Neural Networks. — 1987. — Volume 3. — pp. 11-13.
7. Yurkov, D. A. Method of synthesis of neural network model structures [Text] / D. A. Yurkov // Visn. Skydnoukr. national un-tu. — 2009. — № 5 (135). — Pp. 115-122.
8. Yurkov, D. A. Synthesis of neural networks with fractal structure [Text] / D. A. Yurkov // East European Journal of Advanced Technologies. — 2009. — № 4-3 (40). — Pp. 39-44.
9. Yurkov, D. A. Classification based on cooperative neural network structures [Text] / D. A. Yurkov // East European Journal of Advanced Technologies. — 2009. — №5-3 (41). — Pp. 51-56.
10. Sivak, M. A. A study of the applicability of robust loss functions in neural networks [Text] / M. A. Sivak // Collection of scientific papers of NSTU. - 2020. — No. 4. — pp. 50-58.
11. Sivak, M. A. Optimization of the operation of a robust neural network for the classification problem [Text] / M. A. Sivak, V. S. Timofeev // Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers: at 9 a.m., Novosibirsk, November 30 - December 4, 2020, Part 2. NSTU Publishing House, 2020. pp. 298-300.
12. Gudzimo, S. Dynamically developing search process [Text] / S. Gudzimo, D. Meger, J. Purchase. — 2020. — URL: <https://inlnk.ru/poZ0mB>.
13. Sivak, M. A. Classification of noisy data with different sample sizes [Text] / M. A. Sivak // Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers: at 9 a.m., Novosibirsk, December 6-10, 2021, Part 2. — NSTU Publishing House, 2021. — pp. 277-279.
14. Sivak, M. A. Setting up robust neural networks to solve the classification problem [Text] / M. A. Sivak, V. S. Timofeev // Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics. — 2021. — Vol. 24, No. 3. — pp. 26-32.
15. Sivak, M. A. Construction of robust neural networks with various loss functions [Text] / M. A. Sivak, V. S. Timofeev // Data analysis and processing systems. — 2021. — Vol. 82, No. 2. — pp. 67-83.
16. Timofeev, V. S. Robust neural network with simple architecture [Text] / V. S. Timofeev, M. A. Sivak // Siberian Journal of Industrial Mathematics. — 2021. — Vol. 24, No. 4. — pp. 126-138.
17. Yukang Chen, Yanwei Li, Tao Kong, Lu Qi, Ruihang Chu, Lei Li, Jiayaya Jia. Mathematical exhortation based on user needs // CVPR. 2021. pp. 9563-9572.
18. Rowel Atienza. Fascination with the volume of data for understanding the text of a book // ICCVW. 2021. pp. 1561-1570.
19. Zhong Zhong, Liang Zheng, Guoliang Kang, Shaozi Li, Yi Yang. Fascination with the volume of data under random circumstances // AAAI. 2020. pp. 13001-13008.
20. Ivanov D. A., Turuta D. V. Application of data augmentation methods to improve the accuracy of image classification // Artificial intelligence and decision—making. - 2022. — No. 3. — pp. 45-56.
21. Talukdar S., Mahato S., Shahfahad Pal S., Liu Ya., Rahman A. Classification of vegetation cover in the field of land use using machine learning classifiers for satellite observations - an overview. Updated Sens 2020; 12(7):1135. DOI: 10.3390/rs12071135.

## RESUME

*M. A. Naumov, A. Y. Karpovsky*

*Methods for improving the accuracy of object classification when building a vision system for exploring confined spaces*

In this paper, methods for improving the accuracy of object classification in vision systems operating in conditions of limited space and incomplete source data are proposed and substantiated. Special attention is paid to the synthesis of neural network models based on logical neurons and flexible activation functions, in particular, sigmoids, which made it possible to ensure adaptability and stability of classification in noisy conditions. The development of the concept of fractal and cooperative neural network architecture made it possible to combine private solutions into a single system, which improved the interpretability and accuracy of the model. The practical significance of the proposed approaches is to expand the applicability of neural network structures to the tasks of intelligent analysis and management in complex technical systems. The obtained results create prerequisites for further research in the field of developing explicable and reliable ANNs for use in real-time systems.

## РЕЗЮМЕ

*М.А. Наумов, А.Ю. Карповский*

*Методы повышения точности классификации объектов при построении системы зрения для исследования ограниченных пространств*

В данной работе предложены и обоснованы методы повышения точности классификации объектов в системах технического зрения, функционирующих в условиях ограниченного пространства и неполноты исходных данных. Особое внимание уделено синтезу нейросетевых моделей на основе логических нейронов и гибких активационных функций, в частности, сигмоиды, что позволило обеспечить адаптивность и устойчивость классификации в зашумлённых условиях. Развитие концепции фрактальной и кооперативной нейросетевой архитектуры позволило объединить частные решения в единую систему, что улучшило интерпретируемость и точность модели. Практическая значимость предложенных подходов заключается в расширении применимости нейросетевых структур к задачам интеллектуального анализа и управления в сложных технических системах. Полученные результаты создают предпосылки для дальнейших исследований в области разработки объяснимых и надёжных ИНС для применения в системах реального времени.

**Наумов Максим Александрович** – младший научный сотрудник отдела автоматизации горных машин, Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», г. Донецк. *Область научных интересов:* системы автоматического управления и машинное зрение, эл. почта [maksim-naumov-99@bk.ru](mailto:maksim-naumov-99@bk.ru), адрес 283003, г. Донецк, пр. Ильича, дом 93, телефон +7949 318-32-79.

**Карповский Артур Юрьевич** – заведующий отделом автоматизации горных машин, Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», г. Донецк. *Область научных интересов:* приборостроение и радиоэлектроника, эл. почта [oagm308@mail.ru](mailto:oagm308@mail.ru), адрес 283003, г. Донецк, пр. Ильича, дом 93, телефон +7949 336-05-66.

Статья поступила в редакцию 20.03.2025.

УДК 004.89:004.93

DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-13-20

А. В. Ниценко, В. Ю. Шелепов  
ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта»,  
283048, г. Донецк, ул. Артема, 118-б

## МЕТОД СНЯТИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ВИНИТЕЛЬНОГО И ТВОРИТЕЛЬНОГО ПАДЕЖА ДЛЯ РЯДА СУЩЕСТВИТЕЛЬНЫХ РУССКОГО ЯЗЫКА

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

## A METHOD OF ACCUSATIVE AND INSTRUMENTAL CASES DISAMBIGUATION FOR A NUMBER OF RUSSIAN NOUNS

В статье предложен метод автоматического снятия омонимии винительного и творительного падежа для ряда существительных с использованием данных о глагольном управлении, полученных из Национального корпуса русского языка. Результаты реализованы в экспериментальном программном обеспечении для снятия омонимии.

**Ключевые слова:** обработка естественного языка, снятие омонимии, существительное, винительный падеж, творительный падеж, глагольные формы.

The article proposes a method for automatic disambiguation of accusative and instrumental cases for a number of nouns using verb control data obtained from the Russian National Corpus. The results are implemented in experimental software for disambiguation.

**Keywords:** natural language processing, disambiguation, noun, accusative case, creative case, verb forms.

## Введение

Явление омонимии в русском языке создает значительные сложности при автоматической обработке текста, поэтому необходимым этапом является ее снятие. Проблема снятия омонимии актуальна для множества задач: машинный перевод (например, в [1] показано влияние разрешения омонимии на точность перевода), автоматическое извлечение информации, автоматический анализ содержания, обработка речи и текста [2-13]. Для текстов на русском языке проблема заключается не только в частеречной, но и в морфологической омонимии. В частности, большую трудность представляет омонимия падежных форм существительных, при которой словоформы в разных падежах совпадают по написанию.

**Целью данной работы** является разработка метода снятия омонимии винительного и творительного падежа существительного, основанного на использовании глагольных форм, связанных с рассматриваемыми омонимами.

## О снятии омонимии винительного и творительного падежа существительных

При анализе текста мы работаем с морфологическим словарем [14], содержащим более четырех миллионов русских словоформ (с полной грамматической разметкой), представляя его в виде дерева. Последнее дает возможность почти мгновенного поиска нужной словоформы и, в частности, позволяет легко выделить все омонимы для каждого слова в тексте.

В используемом нами морфологическом словаре насчитывается 85 словоформ существительных с данной омонимией. В настоящей работе мы ограничимся следующими 21-ой омонимичными словоформами:

*блудней, глушней, долбней, дусей, емелей, земелей, злыдней, зюзей, квашней, клянчей, мозглей, мямлей, офеней, нюней, писклей, простофилей, растерей, рохлей, сводней, тихоней, тютей.*

Излагаемые ниже результаты реализованы в виде программного модуля в экспериментальном программном обеспечении для морфологической разметки текста [15], [16]. При вводе русского предложения программа выводит в соответствующем окне вместо словоформ столбец всех соответствующих омонимов, снабжая выбранные омонимы восклицательными знаками (рисунок 1).

Сразу оговорим следующие используемые нами принципы:

- 1) все формулируемые ниже правила применяются только к отрезку между двумя ближайшими знаками препинания, содержащему интересующий нас омоним,
- 2) если программа однозначно определила на упомянутом отрезке наличие существительного в винительном падеже (без омонимии), то для интересующего нас омонима винительный падеж не выбирается.

Далее, для распознавания интересующих нас омонимов используется текстовый управляющий файл *Вин-тв.txt*, состоящий из групп, разделенных пробельными строками. Будем эти группы также называть управляющими. К слову *блудней* относятся две группы. Вот содержимое первой из них:

```
блудней !(тв) (1)
<гл-непер>
вести + себя
величать |тв-вин
выглядеть |тв-вин
```

глядеть  
 назвать |тв-вин  
 называть |тв-вин  
 нарекать |тв-вин  
 наречь |тв-вин  
 обозвать |тв-вин  
 обзывать |тв-вин  
 окрестить |тв-вин  
 повести + себя  
 представлять  
 предстать  
 прожить  
 прозвать |тв-вин  
 прозывать |тв-вин  
 расти  
 сделать |тв-вин  
 смотреть  
 стать  
 счесть |тв-вин  
 считать |тв-вин  
 чувствовать + себя

С глаголами этой группы для омонима *блудней* программой выбирается творительный падеж. При этом строка <гл-непер> подразумевает любой непереходный глагол (подходящий по смыслу и, следовательно, возможный в тексте). Метка |тв-вин указывает на то, что с данным глаголом возможен также омоним винительного падежа (это не метка для программы, а информация для человека). Пример: *Он величал блудней(вин) разбойниками.*

Слово *назвать* может иметь смысл *созвать*.

Для глаголов, не попавших в группу (1) программа по умолчанию автоматически выбирает винительный падеж, кроме случая, когда глагол представлен формой краткого страдательного причастия, относящегося к нашему омониму. В последнем случае всегда выбирается творительный падеж.

Пример: *Мясо со стола украдено этой блудней.*

В управляющем файле для омонима *блудней* присутствует еще одна группа:

блудней !(вин-тв) (2)  
 выставить  
 заменить  
 заменять  
 звать  
 изображать  
 изобразить  
 именовать  
 кликать  
 обругать

С глагольными формами этой группы программа по умолчанию выбирает винительный падеж (если это не противоречит принципу 2), запрещающему два винительных падежа), но возможен также творительный падеж.

Примеры: *Он обругал блудней(вин). Он обругал кошку блудней(тв).*

Изменение выбора омонима осуществляется пользователем с использованием кнопки «С» (сogect) в окне программы.

Аналогично и в основном теми же группами глаголов (1) и (2) управляется алгоритм выбора омонимов для следующих существительных:

*глушной, долбней, дусей, емелей, земелей, злыдней, зюзей, квашной, клянчей, мозглей, мямлей, офеней, нюней, писклей, простофилей, растерей, рохлей, сводней, тихоней, тютей.*

При этом для слов *глушной, долбней, злыдней, нюней, размазней, растерей, рохлей, тихоней, тютей* в группу вида (1) добавляется глагол *сидеть*, для слова *сводней* добавляется глагол *служить*, для слова *тютей* – глаголы *кутать, укутать*. В национальном корпусе русского языка [17] встречается сочетание *платить размазней(тв)*. Поэтому для слова *размазней* в группу вида (1) добавляется глагол *платить*.

Что касается слова *офеней*, то для него из соображений семантики из группы вида (1) удаляются глаголы *глядеть, нарекать, наречь, расти, смотреть*, а из группы вида (2) удаляется глагол *обругать*. Это вызвано, в частности, тем, что слово *офеней*, в отличие от слова *блудней*, не является поведенчески-оценочной характеристикой.

Аналогично для слова *земелей* из группы вида (1) удаляются глаголы *обозвать, обзывать, расти, сделать*. Для слова *тихоней* из группы вида (1) удаляются глаголы *обозвать, обзывать*, а из группы (2) удаляется глагол *обругать*.

Слово *дуся* интерпретируется не как женское имя, а как обозначение для милого, душевного человека, мужчины или женщины. Из соответствующей группы вида (1) для него из соображений семантики должны быть удалены глаголы *обозвать, обзывать*. Для глаголов *прозвать, прозывать, счесть* и *считать* удаляются комментирующие метки *|тв-вин*. Из соответствующей группы вида (2) должны быть удален глагол *обругать*.

Слово *емеля* также интерпретируется не как имя, а как характеристика, основным синоним которой является слово *пустомеля*.

На рисунке 1 приведен пример программного снятия омонимии для предложения «*Он искренне чувствовал себя наивным простофилей*».

Исходный текст	
Он искренне чувствовал себя наивным простофилей.	
Словарная разметка	Разметка со снятой омонимией
он   мест сущ ед муж им	он   мест сущ ед муж им
искренне   нар опред кач	искренне   нар опред кач
чувствовал   гл несом перех прош ед муж	чувствовал   гл несом перех прош ед муж
себя   мест сущ род	себя   мест сущ вин
себя   мест сущ вин !	наивным   прл ед муж тв
наивным   прл ед муж тв !	простофилей   сущ одуш ед общ тв
наивным   прл ед ср тв	
наивным   прл мн дат	
простофилей   сущ одуш ед общ тв !	
простофилей   сущ одуш мн род	
простофилей   сущ одуш мн вин	
.	

Рисунок 1 – Результат снятия омонимии

## Заключение

В статье приведено описание методов автоматического снятия омонимии винительного и творительного падежа некоторых существительных в сочетаниях с глагольными формами. Разработанные алгоритмы были реализованы с использованием языка программирования C++ в экспериментальном программном обеспечении для снятия омонимии. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности морфологической разметки при автоматической обработке текстов на русском языке.

## Список литературы

1. Титова, Е. В. Проблема синтаксической омонимии в системах машинного перевода. *Сборник работ 70-й научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета*, 15-18 мая 2013 г., Минск: В 3 ч. Ч. 2. - Минск, 2013. - С. 161-164.
2. Сорокин, А. Б. Автоматическая морфологическая разметка текста / А. Б. Сорокин, Л. М. Железняк. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2020. № 2. С. 44-46.
3. Литвинов, М. И. Метод повышения качества снятия омонимии с использованием статистики совместного употребления слов / М. И. Литвинов. *Качество. Инновации. Образование*. 2010. № 11(66). С. 53-58.
4. Литвинов, М. И. Модели управления на основе сочетаний из трёх слов и глагольное управление для поверхностного синтаксического анализа / М. И. Литвинов. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2010. № 13. С. 107-112.
5. Бручес, Е. П. Гибридный подход к снятию частеречной омонимии на примере русского языка / Е. П. Бручес. *Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Прикладная лингвистика*, Новосибирск, 16–20 апреля 2016 года. Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2016. С. 13-14.
6. Хорошилов А. А. Контекстное разрешение омонимии на основе центроидно-контекстной модели / А.А. Хорошилов, Ю.В.Никитин, А.В. Кан, Я.Д.Козловская, Е.А.Евдокимова. *Труды ИСП РАН*. 2022. т. 34, вып. 5. С. 171-182.
7. Каневский, Е. А. К вопросу о снятии омонимии при компьютерном анализе текстов / Е. А. Каневский, К. К. Боярский. *Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем* / Под редакцией С.В. Кузнецова. Вып. 45. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 37-41.
8. Зарипова, Д. А. Подходы к автоматическому разрешению многозначности на основе неравномерности распределения значений слов в корпусе / Д. А. Зарипова, Н. В. Лукашевич. *Вестник Московского университета*. Серия 9: Филология. 2023. № 6. С. 40-51.

9. Рыкунов, А.Н. Разработка метода обработки несловарных слов для повышения точности морфологического анализа текстов на русском языке / А. Н. Рыкунов, Е. В. Полицына, С. А. Полицын, А. С. Поречный. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2024. № 1. С. 166-177.
10. Кормановский, М. В. О применении методов анализа текстов на естественном языке с последующим формированием графовых структур / М. В. Кормановский, Л. Л. Волкова. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сборник трудов XXI Международной научно-практической конференции*, Сочи, 01–10 октября 2024 года. Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2024. С. 88-91.
11. Красса, С. И. Снятие неоднозначности ключевых слов в экспертизе медиатекста / С. И. Красса. *Современный медиатекст и судебная экспертиза: междисциплинарные связи и экспертная оценка: Сборник научных работ по итогам Международной научно-практической конференции*, Москва, 12–13 октября 2023 года. Москва: ООО "СОЮЗКНИГ", 2023. С. 153-160.
12. Столяров, И. И. Автоматическое разграничение омографов (на материале НКРЯ) / И. И. Столяров, О. А. Митрофанова. *Международная научная конференция, посвященная 20-летию Национального корпуса русского языка : Материалы конференции, Москва, 20–21 декабря 2024 года*. Москва: Институт русского языка им. В.В. Виноградова РАН, 2024. С. 163-165.
13. Кочеткова, Н. А. Метод формирования модели глагольного управления для русского языка / Н. А. Кочеткова. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2012. № 15. С. 199-202.
14. Большакова, С. А. О снятии омонимии «предикатив-предложная группа» для некоторых распространенных словосочетаний в русскоязычных текстах / С. А. Большакова. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. № 1(28). С. 11-17.
15. Хаген, М. Полная парадигма. Морфология [Электронный ресурс]. *Форум «Говорим по-русски»* [сайт]. 2018. Режим доступа: <http://www.speakrus.ru/dict/#morph-paradigm> (дата обращения: 10.06.2019).
16. Ниценко, А. В. О родительном падеже существительного после глагола в случае его омонимии с винительным падежом / А. В. Ниценко, В. Ю. Шелепов. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2025. № 1(36). С. 4-11.
17. Ниценко, А. В. Об использовании семантической информации для снятия омонимии именительного и винительного падежа (как элемента создания онтологии) / А. В. Ниценко, В. Ю. Шелепов. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 4(35). С. 16-24.
18. *Национальный корпус русского языка* [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.ruscorpora.ru/> (дата обращения: 19.03.2025).

## References

1. Titova, E. V. The problem of syntactic homonymy in machine translation systems. Collection of papers of the 70th scientific conference of students and postgraduates of the Belarusian State University, May 15-18, 2013, Minsk: In 3 parts. Part 2. - Minsk, 2013. - P. 161-164.
2. Sorokin, A. B. Automatic morphological tagging of text / A. B. Sorokin, L. M. Zheleznyak // *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. - 2020. - No. 2. - P. 44-46.
3. Litvinov, M. I. Method for improving the quality of disambiguation using statistics of word co-use / M. I. Litvinov // *Quality. Innovations. Education*. - 2010. - No. 11 (66). – P. 53-58.
4. Litvinov, M. I. Control models based on three-word combinations and verb control for superficial syntactic analysis / M. I. Litvinov // *New information technologies in automated systems*. – 2010. – No. 13. – P. 107-112.
5. Bruches, E. P. Hybrid approach to removing part-of-speech homonymy using the example of the Russian language / E. P. Bruches // *Proceedings of the 54th International Scientific Student Conference ISSC-2016: Applied Linguistics, Novosibirsk, April 16–20, 2016*. – Novosibirsk: Novosibirsk National Research State University, 2016. – P. 13-14.
6. Khoroshilov A. A. Contextual homonymy resolution based on the centroid-context model / A.A. Khoroshilov, Yu.V. Nikitin, A.V. Kan, Ya.D. Kozlovskaya, E.A. Evdokimova // *Proceedings of the ISP RAS*. - 2022. - Vol. 34, issue. 5. - P. 171-182.
7. Kanevsky, E. A. On the issue of removing homonymy in computer analysis of texts / E. A. Kanevsky, K.K. Boyarsky // *Problems of transformation and regulation of regional socio-economic systems* / Edited by S.V. Kuznetsov. Issue. 45. - St. Petersburg: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2019. - P. 37-41.

8. Zaripova, D. A. Approaches to automatic resolution of polysemy based on the uneven distribution of word meanings in a corpus / D. A. Zaripova, N. V. Lukashevich // Bulletin of Moscow University. Series 9: Philology. - 2023. - No. 6. - P. 40-51.
9. Rykunov, A. N. Development of a method for processing non-dictionary words to improve the accuracy of morphological analysis of texts in Russian / A. N. Rykunov, E. V. Politsyna, S. A. Politsyn, A. S. Porechny // Bulletin of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technology. - 2024. - No. 1. - P. 166-177.
10. Kormanovsky, M. V. On the application of methods for analyzing texts in natural language with subsequent formation of graph structures / M. V. Kormanovsky, L. L. Volkova // Innovative, information and communication technologies: collected papers of the XXI International scientific and practical conference, Sochi, October 1-10, 2024. - Moscow: Association of graduates and employees of VVIA named after prof. Zhukovsky, 2024. - P. 88-91.
11. Krassa, S. I. Removing the ambiguity of keywords in the examination of media text / S. I. Krassa // Modern media text and forensic examination: interdisciplinary connections and expert assessment: Collection of scientific papers following the results of the International scientific and practical conference, Moscow, October 12-13, 2023. - Moscow: OOO "SOYUZKNIG", 2023. - P. 153-160.
12. Stolyarov, I. I. Automatic distinction of homographs (based on the NKRYA material) / I. I. Stolyarov, O. A. Mitrofanova // International scientific conference dedicated to the 20th anniversary of the National Corpus of the Russian language: Conference materials, Moscow, December 20-21, 2024. - Moscow: V.V. Vinogradov Institute of the Russian Language, Russian Academy of Sciences, 2024. - P. 163-165.
13. Kochetkova, N. A. Method of forming a verb control model for the Russian language / N. A. Kochetkova // New information technologies in automated systems. - 2012. - No. 15. - P. 199-202.
14. Bolshakova, S. A. On the removal of the "predicative-prepositional group" homonymy for some common phrases in Russian-language texts / S. A. Bolshakova // Problems of Artificial Intelligence. - 2023. - No. 1 (28). - P. 11-17.
15. Hagen, M. Complete paradigm. Morphology [Electronic resource] // Forum "Speak Russian" [website]. 2018. Access mode: <http://www.speakrus.ru/dict/#morph-paradigm> (date of access: 10.06.2019).
16. Nitsenko, A. V. On the genitive case of a noun after a verb in the case of its homonymy with the accusative case / A. V. Nitsenko, V. Yu. Shelepov // Problems of Artificial Intelligence. - 2025. - No. 1 (36). - P. 4-11.
17. Nitsenko, A. V. On the use of semantic information to remove homonymy between the nominative and accusative cases (as an element of creating ontology) / A. V. Nitsenko, V. Yu. Shelepov // Problems of Artificial Intelligence. - 2024. - No. 4 (35). - P. 16-24.
18. National Corpus of the Russian Language [Electronic resource]. - Access mode: URL: <http://www.ruscorpora.ru/> (date of access: 19.03.2025).

## RESUME

*A.V. Nitsenko, V. Yu. Shelepov*

*A method of accusative and instrumental cases disambiguation for a number of Russian nouns*

The problem of disambiguation is one of the most important in natural language automatic processing. This problem is especially relevant for the Russian language since the presence of an extremely large number of homonyms. Therefore, the disambiguation is an important and necessary stage for high-quality text processing and analysis.

Methods for automatic removal of homonymy between the accusative and instrumental cases of some nouns in combination with verb forms are described.

The article contains a description of the proposed algorithms, examples of their work are considered. The developed algorithms were implemented in experimental disambiguation software using the C++ programming language.

The results obtained can be used to automate the morphological tagging of natural language texts with disambiguation, which will improve the accuracy of text classification and clustering, improve the quality of machine translation, information search and other applications.

## РЕЗЮМЕ

*А. В. Ниценко, В. Ю. Шелепов*

*Метод снятия неоднозначности винительного и творительного падежа для ряда существительных русского языка*

Проблема разрешения неоднозначности слов является одной из важнейших в задачах автоматической обработки естественного языка. Для русского языка эта проблема особенно актуальна, поскольку количество омонимов очень велико из-за наличия словоформ. Поэтому процедура снятия омонимии является важным и необходимым этапом для качественной обработки и анализа текстов.

Описаны методы автоматического снятия омонимии винительного и творительного падежа некоторых существительных в сочетаниях с глагольными формами.

В статье приведено описание предложенных методов и алгоритмов, рассмотрены примеры их работы. Разработанные алгоритмы были реализованы с использованием языка программирования C++ в экспериментальном программном обеспечении для снятия омонимии.

Полученные результаты могут быть использованы для автоматизации морфологической разметки естественно-языковых текстов со снятием неоднозначности, что позволит повысить точность классификации и кластеризации текстов, улучшить качество машинного перевода, информационного поиска и других приложений.

**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.

**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: +7949 4219188.

Статья поступила в редакцию 13.06.2025.

М. В. Солопов<sup>1</sup>, Е. С. Чечехина<sup>2</sup>, А. Г. Попандопуло<sup>1</sup>, А. С. Кавелина<sup>1</sup>,  
Г. В. Акопян<sup>1</sup>, В. В. Турчин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака» Министерства здравоохранения Российской Федерации  
283045, г. Донецк, пр-кт. Ленинский, 47

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»  
119234, г. Москва, пр-кт. Ломоносовский, 27 к.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ MASK R-CNN И SEGMENT ANYTHING MODEL (SAM) ДЛЯ ИНСТАНС-СЕГМЕНТАЦИИ МЕЗЕНХИМНЫХ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК НА МИКРОФОТОГРАФИЯХ

M. V. Solopov<sup>1</sup>, E. S. Chechekhina<sup>2</sup>, A. G. Popandopulo<sup>1</sup>, A. S. Kavelina<sup>1</sup>,  
G. V. Akopian<sup>1</sup>, V. V. Turchin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal 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

<sup>2</sup>Federal State Educational Institution of Higher Education Lomonosov Moscow State University  
119234, Moscow, Lomonosovsky Ave. 27 k.1

## STUDY OF APPLICATION OF MASK R-CNN AND SEGMENT ANYTHING MODEL (SAM) FOR INSTANCE SEGMENTATION OF MESENCHYMAL STEM CELLS IN MICROPHOTOGRAPHS

Исследование посвящено сравнению эффективности архитектур Mask R-CNN и Segment Anything Model (SAM) в задаче инстанс-сегментации мезенхимных стволовых клеток (МСК) на микрофотографиях. На двух датасетах (с низкой и высокой плотностью клеток) показано, что Mask R-CNN, обученная на целевом домене, превосходит SAM по метрике mAP (0,64 против 0,61 для низкой плотности; 0,31 против 0,26 для высокой). Выявлено, что увеличение плотности клеток и их перекрытие снижают точность обеих моделей. SAM демонстрирует ограниченную эффективность при использовании только ограничивающих рамок (bounding boxes) в качестве входных данных, что указывает на необходимость адаптации данной модели для работы с биомедицинскими данными.

**Ключевые слова:** инстанс-сегментация, мезенхимные стволовые клетки, морфологическая гетерогенность, плотность клеток, автоматизированный анализ культур, биомедицинские изображения, адаптация моделей.

The study compares the efficiency of Mask R-CNN and Segment Anything Model (SAM) for instance segmentation of mesenchymal stem cells (MSCs) in microphotographs. Results on two datasets (low and high cell density) demonstrate that Mask R-CNN, fine-tuned on target data, outperforms SAM in mAP (0.64 vs. 0.61 for low density; 0.31 vs. 0.26 for high density). Increased cell density and overlap reduce accuracy for both models. SAM's limitations in using only bounding boxes highlight the need for domain-specific adaptation.

**Key words:** instance segmentation, mesenchymal stem cells, morphological heterogeneity, cell density, automated cell culture analysis, biomedical imaging, model adaptation.

## Введение

Мезенхимные стволовые клетки (МСК) представляют собой популяцию недифференцированных клеток взрослого организма, обладающих способностью к самообновлению и дифференцировке в клетки костной, хрящевой и жировой ткани. Помимо этого, данные клетки обладают выраженными иммуномодулирующими и трофическими свойствами. Все перечисленные свойства делают МСК важнейшими объектами исследований в области регенеративной медицины и тканевой инженерии [1]. Их применение охватывает лечение нейродегенеративных заболеваний, восстановление костно-хрящевых дефектов и модуляцию иммунного ответа при аутоиммунных патологиях [2–4]. Однако морфологическая гетерогенность МСК, включая вариации в размере (20–50 мкм), форме (веретенообразная, звездчатая, полигональная) и текстуре цитоплазмы, создают сложности для автоматизированного микроскопического анализа культур *in vitro*. Современные нейросетевые подходы к семантической сегментации, основанные на архитектурах с энкодер-декодер структурами и пространственной пирамидальной обработкой признаков, достигают Dice-коэффициента в диапазоне 0,87–0,92 при выделении клеточных областей [5], [6]. Однако эти методы ограничены задачей классификации пикселей и не обеспечивают разделения отдельных клеточных объектов, что является критически важным для количественного анализа клеточных культур, например, для подсчета клеток или анализа морфологии отдельных клеток. Использование нейросетевых моделей для обработки фотографий клеточных культур МСК активно исследуется в последние годы, демонстрируя потенциал для анализа клеточной жизнеспособности, дифференцировки и сенесцентности [7–13].

Для решения задачи инстанс-сегментации активно применяются современные нейросетевые архитектуры, такие как Mask R-CNN. Данная модель способна одновременно детектировать объекты и генерировать для них маски сегментации, что дает возможность решать задачи даже в сложных условиях с множеством перекрывающихся объектов [14], [15]. С появлением фундаментальных моделей, таких как Segment Anything Model (SAM) [16–19], открылись новые перспективы для задач сегментации. SAM, обученная на большом массиве разнообразных данных, демонстрирует способность к обобщению и сегментации объектов в различных доменах по разнообразным входным подсказкам, включая ограничивающие рамки (bounding boxes). Это свойство делает SAM потенциально мощным инструментом для инстанс-сегментации клеток, особенно в сценариях с ограниченным количеством аннотированных данных для обучения специализированных моделей.

В данной работе проведено исследование эффективности модели SAM для задачи инстанс-сегментации МСК на микрофотографиях. Для генерации подсказок в виде ограничивающих рамок для SAM использовалась предварительно обученная модель Mask R-CNN. Эффективность предложенного подхода сравнивалась с результатами инстанс-сегментации, полученными непосредственно с помощью модели Mask R-CNN.

**Цель исследования** – определить, насколько точно SAM справляется с сегментацией отдельных клеток при использовании ограничивающих рамок, предсказанных Mask R-CNN. Актуальность исследования обусловлена потребностью лабораторий в решениях, способных эффективно работать на небольших наборах данных (до нескольких сотен изображений) и обеспечивающих высокое качество сегментации. Результаты работы позволят оценить применимость SAM для оптимизации анализа фибробластоподобных клеточных популяций, таких как МСК, и могут быть интегрированы в системы автоматизированного мониторинга культур.

## Материалы и методы

В исследовании использовались два аннотированных набора микрофотографий МСК. Первый набор включал 48 изображений крысиных МСК из открытого репозитория Cell Tracking Challenge [20], [21]. Второй набор состоял из 207 фазово-контрастных изображений МСК человека из нашего предыдущего исследования [6]. Оба набора данных были разделены на обучающую и валидационную выборки в соотношении 80% к 20% соответственно. В качестве основной модели для инстанс-сегментации использовалась Mask R-CNN, основанная на архитектуре ResNet-50 с Feature Pyramid Network (FPN) версии 2. Также она была использована для генерации ограничивающих рамок, служащих входными подсказками для модели SAM. Модель была инициализирована весами, предварительно обученными на наборе данных COCO. Далее происходило дообучение для задачи сегментации клеток, при этом выходные слои классификатора и предиктора масок были адаптированы для двух классов: «клетка» и «фон». Процесс дообучения Mask R-CNN осуществлялся в течение 50 эпох. В качестве оптимизатора использовался AdamW с начальной скоростью обучения 0,003 и коэффициентом регуляризации весов 0,0005. Размер батча составлял 2 изображения. Для корректировки скорости обучения применялся планировщик ReduceLROnPlateau, который снижал скорость обучения при отсутствии улучшения функции потерь на валидационной выборке. В процессе обучения применялись следующие аугментации данных: случайные горизонтальные и вертикальные отражения с вероятностью 0,5 и 0,3 соответственно, а также случайные повороты на 90 градусов с вероятностью 0,3. Веса модели, показавшей лучшие результаты на валидационной выборке, сохранялись и использовались на последующих этапах.

Для сегментации с использованием SAM применялась предварительно обученная модель на базе архитектуры Vision Transformer (ViT-H). SAM является фундаментальной моделью, обученной на обширном наборе данных, и в данном исследовании использовалась без дополнительного дообучения. Для инициации процесса сегментации модель SAM получала в качестве входных подсказок ограничивающие рамки, сгенерированные предварительно обученной моделью Mask R-CNN для каждого обнаруженного объекта на изображении. Использовался режим, позволяющий SAM генерировать несколько альтернативных масок для одной подсказки, из которых выбиралась маска с наибольшей оценкой уверенности.

Качество инстанс-сегментации для обеих моделей (Mask R-CNN и SAM с подсказками от первой) на валидационных изображениях оценивалось с использованием метрики средней точности (mean average precision, mAP). Расчет mAP производился для набора пороговых значений метрики IoU (intersection over union), варьирующихся от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05. Для каждого предсказанного объекта вычислялось IoU между предсказанной маской и маской истинного объекта. Предсказание считалось истинно положительным (TP), если IoU превышало заданный порог и объект не был сопоставлен ранее, в противном случае – ложно положительным (FP). На основе этих значений строились кривые точности-полноты (precision-recall) для каждого класса, и вычислялся AP как площадь под кривой с использованием метода 11-точечной интерполяции. Визуальное сравнение результатов сегментации проводилось для выборочных изображений. Обучение и оценка моделей выполнялось с помощью языка программирования Python v3.10 с использованием библиотеки PyTorch v2.3.1. Все вычисления производились на устройстве CUDA. Конфигурация вычислительного сервера: GPU 1xP100 16GB, CPU 10 VCPU, RAM 28GB.

## Результаты

В ходе исследования была проведена оценка эффективности инстанс-сегментации МСК с использованием моделей Mask R-CNN и SAM, последняя из которых получала ограничивающие рамки от Mask R-CNN в качестве входных подсказок (рис. 1). Анализ эффективности этих моделей проводился на двух валидационных выборках микрофотографий: МСК крысы с низкой плотностью расположения клеток и МСК человека с высокой плотностью и наложением клеток (табл. 1).

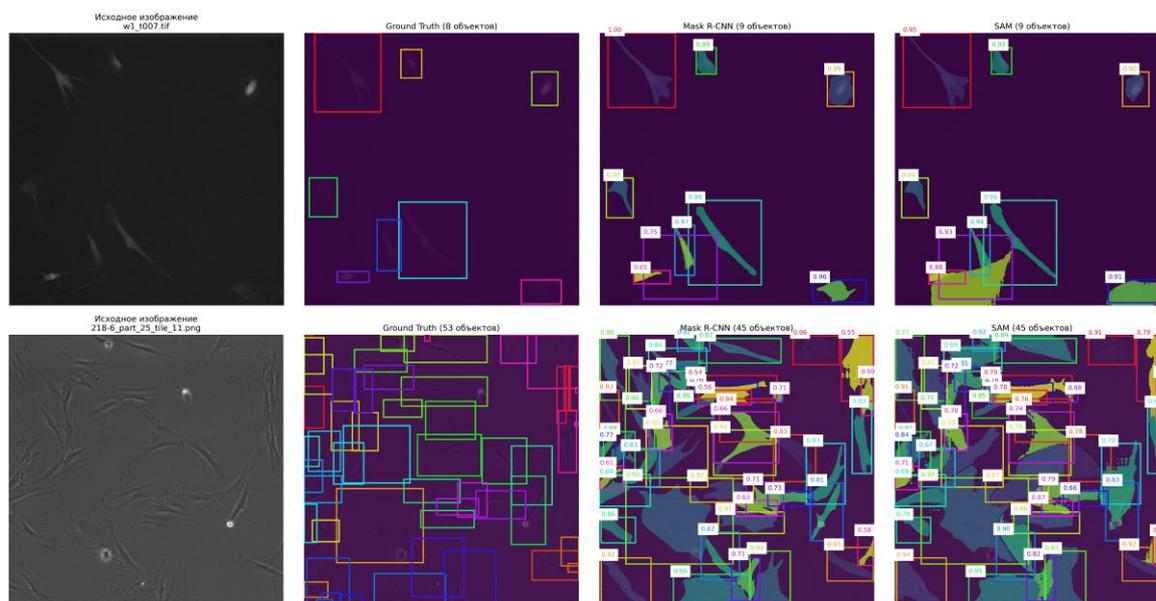


Рисунок 1 – Сравнительный анализ результатов инстанс-сегментации МСК на примере валидационных фотографий МСК крысы (верхний ряд) и МСК человека (нижний ряд).

- Колонки по порядку: 1) исходное микроскопическое изображение клеточной культуры; 2) истинная разметка (ground truth), демонстрирующая ограничивающие рамки для каждой клетки; 3) результаты сегментации, полученные с помощью модели Mask R-CNN, отображены предсказанные маски (окрашены разными цветами для наглядности), ограничивающие рамки и соответствующие им оценки уверенности; 4) результаты сегментации, полученные с помощью модели SAM.

Таблица 1 – Сравнение эффективности инстанс-сегментации МСК моделями Mask R-CNN и SAM

Метрика	Крысиные МСК (48 изображений)	Человеческие МСК (207 изображений)
Кол-во клеток	8,4	41,85
Обнаружено Mask R-CNN	10,0	37,17
Обнаружено SAM	10,0	37,17
Уверенность Mask R-CNN	0,938	0,801
Уверенность SAM	0,927	0,848
mAP Mask R-CNN	0,640	0,306
mAP SAM	0,605	0,262

Для набора данных с МСК крысы, характеризующегося меньшей плотностью клеток, среднее количество аннотированных объектов на изображении составило 8,4. Модель Mask R-CNN детектировала в среднем 10 объектов, и аналогичное количество объектов было сегментировано моделью SAM. Средняя уверенность предсказаний

для Mask R-CNN достигла 0,9379, в то время как для SAM этот показатель составил 0,9273. Ключевая метрика качества сегментации, средняя точность (mAP), для Mask R-CNN оказалась равной 0,6395. При использовании SAM с подсказками от Mask R-CNN значение mAP снизилось до 0,6053.

При анализе набора данных МСК человека, где наблюдалась более высокая плотность клеток и их частичное перекрытие, среднее количество аннотированных объектов на изображении составило 41,85. Модели детектировали в среднем 37,17 объектов. Средняя уверенность предсказаний Mask R-CNN на этом более сложном наборе данных составила 0,8014. Интересно, что средняя уверенность сегментаций SAM была несколько выше – 0,8484. Однако, значения mAP для обеих моделей значительно снизились по сравнению с результатами на датасете МСК крысы. Для Mask R-CNN mAP на данных МСК человека составила 0,3062, а для SAM – 0,2623.

Таким образом, на обоих наборах данных модель Mask R-CNN продемонстрировала более высокую точность инстанс-сегментации по метрике mAP по сравнению с моделью SAM, которая использовала ограничивающие рамки от Mask R-CNN. Увеличение плотности клеток и их взаимное наложение привели к существенному снижению качества сегментации для обеих исследованных конфигураций.

## Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о различной эффективности исследуемых подходов к инстанс-сегментации МСК в зависимости от характеристик набора данных. На изображениях с низкой плотностью клеток обе модели показали относительно высокие значения mAP, при этом Mask R-CNN, обученная непосредственно на целевой задаче, превзошла SAM, использовавшую лишь ограничивающие рамки в качестве подсказок. Это может указывать на то, что для специфических биомедицинских изображений, даже при использовании мощных фундаментальных моделей типа SAM, качество сегментации сильно зависит от точности и специфичности входных промптов. Ограничивающая рамка, хотя и локализует объект, может быть недостаточно информативной для SAM, чтобы точно выделить границы клетки, особенно если модель не была дополнительно адаптирована под конкретный тип клеток или условия микроскопии. Незначительное превышение количества детектированных объектов над истинным количеством (10 против 8,4) может свидетельствовать о небольшой тенденции к повышению ложноположительных результатов или детекции артефактов на изображениях с низкой плотностью.

Переход к более сложному набору данных с высокой плотностью и перекрытием клеток (МСК человека) ожидаемо привел к значительному падению точности сегментации для обеих моделей. Значения mAP снизились более чем в два раза. Примечательно, что на этом наборе данных количество детектированных объектов (37,17) оказалось ниже истинного среднего количества (41,85), что указывает на пропуски объектов, вероятно, в областях с высокой степенью их взаимного перекрытия. В таких условиях точное выделение границ отдельных клеток становится крайне затруднительным как для этапа детекции Mask R-CNN, так и для последующей сегментации SAM.

Интересным наблюдением является более высокая средняя уверенность предсказаний SAM (0,8484) по сравнению с Mask R-CNN (0,8014) на данных МСК человека, несмотря на более низкий mAP у SAM. Это может означать, что SAM с высокой уверенностью генерирует маску внутри предоставленной ограничивающей рамки, однако эта маска не всегда точно соответствует границам истинного объекта, особенно в условиях перекрытия. Модель Mask R-CNN, напротив, может давать менее уверенные, но более точные по метрике IoU предсказания масок.

Тот факт, что Mask R-CNN стабильно демонстрировала лучшие результаты по mAP, подчеркивает важность специализации модели под конкретную задачу. Несмотря на впечатляющие возможности SAM по обобщению, ее применение в исходном виде с использованием только ограничивающих рамок в качестве подсказок может быть неоптимальным для сложных задач инстанс-сегментации в биомедицине, требующих высокой точности. Возможно, использование более детализированных подсказок для SAM, таких как точечные промпты или грубые маски, или же дообучение SAM на специфическом датасете могло бы улучшить ее производительность. Текущий подход, где SAM полностью полагается на качество рамок от Mask R-CNN, наследует все ошибки и неточности этапа детекции.

## Выводы

Сравнительный анализ Mask R-CNN и SAM с подсказками в виде ограничивающих рамок выявил преимущество специализированной модели (Mask R-CNN) по метрике mAP для инстанс-сегментации МСК (0,64 против 0,61 для низкой плотности; 0,31 против 0,26 для высокой). Плотность клеток и их перекрытие значимо снижают точность обеих моделей. Результаты подчеркивают ограничения SAM в конфигурации без доменной адаптации, несмотря на её потенциал как фундаментальной модели. Для повышения качества сегментации SAM требуются исследования по оптимизации промптинга и тонкой настройке на биомедицинских данных.

## Список литературы / References

1. Jovic D., Yu Y., Wang D. et al. A Brief Overview of Global Trends in MSC-Based Cell Therapy. *Stem Cell Reviews and Reports*. 2022. Vol. 18. P. 1525–1545. DOI: 10.1007/s12015-022-10369-1.
2. Khalid A. A.-A., Rehab Y. A.-A. Update on the Use of Mesenchymal Stem Cells in the Treatment of Various Infectious Diseases Including COVID-19 Infection. *Journal of Stem Cell Therapy and Transplantation*. 2023. Vol. 7. P. 034–042. DOI: 10.29328/journal.jsctt.1001033.
3. Chung M.-J., Son J.-Y., Park S. et al. Mesenchymal Stem Cell and MicroRNA Therapy of Musculoskeletal Diseases. *International Journal of Stem Cells*. 2021. Vol. 14. № 2. P. 150–167. DOI: 10.15283/ijsc20167.
4. Vargas-Rodríguez P., Cuenca-Martagón A., Castillo-González J. et al. Novel Therapeutic Opportunities for Neurodegenerative Diseases with Mesenchymal Stem Cells: The Focus on Modulating the Blood-Brain Barrier. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24. № 18. P. 14117. DOI: 10.3390/ijms241814117.
5. Adnan N., Umer F., Malik S. Implementation of Transfer Learning for the Segmentation of Human Mesenchymal Stem Cells—A Validation Study. *Tissue and Cell*. 2023. Vol. 83. P. 102149. DOI: 10.1016/j.tice.2023.102149.
6. Solopov M., Chechekhina E., Kavelina A. et al. Comparative Study of Deep Transfer Learning Models for Semantic Segmentation of Human Mesenchymal Stem Cell Micrographs. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025. Vol. 26. № 5. P. 2338. DOI: 10.3390/ijms26052338.
7. Imboden S., Liu X., Lee B.S. et al. Investigating Heterogeneities of Live Mesenchymal Stromal Cells Using AI-Based Label-Free Imaging. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. P. 6728. DOI: 10.1038/s41598-021-85905-z.
8. Hoffman J., Zheng S., Zhang H. et al. Image-Based Discrimination of the Early Stages of Mesenchymal Stem Cell Differentiation. *Molecular Biology of the Cell*. 2024. Vol. 35. P. ar103. DOI: 10.1091/mbc.E24-02-0095.
9. Kong Y., Ao J., Chen Q. et al. Evaluating Differentiation Status of Mesenchymal Stem Cells by Label-Free Microscopy System and Machine Learning. *Cells*. 2023. Vol. 12. № 11. P. 1524. DOI: 10.3390/cells12111524.
10. Hassanlou L., Meshgini S., Alizadeh E. Evaluating Adipocyte Differentiation of Bone Marrow-Derived Mesenchymal Stem Cells by a Deep Learning Method for Automatic Lipid Droplet Counting. *Computers in Biology and Medicine*. 2019. Vol. 112. P. 103365. DOI: 10.1016/j.combiomed.2019.103365.
11. Lan Y., Huang N., Fu Y. et al. Morphology-Based Deep Learning Approach for Predicting Osteogenic Differentiation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022. Vol. 9. P. 802794. DOI: 10.3389/fbioe.2021.802794.

12. Mota S.M., Rogers R.E., Haskell A.W. et al. Automated Mesenchymal Stem Cell Segmentation and Machine Learning-Based Phenotype Classification Using Morphometric and Textural Analysis. *Journal of Medical Imaging*. 2021. Vol. 8. № 1. P. 014503. DOI: 10.1117/1.JMI.8.1.014503.
13. Ochs J., Biermann F., Piotrowski T. et al. Fully Automated Cultivation of Adipose-Derived Stem Cells in the StemCellDiscovery—A Robotic Laboratory for Small-Scale, High-Throughput Cell Production Including Deep Learning-Based Confluence Estimation. *Processes*. 2021. Vol. 9. № 4. P. 575. DOI: 10.3390/pr9040575.
14. Rettenberger L., Rieken Münke F., Bruch R., Reischl M. Mask R-CNN Outperforms U-Net in Instance Segmentation for Overlapping Cells. *Current Directions in Biomedical Engineering*. 2023. Vol. 9. № 1. P. 335–338. DOI: 10.1515/cdbme-2023-1084.
15. Murugesan R., T. G.A., A. V. et al. Instance Segmentation of Neuronal Cells Using U-Net, Mask R-CNN, and Detectron2. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*. 2024. Vol. 45. № 2. P. 129–149. DOI: 10.1504/IJBET.2024.138735.
16. Kirillov A., Mintun E., Ravi N. et al. Segment Anything. *arXiv*. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2304.02643> (дата обращения: 01.07.2024).
17. Mazurowski M.A., Dong H., Gu H. et al. Segment Anything Model for Medical Image Analysis: An Experimental Study. *Medical Image Analysis*. 2023. Vol. 89. P. 102918. DOI: 10.1016/j.media.2023.102918.
18. Ji W., Li J., Bi Q. et al. Segment Anything Is Not Always Perfect: An Investigation of SAM on Different Real-World Applications. *Machine Intelligence Research*. 2024. Vol. 21. P. 617–630. DOI: 10.1007/s11633-023-1385-0.
19. Huang Y., Yang X., Liu L. et al. Segment Anything Model for Medical Images? *Medical Image Analysis*. 2024. Vol. 92. P. 103061. DOI: 10.1016/j.media.2023.103061.
20. Ulman V., Maška M., Magnusson K.E.G. et al. An Objective Comparison of Cell-Tracking Algorithms. *Nature Methods*. 2017. Vol. 14. № 12. P. 1141–1152. DOI: 10.1038/nmeth.4473.
21. Maška M., Ulman V., Delgado-Rodriguez P. et al. The Cell Tracking Challenge: 10 Years of Objective Benchmarking. *Nature Methods*. 2023. Vol. 20. № 7. P. 1010–1020. DOI: 10.1038/s41592-023-01879-y.

## RESUME

*M. V. Solopov, E. S. Chechekhina, A. G. Popandopulo, A. S. Kavelina,  
G. V. Akopian, V. V. Turchin*

*Study of application of Mask R-CNN and Segment Anything Model (SAM)  
for instance segmentation of mesenchymal stem cells in microphotographs*

Mesenchymal stem cells (MSCs) are vital for regenerative medicine, but their morphological heterogeneity complicates automated analysis. Traditional segmentation methods effectively detect cell regions but fail to separate individual objects. Modern models, such as Mask R-CNN, advance instance segmentation but struggle with high cell density. Foundational models like Segment Anything Model (SAM) offer new potential, yet their applicability to biomedical requires further validation. The aim of this study is to compare the efficiency of Mask R-CNN and SAM for instance segmentation of MSCs in microphotographs under varying cell density conditions.

The study utilized two datasets: 48 rat MSC microphotographs and 207 human MSC phase-contrast images, split into training/validation sets (80/20). Mask R-CNN (ResNet-50-FPN-V2) was fine-tuned with augmentations (flips, rotations) and AdamW optimizer; SAM was applied without fine-tuning, using Mask R-CNN-predicted bounding boxes. Evaluation was based on mAP (IoU 0.5–0.95), incorporating precision-recall metrics.

For rat MSCs (low density), Mask R-CNN achieved a mAP of 0.64, while SAM, using bounding boxes from Mask R-CNN, reached 0.61. For human MSCs (high density and overlap), mAP values decreased to 0.31 for Mask R-CNN and 0.26 for SAM. Despite SAM's higher prediction confidence (0.85 vs. 0.80 for human MSCs), its accuracy was lower due to errors in cell boundary detection during partial overlaps. Both models underestimated object counts in dense images, detecting 37.17 cells on average compared to the ground truth of 41.85.

The domain-specialized Mask R-CNN outperformed the foundational SAM in MSC instance segmentation, particularly under high-density and overlapping conditions. The quality of input prompts (bounding boxes) was critical for SAM, highlighting the need for prompt optimization, such as point-based hints or rough masks, and fine-tuning on target datasets. These findings are essential for developing automated cell culture analysis systems, where segmentation precision directly affects the reliability of quantitative and morphological assessments.

## РЕЗЮМЕ

*М. В. Солопов, Е. С. Чечехина, А. Г. Попандопуло, А. С. Кавелина,  
Г. В. Акопян, В. В. Турчин*

*Исследование применения моделей Mask R-CNN и Segment Anything Model (SAM) для инстанс-сегментации мезенхимных стволовых клеток на микрофотографиях*

Мезенхимные стволовые клетки (МСК) являются важными объектами исследований в области регенеративной биомедицины, но их морфологическая неоднородность осложняет автоматизированный анализ. Традиционные методы сегментации эффективны для выделения областей, но не разделяют отдельные клетки. Современные модели (Mask R-CNN) улучшают инстанс-сегментацию, но сталкиваются с трудностями при высокой плотности клеток. Появление фундаментальных моделей (Segment Anything Model, SAM) открывает новые возможности, однако их применимость к биомедицинским данным требует оценки. Цель исследования – сравнить эффективность архитектур Mask R-CNN и SAM для инстанс-сегментации МСК на микрофотографиях с различной плотностью клеток.

Исследование выполнено на двух датасетах: 48 микрофотографий крысиных МСК и 207 фазово-контрастных изображений человеческих МСК, разделённых на обучающую и валидационную выборки (80/20). Модель Mask R-CNN (ResNet-50-FPN-V2) дообучена с аугментациями (отражения, повороты) и оптимизатором AdamW; SAM применялась без дообучения, используя предсказанные Mask R-CNN ограничивающие рамки. Оценка проводилась по mAP (IoU 0,5–0,95) с учётом точности и полноты сегментации.

На датасете крысиных МСК (низкая плотность клеток) Mask R-CNN достигла mAP 0,64, SAM – 0,61. Для человеческих МСК (высокая плотность и перекрытие) Mask R-CNN показала mAP 0,31, SAM – 0,26. SAM продемонстрировала более высокую уверенность предсказаний (0,85 против 0,80 у Mask R-CNN для человеческих МСК), но ошибки в определении границ при перекрытии снизили точность. Обе модели недооценили количество объектов на плотных изображениях: среднее количество детектированных клеток составило 37,17 при истинном значении 41,85.

Специализированная модель Mask R-CNN превзошла фундаментальную SAM в задачах инстанс-сегментации МСК, особенно в условиях высокой плотности и перекрытия клеток. Качество входных подсказок (ограничивающих рамок) оказалось критическим фактором для SAM, что подчеркивает необходимость оптимизации промптов, таких как использование точечных подсказок или грубых масок, а также тонкой настройки модели на целевом датасете. Полученные результаты важны для разработки автоматизированных систем анализа клеточных культур, где точность сегментации напрямую влияет на достоверность количественных и морфологических оценок.

**Солопов М. В.** – биолог, лаборатория клеточно-тканевого культивирования ФГБУ «ИНВХ им. В.К. Гусака» Минздрава России, 283045, Донецк, пр-кт. Ленинский, 47, тел +7(949) 942-5835, [mxsolopov@yandex.ru](mailto:mxsolopov@yandex.ru). *Область научных интересов:* регенеративная биомедицина, клеточные технологии, искусственный интеллект, нейронные сети

**Чечехина Е. С.** – лаборант, кафедра биохимии и регенеративной биомедицины, факультет фундаментальной медицины МГУ имени М.В. Ломоносова, 119234, г. Москва, пр-кт. Ломоносовский, 27 к.1, [voynovaes.pharm@gmail.com](mailto:voynovaes.pharm@gmail.com). *Область научных интересов:* регенеративная биомедицина, клеточные технологии, искусственный интеллект, нейронные сети

**Попандоуло А. Г.** – д.мед.н, профессор, заведующий лабораторией клеточно-тканевого культивирования ФГБУ «ИНВХ им. В.К. Гусака» Минздрава России, 283045, Донецк, пр-кт. Ленинский, 47, [pag.lctc@mail.ru](mailto:pag.lctc@mail.ru). *Область научных интересов:* регенеративная биомедицина, клеточные технологии, хирургия

**Кавелина А. С.** – к.мед.н, биолог, лаборатория клеточно-тканевого культивирования ФГБУ «ИНВХ им. В.К. Гусака» Минздрава России, 283045, Донецк, пр-кт. Ленинский, 47, [annakavelina@mail.ru](mailto:annakavelina@mail.ru). *Область научных интересов:* регенеративная биомедицина, клеточные технологии

**Акопян Г. В.** – биолог, лаборатория клеточно-тканевого культивирования ФГБУ «ИНВХ им. В.К. Гусака» Минздрава России, 283045, Донецк, пр-кт. Ленинский, 47, [gulnara.akopyan.79@mail.ru](mailto:gulnara.akopyan.79@mail.ru). *Область научных интересов:* регенеративная биомедицина, клеточные технологии

**Турчин В. В.** – биолог, лаборатория клеточно-тканевого культивирования ФГБУ «ИНВХ им. В.К. Гусака» Минздрава России, 283045, Донецк, пр-кт. Ленинский, 47, [turchin.dn@mail.ru](mailto:turchin.dn@mail.ru). *Область научных интересов:* регенеративная биомедицина, клеточные технологии

Статья поступила в редакцию 14.06.2025.

Раздел 2  
*Section 2*

Математическое моделирование,  
численные методы  
и комплексы программ

---

*Mathematical modeling,  
numerical methods  
and software packages*

УДК 519.8:658.512

DOI 10.24412/2413-7383- 2025-2-37-31-43

А. И. Боровиков, О. А. Криводубский  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»  
283050, г. Донецк, пр. Богдана Хмельницкого, 84

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПОТОКОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ОПТИМИЗАЦИИ И ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ В ЛОГИСТИКЕ, ФИНАНСАХ И ЗАКУПКАХ

A. I. Borovikov, O. A. Krivodubsky  
Donetsk National Technical University  
283050, c. Donetsk, Bogdana Khmel'nitskogo av.

## MATHEMATICAL MODELING AND FLOW FORMALIZATION FOR ANALYSIS, OPTIMIZATION AND ANOMALY DETECTION IN LOGISTICS, FINANCE AND PROCUREMENT

В статье представлен обзор современных методов формализации материальных, финансовых и информационных потоков на предприятии. Рассматриваются объектные и процессные подходы, а также дискретные, графовые и матричные модели, применяемые для анализа, оптимизации и выявления аномалий в логистических и финансовых процессах, включая сферу закупок. Обсуждаются возможности интеграции различных моделей и использование методов машинного обучения для повышения эффективности анализа и принятия решений.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, формализация потоков, логистика, финансы, закупки, аномалии, оптимизация, машинное обучение, графовые модели, матричные модели, дискретные модели.

The article provides an overview of modern methods for formalizing material, financial, and information flows in enterprises. It examines object-oriented and process-oriented approaches, as well as discrete, graph-based, and matrix models used for analysis, optimization, and anomaly detection in logistics and financial processes, including procurement. The article discusses the integration of various models and the use of machine learning techniques to enhance analysis efficiency and decision-making.

**Key words:** mathematical modeling, flow formalization, logistics, finance, procurement, anomalies, optimization, machine learning, graph models, matrix models, discrete models.

## Введение

Математическое моделирование потоков представляет собой важный инструмент в анализе данных и выявлении аномалий. Потоки в рамках деятельности предприятия, как правило, отличаются высокой степенью разнородности и содержат значительное количество избыточной информации, что существенно усложняет их интерпретацию. Более того, эти разнородные данные часто взаимосвязаны, что открывает возможности для поиска закономерностей и, как следствие, выявления аномалий в этих закономерностях [1], [2]. Формализация таких потоков позволяет структурировать данные, выделяя ключевые параметры и устраняя шум, что способствует повышению точности анализа и эффективности принимаемых решений. Кроме того, особый интерес представляет совместный анализ финансовых и материальных потоков, поскольку между ними часто наблюдается тесная взаимосвязь. Изменения в материальных потоках, как правило, сопровождаются соответствующими финансовыми операциями, а выявление несоответствий между ними может указывать на ошибки, неэффективность или потенциальные нарушения. Такой комплексный подход позволяет более точно выявлять аномалии и принимать обоснованные управленческие решения [3].

Существует два ключевых подхода к моделированию:

- объектный, ориентированный на инфраструктурные компоненты (склады, транспортные узлы, производственные мощности и т.п.);
- процессный, фокусирующийся на движении потоков и управлении логистическими и операционными процессами.

Математическое моделирование позволяет учитывать широкий спектр факторов – от временных ограничений и стоимости до объемов поставок и доступности ресурсов. Это способствует выявлению узких мест, оптимизации маршрутов, снижению издержек и построению визуальных моделей для поддержки управленческих решений. Кроме того, моделирование помогает прогнозировать поведение потоков, оценивать риски и формировать сценарные планы для различных рыночных условий. В то же время чрезмерная детализация может осложнять интерпретацию результатов и ограничивать практическое применение [4].

Отдельное внимание в рамках аналитических систем уделяется сфере закупок. Здесь выявлены такие проблемы, как недостаточный учет качественных характеристик товаров, поверхностный анализ влияния закупочной деятельности на отрасли и участников, а также ограниченная объективность экспертных оценок. Для преодоления этих ограничений предлагается активнее использовать реальные данные и математические методы. Применение статистики и моделирования позволяет повысить эффективность процесса закупок, проводить прогнозирование и выявлять скрытые взаимосвязи [5].

## Формализация потоков

Среди современных моделей математического моделирования наиболее часто встречаются графовые, матричные и дискретные модели, а также их комбинации. Потоки данных могут моделироваться как отдельно, используя различные подходы, так и совместно, интегрируя несколько моделей для более комплексного анализа. Например, автор статьи [6] рассматривает дискретный подход к моделированию материальных и финансовых потоков. Цепочку закупок рассматривается как последо-

вательность этапов, связывая финансовые и материальные потоки через технологические коэффициенты  $k_i$ . Эти коэффициенты показывают эффективность преобразования ресурсов на каждом этапе (закупка сырья, транспортировка, переработка, реализация). Данный метод формализации был разработан автором для оценки эффективности производства, однако его можно адаптировать и для задачи выявления аномалий при закупках. Тогда этапами могут быть закупка сырья, транспортировка, переработка, реализации и тд. На основе статьи можно вывести формулу 1 и 2.

$$M_n = M_0 \times \prod_{i=1}^n k_i \quad (1)$$

$$d_{total} = \sum_{i=1}^n (C_i \times M_{i-1}) \quad (2)$$

где:

- $M_0$ : входной материальный поток (например, объёмы закупленного сырья);
- $M_n$ : выходной материальный поток (например, объем продукции после всех этапов);
- $k_i$ : технологический коэффициент этапа  $i$ , отражающий эффективность преобразования;
- $C_i$ : удельные затраты на этапе  $i$ ;
- $d_{total}$ : общие затраты на закупку и переработку.

Аномалии можно определять, сравнив фактические объёмы и затраты с расчётными. Отклонения расчётных коэффициентов  $k_i$  и  $C_i$  могут указывать на аномалии. Таким образом, можно определять на каком этапе и в каких именно потоках произошли аномалии.

Автор статьи [7] предлагает другой подход к моделированию дискретной модели, сосредоточенный на бухгалтерском учёте и процессе снабжения, используя дискретную динамическую модель. В основе модели лежит анализ изменений остатков на счетах и движения потоков за определённые временные интервалы. Это позволяет отслеживать, как меняются запасы и денежные средства в процессе снабжения с учётом временных задержек, которые неизбежны при логистике и финансовых операциях.

Для учета используется уравнение, описывающее динамику остатков и потоков по формуле 3, где  $S(t)$  – состояние счёта,  $U_{in}(t)$  – входящий поток,  $U_{out}(t)$  – исходящий поток,  $\Delta t$  – дискретный временной шаг.

$$S(t) = S(t - \Delta t) + U_{in}(t) - U_{out}(t) \quad (3)$$

Модель учитывает входящие и исходящие потоки, что даёт возможность прогнозировать и анализировать хозяйственные операции в динамике. Например, денежные поступления рассматриваются с учётом лимитов и задержек, связанных с логистическими процессами, а материальные запасы отражают текущие остатки с учётом поступлений и расходов.

Отклонения в показателях денежных и материальных потоков позволят выявлять аномалии в закупках. Эти отклонения могут служить сигналом о возможных нарушениях или ошибках и быть обработаны с помощью методов машинного обучения для автоматического обнаружения нетипичных ситуаций.

Другой подход основан на рассмотрении транспортной задачи как оптимизации распределения грузов между несколькими источниками и потребителями с разным количеством сторон [8]. Эта задача, закреплённая в научной литературе, применима

для управления прямыми поставками (от складов к клиентам) и обратными потоками (сбор грузов на центральные склады). Для моделирования используется дискретная экономико-математическую модель, которая учитывает потоки в целых единицах (например, паллеты или коробки), отражая реальные логистические операции. Данные для модели берутся из учетных систем предприятия, таких как объемы грузов и затраты на перевозку. Автор так же подчеркивает, что для таких дискретных моделей необходимо целочисленное программирование, так как округление результатов линейного программирования может нарушать ограничения (например, превышение доступного груза) и приводить к неоптимальным решениям. Целочисленные вычисления, несмотря на их сложность, обеспечивают точность и корректность в управлении логистическими потоками.

Далее рассматриваются матричные модели [9-12], которые часто служат основой для методов машинного обучения и позволяют анализировать взаимосвязи между различными показателями. Кроме того, с их помощью применяются методы классификации и сегментации, такие как ABC-анализ [13], а также другие аналитические подходы.

Рассмотрение матричных моделей позволяет перейти к более детальному анализу конкретных методик и их применения в управлении эффективностью предприятия. Так, в статье [9] представлена комплексная система моделей, объединяющая когнитивное картирование, фреймовое представление знаний, матрицы потребностей, рисков и семантическое моделирование. Автор подробно описывает фреймовое представление знаний как способ структурирования проблемных ситуаций и управленческих решений с помощью типовой схемы, включающей дескриптивные функции управления: целеполагание, учет, анализ, прогнозирование и управляющее воздействие. Каждый фрейм формализует связанный набор данных, делящихся на качественные (например, технологичность оборудования) и количественные (например, рентабельность продаж) переменные, и интегрируется с когнитивной картой предприятия. Это позволяет системно анализировать причинно-следственные зависимости и разрабатывать меры для устранения узких мест в операционной, финансовой, инвестиционной и интеллектуальной деятельности.

В статье также описаны две ключевые матрицы:

- 1) матрица потребностей и возможностей, которая сравнивает текущие ресурсы и задачи предприятия с доступными возможностями, выявляя дефициты и потенциалы;
- 2) матрица рисков, позволяющая ранжировать угрозы по критериям вероятности и воздействия.

Автор статьи [10] предлагает использовать матричные модели для формализации финансовых потоков, интегрируя их с нейронной сетью для анализа и прогнозирования. Основная матрица – матрица коэффициентов сбалансированности платежей, которая строится на основе данных о притоках и оттоках денежных средств из бухгалтерской системы. Она предназначена для оценки финансовой устойчивости и ликвидности предприятия через расчёт соотношений между денежными потоками за определённый период. Например, формула 4 выражает базовый коэффициент, показывающий общее соотношение всех поступлений к выплатам.

$$k_1 = \frac{CIF_t}{COF_t} \quad (4)$$

Здесь  $CIF_t$  – это общая сумма притоков денежных средств за период  $t$ , включая поступления от продаж, кредитов, инвестиций и других источников.  $COF_t$  – общая сумма оттоков за тот же период, охватывающая выплаты по операциям, инвестициям, погашению долгов и прочим расходам. Этот коэффициент помогает понять, достаточно ли поступлений для покрытия выплат, где значение больше 1 указывает на положительный баланс. Следующий коэффициент (формула 5) корректирует притоки, исключая финансовую деятельность.

$$k_2 = \frac{CIF_t - CIF_{ia}}{COF_t} \quad (5)$$

В этом уравнении  $CIF_{ia}$  представляет притоки, связанные с финансовой деятельностью, такие как получение кредитов или эмиссия акций. Формула 6 же исключает притоки от инвестиционной деятельности.

$$k_3 = \frac{CIF_t - CIF_{ia} - CIF_{fa}}{COF_t} \quad (6)$$

Переменная  $CIF_{fa}$  обозначает поступления от инвестиционной деятельности, например, продажа активов или возврат инвестиций. Этот коэффициент фокусируется на операционной эффективности, исключая внешние финансовые и инвестиционные влияния. Аналогично, формула 7 корректирует знаменатель, убирая оттоки по финансовой деятельности.

$$k_4 = \frac{CIF_t}{COF_t - COF_{ia}} \quad (7)$$

Здесь  $COF_{ia}$  – выплаты, связанные с финансовой деятельностью, такие как погашение кредитов или выплата дивидендов. Далее, формула 8 сочетает корректировки притоков и оттоков.

$$k_5 = \frac{CIF_t - CIF_{ia}}{COF_t - COF_{ia}} \quad (8)$$

Она оценивает баланс с учётом только операционных и инвестиционных потоков. Более сложный коэффициент  $k_6$  (формула 9) исключают инвестиционные потоки.

$$k_6 = \frac{CIF_t - CIF_{ia} - CIF_{fa}}{COF_t - COF_{ia}} \quad (9)$$

Далее, коэффициент  $k_7$  (формула 10) дополнительно корректирует знаменатель, убирая оттоки инвестиционной деятельности.

$$k_7 = \frac{CIF_t}{COF_t - COF_{ia} - COF_{fa}} \quad (10)$$

Переменная  $COF_{fa}$  – это выплаты по инвестиционной деятельности, например, покупка оборудования или недвижимости. Коэффициент, представленный формулой 11 учитывает исключение финансовых притоков.

$$k_8 = \frac{CIF_t - CIF_{ia}}{COF_t - COF_{ia} - COF_{fa}} \quad (11)$$

Наконец, формула 12 представляет наиболее очищенный показатель.

$$k_9 = \frac{CIF_t - CIF_{ia} - CIF_{fa}}{COF_t - COF_{ia} - COF_{fa}} \quad (12)$$

Этот коэффициент фокусируется на операционных потоках, полностью исключая влияние финансовой и инвестиционной деятельности, что позволяет оценить чистую эффективность основной деятельности. Эти данные извлекаются из бухгалтерских отчетов и ERP-систем, таких как 1С, где фиксируются все поступления и выплаты по счетам. Другая модель – матрица формирования потоков, представляющая транзакции между бухгалтерскими счетами. Её ячейки содержат суммы проводок, например, переводы с кассового счёта на счёт оплаты поставщикам, извлечённые из записей двойной бухгалтерии в тех же ERP-системах.

Матрицы служат для структурирования финансовых данных, выявления закономерностей и подготовки входных данных для нейронной сети. Они позволяют систематизировать притоки, оттоки и транзакции, чтобы анализировать баланс, эффективность и потенциальные отклонения. В нейронной сети счета выступают как нейроны, а транзакции – как синапсы с весами, равными суммам операций. Сеть принимает матричные данные, такие как значения коэффициентов из уравнений 4-12 или суммы транзакций, на входной. Скрытые слои обрабатывают эти данные, находя сложные зависимости, например, как конкретный платёж влияет на ликвидность. Выходной слой выдаёт прогнозы, такие как ожидаемые денежные потоки, или сигналы об аномалиях, например, необычно высоких выплатах. Обучение сети происходит на исторических данных из матриц, что позволяет выявлять закономерности и корректировать прогнозы в реальном времени с каждой новой транзакцией, отражённой в бухгалтерской системе. Этот подход можно адаптировать для материальных потоков, создав матрицы перемещений между складами или производственными единицами, где ячейки содержат объёмы товаров, и применив нейронную сеть для обнаружения аномалий, таких как неожиданные сбои в поставках.

Похожий подход для анализа эффективности денежных потоков предприятия, используя матрицу, предлагают и авторы статьи [11]. Матрица создается на основе данных из финансовых отчетов, таких как отчеты о движении денежных средств и бухгалтерский баланс. На главной диагонали матрицы размещаются ключевые показатели:

- денежные поступления (CIF);
- выплаты (COF);
- чистый денежный поток (NCF);
- остаток денежных средств (ДС);
- дебиторская задолженность (ДЗ);
- кредиторская задолженность (КЗ);
- оборотные активы (ОА).

В остальных ячейках располагаются коэффициенты, вычисленные как соотношения между этими показателями, например, отношение поступлений к выплатам или чистого потока к остатку средств. Такой подход позволяет систематизировать финансовую информацию для дальнейшего анализа.

Факторный анализ в данном контексте предполагает разложение эффективности денежных потоков на отдельные компоненты, называемые факторами. Фактор – это конкретный коэффициент, который характеризует определенный аспект финансовой деятельности, влияющий на общий денежный поток, например, способность предприятия пополнять денежные средства или эффективность управления задолженностью. В статье факторами являются ячейки матрицы, однако не все факторы автор использует для конечной модели оценки эффективности предприятия. После нескольких итераций факторного анализа, где каждый фактор оценивается по его вкладу, авторы приходят к итоговой модели. Эта модель представлена формулой 13.

$$K_{\text{эдп}} = \frac{NCF}{ДС} \times \frac{ДС}{CIF} \times \frac{CIF}{ДЗ} \times \frac{ДЗ}{КЗ} \times \frac{КЗ}{COF} \quad (13)$$

Данная модель отражает эффективность денежного потока, объединяя ключевые факторы, и помогает выявить сильные и слабые стороны финансовой политики предприятия на основе данных, таких как отчеты.

Следующий распространённый тип моделей потоков – графовый. Графовые модели широко применяются для формализации хозяйственной деятельности предприятий, позволяя наглядно представлять структуру и динамику различных потоков, а также анализировать взаимосвязи между участниками процессов [14-16]. Эти модели используются для выявления ключевых элементов системы, анализа маршрутов движения ресурсов и поиска потенциальных узких мест. В то же время, в ряде работ графовые модели адаптируются и для специфических задач, таких как контроль закупок и выявление аномалий. Например, интересный подход предлагает автор статьи [17], он применяет математическую модель на основе атрибутированных графов для представления данных о государственных закупках. Граф определяется уравнением 14, где вершины  $V$  соответствуют экономическим агентам (покупателям, таким как муниципалитеты, и победителям тендеров), а рёбра  $E$  отражают контрактные отношения между ними.

$$G = (V, E, X, Y) \tag{14}$$

Здесь описан граф и матрицы, которые хранят информацию о характеристиках агентов и их взаимодействиях. Матрица  $X$  хранит атрибуты вершин, указывающие тип агента (покупатель или победитель), а матрица  $Y$  содержит атрибуты рёбер, описывающие количество лотов в контракте (1, 2-5 или 6+ лотов). Рисунок 1 показывает пример такого графа, где видно, как делится граф  $G$  на подграфы.

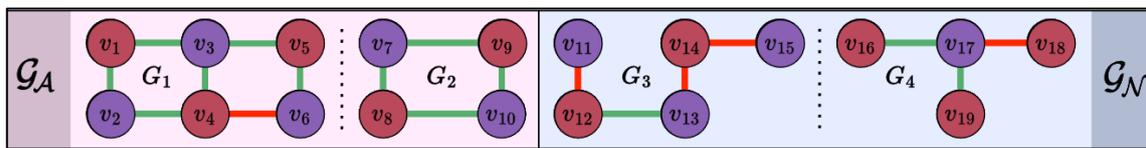


Рисунок 1 — Коллекция  $G$  графов, включающая подмножества аномальных ( $G_A$ ) и нормальных ( $G_N$ ) графов.

Для анализа автор применяет метод PANG (Pattern-Based Anomaly Detection in Graphs). Он ищет повторяющиеся кусочки графа (паттерны), которые могут указывать на мошенничество, например, контракты с одним предложением. PANG сначала находит паттерны с помощью алгоритмов gSpan или cgSpan, затем проверяет, насколько они различают нормальные и подозрительные случаи. Важность паттерна оценивается через дискриминационный счёт, выраженный формулой 15.

$$disc(P) = |F(P, G_A) - F(P, G_N)| \tag{15}$$

Здесь  $F$  – частота паттерна, а  $G_A$  и  $G_N$  – группы аномальных и нормальных графов. Рисунок 2 наглядно объясняет шаги PANG от поиска паттернов до преобразования графа в числа для анализа.

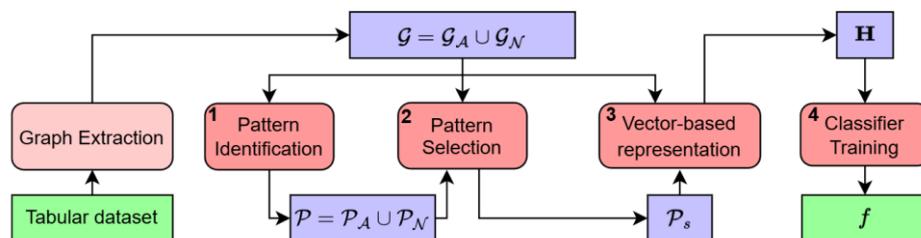


Рисунок 2 — Этапы обработки предлагаемой структуры PANG

Эти векторы, объединённые в матрицу  $H$ , подаются в классификатор  $C$ -SVM для определения аномальных графов, указывающих на потенциальное мошенничество, например, контракты с единственным предложением. PANG позволяет выявлять и интерпретировать подозрительные паттерны, такие как многократные контракты между одними и теми же агентами, что делает его эффективным для методов машинного обучения, включая SVM, Random Forest и другие, работающие с векторными данными. Это помогает регуляторам анализировать сложные данные закупок, выявлять аномалии и объяснять их причины.

Каждая из предложенных моделей формализации потоков позволяет анализировать отдельные виды аномалий, однако наибольшая эффективность достигается при комбинировании разных моделей. Например, статья [18] описывает несколько экономико-математических методов для прогнозирования закупок, каждый из которых опирается на определенные математические модели и данные.

Детерминированный метод основывается на матричной модели, которая учитывает потребность в товаре или услуге, нормы потребления и частоту закупок. Для этого метода необходимы исторические данные о нормах потребления и периодичности, которые можно получить из финансовых отчетов или инвентаризационных журналов учреждения. Стохастический метод использует динамическую модель, которая описывает изменение объемов закупок с учетом времени, скорости использования и ресурсных ограничений. Для этого нужны данные об объемах закупок, времени их использования и ресурсных ограничениях, доступные из операционных записей и истории закупок. Статистический метод применяет корреляционный анализ, изучая взаимосвязи между показателями, такими как стоимость закупок и расходы на обслуживание. Для этого требуются парные данные из финансовых и операционных отчетов учреждения.

Так же автор рассматривает классификацию закупок. По периодичности закупки делятся на:

- одноразовые, проводимые единожды без повторения;
- ежегодные, отличающиеся регулярностью и стабильностью потребностей.

По горизонту планирования выделяются месячные, квартальные, полугодовые и годовые закупки, а также краткосрочные (в пределах трех лет) и долгосрочные (свыше трех лет). Дополнительно закупки классифицируются как запланированные, включенные в план-график на основе потребностей, и внеплановые, возникающие по итогам конкурентных процедур. Эта структура позволяет сегментировать данные о закупках для дальнейшего анализа.

В итоге, классификация позволяет разделить данные на регулярные и нерегулярные потоки, где детерминированный метод подходит для стабильных закупок, а стохастический – для учета случайных событий в нерегулярных закупках. Корреляционный анализ помогает установить ожидаемые зависимости между показателями, и нарушения этих связей могут указывать на аномалии.

Более комплексный подход предлагают авторы статьи [19]. Основная идея заключается в использовании объяснимых индикаторов риска, которые анализируют данные о заказах, поставщиках и ценах, чтобы предоставить аудиторам интерпретируемые результаты. Система структурирует сложные данные о закупках, включая заказчиков, поставщиков, товары и суммы, и применяет к ним разные математические модели для обнаружения подозрительных закономерностей. Для этого данные преобразуются в графы или числовые наборы. Концепция работы индикаторов представлена формулой 16, которая показывает, как каждая операция получает

оценку риска от 0 до 1, где  $f$  – индикатор, а  $X_s$  – множество операций. Такой подход позволяет не только выявлять потенциальные нарушения, но и адаптировать анализ под особенности процессов конкретной организации.

$$f: X_s \rightarrow Y \in [0,1] \quad (16)$$

Для анализа данных авторы используют графовые и статистические методы. Например, индикатор необычного поставщика строится на основе графовой модели, где заказчики и поставщики – узлы, а транзакции – рёбра с весами, такими как количество заказов (рис. 3).

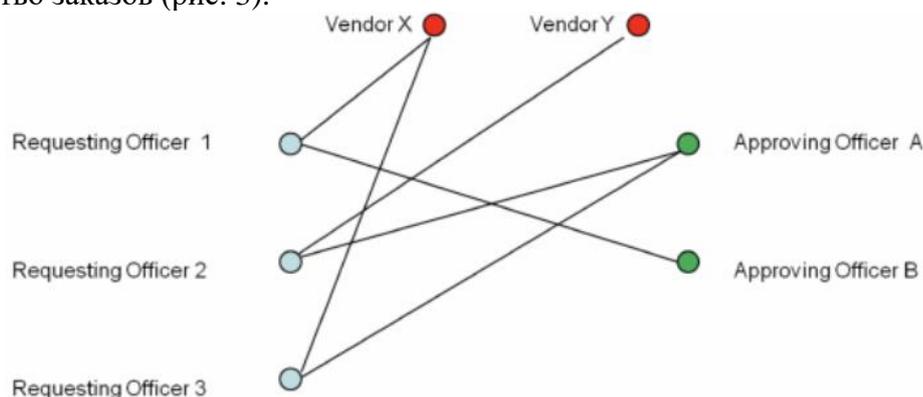


Рисунок 3 — Графическая модель, описывающая отношения между запрашивающим должностным лицом (RO), утверждающим должностным лицом (АО), поставщиком

Этот индикатор выявляет аномальные связи, такие как работа поставщика с малым числом заказчиков. Индикатор расходов на товар применяет обработку естественного языка и кластеризацию  $k$ -means для группировки схожих товаров, а затем оценивает аномалии цен. Другие индикаторы, такие как разделение заказа или анализ частоты цифр, используют анализ временных рядов или статистические тесты для поиска мошеннических паттернов. Эти модели демонстрируют гибкость подхода, позволяя анализировать различные аспекты данных.

Ключевым элементом системы является использование ансамблей индикаторов, которые комбинируют результаты нескольких моделей для повышения точности. Последовательные ансамбли обрабатывают данные поэтапно по формуле 17, где  $h(x)$  – предварительная обработка (например, группировка), а  $g(x)$  – анализ риска.

$$f_s(x) = g(h(x)) \quad (17)$$

Независимые ансамбли объединяют разные индикаторы по формуле 18, где  $g(x)$  и  $h(x)$  – оценки по количеству и стоимости операций, а  $f_m$  – их комбинация.

$$f_l(x) = f_m(g(x), h(x)) \quad (18)$$

Для оценки участников, таких как заказчики, используется формула 19, где  $f_A$  агрегирует риски по всем операциям  $x_i$  участника, а  $f_D$  учитывает их характеристики.

$$f_s(x) = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) = f_A(f_D(x_i, f(x_i))) \quad (19)$$

Такой подход обеспечивает комплексный анализ, устойчивый к шуму в данных. Важным преимуществом является объяснимость – система предоставляет понятные обоснования аномалий, облегчая расследование.

Все предыдущие примеры описывали методы формализации финансовых и материальных потоков. Для полноты рассмотрим, как формализуются информационные потоки. Главное в анализе информационных потоков – выявление их ключевых

характеристик, таких как интенсивность, корреляции и долгосрочные зависимости, чтобы понять их поведение и предсказуемость. В статье [20] для этого используется модель фрактального броуновского движения (ФБД), относящаяся к классу стохастических непрерывных моделей. Она позволяет описывать сложные закономерности потоков, которые не охватываются матричными, графовыми, векторными или дискретными моделями. Модель строят на основе анализа временных рядов, а её точность проверяют, сравнивая с реальными данными, что помогает классифицировать потоки и прогнозировать их свойства.

## Выводы

Формализация материальных, финансовых и информационных потоков выступает важнейшим инструментом для повышения прозрачности, управляемости и эффективности деятельности предприятия. Современные методы формализации включают дискретные, графовые и матричные модели, каждая из которых обладает своими преимуществами и применяется для решения различных задач.

Дискретные модели удобны для анализа поэтапных процессов и оценки эффективности на каждом этапе. Графовые – для выявления аномалий в связях между участниками и анализа сложных сетевых структур, в том числе в логистике и закупках. Матричные модели позволяют структурировать большие объёмы данных, выявлять взаимосвязи между показателями, интегрировать методы машинного обучения и проводить комплексный анализ потоков.

Особое значение приобретает возможность интеграции различных моделей. В ряде случаев графовые модели могут быть преобразованы в матричные или векторные, как это показано в статье [17], либо дополняться ими для более глубокого и многогранного анализа. Такой подход позволяет использовать сильные стороны каждого метода: графовые модели обеспечивают наглядное представление сложных сетевых структур и выявление аномалий во взаимосвязях между участниками, а матричные и векторные – удобны для последующей обработки с помощью современных алгоритмов анализа данных и машинного обучения. В результате достигается более полное и гибкое представление о структуре и динамике потоков, расширяются аналитические возможности и повышается адаптивность инструментов под специфику конкретных задач.

Комбинирование различных моделей, а также применение ансамблей индикаторов, способствует повышению точности обнаружения аномалий и объяснимости результатов, что особенно важно для принятия управленческих решений и проведения аудита. В современных условиях, когда предприятия сталкиваются с возрастающей сложностью бизнес-процессов и необходимостью быстрой адаптации к изменениям, такие аналитические подходы становятся неотъемлемой частью эффективного управления.

Таким образом, развитие методов формализации потоков создает основу для построения гибких и эффективных аналитических систем управления, отвечающих современным требованиям бизнеса. Это позволяет не только своевременно выявлять и устранять аномалии, но и оптимизировать процессы, прогнозировать риски и поддерживать стратегическое развитие предприятия в условиях высокой неопределённости и конкуренции.

## Список литературы

1. Боровиков А. И., Криводубский О. А. Взаимодействие основных потоков предприятия. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. Т. 35. № 4. С. 76-87.
2. Дорохина Г. В. Требования к информационной технологии цифрового сбора, обработки и анализа данных. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2020. № 4 (19). С. 4-9.
3. Дмитриук Т. Г., Зори С. А. Анализ структуры производственной деятельности предприятия как объекта управления. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2020. № 1 (16). С. 37-53.

4. Смирнова Е. А., Зуев А. В. Модели и методы управления цепями поставок. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. Серия: Экономика. 2022. №. 2. С. 95-100.
5. Пономарев А. А. Методические подходы к оценке эффективности организационно-экономического механизма управления системой государственных закупок. *Инновации и инвестиции*. 2022. №. 12. С. 109-113.
6. Вострокнутов А. Е., Фешина Е. В., Мурлин А. Г. Усовершенствованные математические модели описания производственных процессов и расчета их экономической эффективности в цепочке создания кондитерских изделий. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2022. №. 183. С. 331-346.
7. Абдурахимов А. А. Бухгалтерский учет хозяйственных процессов как объект математического моделирования. *Endless light in science*. 2022. №. 3. С. 39-43.
8. Быкова Г. П. Особенности экономико-математического моделирования некоторых логистических операций. *Прогрессивные технологии в транспортных системах*. 2021. С. 127-132.
9. Яковлева Елена Анатольевна, Гаджиев Магомедрасул Магомедович, Шарич Эрмин Эмирович, Яковлева Дарья Дмитриевна Модель анализа материальных и нематериальных факторов эффективности в системе стратегического планирования на основе совместного причинно-следственного картирования и фреймового представления знаний. *ЭПП*. 2021. №1.
10. Матюш И. В. Применение нейронных сетей при мониторинге и прогнозировании финансовых потоков. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки*. 2024. №. 2. С. 16-20.
11. Кричевец Е. А., Кудревич В. В. Разработка модели факторного анализа эффективности денежного потока предприятия. *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. Серия: Экономика и управление. 2020. №. 3. С. 32-41.
12. Наумов И. В. Сценарное моделирование процессов движения финансовых потоков между институциональными секторами в региональной территориальной системе. *Финансы: теория и практика*. 2018. Т. 22. №. 1. С. 32-49.
13. Токмянина А. Д., Долженкова Е. В. Методические аспекты управления материальными потоками промышленного предприятия. *Молодежь и наука* Том 1 Нижний Тагил, 2024. С. 208-211.
14. Меркулова Ю. В. *Фундаментальные исследования*. Учредители: ООО "Издательский дом" Академия естествознания". №. 8. С. 75-88.
15. Бежанова Е. Х., Темирова Л. Г., Шагаошев Р. В. Программная реализация логистической задачи товародвижения. *Государственное и муниципальное управление. Ученые записки*. 2021. №. 2. С. 90-95.
16. Асанов А. З., Мышкина И. Ю., Грудцына Л. Ю. Применение графовых моделей в проектном управлении. *Онтология проектирования*. 2023. Т. 13. №. 2 (48). С. 232-242.
17. Potin L. et al. Pattern mining for anomaly detection in graphs: Application to fraud in public procurement. *Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. С. 69-87.
18. Иванников К. А. Возможности применения экономико-математического инструментария в анализе закупки товаров, работ, услуг. *Современная экономика: проблемы и решения*. 2022. Т. 12. С. 68-79.
19. Westerski A. et al. Explainable anomaly detection for procurement fraud identification—lessons from practical deployments. *International Transactions in Operational Research*. 2021. Т. 28. №. 6. С. 3276-3302.
20. Черниговский А. В., Кривов М. В., Истомин А. Л. Исследование и выбор математической модели сетевого трафика. *Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Приборостроение»*. 2020. №. 3 (132). С. 84-99.

## References

1. Borovikov A. I., Krivodubsky O. A. Interaction of the main flows of the enterprise // *Problems of artificial intelligence*. - 2024. - Vol. 35. - No. 4. - P. 76-87.
2. Dorokhina G. V. Requirements for information technology of digital data collection, processing and analysis // *Problems of artificial intelligence*. - 2020. - No. 4 (19). - P. 4-9.
3. Dmitryuk T. G., Zori S. A. Analysis of the structure of production activities of the enterprise as a management object // *Problems of artificial intelligence*. - 2020. - No. 1 (16). - P. 37-53.
4. Smirnova E. A., Zuev A. V. Models and methods of supply chain management // *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Economy*. – 2022. – No. 2. – P. 95-100.
5. Ponomarev A. A. Methodological Approaches To Assessing The Efficiency Of The Organizational And Economic Mechanism Of Management Of The Public Procurement System // *Innovations and Investments*. – 2022. – No. 12. – P. 109-113.
6. Vostroknutov A. E., Feshina E. V., Murlin A. G. Improved Mathematical Models For Description Of Production Processes And Calculation Of Their Economic Efficiency In The Confectionery Product Production Chain // *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. - 2022. - No. 183. - P. 331-346.
7. Abdurakhimov A. A. Accounting Of Business Processes As An Object Of Mathematical Modeling // *Endless light in science*. - 2022. - No. 3. - P. 39-43.

8. Bykova G. P. Features of economic and mathematical modeling of some logistics operations // Progressive technologies in transport systems. - 2021. - P. 127-132.
9. Yakovleva Elena Anatolyevna, Gadzhiev Magomedrasul Magomedovich, Sharich Ermin Emirovich, Yakovleva Daria Dmitrievna Model For Analysis Of Material And Intangible Efficiency Factors In The Strategic Planning System Based On Joint Cause-And-Effect Mapping And Frame Representation Of Knowledge // EPP. 2021. No. 1.
10. Matyush I. V. Application of neural networks in monitoring and forecasting financial flows // Bulletin of Polotsk State University. Series D. Economic and legal sciences. - 2024. - No. 2. - P. 16-20.
11. Krichevets E. A., Kudrevich V. V. Development of a model of factor analysis of the efficiency of the enterprise cash flow // Vector of Science of Togliatti State University. Series: Economics and Management. - 2020. - No. 3. - P. 32-41.
12. Naumov I. V. Scenario modeling of the processes of movement of financial flows between institutional sectors in the regional territorial system // Finance: theory and practice. - 2018. - Vol. 22. - No. 1. - P. 32-49.
13. Tokmyanina A. D., Dolzhenkova E. V. Methodological aspects of managing material flows of an industrial enterprise // Youth and Science. - Volume 1. - Nizhny Tagil, 2024. - 2024. - P. 208-211.
14. MERKULOVA Yu. V. FUNDAMENTAL RESEARCH // FUNDAMENTAL RESEARCH Founders: OOO "Publishing House" Academy of Natural Sciences". - No. 8. - P. 75-88.
15. Bezhanova E. Kh., Temirova L. G., Shkhagoshev R. V. Software implementation of the logistics problem of goods movement // State and municipal administration. Scientific notes. - 2021. - No. 2. - P. 90-95.
16. Asanov A. Z., Myshkina I. Yu., Grudtsyna L. Yu. Application of graph models in project management // Ontology of design. - 2023. - Vol. 13. - No. 2 (48). - P. 232-242.
17. Potin L. et al. Pattern mining for anomaly detection in graphs: Application to fraud in public procurement // Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. - Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. - P. 69-87.
18. Ivannikov K. A. Possibilities of applying economic and mathematical tools in the analysis of the procurement of goods, works, services // Modern Economy: Problems and Solutions. - 2022. - Vol. 12. - P. 68-79.
19. Westerski A. et al. Explainable anomaly detection for procurement fraud identification—lessons from practical deployments // International Transactions in Operational Research. - 2021. - Vol. 28. - No. 6. - P. 3276-3302.
20. Chernigovsky A. V., Krivov M. V., Istomin A. L. Research and selection of a mathematical model of network traffic // Bulletin of the Moscow State Technical University named after NE Bauman. Series "Instrument Engineering". - 2020. - No. 3 (132). - P. 84-99.

## RESUME

*A. I. Borovikov, O. A. Krivodubsky*

*Mathematical modeling and flow formalization for analysis, optimization and anomaly detection in logistics, finance and procurement*

The formalization of material, financial, and information flows is essential for analyzing heterogeneous data, optimizing processes, and detecting anomalies in enterprise operations. These flows are complex and highly variable, often containing redundant information, which complicates their interpretation and requires advanced mathematical methods to ensure reliable and effective analysis.

The paper provides a detailed review of discrete, graph-based, and matrix models, as well as their possible combinations for comprehensive flow analysis. Special attention is given to the integration of different approaches and the use of machine learning methods, which enhance the quality of flow analysis in logistics, finance, and procurement, and allow models to be adapted to specific tasks.

The analysis demonstrates that flow formalization enables the structuring of large volumes of data, identification of key parameters, timely detection of anomalies, and optimization of business processes. The use of modern analytical tools and the combination of various models significantly improve the accuracy, reliability, and explainability of results, which is crucial for managerial decision-making.

The article emphasizes that the further development of methods for formalizing material, financial, and information flows is directly linked to the creation of effective management and monitoring systems. This is particularly important for modern enterprises striving for transparency, sustainable development, and the implementation of innovative solutions in an increasingly complex business environment.

## РЕЗЮМЕ

*А. И. Боровиков, О. А. Криводубский*

*Математическое моделирование и формализация потоков для анализа, оптимизации и выявления аномалий в логистике, финансах и закупках*

Формализация материальных, финансовых и информационных потоков необходима для анализа разнородных данных, оптимизации процессов и выявления аномалий в деятельности предприятий. В современных организациях такие потоки характеризуются высокой сложностью, вариативностью и избыточностью информации, что затрудняет их интерпретацию и требует применения продвинутых математических методов для обеспечения достоверности и эффективности анализа.

В работе подробно рассмотрены дискретные, графовые и матричные модели, а также их возможные комбинации для комплексного анализа потоков. Особое внимание уделено интеграции различных подходов и использованию методов машинного обучения, что позволяет повысить качество анализа потоков в таких сферах, как логистика, финансы и закупки, а также адаптировать модели под специфику конкретных задач.

Проведённый анализ показывает, что формализация потоков способствует структурированию больших объёмов данных, выделению ключевых параметров, своевременному обнаружению аномалий и оптимизации бизнес-процессов. Применение современных аналитических инструментов и совмещение различных моделей значительно повышает точность, надёжность и объяснимость получаемых результатов, что важно для принятия управленческих решений.

В статье подчёркивается, что дальнейшее развитие методов формализации материальных, финансовых и информационных потоков напрямую связано с созданием эффективных систем управления и мониторинга. Это становится особенно актуальным для современных предприятий, стремящихся к прозрачности, устойчивому развитию и внедрению инновационных решений в условиях возрастающей сложности бизнес-среды.

**Боровиков Алексей Иванович** – аспирант «Автоматизированные системы управления» Донецкого национального технического университета, г. Донецк, тел +7(949) 321-2972, [aleksey.borovikov.00@mail.ru](mailto:aleksey.borovikov.00@mail.ru). *Область научных интересов:* автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, интеллектуальные методы управления, машинное обучение, методы и системы искусственного интеллекта.

**Криводубский Олег Александрович** – д.т.н., с.н.с., Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк. *Область научных интересов:* автоматизированные системы управления, эл. почта [oleg.krivodybski.dn@gmail.ru](mailto:oleg.krivodybski.dn@gmail.ru), адрес:, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон: +7949 54 83 89.

Статья поступила в редакцию 16.04.2024

УДК 621.771.07:004.94

DOI 10.24412/2413-7383- 2025-2-37-44-58

В. С. Солод

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

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АРМАТУРНОГО ПРОКАТА

V. S. Solod

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

## PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL FOR DEVELOPING AN EXPERT SYSTEM FOR ACCELERATED COOLING OF REINFORCEMENT PRODUCTS

Целью исследования является разработка экспертной системы ускоренного охлаждения арматурного проката в виде искусственной нейронной сети с применением нового метода машинного обучения: использования фундаментального знания для решения практических задач. В качестве фундаментального знания используется физико-математическая модель ускоренного многостадийного охлаждения арматурной стали в потоке прокатного стана. 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 режимов прокатки.

**Ключевые слова:** закалка, арматурные профили, термоупрочнение, физико-математическая модель, алгоритм, термоустановки

The ultimate goal of the study is to develop an expert system for accelerated cooling of reinforcing steel in the form of an artificial neural network (ANN), using a new machine learning method: using fundamental knowledge to solve practical problems. A physical and mathematical model of accelerated multi-stage cooling of reinforcing steel in a rolling mill flow is used as fundamental knowledge.

This model can be used both as a tool for creating a training data set for training ANN, and for optimizing the technology for cooling profiles from various steel grades with possible changes in rolling modes.

**Key words:** hardening, reinforcement bars, thermal strengthening, physical and mathematical model, algorithm, thermal facility

## Введение

Производство арматуры – это непрерывный процесс с большими объемами. После прокатки заготовки в нужную форму профиля она проходит контролируемый процесс охлаждения для достижения требуемой прочности и других механических свойств. Для этого предназначены автоматизированные системы закалки.

Цель заключается в закалке непрерывной длины арматуры на выходе из прокатного стана. Основные особенности и характеристики автоматизированных системы закалки арматуры состоят в следующем:

- непрерывная работа: эти системы интегрируются непосредственно в линию прокатного стана. Арматура непрерывно проходит через зону закалки.
- высокоскоростная работа: скорость закалки соответствует скорости производства прокатного стана. Закалка осуществляется водой: Системы подачи воды: обычно используют ряды распылительных форсунок для равномерного охлаждения арматуры.
- управление водными ресурсами: эффективные системы включают системы очистки и рециркуляции воды для минимизации потребления воды и воздействия на окружающую среду.
- управляемое охлаждение: системы часто используют несколько зон охлаждения для достижения определенной скорости охлаждения.
- контроль температуры: пирометры контролируют температуру арматуры, чтобы гарантировать постоянство процесса.
- управление с обратной связью: расход, давление воды и схемы включения зон охлаждения часто динамически регулируются на основе показаний температуры и скорости прокатки.
- автоматизированное управление процессом: Управление ПЛК (программируемый логический контроллер): ПЛК управляет временем, потоком, температурой и другими параметрами процесса.
- НМІ (человеко-машинный интерфейс): операторы используют НМІ для контроля процесса, внесения корректировок и устранения неполадок.
- регистрация данных: критически важные данные (например, температурные профили, скорости охлаждения) регистрируются для контроля качества и оптимизации процесса.
- адаптивность: Система должна быть адаптирована к различным диаметрам арматуры и иметь возможность обрабатывать стали разного химического состава.
- отделка поверхности: процесс закалки помогает избегать нежелательных поверхностных дефектов, таких как образование окалины.

К преимуществам автоматизированных систем закалки арматуры относят:

- постоянство свойства материала: достигается более постоянная прочность, пластичность и другие механические свойства по всей длине стержня;
- улучшенное качество продукции: приводит к более высокому качеству арматуры, которая соответствует или превосходит отраслевые стандарты;
- более высокая производительность: обеспечивает более высокие скорости прокатки без ущерба для качества продукции;
- сокращение отходов материалов: более точный контроль процесса снижает количество производимого материала, не соответствующего спецификации;
- энергоэффективность: некоторые передовые системы оптимизируют использование воды, что приводит к снижению эксплуатационных расходов.

Среди производителей арматуры, использующих автоматизированные системы заковки крупные сталелитейные заводы: компании, которые производят широкий сортамент стальной продукции, включая арматуру, специализированные производители арматуры. Такие компании, как: ArcelorMittal, Nippon Steel, Baosteel, Nucor, Posco, используют эту технологию или ее запатентованную версию.

Поставщики оборудования для прокатных станов: компании, поставляющие прокатные станы, часто интегрируют системы заковки как часть своего общего решения. Примерами могут служить: Primetals Technologies, Danieli, SMS Group и Siemens, MWE. Некоторые компании специализируются на проектировании и производстве систем заковки для различных применений, включая арматуру (Danieli, Thermex). Основными поставщиками арматурного проката на российский рынок являются: СЗАО «ММЗ» (Молдавия), РУП «БМЗ» (Беларусь), ПАО «Северсталь», ОАО «ЗСМК», ОАО «ММК», ОАО «Амурметалл», «Мечел», «ОЭМК», «РЭМЗ» и др.

Интеграция автоматизированной системы заковки с существующим прокатным станом может быть сложной. Внедрение и настройка передовых систем управления для непрерывного производства требуют квалифицированных инженеров. Подробно исследовались процессы ускоренного охлаждения проката в линии сортовых станов Магнитогорского металлургического комбината [1], Донецкого металлургического завода [2-4], мелкосортно-проволочном стане 320/150 Молдавского металлургического завода [5], мелкосортном стане 250 завода «Криворожсталь» [6], сортовых станах Западно-Сибирского металлургического комбината [7-10] и др. Решению задачи построения математической модели процесса термического упрочнения, в основном – построению температурного поля в сечении горячекатаной арматурной стали, посвящена работа [11]. Для всех указанных исследований характерно использование усредненных характеристик охлаждающей воды по длине камеры. Кроме того, отсутствует взаимосвязь температурно-скоростных факторов и структурообразования и влияние структурных компонент на механические свойства конечного продукта.

## Теоретические основы

В общем случае установка термоупрочнения арматуры состоит, как показано на рис. 1, из набора  $n$  камер охлаждения, длиной  $L_{ki}$ , установленных за чистой прокатной клетью на расстоянии  $L_{e0}$ , на расстоянии друг от друга  $L_{ei}$ , для обеспечения выравнивания температуры по сечению проката до последующей стадии охлаждения. Охлаждение обеспечивается водой, подаваемой через форсунки на входе в каждую камеру.

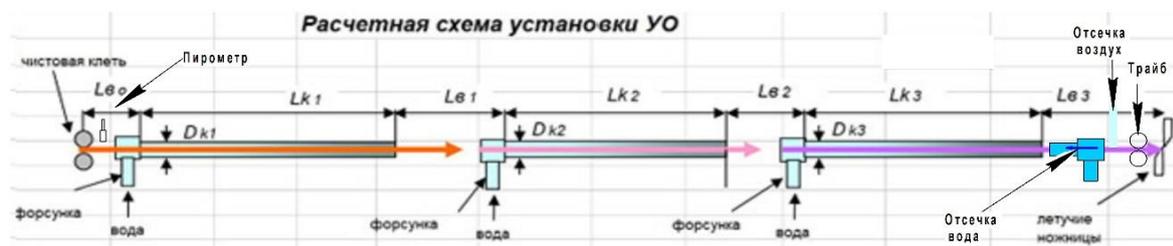


Рисунок 1 - Схема установки ускоренного охлаждения

Расход воды обеспечивается давлением, устанавливаемым оператором в ручном режиме в каждой включенной секции. Такой процесс называют многостадийным ускоренным прямоточным охлаждением водой сортового проката, комбинированным с выравниванием температуры по сечению на воздухе.

При установке избыточного давления в камере или включении большего количества камер происходит переупрочнение металла, при недостаточном давлении механические свойства получают ниже обусловленных стандартами.

Разработанная математическая модель построения температурного поля по сечению профиля при многостадийном ускоренном охлаждении водой сортового проката, комбинированного с выравниванием температуры по сечению на воздухе описана в работе [13]. Модель основана на применении численного решения дифференциального уравнения теплопроводности (1) при прокатке круглых (арматурных) профилей при заданных условиях внешнего теплообмена.

$$C(t) \cdot \rho(t) \frac{dt}{d\tau} = \frac{d}{dr} \left( \lambda(t) \frac{dt}{dr} \right) + \frac{m}{r} \lambda(t) \frac{dt}{dr} + q_v \quad (1)$$

с начальными условиями  $\tau = 0$ ;  $t_n = f(r)$ , методом «прогонки» для определения распределения температуры по сечению цилиндрического бесконечного стержня [14]. Необходимые для расчета зависимости теплофизических коэффициентов углеродистой стали, в частности – плотности, удельной теплоемкости, энтальпии, коэффициента теплопроводности от температуры охлаждения получены статистической обработкой табличных данных [15] с высокой степенью точности на всем интервале температур охлаждения.

Основной проблемой, возникающей при построении модели формирования механических свойств проката при термоупрочнении является большое количество факторов, влияющих на конечные значения свойств.

Типичная диаграмма изотермического распада аустенита [16] для доэвтектоидных сталей имеет вид, показанный на рис. 2. Простейшим подходом является построение статистической (регрессионной модели) для конкретных условий обработки. Однако этот подход возможен только при построении модели существующего процесса и не может быть использован для целей прогнозирования при выходе значений параметров за пределы, использованные при получении экспериментальных данных для создания модели.

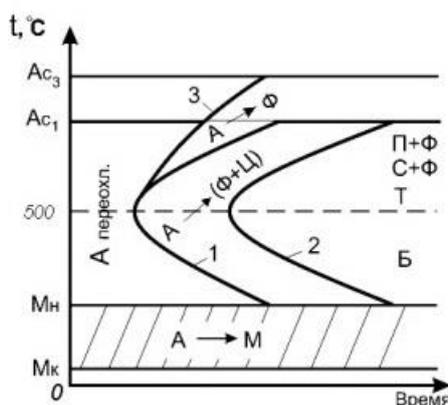


Рисунок 2 - Диаграмма изотермического распада аустенита для доэвтектоидных сталей:

1 – линия начала распада аустенита, 2 – линия конца распада аустенита, 3 – линия выделения избыточного феррита (цементита)

Преодолеть это ограничение можно при построении модели, основанной на уравнениях, описывающих физическую сущность происходящих процессов.

Предложен следующий вариант сочетания физических и эмпирических (статистических) компонентов модели.

1. На основании данных решения уравнения (1) строятся кривые изменения температуры во времени для конечного числа элементарных слоев поперечного сечения профиля.
2. С использованием модели изотермической С-диаграммы и принципа аддитивности анализируется процесс превращения при заданных переменных условиях охлаждения в каждом слое.
3. На основании данных о долевом фазовом составе структуре в каждом слое производится определение интегральных долевых характеристик компонент структуры
4. Исходя из предположения о механических свойствах каждой структурной составляющей, производится вычисление интегральных механических характеристик всего поперечного сечения профиля.

Разработана адаптируемая термодинамическая модель изотермического распада аустенита углеродистых и низколегированных сталей, позволяющая прогнозировать структурный состав охлажденного проката из углеродистых и низколегированных сталей. Остановимся кратко на характеристике этой модели.

Скорость образования новой фазы  $R$  при изотермическом распаде аустенита определили в виде произведения двух факторов  $f_T$  и  $f_S$ , первый из которых зависит от температуры и некоторых параметров, определяемых на основании экспериментальных данных, а второй – зависит от соотношения объемных долей фаз, но не зависит от температуры:

$$R = \frac{dS}{d\tau} = f_T(T, T_0, T_c, \lambda, \mu) f_S(S), \quad (2)$$

где  $S$  – объемная доля новой фазы;  $\tau$  – время;  $T$  – температура;  $T_0$  – температура минимальной устойчивости исходной фазы;  $T_c$  – критическая температура начала превращения;  $\lambda, \mu$  – эмпирически определяемые параметры.

Факторы  $f_T$  и  $f_S$  далее будем именовать соответственно термодинамическим и конфигурационным, что вполне отражает их содержание.

Для построения кривых изотермического распада вид зависимости конфигурационного фактора  $f_S$ , входящего в уравнение (2), от объемной доли  $S$  не имеет принципиального значения. В частности, в качестве интеграла конфигурационного фактора можно использовать уравнение М. Авраами. Исходя из представлений о термически активируемом росте [17-19], термодинамический фактор получен в виде:

$$f_T = \left\{ A \frac{kT}{h} \exp \left[ \frac{1}{T} \left( T_0 - \lambda T_c \coth \left( \lambda \frac{T_c - T_0}{T_0} \right) \right) \right] \cdot \left[ \exp \left( \lambda \frac{T_c - T}{T} \right) - \exp \left( -\lambda \frac{T_c - T}{T} \right) \right] \right\}^\mu, \quad (3)$$

где  $A$  – микроскопическая мобильность межфазной границы;  $k$  – постоянная Больцмана;  $h$  – постоянная Планка.

Если из эксперимента известно время, соответствующее минимальной устойчивости исходной фазы  $\tau_0$ , и соответствующая температура  $T_0$ , то координаты кривой изотермического распада определяются как

$$\tau(T) = \tau_0 \frac{f_T(T_0, T_0, T_c, \lambda, \mu)}{f_T(T, T_0, T_c, \lambda, \mu)}. \quad (4)$$

В результате анализа ряда С-диаграмм для углеродистых и низколегированных сталей [20] получены уравнения, позволившие построить температурно-временную модель трансформации аустенита. На рис. 3 приведены расчетные С-диаграммы для некоторых марок сталей, используемых при термоупрочнении арматурных профилей. Определяющим фактором для построения является химический состав стали по трем элементам С, Mn, Si. Для определения переменных теплофизических характеристик охлаждающей среды по длине трубы, таких как температура насыщения, плотность, динамическая вязкость, теплоемкость и теплопроводность воды необходимо знать изменение её гидродинамических параметров. Эти параметры зависят от конструкции охлаждающей трубы и начальных условий охлаждения.

С-диаграмма Ст3пс

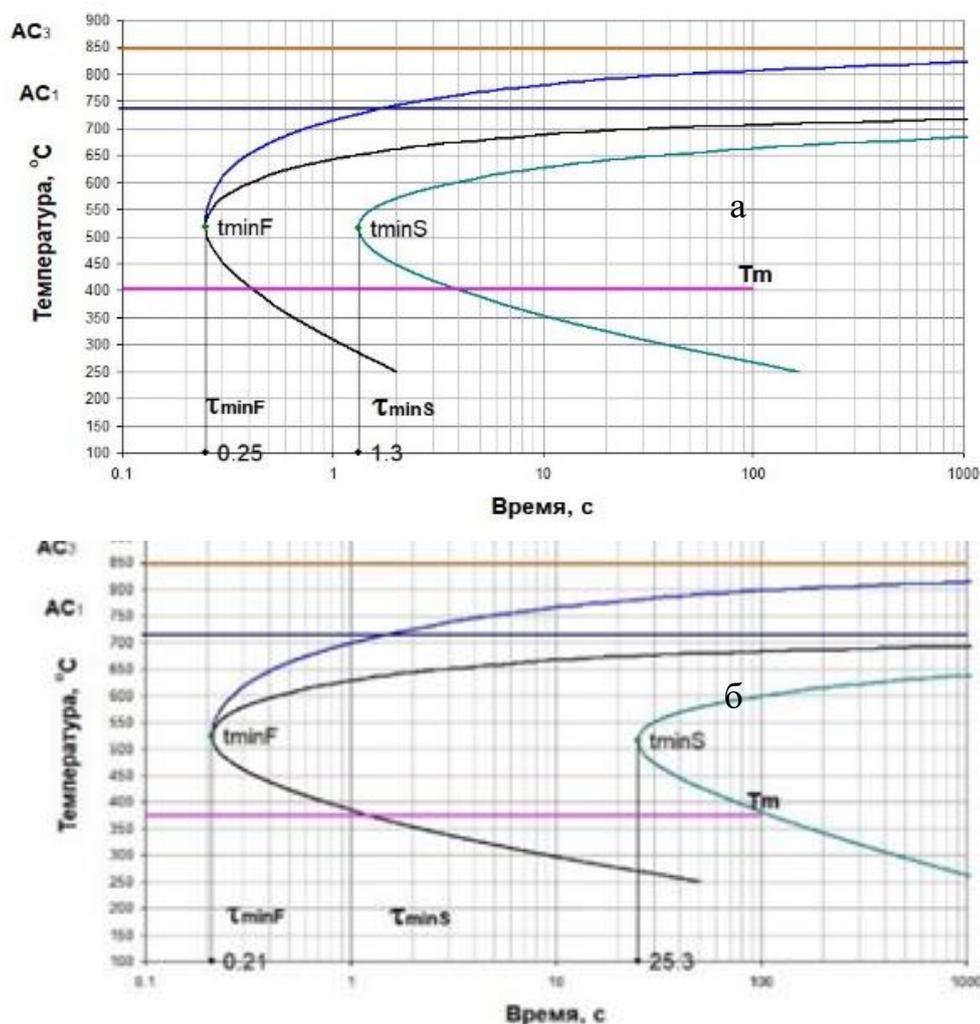


Рисунок 3 - Расчетные С-диаграммы сталей: а- Ст3пс, б- 25Г2С:

$AC_1, AC_3$  – критические температуры превращения доэвтектоидных сталей;  $(\tau_{minF}, t_{minF}), (\tau_{minS}, t_{minS})$  – координаты точек наименьшей устойчивости феррита и перлита соответственно;  $T_m$  – температура начала мартенситного превращения.

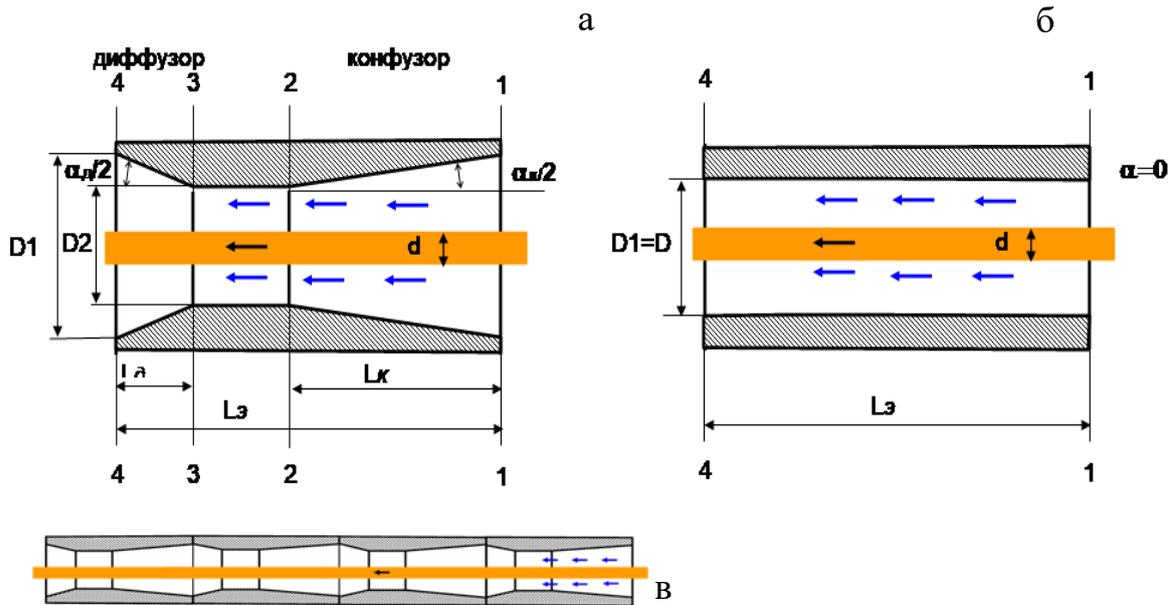


Рисунок 4 - Схемы конструкции элементов охлаждающих труб, применяемых на практике: а- КД; б- гладкая; в- схема сборки элементов КД в камере.

Известны два варианта конструкции – гладкая (постоянного диаметра) и конфузорно-диффузорная (КД), состоящая из элементов-вставок. На рис.4 приведены указанные конструкции.

Уравнение Бернулли (4) в избыточных давлениях, записанное для входного и выходного сечения трубы [21] имеет вид:

$$P_{\text{вх}} + \rho \frac{V_{\text{вх}}^2}{2} = P_{\text{вых}} + \rho \frac{V_{\text{вых}}^2}{2} + P_{\text{пот}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}$  – давление воды на входе и выходе камеры, Па;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{вх}}=V_{\text{вых}}=V_{\text{в}}$  – скорость воды на входе и выходе камеры, м/с;  $P_{\text{пот}}$  – потери давления за счет трения и местного сопротивления (в случае КД камеры), Па.

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{фор}}(1 - K_{\text{фор}})$$

$$P_{\text{пот}} = K_{\text{сопр}} \rho \frac{V_{\text{в}}^2}{2}. \quad (5)$$

$$K_{\text{сопр}} = N_{\text{эл}}(K_{\text{кон}} + K_{\text{диф}} + K_{\text{ц}}),$$

$$\text{где } K_{\text{диф}} = \frac{\mu_{\text{тр}}}{8 \sin(\frac{\alpha_{\text{д}}}{2})} \left[ 1 - \frac{1}{D_{\text{д}}^4} \right] + \sin \alpha_{\text{д}} \left[ 1 - \frac{1}{D_{\text{д}}^2} \right]^2,$$

$$K_{\text{ц}} = \mu_{\text{тр}} \frac{L_{\text{ц}}}{D_{\text{ц}}}, K_{\text{кон}} = \frac{\mu_{\text{тр}}}{8 \sin(\frac{\alpha_{\text{к}}}{2})} \left[ 1 - \frac{1}{D_{\text{к}}^2} \right],$$

$D_{\text{д}}, D_{\text{к}}, D_{\text{ц}}$  – средние диаметры живого сечения на соответствующих участках элемента,

$K_{\text{диф}}, K_{\text{кон}}, K_{\text{ц}}$  – коэффициенты сопротивления на участках диффузора, конфузора; и цилиндра соответственно. Остальные обозначения показаны ниже в табл.1

Таблица 1- Гидродинамические параметры КД и гладкой камеры

Входные данные				
Параметр	об.	ед. изм.	Знач.	Знач.
Максимальный диаметр вставки	D1	мм	44	38
Минимальный диаметр вставки	D2	мм	33	38
Диаметр арматуры	do	мм	16	16
Длина диффузора	Lд	мм	9	9
Длина конфузора	Lк	мм	71	71
Длина элемента	Lэ	мм	94	94
Число вставок	N		19	19
Давление на форсунке	Pф	ат	10	10
Кoeff. гидравлического трения	$\mu_{тр}$		0.028	0.028
Кoeff. потерь на форсунке	Kф	-	0.5	0.5
Выходные данные				
Давление на выходе из камеры	Pвых	ат	1.00	1.00
Угол сужения (конфузор)	$\alpha_k / 2$	град	4.4	0.0
Угол расширения (диффузор)	$\alpha_d / 2$	град	31.4	0.0
Общая длина трубы	$N \cdot Lэ$	м	1.79	1.79
Минимальная скорость воды	Vв_min	м/с	10.0	21.1
Максимальная скорость воды	Vв_max	м/с	20.2	21.1
Средняя скорость воды	Vв_ср	м/с	14.1	21.1
Расход воды	Q	м3/ч	47.7	70.9

Приведенные выше зависимости позволяют определить гидродинамические параметры воды в любом сечении трубы охлаждения. В табл.1 показаны результаты расчета интегральных характеристик режима, а на рис.5 - графики распределения скорости и давления воды по длине камеры охлаждения при равных средних диаметрах живого сечения трубы.

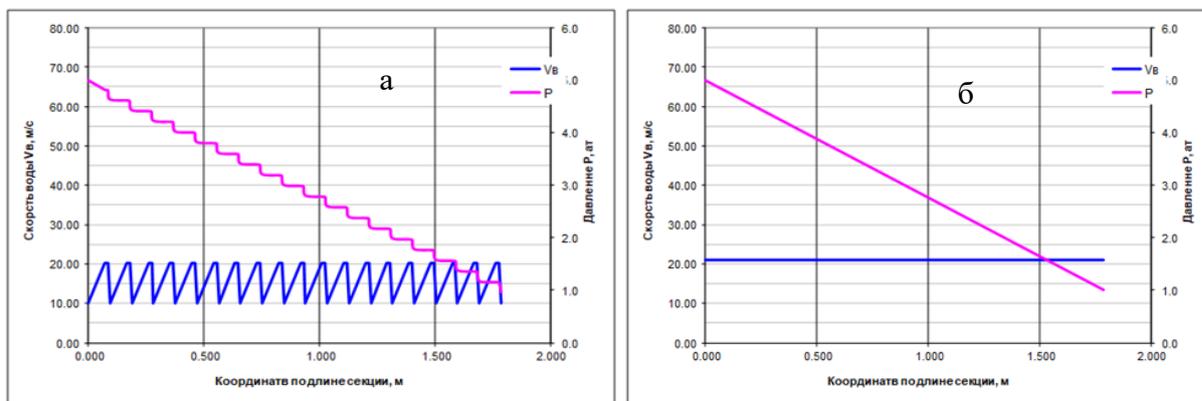


Рисунок 5 - Графики распределения скорости и давления воды по длине камеры охлаждения: а – КД; б -гладкой

Для получения связи предела прочности и твердости при термоупрочнении на стане 250 отобраны образцы упрочненных профилей арматуры №16 и №20, классов А500 и А800, на которых были проведены замеры твердости по Бринелю вдоль радиуса поперечного сечения с привязкой к компонентам микроструктуры. Результаты показаны в табл.2. Обозначения принятые в табл.2 показаны ниже:

C, Mn, Si — содержание углерода, марганца и кремния в стали (%);

$C_{эк}$  – углеродный эквивалент;

$\sigma_b, \sigma_{0.2}$  — предел прочности и условный предел текучести (Н/мм<sup>2</sup>);

$\delta\%$  - относительное удлинение;

НВ, НВ<sub>м</sub>, НВ<sub>б</sub>, НВ<sub>п</sub>, НВ<sub>ф</sub> - твердость по Бринелю средневзвешенная, мартенсита, бейнита, перлита и феррита соответственно.

Таблица 2 – Исходные данные и результаты эксперимента по определению механических свойств арматурных профилей в функции твердости структурных компонент

№	С	Мn	Si	Сзк	б <sub>0,2</sub>	б <sub>b</sub>	δ%	НВ	НВ <sub>м</sub>	НВ <sub>б</sub>	НВ <sub>п</sub>	НВ <sub>ф</sub>
1	0.21	0.61	0.071	0.319	632	745	21	212	227	210	-	196
2	0.18	0.61	0.063	0.288	582	687	21.5	203	211	203	-	171
3	0.18	1.24	0.62	0.449	882	1055	11.5	298	333	299	243	-
4	0.21	0.61	0.071	0.319	602	707	21.5	215	234	200	-	171
5	0.21	0.61	0.071	0.319	557	657	17.5	215	236	205	182	174
6	0.22	1.14	0.35	0.445	985	1140	15.5	293	295	295	-	-
7	0.22	0.67	0.089	0.341	615	717	17	218	229	210	-	-
8	0.24	1.5	0.77	0.567	975	1140	12.5	310	316	315	286	-
9	0.21	1.4	0.68	0.511	1010	1185	14	313	315	312	302	-
10	0.21	0.6	0.057	0.316	660	760	18.5	205	224	200	-	179

В результате статистической обработки данных табл.2 получены следующие зависимости твердости:

- феррит  $HВ_{ф} = 361 - 0.357 T_{фср} + 50 Si$ , где  $T_{фср}$  – средняя температура ферритного превращения;
- перлит  $HВ_{п} = (730.7 - 0.73T_{пср}) C + 204.17 - 0.155T_{пср}$ , где  $T_{пср}$  – средняя температура перлитного превращения;
- бейнит  $HВ_{б} = 86.7 + 182.2Mn + 176.5Si - 157.15Mn \cdot Si$ ,
- мартенсит  $HВ_{м} = 164.6 + 74.8Mn + 357.6 Si - 205.7 Mn Si$ ,

Для определения средневзвешенной твердости используется формула

$$HВ_{ср} = V_{ф} \cdot HВ_{ф} + V_{п} \cdot HВ_{п} + V_{б} \cdot HВ_{б} + V_{м} \cdot HВ_{м},$$

где  $V_{ф}$ ,  $V_{п}$ ,  $V_{б}$ ,  $V_{м}$  – относительные объемные доли соответствующих структурных составляющих ( $\sum V_i = 1$ ).

Предел прочности определяется по уравнению регрессии:

$$б_{в} = 4.531 \cdot HВ_{ср} - 242, R^2 = 0.9569,$$

условный предел текучести связан с пределом прочности выражением

$$б_{0,2} = 0.857 \cdot б_{в} - 3.24, R^2 = 0.9979, \text{ где } R^2 - \text{коэффициент детерминации.}$$

$$\text{относительное удлинение } \delta_{отн} = 0.06e^{\frac{195}{HВ_{ср}}}$$

Укрупненная блок-схема полного алгоритма расчета модели показана на рис. 6.

Входными данными для моделирования являются:

$N$  - количество включенных подряд камер ускоренного охлаждения;

$d_0$  - диаметр проката;

$V_{л}$  - линейная скорость металла (скорость прокатки);

$t(x/r_0)$  - исходное распределение температуры по сечению на выходе из чистой клетки прокатного стана;

$C, Mn, Si$  - химический состав стали;

$L_{вi}$  - длины участков выравнивания на воздухе;

$L_{ки}, D_{ки}$  - конструкция установки ускоренного охлаждения (см. рис. 1);

$t_{вxi}$  - температура воды на входе в камеру;

$P_{к_вxi}$  - давление воды на входе в камеру.

Выходными данными модели являются:

$A, \Phi, П, Б, М$  - (аустенит, феррит, перлит, бейнит, мартенсит) количество структурных составляющих стали после распада аустенита в долях единицы;

$t_{со}$  - температура самоотпуска;

$W_{в\Sigma}$  - суммарный расход воды;

$\sigma_{02}$  - условный предел текучести холодного металла;

$\sigma_{в}$  - предел прочности холодного металла;

$\delta$  - относительное удлинение холодного металла, %;

$V_{vi}$  - средняя скорость воды в камере  $i$ ;

$t_{ввыxi}$  - температура воды на выходе из камеры  $i$ ;

$W_{vi}$  - расход воды в камере  $i$ ;

$t_{мвxi}, t_{мвыxi}$  - среднемассовые температуры металла на входе и выходе из камеры  $i$ ;

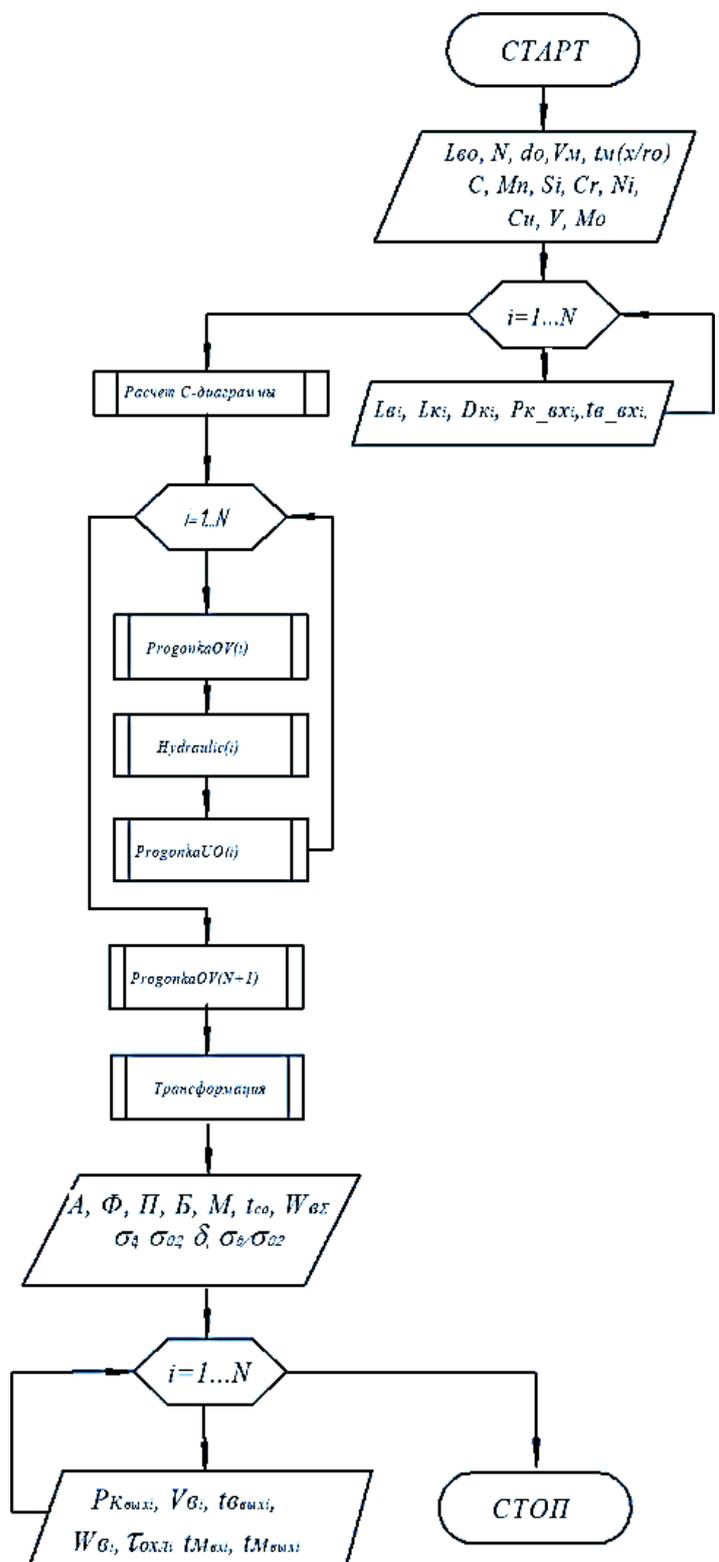


Рисунок 6 - Блок-схема алгоритма модели комбинированного охлаждения арматурного проката в потоке прокатного стана: «PrigonkaOV» – подпрограмма расчета температурного поля при охлаждении на воздухе; «PrigonkaUO» – подпрограмма расчета температурного поля при охлаждении водой в камере; «Трансформация» - подпрограмма расчета объемных долей структурных составляющих.

С использованием описанной физико-математической модели разработана программа, интерфейс пользователя которой показан на рис.7-8. Программа позволяет моделировать охлаждение проката  $\varnothing 8\text{--}32\text{ мм}$  в установках, содержащих от 1 до 6 секций гладкого или КД типа при скорости прокатки  $5\text{--}20\text{ м/с}$ .

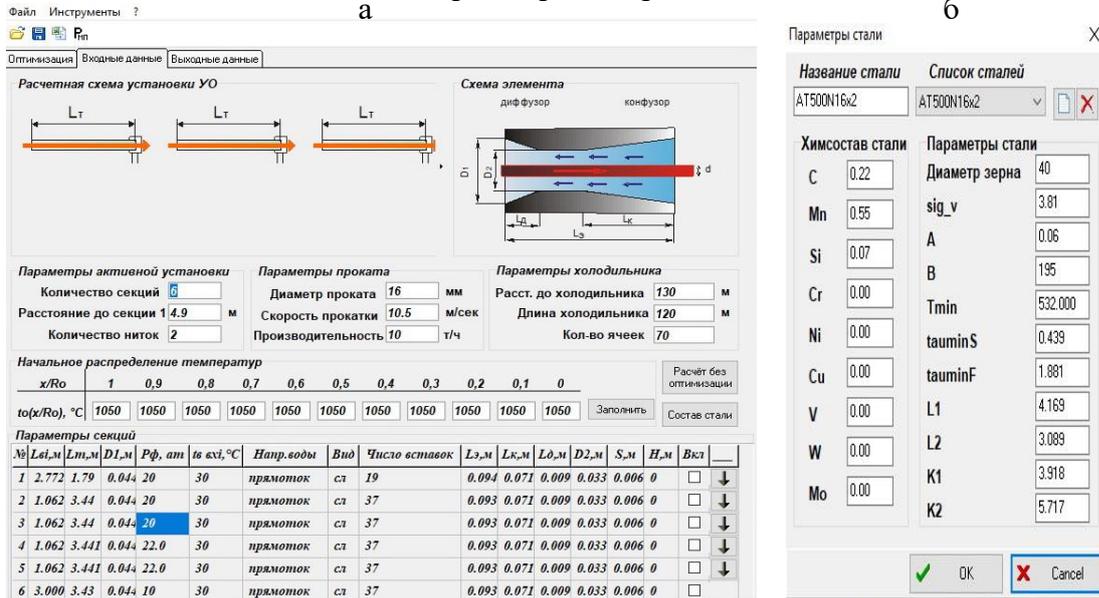


Рисунок 7 - Вид интерфейса пользователя при вводе данных:  
а- конструкции установки; б- характеристик марки стали.

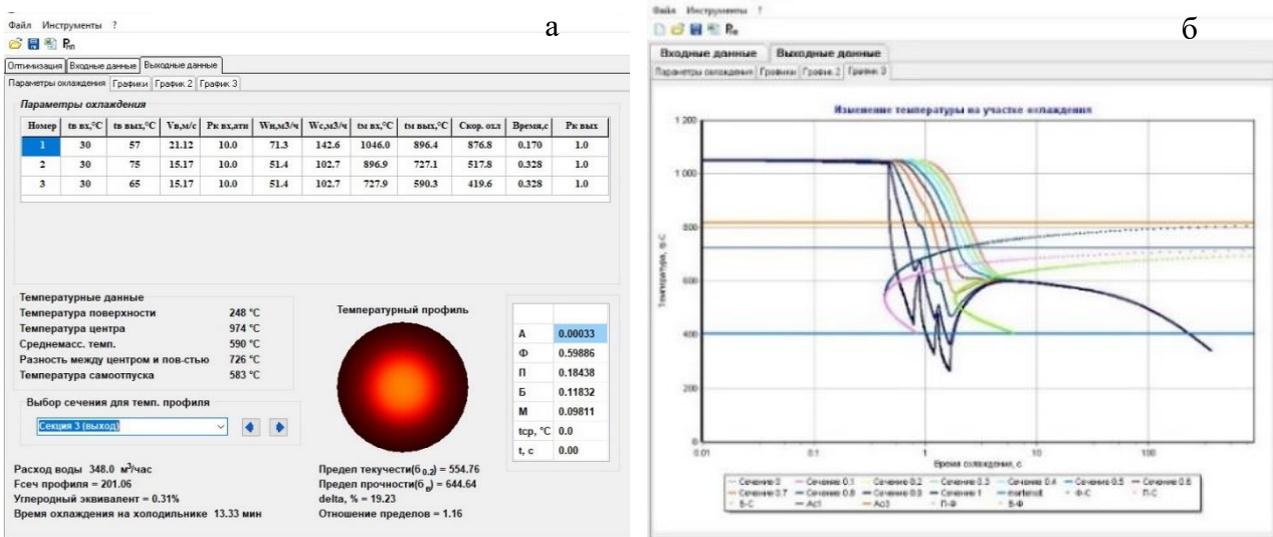


Рисунок 8 - Вид интерфейса пользователя: а- интегральные характеристики процесса; б- температурное поле профиля, наложенное на С-диаграмму

## Заключение

Наличие физико-математической модели процесса ускоренного охлаждения в установках типа КД в потоке сортового стана позволяет осуществить разработку экспертной системы для оптимизации процесса термоупрочнения арматурной стали на основе ИНС с глубоким обучением. Процесс обучения, требующий в обычных условиях проведения дорогостоящего широкого производственного эксперимента

для получения обучающего набора данных, заменяется расчетом по разработанной модели на основе фундаментальных знаний. Производственный эксперимент в этом случае заключается в получении небольшого числа данных для подстройки модели, которая предусмотрена в программе.

Результаты проверки точности прогноза механических свойств по данным заводской практики показал удовлетворительную сходимость расчетных и практических данных.

## Список литературы

1. Тахаутдинов, Р.С. Производство термомеханически упрочненной арматуры на мелкосортном стане 250-1 Магнитогорского металлургического комбината. *Черная металлургия. Бюлл. НТИ.* 2003. №12. С. 47-49.
2. Минаев, А.А. Особенности пульсирующего течения хладагента в камерах устройств ускоренного охлаждения / А.А. Минаев, Е.Н. Смирнов. *Изв. вузов. Черн. металлургия.* 1988. № 11. С. 156-157.
3. Минаев, А.А. Показатель эффективности устройств для охлаждения движущегося проката / А.А. Минаев, Ю.Е. Бердичевский, П.Ф. Бублик. *Изв. вузов. Черн. металлургия.* 1985. № 6. С. 154-155.
4. Минаев, А.А. Разработка методики расчета теплообмена в устройстве для регулируемого охлаждения в потоке прокатного стана / А.А. Минаев, С.А. Онищенко, А.В. Гребельный. *Теплофизика технологических процессов: Тез. докл. VI Всесоюз. конф.* Ташкент, 1984. Ч. 3. С. 2
5. Савьюк, А.Н. Оптимизация химического состава стали, технологии прокатки и термообработки для обеспечения механических свойств проката в узком диапазоне значений / А.Н. Савьюк, И.В. Деревянченко и др. *Тр. 5-го конгресса прокатчиков.* М., 2004. С. 200-205.
6. Худик, Ю.Т. Исследование служебных характеристик установки для термического упрочнения арматурной стали в потоке стана 250-5 завода «Криворожсталь» / Ю.Т. Худик и др. *Термическая обработка металлов.* М., 1979. Вып. 8.-С. 65-66
7. Михаленко, И.А. Технология производства арматуры диаметром 25-28 мм класса прочности А500С с высокими пластическими свойствами / И.А. Михаленко. *Черная металлургия. Бюлл. НТИ.* 2004. Я» 6. С. 46-49.
8. Юрьев, А.Б. Прерывистое охлаждение в потоке стана 450 стальной арматуры большого диаметра / А.Б. Юрьев и др. *Тр. 4-го конгресса прокатчиков.* Т. 1. М., 2002. С. 301-304.
9. Юрьев, А.Б. Разработка технологии упрочнения стержневой арматуры диаметром 32-40 мм на класс А500С / А.Б. Юрьев и др. *Черная металлургия. Бюлл. НТИ.* 2002 № 10. С. 41-43.
10. Юрьев, А.В. Оптимизация технологии упрочнения стержневой арматуры диаметром 32-40 мм класса А500С / А.В. Юрьев и др. *Сталь.* 2002. № 2. С. 68-69.
11. Киркин, Д.С. Разработка математической модели процесса термического упрочнения горячекатаной арматурной стали / Д.С. Киркин, Ю.А. Калягин. *Молодые исследователи регионам: Материалы Всероссийской науч. конф. студ. и аспирантов.* Вологда, 21-22 апреля 2005 г. Вологда: ВГТУ, 2005.-Т. 1.-С79-81.
12. Киркин, Дмитрий Сергеевич. Исследование и совершенствование процесса ускоренного охлаждения проката в линии сортовых станов : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.14.04 / Киркин Дмитрий Сергеевич; [Место защиты: Череповец. гос. ун-т]. Череповец, 2007. 16 с.
13. Математическое моделирование процесса комбинированного охлаждения сортового проката / В.С.Солод, Д.Н.Новиков, М.Н.Тытук, С.И.Гинкул, М.А.Ларченко. *Металл и литье Украины.* 2007, №8.- с. 28-30.
14. *Тепломассообмен* / С.И.Гинкул, В.И.Шелудченко, В.В.Кравцов, С.В.Палкина. Донецк: Норд-Пресс, 2006. 298 с.
15. *Расчет усилий при непрерывной прокатке* / В.Н.Жучин, Г.С.Никитин, Я.С.Шварцбарт, И.Г.Зуев М.:Металургия, 1986.- 198 с.
16. 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. ISBN 978-5-7962-0149-7
17. Glasstone S., Laidler K. J., Eyring H. *The Theory of Rate Processes.* McGraw-Hill, New York, 1941.
18. Cristian J. W. *Transformations in Metals and Alloys. Part I.* Pergamon Press, Oxford, 1975.
19. Cahn J. W., Hagel W. C. *Decomposition of Austenite by Diffusional Processes.* Interscience, New York, 1962.

20. *Atlas of isothermal transformation diagrams*. United States Steel Corporation. 1957.
21. Губинский В.И., Минаев А.Н., Гончаров Ю.В. *Уменьшение окалинообразования при производстве проката*. К.:Техніка, 1981.-135 с.

## References

1. Takhautdinov, R.S. Production of thermomechanically strengthened reinforcement bars at the 250-1 light-section mill of the Magnitogorsk Iron and Steel Works / R.S. Takhautdinov // *Ferrous metallurgy. Bulletin of NTI*. - 2003. - No. 12.-P. 47-49
2. Minaev, A.A. Features of the pulsating flow of the coolant in the chambers of accelerated cooling devices / A.A. Minaev, E.N. Smirnov // *News of the universities. Chern. metallurgy*. - 1988. - No. 11. - P. 156-157. 160
3. Minaev, A.A. Efficiency indicator of devices for cooling moving rolled products / A.A. Minaev, Yu.E. Berdichevsky, P.F. Bublik // *News of the universities. Chern. metallurgy*. - 1985. - № 6. - P. 154-155.
4. Minaev, A. A. Development of a method for calculating heat exchange in a device for controlled cooling in a rolling mill flow / A. A. Minaev, S. A. Onishchenko, A. V. Grebelny // *Thermal physics of technological processes: Abstract. report. VI All-Union Conf.* - Tashkent, 1984. - Part 3. - P. 2 5.
5. Savyuk, A. N. Optimization of the chemical composition of steel, rolling technology and heat treatment to ensure the mechanical properties of rolled products in a narrow range of values / A. N. Savyuk, I. V. Derevyanchenko et al. // *Proc. of the 5th congress of rolling mill workers*. - M., 2004. - P. 200-205.
6. Khudik, Yu. T. Study of service characteristics of the installation for thermal hardening of reinforcing steel in the flow of mill 250-5 of the Krivorozhstal plant / Yu. T. Khudik et al. // *Heat treatment of metals*. - M., 1979.-Issue. 8.-P. 65-66
7. Mikhaleiko, I. A. Technology of production of reinforcement bars with a diameter of 25-28 mm of strength class A500C with high plastic properties / I. A. Mikhaleiko // *Ferrous metallurgy. Bulletin of NTI*. - 2004. - № 6. - P. 46-49.
8. Yuryev, A. B. Intermittent cooling in the flow of mill 450 of large-diameter steel reinforcement bars / A. B. Yuryev et al. // *Proc. of the 4th Congress of Rolling Workers*. - V. 1. - M., 2002. - P. 301-304.
9. Yuryev, A.B. Development of technology for strengthening reinforcement bars with a diameter of 32-40 mm to class A500C / A.B. Yuryev et al. // *Ferrous metallurgy. Bulletin of NTI*. - 2002 - No. 10. - P. 41-43.
10. Yuryev, A.V. Optimization of technology for strengthening reinforcement bars with a diameter of 32-40 mm of class A500C / A.V. Yuryev et al. // *Steel*. - 2002. - No. 2.-P. 68-69.
11. Kirkin, D.S. Development of a mathematical model for the process of thermal strengthening of hot-rolled reinforcing steel / D.S. Kirkin, Yu.A. Kalyagin // *Young researchers - to the regions: Proceedings of the All-Russian scientific conf. students and postgraduates*. - Vologda, April 21-22, 2005 - Vologda: VSTU, 2005.-Т. 1.-P79-81.
12. Kirkin, Dmitry Sergeevich. Research and improvement of the process of accelerated cooling of rolled products in the line of section mills: author's abstract of dis. candidate of technical sciences: 05.14.04/ Kirkin Dmitry Sergeevich; [Place of defense: Cherepovets. state University]. - Cherepovets, 2007. – 16 p.
13. Mathematical modeling of the process of combined cooling of rolled products / V.S. Solod, D.N. Novikov, M.N. Tytyuk, S.I. Ginkul, M.A. Larchenko // *Metal and casting of Ukraine*. 2007, No. 8. - p. 28-30.
14. Heat and mass transfer / S.I. Ginkul, V.I. Sheludchenko, V.V. Kravtsov, S.V. Palkina. - Donetsk: Nord-Press, 2006.-298 p.
15. Calculation of forces during continuous rolling / V.N. Zhuchin, G.S. Nikitin, Ya.S. Schwartzbart, I.G. Zuev M.: Metallurgy, 1986.- 198 p.
16. Chudina O.V. Theory and practice of heat treatment of metals: a teaching aid for a multimedia publication / O. V. Chudina, G. V. Gladova, A. V. Ostroukh. - M.: MADI, 2013. - 64 p. ISBN 978-5-7962-0149-7.
17. Glasstone S., Laidler K. J., Eyring H. *The Theory of Rate Processes* // McGraw-Hill, New York, 1941.
18. Cristian J. W. *Transformations in Metals and Alloys. Part I* // Pergamon Press, Oxford, 1975.
19. Cahn J. W., Hagel W. C. *Decomposition of Austenite by Diffusional Processes* // Interscience, New York, 1962.
20. *Atlas of isothermal transformation diagrams*. United States Steel Corporation. 1957.
21. Gubinsky V.I., Minaev A.N., Goncharov Yu.V., *Reduction of scale formation in the production of rolled products* - K.: Tekhnika, 1981.-135 p

## RESUME

*V. S. Solod*

*Physical and mathematical model for developing an expert system for accelerated cooling of reinforcement products*

Research into accelerated cooling processes in a section mill line has been actively conducted since the 1980s and continues to this day. Mathematical modeling was mainly carried out at the level of integral characteristics of the process. All of the above studies are characterized by the use of averaged characteristics of cooling water along the length of the chamber. In addition, there is no relationship between temperature-speed factors and structure formation and the influence of structural components on the mechanical properties of the final product.

**Methods:**

Application of numerical solution of differential equation of heat conductivity by the "run" method for constructing temperature field in cross-section of profile. Dependences of thermophysical coefficients of carbon steel on cooling temperature were obtained by statistical processing of tabular data with high degree of accuracy over the whole range of cooling temperatures. Use of fundamental provisions of hydraulics for determination of change of hydrodynamic parameters of cooling medium during accelerated cooling. Construction of model of diagrams of temperature-rate transformation of deformation structures of low-carbon steels (TTT-diagrams) based on statistical processing of coordinates of critical points for different grades of steel. Statistical processing of results of metallographic studies of types of structures of hardening and tempering in reference to them of values of hardness.

**Results:**

For the first time, based on fundamental knowledge in the field of heat engineering, hydraulics, metal science, a mathematical model, algorithm and program for simulating the process of accelerated cooling of reinforcement bars in the flow of a bar rolling mill have been developed.

The model takes into account the real conditions of the process associated with the design of the cooling line, cooling chambers, temperature and speed conditions of rolling, steel grade.

**Conclusion:**

The development is intended to create an expert system based on AI for optimizing the process of reinforcement bars thermal strengthening based on water and electricity consumption.

As a simulation model, this model can be used in the educational process for students to study the influence of a number of factors on the flow and results of thermal strengthening of deformed metal during accelerated cooling.

## РЕЗЮМЕ

*В. С. Солод*

*Физико-математическая модель для разработки экспертной системы ускоренного охлаждения арматурного проката*

Исследования процессов ускоренного охлаждения проката в линии сортовых станов активно проводились начиная с 80-х годов XX века и продолжаются до настоящего времени. В основном математическое моделирование проводилось на уровне интегральных характеристиках процесса. Для всех указанных исследований

характерно использование усредненных характеристик охлаждающей воды по длине камеры. Кроме того, отсутствует взаимосвязь температурно-скоростных факторов и структурообразования и влияние структурных компонент на механические свойства конечного продукта.

#### **Методы:**

- применение численного решения дифференциального уравнения теплопроводности методом «прогонки» для построения температурного поля в поперечном сечении профиля;
- зависимости теплофизических коэффициентов углеродистой стали, от температуры охлаждения получены статистической обработкой табличных данных с высокой степенью точности на всем интервале температур охлаждения;
- использование основных положений гидравлики для определения изменения гидродинамических параметров охлаждающей среды во времени ускоренного охлаждения;
- построение модели диаграмм температурно-скоростной трансформации деформационных структур низкоуглеродистых сталей (С- диаграмм) на основе статистической обработки координат критических точек для разных марок стали.
- статистическая обработка результатов металлографических исследований типов структур закалки с отпуском в привязке к ним значений твердости.

#### **Результаты:**

Впервые, на основе фундаментальных знаний в области теплотехники, гидравлики, металловедения разработана математическая модель, алгоритм и программа для моделирования процесса ускоренного охлаждения арматурного проката в потоке сортового прокатного стана.

Модель учитывает реальные условия процесса, связанные с конструкцией установки, камер охлаждения, температурно-скоростными условиями прокатки, маркой стали.

#### **Заключение:**

Разработка предназначена для создания на основе ИИ экспертной системы оптимизации процесса термоупрочнения арматуры по расходу воды и электроэнергии.

Как имитационная, эта модель может использоваться в учебном процессе для исследования студентами влияния ряда факторов на течение и результаты термоупрочнения деформированного металла при ускоренном охлаждении.

**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. 118б, телефон +7(949) 459- 02 -42.

Статья поступила в редакцию 29.03.2025.

Раздел 3  
*Section 3*

Системный анализ, управление  
и обработка информации,  
статистика

---

*System analysis, management  
and information processing,  
statistics*

УДК 681.518.9; 621.384.3

DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-60-65

S. S. Antsyferov, K. N. Fazilova, D. S. Muravyov  
MIREA – Russian Technological University, c. Moscow, Russia  
Russia, 119454, c. Moscow, Vernadsky ave., 78

## INTELLIGENT QUALITY CONTROL SYSTEMS FOR HIGH-TECH MANUFACTURING PROCESSES AND EQUIPMENT

С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, Д. С. Муравьев  
МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия  
119454, Россия, г. Москва, пр. Вернадского, 78

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ НАУКОЁМКОГО ПРОИЗВОДСТВА

In the article, a methodology for quality management of technological processes and equipment in high-tech production is proposed. Practical testing of this methodology has shown its applicability when comparing the current situation with previously calculated options from the tree of all quality states.

**Keywords:** methodology, quality management, technological process, technological equipment, neural network, machine learning, quality control.

В статье предложена методология управления качеством технологических процессов и оборудования наукоёмкого производства. Практическая апробация данной методологии показала возможность ее использования при сопоставлении текущей ситуации с ранее просчитанными вариантами из дерева всех состояний качества.

**Ключевые слова:** методология, управление качеством, технологический процесс, технологическое оборудование, нейросеть, машинное обучение, контроль качества.

## Introduction

The task of achieving a high level of quality in the functioning of technological processes (TP) and technological equipment in intelligent high-tech production (IHTP) can be addressed through continuous monitoring and forecasting of their states, as well as timely execution of production and preventive maintenance.

In this context, the development of a methodology and systems for quality management of technological processes and equipment becomes highly relevant. These systems should provide information not only about the actual state of the monitored processes and equipment but also offer predictions about the potential emergence of critical states.

The obtained information enables the establishment of clearer links between the procedures for planning scheduled maintenance and the actual (as well as forecasted) state of technological processes and equipment, which should ultimately enhance overall production efficiency.

The goal of this work is to develop a methodology for quality management of technological processes and equipment in intelligent high-tech production.

## Quality Management Methodology

The methodology is based on the principle of comprehensive, multi-level quality control. The main levels are identified as follows (Fig. 1):

- \* Quality control of technological equipment. The control element is a multi-layer neural network classifier (NNC) for equipment states. The NNC undergoes preliminary training on a dataset of equipment signals (machine learning mode), enabling it to distinguish between equipment states (optimal, good, etc.). The NNC serves as the foundation for a system of monitoring and forecasting the states of technological processes and equipment [1]. This system is integrated into the IIoT Istok platform, allowing for timely mitigation of factors that reduce product quality and enabling more precise organization of repair and preventive maintenance.

- \* Quality control of technological operations (TO). To optimize TO, a digital twin (DT) is created based on a knowledge base (KB), and a 3D model of the processed part (P) is developed. After performing the TO, the controlled dimension (CD) is measured and compared with the 3D model, providing a probabilistic assessment of the operation's effectiveness, which serves as a measure of TO quality. The availability of probabilistic effectiveness measures for all operations allows for an overall assessment of the technological process quality.

- \* Quality control of the technological process through evaluation of current quality indicators. For this purpose, interval values of probabilistic indicators ( $P_{min}$ ,  $P_{max}$ ) are determined in machine learning mode, and corresponding boundary quality indicators  $H$  and  $\dot{H}$  are defined according to algorithm A1 [2], which are further determined by algorithm A2 [2]. The current indicators  $H$  and  $\dot{H}$ , obtained at each step of the TP, are compared with the boundary values (quality boundaries:  $H_b$  and  $\dot{H}_b$ ). Exceeding these boundaries indicates a disruption in the TP.

- \* Predictive quality control. Within the quality boundaries, algorithm A3, incorporating artificial intelligence elements, is used to identify trends (sustained movement of current indicators  $H$  and  $\dot{H}$  toward a boundary value). If a trend is detected, a signal is issued about the risk of TP disruption. If no trend is found, statistical processing of the dataset is performed using algorithm A4 to determine the probability of TP disruption risk.

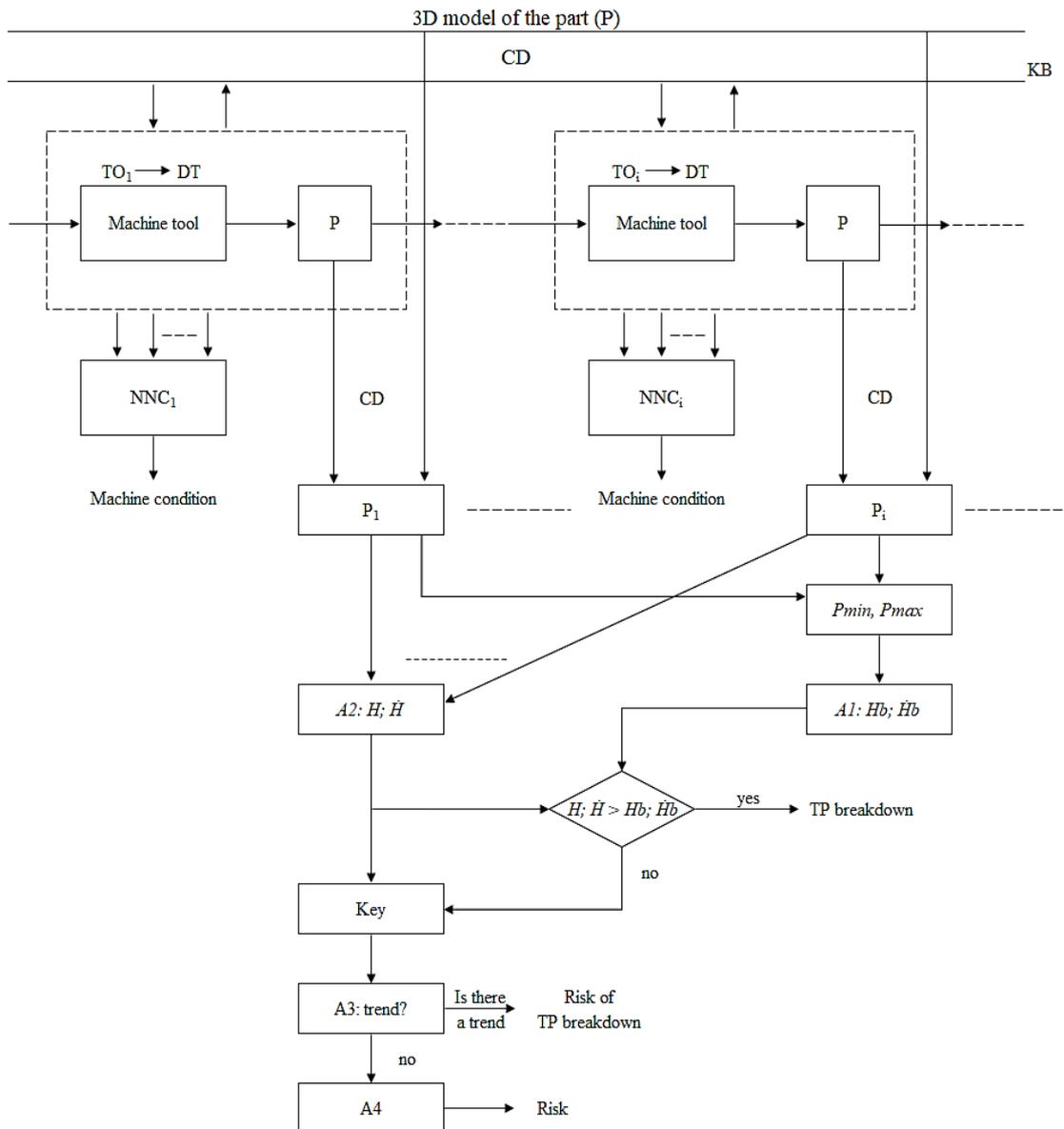


Fig. 1. Structural diagram of the quality management system for TP and equipment

The practical implementation of the quality management system as a trainable neural network will enable the creation of a calculation matrix, allowing for the comparison of the current situation with pre-calculated scenarios from the tree of all quality states.

## Conclusion

The proposed methodology facilitates the development of quality management systems for technological processes and equipment in intelligent high-tech production in the form of programmable modules. These modules enable the optimization of preventive maintenance plans based on machine learning. This serves as a solid foundation for achieving high-quality functioning of both technological equipment and technological processes as a whole.

## Список литературы

1. Анцыферов С.С. и др. Система мониторинга и прогнозирования поведения оборудования на базе IoT. *Автоматизация в промышленности*. 2024. № 3. С. 51-55.
2. Анцыферов С.С., Сигов А.С., Фазилова К.Н. Методология контроля функционирования неравновесно-устойчивых технических систем. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2021. №1 (20). С. 18-26.
3. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Русанов К.Е. Методика контроля качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства. *Научные технологии*. 2023. Т.24. №7. С. 39-43.
4. Анцыферов С.С., Тихонов И.А. Интеллектуализация предприятий электронной промышленности и управление рисками. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. №4 (31). С. 29-39.
5. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Русанов К.Е. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. №2 (43). С. 37-44.
6. Солод В.С. Физико-математическая модель для разработки экспертной системы сортопрокатного производства. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. №3 (34). С. 20-38.
7. Рылов С.А. Однопарный Ethernet T1S как основа интеллектуальных датчиков промышленного интернета вещей. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. №4 (35). С. 222-232.
8. Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н. Нечеткая модель диагностики технологических процессов. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. №3 (30). С. 76-86.
9. Бахтадзе Н.Н., Коньков А.Е., Елпашев Д.В., Кушнарев В.Н., Мухтаров К.С., Пуртов А.В., Пятацкий В.Е., Черешко А.А. Методы синтеза цифровых двойников на основе цифровых идентификационных моделей производственных процессов. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2024. №4. С. 100-111.
10. Аристова Н.И. Исследование компенсации брака при изготовлении партии узлов на гибких производствах. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2023. №1. С. 82-86.
11. Sahib R.H., Jawad D.H.M., Mtasher A.K., Msad J.J. Network intrusion detection system using machinelearning models and data mining strategies: comprehensive study. *Вычислительные технологии*. 2024. №5. С.113-123.
12. Зацаринный А.А., Ионенков Ю.С. Некоторые вопросы использования цифровых двойников при создании информационных систем. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2022. №2. С. 22-29.
13. Chernyi S.G., Ivanovskii A.N. automated system for ship draught measurement with component of intelligent systems. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2022. №2. С.59-69.
14. Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Петряшов И.С., Степанов А.С. Цифровой реинжиниринг позаказного производства оборудования на малых предприятиях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2024. №8(773). С. 52-60.
15. Зайцева Ю.С. Методы искусственного интеллекта для задач управления робототехническими и мехатронными системами: обзор. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2024. №1(776). С. 41-56.
16. Сухомлинов А.И. Интегрированная система управления производством промышленного предприятия. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2024. №3. С. 98-109.
17. Долгов В.А., Никишечкин П.А., Ивашин С.С., Долгов Н.В., Акимов А.А. Современные подходы к построению цифровых двойников продуктов, процессов и систем, включая производственно-логистические системы машиностроительных предприятий. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2023 №2. С. 88-96.
18. Ковалёв С.П. Применение цифровых двойников в автоматизированном управлении высокотехнологичным промышленным производством. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2024. №4. С. 211-220.
19. Ebraheem A., Ivanov I. Towards automated and optimal IoT design. *Информатика и автоматизация*. 2024. №2. С.377-406.
20. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Модель информационного взаимодействия элементов многоуровневой системы цифровых двойников. *Информатика и автоматизация*. 2021. №3. С.530-561.

## References

1. Antsyferov S.S. et al. System for Monitoring and Forecasting Equipment Behavior Based on IoT // Automation in Industry. 2024. No. 3. — P. 51–55.
2. Antsyferov S.S., Sigov A.S., Fazilova K.N. Methodology for Monitoring the Functioning of Non-Equilibrium Stable Technical Systems // Problems of Artificial Intelligence. 2021. No. 1 (20). P. 18–26.
3. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Methodology for Quality Control of Technological Processes in Intelligent Manufacturing // High-Tech Technologies. 2023. Vol. 24. No. 7. P. 39–43.

4. Antsyferov S.S., Tikhonov I.A. Intellectualization of Electronics Industry Enterprises and Risk Management // Problems of Artificial Intelligence. 2023. No. 4 (31). P. 29–39.
5. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Intelligent Systems for Managing Technological Processes // Problems of Artificial Intelligence. 2024. No. 2 (43). P. 37–44.
6. Solod V.S. Fiziko-matematicheskaya model' dlya razrabotki ekspertnoj sistemy sortoprokatnogo proizvodstva // Problemy iskusstvennogo intellekta. 2024. №3 (34). S. 20-38.
7. Rylov S.A. Odnoparnyj Ethernet T1S kak osnova intellektual'nyh datchikov promyshlennogo interneta veshchej // Problemy iskusstvennogo intellekta. 2024. №4 (35). S. 222-232.
8. Fam K.B., Murashev P.M., Bogatkov V.N. Nechetkaya model' diagnostiki tekhnologicheskikh processov // Problemy iskusstvennogo intellekta. 2023. №3 (30). S. 76-86.
9. Bahtadze N.N., Kon'kov A.E., Elpashev D.V., Kushnarev V.N., Muhtarov K.S., Purtov A.V., Pyatekij V.E., Cheresheko A.A. Metody sinteza cifrovyyh dvojn timerov na osnove cifrovyyh identifikacionnyh modelej proizvodstvennykh processov // Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 2024. №4. S. 100-111.
10. Aristova N.I. Issledovanie kompensacii braka pri izgotovlenii partii uzlov na gibkikh proizvodstvakh // Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 2023. №1. S. 82-86.
11. Sahib R.H., Jawad D.H.M., Mtasher A.K., Msad J.J. Network intrusion detection system using machine learning models and data mining strategies: comprehensive study // Vychislitel'nye tekhnologii. 2024. №5. S.113-123.
12. Zaccarinnyj A.A., Ionenkov Yu.S. Nekotorye voprosy ispol'zovaniya cifrovyyh dvojn timerov pri sozdaniii informacionnykh sistem // Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 2022. №2. S. 22-29.
13. Chernyi S.G., Ivanovskii A.N. automated system for ship draught measurement with component of intelligent systems // Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 2022. №2. S.59-69.
14. Bulavin V.F., Bulavina T.G., Petryashov I.S., Stepanov A.S. Cifrovoy reinzhiniring pozakaznogo proizvodstva oborudovaniya na malyykh predpriyatiyakh // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie. 2024. №8(773). S. 52-60.
15. Zajceva Yu.S. Metody iskusstvennogo intellekta dlya zadach upravleniya robototekhnicheskimi i mekhatronnymi sistemami: obzor // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie. 2024. №1(776). S. 41-56.
16. Suhomlinov A.I. Integrirovannaya sistema upravleniya proizvodstvom promyshlennogo predpriyatiya // Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii. 2024. №3. S. 98-109.
17. Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Dolgov N.V., Akimov A.A. Sovremennyye podhody k postroeniyu cifrovyyh dvojn timerov produktov, processov i sistem, vklyuchaya proizvodstvenno-logisticheskie sistemy mashinostroitel'nykh predpriyatij // Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii. 2023. №2. S. 88-96.
18. Kovalyov S.P. Primenenie cifrovyyh dvojn timerov v avtomatizirovannom upravlenii vysokotekhnologichnym promyshlennym proizvodstvom // Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2024. №4. S. 211-220.
19. Ebraheem A., Ivanov I. Towards automated and optimal IIoT design // Informatika i avtomatizaciya. 2024. №2. S. 377-406.
20. Vorob'ev A.V., Vorob'eva G.R. Model' informacionnogo vzaimodejstviya elementov mnogourovnevnoj sistemy cifrovyyh dvojn timerov // Informatika i avtomatizaciya. 2021. №3. S.530-561.

## RESUME

*S. S. Antsyferov, K.N. Fazilova, D.S. Muravyov*

*Intelligent Quality Control Systems for High-Tech Manufacturing Processes and Equipment*

The task of achieving a high level of quality in the functioning of technological processes (TP) and technological equipment in intelligent high-tech production (IHTP) can be addressed through continuous monitoring and forecasting of their states, as well as timely execution of production and preventive maintenance.

In this context, the development of a methodology and systems for quality management of technological processes and equipment becomes highly relevant. These systems should provide information not only about the actual state of the monitored processes and equipment but also offer predictions about the potential emergence of critical states.

The goal of this work is to develop a methodology for quality management of technological processes and equipment in intelligent high-tech production.

The methodology is based on Industry 4.0, which involves the use of elements of artificial intelligence, machine learning methods, digital twins, industrial Internet of Things technology, knowledge bases, and databases.

The practical implementation of the quality management system as a trainable neural network will enable the creation of a calculation matrix, allowing for the comparison of the current situation with pre-calculated scenarios from the tree of all quality states.

The proposed methodology facilitates the development of quality management systems for technological processes and equipment in intelligent high-tech production in the form of programmable modules. These modules enable the optimization of preventive maintenance plans based on machine learning.

## РЕЗЮМЕ

*С.С. Анцыферов, К.Н. Фазилова, Д.С. Муравьев*

*Интеллектуальные системы управления качеством технологических процессов и оборудования наукоёмкого производства*

Задача достижения высокого уровня качества функционирования технологических процессов (ТП) и технологического оборудования интеллектуального наукоёмкого производства (ИНП) может быть решена путем непрерывного мониторинга и прогнозирования их состояний, а также своевременным проведением производственно-профилактических работ.

В связи с этим актуальной становится проблема разработки методологии и реализующих ее систем управления качеством технологических процессов и технологического оборудования. Данные системы должны предоставлять информацию не только о реальном состоянии контролируемых процессов и оборудования, но и давать прогноз о возможности появления критических состояний.

Цель работы – разработка методологии управления качеством технологических процессов и оборудования интеллектуального наукоёмкого производства.

В основу построения методологии положена Индустрия 4.0., предполагающая использование элементов искусственного интеллекта, методов машинного обучения, цифровых двойников, технологии промышленного интернета вещей, базы знаний и базы данных.

Практическая реализация системы управления качеством в виде обучаемой нейросети позволит создать расчетную матрицу, с помощью которой появится возможность сопоставления текущей ситуации с ранее просчитанными вариантами из дерева всех состояний качества.

Предлагаемая методология позволяет создавать системы управления качеством технологических процессов и оборудования интеллектуального наукоёмкого производства в виде программируемых модулей, создающих возможность оптимизации плана предупредительных ремонтно-профилактических работ на основе машинного обучения.

**Анцыферов Сергей Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва. *Область научных интересов:* системы искусственного интеллекта, эл. почта [antsyferov@mirea.ru](mailto:antsyferov@mirea.ru), адрес: 119454, г. Москва, проспект Вернадского, дом 78, телефон +7499 600-80-80, доб. 23043

**Фазилова Ксения Наильевна** – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва. *Область научных интересов:* системы искусственного интеллекта, эл. почта [fazilova@mirea.ru](mailto:fazilova@mirea.ru), адрес: 119454, г. Москва, проспект Вернадского, дом 78, телефон +7499 600-80-80, доб. 25092

**Муравьев Дмитрий Сергеевич** – ассистент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва. *Область научных интересов:* системы искусственного интеллекта, эл. почта [muravev@mirea.ru](mailto:muravev@mirea.ru), адрес: 119454, г. Москва, проспект Вернадского, дом 78, телефон +7499 600-80-80, доб. 25092

Статья поступила в редакцию 16.05.2025

УДК 004.891.3: 005.332.7

DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-66-78

А. В. Звягинцева, И. Ю. Ковалев  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Донецкий государственный университет»  
283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24

## АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРЕЦЕДЕНТНЫХ СОБЫТИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ДОБЫЧИ НЕФТИ И ГАЗА

A. V. Zviagintseva, I. Y. Kovalev  
Federal State Educational Institution of Higher Education «Donetsk State University»  
283001, Donetsk, University str, 24

## ANALYSIS OF CLASSIFICATION MODELS FOR RECOGNIZING PRECEDENT EVENTS IN OIL AND GAS PRODUCTION PROCESSES

Г. В. Звягинцева, І. Ю. Ковальов  
Федеральна державна бюджетна освітня установа  
вищої освіти «Донецький державний університет»  
283001, м. Донецьк, вул. Університетська, 24

## АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ КЛАСИФІКАЦІЇ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПРЕЦЕДЕНТНИХ ПОДІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ВИДОБУТКУ НАФТИ І ГАЗУ

В статье проводится сравнительное тестирование моделей классификации событий на примере датасета аварий на нефтяных скважинах с естественным притоком нефти и газа. Осуществлен анализ и обработка данных, проведена настройка гиперпараметров каждой модели, выполнено обучение моделей, проведено тестирование и рассчитаны метрики.

**Ключевые слова:** события, нефтедобыча, бинарная классификация, машинное обучение.

The article provides a comparative testing of event classification models using a dataset of accidents at oil wells with natural oil and gas inflow as an example. The data were analyzed and processed, the hyperparameters of each model were adjusted, the models were trained, tested, and metrics were calculated.

**Keywords:** events, oil production, binary classification, machine learning.

У статті проводиться порівняльне тестування моделей класифікації подій на прикладі датасету аварій на нафтових свердловинах із природним припливом нафти та газу. Здійснено аналіз та обробку даних, проведено налаштування гіперпараметрів кожної моделі, виконано навчання моделей, проведено тестування та розраховано метрики.

**Ключові слова:** події, нафтовидобуток, бінарна класифікація, машинне навчання.

Нефть играет важнейшую роль в мировой экономике, оказывая влияние на транспорт, производство электроэнергии, нефтехимическую промышленность и национальную безопасность. Главными странами по экспорту нефти в 2023 году являлись Саудовская Аравия (349,1 млн тонн), Россия (240,8 млн тонн), Канада (207,2 млн тонн), США (185 млн тонн) и Ирак (184,2 млн тонн) [1]. В соответствии с Энергетической стратегией России [2] нефтегазовая отрасль должна обеспечить стабильную добычу нефти с газовым конденсатом в объеме 525 млн т в год, увеличение коэффициента извлечения нефти до 40%, переход на новую технологическую платформу в освоении трудноизвлекаемых запасов, малых месторождений, малодебитных и высокообводненных скважин.

Нефтегазоразведка и добыча сопряжены с многочисленными проблемами, среди которых выделяются риски промышленной и экологической безопасности [3].

Аварии, такие как взрывы на платформах или разливы нефти, могут привести к серьезным экологическим катастрофам и человеческим жертвам. Своевременное распознавание опасных событий на основе данных технологического мониторинга, а также выявление прецедентов по ретроспективным данным – актуальная задача для многих отраслей промышленности.

**Цель работы** – провести сравнительный анализ моделей классификации для выявления прецедентов на примере датасета аварий на нефтяных скважинах с естественным притоком нефти и газа.

## Опасные события в нефтегазовой отрасли

В Российской Федерации за период 2004–2018 гг. произошла 251 аварийная ситуация на объектах нефтепереработки и нефтехимии. Наиболее частыми причинами произошедших аварий являлись взрыв (41%), выброс опасных веществ (20%) и пожар (39%). Общий экономический ущерб за рассмотренный период составил 20 млрд 863 млн руб. [4]. В свою очередь, за период 2019–2023 гг. на объектах нефтеперерабатывающих предприятий в России произошло 53 аварий, на которых погибло 30 человек. Основная доля аварий пришлась на пожар (58%) и взрыв (26%), оставшиеся 16% – выброс опасных веществ. Также за последние 10 лет в РФ произошло как минимум 5 аварий на нефтескважинах, которые удалось бы предотвратить, применяя системы мониторинга и системы раннего обнаружения неисправностей [5].

Раннее обнаружение и диагностика неисправностей при технологическом мониторинге помогает избежать аномального развития событий и снизить репутационные, экономические и экологические потери. Поэтому решению этой проблемы уделяется большое внимание.

В данной работе исследуются технологические аварии на примере нефтедобывающих скважин с естественным притоком нефти и газа. Такие аварии характеризуются множеством разнородных факторов и сложными причинно-следственными связями иницирующих событий.

Классификация аварий на нефтяных скважинах регламентируется национальными и международными стандартами: ГОСТ Р 53554-2009, ГОСТ Р 22.0.05-94, РД 08-492-02, API RP 59, API STD 53, ISO 10418:2003, ISO 14224:2016, IOGP Report 476, а также методическими рекомендациями [6]. Типы аварий на нефтяных скважинах делятся по характеру возникновения: внезапные (выбросы, фонтанирование), постепенные (утечки, коррозия); по масштабу последствий: локальные (в пределах скважины), объектовые (на территории месторождения), региональные (загрязнение окружающей среды), глобальные (катастрофические разливы); по виду осложнений:

газонефтеводопроявления (ГНВП), открытые фонтаны, пожары и взрывы, обрушения ствола скважины, разрушение устья; по причинам: технические (поломка оборудования), технологические (ошибки в бурении/эксплуатации), природные (землетрясения, паводки). Исходя из технологических особенностей, признаков реализации опасности аварий, тяжести последствий по трем уровням опасности возникновения, развития и эскалации аварий различают: 1-й уровень: чрезвычайно высокая аварийная опасность – авария; 2-й уровень: высокая аварийная опасность – инцидент; 3-й уровень: средняя аварийная опасность – предпосылка к инциденту [6].

В качестве события обычно рассматривается любой наблюдаемый факт, который выражается в изменении состояния объекта или системы; факт, который привлекает внимание нарушением технологических режимов. В свою очередь, в качестве прецедента изучается событие, которое имело место в прошлом и является примером и основанием для аналогичных действий в настоящем. События, являющиеся прецедентными и повлекшие за собой ряд других событий, оказывают значительное влияние на формирование опасных ситуаций. В контексте нефтегазовой добычи прецедентные события играют критическую роль. Например, к ним относятся аварии на буровых платформах, утечки нефти и газа, взрывы на газопроводах, а также сбои в работе оборудования, приводящие к остановке добычи нефти и газа. Анализ этих событий позволяет выявлять недостатки в системе, разрабатывать меры по предотвращению повторения подобных ситуаций и повышать безопасность и эффективность добычи [7].

Согласно Цюрихской схеме классификации [8] к технологическим и техническим событиям (технологическим рискам) относятся технологические ошибки и проблемы, сбои технического, программного и аппаратного обеспечения, инциденты в области промышленной, информационной и технической безопасности, аварии и т.д. В модели управления рисками организаций COSO [9] технологические события – это события, связанные с технологическими новшествами, техническим прогрессом, использованием инфраструктуры, спросом на продукты и услуги, ведущие к снижению затрат и повышению эффективности деятельности и т.д. Методы выявления и оценки событий в модели COSO являются преимущественно экспертными, используется методология деревьев событий/решений, риски и возможности просчитываются с учетом взаимосвязи событий и их вероятностей [7], [10].

Прецедентный подход [11–13] позволяет упростить процесс принятия решений в условиях временных ограничений и при наличии различного рода неопределенности в исходных данных и экспертных знаниях [14], [15]. Анализ прецедентных событий применяется для раннего определения аварийных (нештатных, непредвиденных, случайных) событий с целью предотвращения аварий и требует использования ретроспективных данных [16].

## Технология подводной добычи нефти и газа

В работе в качестве примера рассматриваются морские скважины так как они являются одним из наиболее сложных и технологически емких типов скважин, требующих высокого уровня технической и экологической безопасности. Морские скважины имеют ряд особенностей, включая высокую стоимость бурения и эксплуатации, сложность доступа к месторождениям и необходимость использования специализированных платформ [17], [18].

В процессе эксплуатации нефтяных скважин накапливается большой объем данных мониторинга, характеризующих режим работы и свойства добываемого сырья, т.к. скважина представляет собой набор датчиков, механических, пневматических и

гидравлических систем, которые могут быть частично или полностью установлены на морском дне, в скважине или на поверхности. На рисунке 1 представлена схема морской скважины с естественным притоком нефти и газа [19].



Рисунок 1 – Система подводной добычи нефти и газа: источник: [20, с. 3]

Как видно из рисунка, нефть или газ поступают из трубопровода скважины через подводную фонтанную арматуру (ПФА) и гидравлический шланг в емкости платформы под давлением, не более 103,5 МПа при температуре не выше 121 °С. Управление потоком добываемой среды обеспечивается автоматизированной ПФА, которая размещается на морском дне у устья скважины. Управление регулирующим клапаном и датчиками производится с поверхности через шлангокабель, представляющий собой комплекс электрических и волоконно-оптических кабелей, шлангов или трубопроводов, заключенных в общую оболочку.

Шлангокабель предназначен для передачи сигналов связи, электрической и гидравлической энергии, а также химических сред [21]. Внутри ПФА установлен постоянный скважинный манометр, скважинный предохранительный клапан (СПК), датчик температуры и давления. В целом описанная система представляет собой автоматизированный технологический комплекс, обеспечивающий управление по всей технологической цепочке добычи нефти и газа [21].

Опасные события и ситуации, такие как аварии или отказы оборудования, могут возникнуть в процессе добычи и требуют немедленного реагирования. Обычно на возобновление процесса требуется порядка нескольких часов или дней, что в некоторых случаях может привести к длительным простоям и значительным экономическим потерям.

## Исходные данные и их первичная обработка

В качестве датасета использован набор данных из открытого репозитория на GitHub [22], представленный девятью классами событий: 0 класс – нормальная работа; 1–8 классы – опасные события и технологические сбои.

**1 класс. Резкое увеличение содержания взвешенной воды, отложений и других примесей в продукции.** Показатель определяется как отношение между скоростью потока воды (осадков) и скоростью потока жидкости, измеренных при нормальной температуре и давлении. В течение жизненного цикла скважины показатель увеличивается за счет естественного водоносного горизонта пласта, либо из-за искусственной закачки. Внезапное увеличение показателя приводит к проблемам с переработкой нефти и к снижению коэффициента нефтеотдачи.

**2 класс. Ложное срабатывание/закрытие СПК** часто происходит без каких-либо признаков на поверхности (например, падение давления в гидравлическом приводе). Приводит к незапланированной остановке добычи.

**3 класс. Воздушная пробка.** Критический тип нестабильности. Две наиболее яркие особенности этого события – четко выраженная периодичность (около 30, 45 или 60 мин. неблагоприятного события) и интенсивность, которая обычно достаточна для обнаружения датчиками по всей производственной линии. События такого типа могут привести к повреждению оборудования скважины и/или всего добывающего комплекса.

**4 класс. Нестабильность потока.** Во время нестабильности потока одна из контролируемых переменных претерпевает соответствующие изменения, но с допустимыми амплитудами. Характеристикой, которая отличает этот тип от воздушных пробок, является отсутствие периодичности между этими изменениями. Нестабильность потока может прогрессировать до воздушной пробки.

**5 класс. Быстрое снижение производительности.** Производительность скважины с естественным притоком зависит от статического давления в резервуаре, процентного содержания основного осадка и воды, вязкости добываемой жидкости, диаметра эксплуатационной линии и т.д. Когда энергии системы становится недостаточно для преодоления потерь, поток среды замедляется или даже прекращается.

**6 класс. Резкое ограничение клапаном эксплуатационного штуцера (ЭШ).** Для корректного использования выражения «Резкое ограничение клапаном ЭШ» ограничение должно происходить с амплитудой выше установленного эталона (например, 5%) и в течение короткого времени (например, менее 10 с). Краткие сбои могут наблюдаться при ручном управлении из-за эксплуатационных проблем.

**7 класс. Образование отложений в эксплуатационном штуцере (ЭШ).** Мониторинг производственного клапана важен из-за восприимчивости к неорганическим отложениям, которые могут значительно снизить добычу нефти и газа.

**8 класс. Гидраты в производственной линии.** Кристаллогидраты могут образовываться в скважинах, приводя к полному прекращению потока.

В репозитории на GitHub доступны только небольшие фрагменты, в которых состояние переходит от обычной (нормальной) работы к переходному (предаврийному) состоянию, а затем к установившейся аномалии (аварии). Полученные фрагменты данных в формате CSV помещали в каталог, который соответствует одному из зафиксированных классов событий в морских скважинах с естественным притоком нефти и газа. Количество фрагментов (файлов) для каждого класса события представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Количество файлов для каждого класса события датасета аварий на нефтяных скважинах с естественным притоком нефти и газа

Класс события	Количество фрагментов (файлов)			
	Реальные	Симуляция	Экспертные	Всего
0 – нормальная работа	594	0	0	594
1 – резкий рост содержания взвешенной воды, отложений и др. примесей в продукции	5	114	10	129
2 – ложное срабатывание СПК	20	16	0	36
3 – серьезная закупорка	32	74	0	106
4 – нестабильность потока	344	0	0	344
5 – быстрое снижение производительности	11	439	0	450
6 – резкое ограничение клапаном ЭШ	6	215	0	221
7 – образование отложений в ЭШ	5	0	10	15
8 – гидраты в производственной линии	0	81	0	81
ИТОГО	1017	939	20	1976

Из таблицы 1 видно, что с 2014 по 2018 год по 18-ти нефтяным платформам произошло не так много аварий, поэтому сохранено всего 423 файла с аварийными состояниями. Для дальнейших исследований использовались только реальные данные.

На протяжении всего фрагмента значения показателей (данные датчиков) фиксировались каждую секунду. Объем данных в файлах зависит от продолжительности аварии и находится в диапазоне от 3 673 до 345 601 строк. Минимальное количество данных в файле наблюдается для второго класса событий, а максимальное – для седьмого. Следует отметить, что каждый из файлов имеет одинаковую структуру, её можно представить в виде таблицы 2.

Таблица 2 – Описание показателей датасета аварий на нефтяных скважинах с естественным притоком нефти и газа

№	Показатель	Описание	Ед. изм.
1	Timestamp	Временная метка	с
2	P-PDG	Давление в датчике давления на выходе из скважины	Па
3	P-TPT	Давление в датчике давления и температуры возле устья скважины	Па
4	T-TPT	Температура в датчике давления и температуры возле устья скважины	°С
5	P-MON-СКР	Давление перед затвором регулирующего клапана	Па
6	T-JUS-СКР	Температура за затвором регулирующего клапана	°С
7	P-JUS-СКGL	Давление на клапане газовой линии	Па
8	T-JUS-СКGL	Температура на клапане газовой линии	°С
9	QGL	Скорость потока газа	см <sup>3</sup> /с
10	Class	Состояние процесса: нормальное (0), предаварийное (101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108), аварийное (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)	–

Показатель, качественно характеризующий состояние процесса, разбитый на нормальное (0), предаварийное (101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108) и аварийное (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) состояния, позволяет четко выделить класс события и вовремя принять нужные меры по устранению неисправности.

Для нулевого класса в репозитории [22] представлено 9 903 750 значений измерений, для 1-ого – 9 182 499, для 2-ого – 655 017, для 3-его – 4 838 079, 4-ого – 2 462 076, 5-ого – 13 414 798, 6-ого – 5 861 368, для 7-ого и 8-ого – 2 885 548 и 2 186 920 соответственно. Таким образом, общий объем исходных данных составил 51 390 055 наблюдений.

Проведен анализ значений количественных переменных (признаков), выявлено, что большинство значений P-PDG, T-JUS-СКGL, QGL равны нулю и не несут полезную информацию, поэтому эти переменные были исключены из датасета. В результате оставлено 5 наиболее информативных признаков: P-TPT, T-TPT, P-MON-СКР, T-JUS-СКР, P-JUS-СКGL.

В данных наблюдался большой дисбаланс по количеству событий для каждого класса, поэтому значения качественной переменной Class были приведены к бинарному виду: 1 – нормальное состояние (74%), 0 – предаварийное и аварийное (26%). Датасет разбили на обучающую (80% все данных) и тестовую (20%) выборки.

## Модели классификации

На сегодняшний день для решения задачи классификации разработано большое количество алгоритмов и методов, на основе которых строятся модели классификации (табл. 3). В данной работе рассмотрены все методы из этой таблицы. Они реализованы

в открытой библиотеке Scikit-learn – одной из наиболее широко используемых библиотек Python для Data Science и Machine Learning. Библиотека содержит алгоритмы машинного обучения: классификации, прогнозирования или разбивки данных на группы, была разработана в рамках проекта Google Summer of Code в 2007 году, а сейчас активно развивается и поддерживается.

Таблица 3 – Сравнение методов классификации по разным критериям

Критерий	Группы методов
Тип обучения	<b>Без учителя (Unsupervised / Anomaly Detection):</b> One Class SVM, Local Outlier Factor, Isolation Forest <b>С учителем (Supervised):</b> Linear SVM, Logistic Regression, RBF SVM, Naive Bayes, Neural Net, QDA, AdaBoost, Nearest Neighbors, CatBoost, Histogram-Based Gradient Boosting, Decision Tree, XGBoost, Extra Trees, Random Forest, Bagging Classifier
Основная задача	<b>Обнаружение аномалий:</b> One Class SVM, Local Outlier Factor, Isolation Forest <b>Классификация:</b> Linear SVM, Logistic Regression, RBF SVM, Naive Bayes, Neural Net, QDA, AdaBoost, Nearest Neighbors, CatBoost, Histogram-Based GB, Decision Tree, XGBoost, Extra Trees, Random Forest, Bagging Classifier
Алгоритмическая группа	<b>Методы, основанные на расстоянии / ядрах:</b> SVM (Linear, RBF, One Class), Nearest Neighbors, Local Outlier Factor <b>Вероятностные методы:</b> Naive Bayes, QDA, Logistic Regression <b>Изоляция / разделение:</b> Isolation Forest <b>Методы на основе деревьев:</b> Decision Tree, Random Forest, Extra Trees, XGBoost, CatBoost, Histogram-Based GB, AdaBoost (может использовать деревья) <b>Ансамблевые методы:</b> AdaBoost, Bagging Classifier, Random Forest, Extra Trees, XGBoost, CatBoost, Histogram-Based GB <b>Нейросетевые методы:</b> Neural Net
Чувствительность к выбросам	<b>Чувствительные:</b> SVM (без регуляризации), Logistic Regression, Neural Net <b>Устойчивые:</b> Isolation Forest, Local Outlier Factor, Random Forest, Extra Trees, Bagging
Интерпретируемость	<b>Высокая:</b> Decision Tree, Logistic Regression, Naive Bayes, QDA <b>Средняя:</b> Random Forest, AdaBoost, Linear SVM <b>Низкая:</b> Neural Net, RBF SVM, CatBoost, XGBoost, Histogram-Based GB
Масштабируемость	<b>Высокая:</b> Linear SVM, Logistic Regression, Decision Tree, Random Forest, CatBoost, XGBoost, Histogram-Based GB <b>Средняя:</b> AdaBoost, Neural Net (зависит от архитектуры) <b>Низкая:</b> RBF SVM (плохо на больших данных), Nearest Neighbors (плохо в высоких размерностях)
Поддержка многоклассовой классификации	<b>Да:</b> Logistic Regression, Random Forest, Neural Net, Naive Bayes, Decision Tree, AdaBoost, XGBoost, CatBoost, Extra Trees, Bagging, RBF SVM (с OvO/OvR) <b>Нет (только бинарная / аномалии):</b> Linear SVM (без OvO/OvR), One Class SVM, Local Outlier Factor, Isolation Forest

## Используемые метрики

Для оценки качества моделей бинарной классификации будем использовать следующие метрики: *Precision* (точность), *Recall* (полнота), *F1-score* (среднее гармоническое между точностью и полнотой) и *ROC AUC* (площадь под кривой ROC) [16]. Метрика *Precision* (точность) показывает долю реальных объектов класса среди отнесённых классификатором к этому классу:

$$Precision = TP / (TP + FP), \quad (1)$$

где  $TP$  (True Positive) – количество объектов, которые модель верно отнесла к классу,  $FP$  (False Positive) – количество объектов, ошибочно отнесенные моделью к классу. Значение этой метрики должно стремиться к единице.

Метрика  $Recall$  (полнота) оценивает долю правильно классифицированных объектов данного класса:

$$Recall = TP / (TP + FN), \quad (2)$$

где  $TP$  (True Positive) – количество правильно классифицированных объектов,  $FN$  (False Negative) – количество объектов, которые модель ошибочно не отнесла к классу. Метрика показывает сколько объектов потеряно при классификации. Чем ближе значение к 1 (100%) тем лучше модель справляется с задачей распознавания.

Для общей оценки качества модели используем показатель  $F1$ -score ( $F1$ -мера) – среднее гармоническое значение между точностью и полнотой:

$$F1\text{-score} = 2 \cdot Precision \cdot Recall / (Precision + Recall), \quad (3)$$

где 1 соответствует идеальной классификации.

Часто результат работы визуализируют с помощью кривой ошибок  $ROC$  (receiver operating characteristic), иллюстрирующей производительность классификационной модели и отражающей графическое представление компромисса между чувствительностью и специфичностью при различных порогах классификации. Ось  $X$  данного графика ( $FPR$ ) – ложноположительная частота (доля ошибочно классифицированных отрицательных результатов относительно всех отрицательных результатов), а ось  $Y$  – истинноположительная частота ответов ( $Recall$ ).

$$FPR = FP / (TN + FP), \quad (4)$$

где  $FP$  (False Positive) – количество объектов, ошибочно отнесенных моделью к классу, а  $TN$  (True Negative) – количество объектов, которые модель верно не отнесла к классу.

В этом случае качество модели оценивается как  $AUC$  (Area Under the ROC Curve) – мера, которая позволяет суммировать производительность модели одним числом, измеряя площадь под кривой  $ROC$ .  $AUC$  колеблется от 0 до 1. Чем ближе значение к 1 (100%) тем лучше модель справляется с задачей распознавания.

Работа над повышением качества модели сводится к получению более высокой оценки  $ROC$ ,  $AUC$ ,  $Precision$ ,  $Recall$ , и, следовательно,  $F1$ -score. Скорость обучения моделей важна для самообновления и самообучения моделей, так как быстрое обучение приводит к более короткому времени отклика всей системы. Для оценки скорости потоковой работы и для работы на слабых устройствах необходимо знать время выполнения модели на тестовых данных.

## Сравнительный анализ моделей классификации

Для обработки и анализа данных, обучения и сравнительного анализа качества моделей классификации использовали язык программирования Python (большое количество библиотек) и Jupyter Notebook для визуализации данных. Все операции проводились в облачном сервисе Yandex DataSphere, который предназначен для анализа данных, разработки и эксплуатации моделей машинного обучения в составе платформы Yandex.Cloud. Анализ качества модели включал подбор гиперпараметров, обучение на тренировочном наборе данных, тестирование на тестовом наборе данных (на вход модели подаётся набор показателей, а модель выдаёт класс события), расчёт метрик. После обучения модель сохраняли с целью последующего использования в качестве основы для написания программного продукта.

Изучаемые модели чувствительны к гиперпараметрам, для определения их оптимальных значений использовались инструменты `RandomizedSearchCV` и `GridSearchCV`. `GridSearchCV` осуществляет полный перебор всех комбинаций параметров, этот инструмент использовался при малом количестве этих величин. Если параметров было много, то применялся `RandomizedSearchCV`, который выполняет случайный поиск по распределениям параметров. Диапазоны параметров выбирались на основе документации, экспериментов и экспертной оценки. Использовались также стандартные рекомендации из библиотеки `sklearn`. Для уменьшения переобучения под конкретный параметр данные разбивались на несколько частей, а модель обучалась и тестировалась на разных комбинациях этих частей. Полученные результаты сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты тестирования моделей классификации на примере датасета аварий на нефтяных скважинах

Модель	<i>Precision</i> (точность)	<i>Recall</i> (полнота)	<i>F1-score</i> ( <i>F-мера</i> )	<i>ROC</i> <i>AUC</i>	Время обучения, с	Время тестирования, с
One Class SVM - RBF	0,574	0,579	0,577	0,463	250,00	27,81
Local outlier factor	0,614	0,713	0,624	0,503	1,36	0,30
Isolation Forest	0,784	0,757	0,766	0,740	0,30	0,57
Linear SVM	0,786	0,426	0,392	0,598	9,11	0,01
Logistic Regression	0,549	0,683	0,600	0,475	1,13	0,01
RBF SVM	0,696	0,729	0,620	0,505	1656,54	119,50
Naive Bayes	0,652	0,705	0,661	0,539	0,02	0,00
Neural Net	0,834	0,836	0,822	0,734	14,18	0,11
QDA	0,884	0,881	0,873	0,800	0,06	0,01
AdaBoost	0,953	0,953	0,953	0,935	4,43	0,13
Nearest Neighbors	0,981	0,981	0,981	0,977	0,11	1,66
CatBoost	0,982	0,982	0,982	0,979	4,34	0,02
Histogram-Based Gradient Boosting	0,987	0,987	0,987	0,986	0,92	0,07
Decision Tree	0,988	0,988	0,988	0,985	0,64	0,00
XGBoost	0,989	0,989	0,989	0,986	10,53	0,04
Extra Trees	0,989	0,989	0,989	0,987	2,15	0,24
Random Forest	0,989	0,989	0,989	0,987	42,15	0,44
Bagging Classifier	0,990	0,990	0,990	0,988	3,47	0,02

Из таблицы видно, что при работе с датасетом аварий на нефтяных скважинах с естественным притоком нефти и газа у модели `Bagging Classifier` метрика *F1-score* достигла 99%, что является отличным результатом для выявления аномального состояния работы нефтяной скважины. Скорость обучения большинства моделей на основе ансамблей решающих деревьев (`Decision Tree`, `Extra Trees`, `Bagging Classifier`) достаточная для периодического самообновления и самообучения моделей, и скорость определения класса события на тестовых данных отличная. А вот скорость обучения моделей `SVM` и `Neural Net` низкая, а значит они плохо подходят для потоковой работы в реальных условиях.

## Выводы

В ходе проведения сравнительного анализа моделей классификации прецедентных событий на примере датасета аварий на нефтяных скважинах выполнен анализ и обработка данных, проведена настройка гиперпараметров каждой модели при помощи

инструментов GridSearchCV и RandomizedSearchCV, выполнено обучение моделей двух категорий: без учителя (One Class SVM, Local outlier factor, Isolation Forest) и с учителем (Linear SVM, RBF SVM, Naive Bayes, Neural Net, QDA, AdaBoost, Nearest Neighbors, CatBoost, Histogram-Based Gradient Boosting, Decision Tree, XGBoost, Extra Trees, Random Forest, Bagging Classifier), проведено тестирование и рассчитаны метрики *Precision* (точность), *Recall* (полнота), *F1 (F-мера)*, *ROC AUC*, время обучения, время тестирования.

Модели классификации без учителя в теории хорошо подходят для выявления аномалий в неразмеченных данных, однако на практике для классификации прецедентных событий эти модели на примере датасета аварий показали плохие результаты (40–58% правильных ответов). В большей степени это связано с тем, что нормальные экземпляры находятся слишком близко к аномалиям.

Модели классификации с учителем на основе ансамблей деревьев решений (CatBoost, Histogram-Based Gradient Boosting, Decision Tree, XGBoost, Extra Trees, Random Forest, Bagging Classifier) справились с задачей классификации отлично, показав и высокие значения метрик (примерно 99% правильных ответов), и высокую скорость обучения (4 с на переобучение всей модели) и работы (0,02 с на прогноз класса состояния).

Отметим, что алгоритм классификации на основе многослойной нейронной сети считается очень перспективным, но для задачи бинарной классификации показал всего 82% правильных ответов. Такие результаты подтверждают тот факт, что для задачи бинарной классификации лучше деревьев решений пока еще нет алгоритмов.

Полученный опыт можно использовать для обнаружения аварий в других сферах деятельности человека. В этой работе не было уделено должное внимание определению конкретных классов событий (предаварийных и аварийных), чтобы можно было рекомендовать действия в зависимости от класса неисправности. Поэтому необходимо исследовать возможности алгоритмов классификации при мультиклассовой классификации, когда наблюдается большой дисбаланс по классам. Также важно отметить, что данные являются темпоральными, и признак времени играет значительную роль при прогнозировании аварийных ситуаций с помощью алгоритмов регрессии.

## Список литературы

1. Energy Institute Statistical Review of World Energy 2024 – Energy Institute. 2024, 76 p.
2. Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2050 года. М.: Министерство энергетики РФ, 2025. 107 с.
3. Шмаль Г.И. Проблемы при разработке трудноизвлекаемых запасов нефти в России и пути их решения // Георесурсы, №18(4), 2016. – С. 256–260.
4. Калараш Р.А., Короткова Т.Г. Статистика аварий на объектах нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности // Научные труды КубГТУ, №7, 2019. – С. 314–324.
5. Уроки, извлеченные из аварий. – Текст: электронный // Ростехнадзор: [сайт]. URL <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (28.05.2025).
6. Руководство по безопасности «Методические рекомендации по классификации аварийно опасных происшествий на опасных производственных объектах нефтегазового комплекса». Утв. Приказом Ростехнадзора от 20.11.2023, №410. – 17 с.
7. Звягинцева А.В., Гучмазова Т.К., Клеменюк В.Р. Выявление взаимосвязи сложных событий на примере анализа статистических данных о чрезвычайных ситуациях // Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки, №3, 2024. – С. 45–54.
8. Alvarez G. Operational Risk Quantification: Mathematical Solutions for Analyzing Loss Data, 2001, 18 p.
9. Управление рисками организаций. Интегрированная модель. Краткое изложение. Концептуальные основы. Проектный консультативный совет COSO, 2004. – 111 с.
10. Звягинцева А.В. Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем. – М.: Спектр, 2016. – 258 с.

11. Черновалова М.В., Черненский Л.Л., Макарова М.М. Прецедентный подход для оценки влияния молний на системы уличного освещения с использованием онтологий // Программные продукты и системы, №35(4), 2022. – С. 729–736.
12. Микрюков А.А., Куулар А.В. Совершенствование процесса управления инцидентами на основе прецедентного подхода // Открытое образование. Т.25, №4, 2021. – С. 47–54.
13. Рычка О.В. Анализ эффективности усовершенствованных методов поиска и обработки аномалий для нелинейных моделей с внутренней линейностью // Проблемы искусственного интеллекта, №3(18), 2020. – С. 101–110.
14. Кривов М.В., Асламова Е.А., Асламова В.С. Система выработки стратегий управления промышленной безопасностью // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика, №59, 2022. – С. 55–65.
15. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. – М.: НУМЦ Минприроды России, 1996. – 207 с.
16. David M.W. Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation // International Journal of Machine Learning Technology. Vol.2, no 1, 2011: 37–63.
17. NOR-SOK D-010 Well integrity in drilling and well operations. 2013. Standards Norway, 224 p.
18. ГОСТ Р 54483-2021. Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Общие требования. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 45 с.
19. ГОСТ Р 53554-2009. Поиск, разведка и разработка месторождений углеводородного сырья. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2020. – 19 с.
20. R.E.V. Vargas, et al. A realistic and public dataset with rare undesirable real events in oil wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol.181, 2019, 9 p.
21. ГОСТ Р 59304-2021. Нефтяная и газовая промышленность. Системы подводной добычи. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2021. – 16 с.
22. 3W Dataset [online]. Available at: [https://github.com/ricardovargas/3w\\_dataset](https://github.com/ricardovargas/3w_dataset) (accessed May 20, 2025).

## References

1. Energy Institute Statistical Review of World Energy 2024 – Energy Institute. 2024, 76 p.
2. Jenergeticheskaja strategija Rossijskoj Federacii do 2050 goda. Moscow, Ministerstvo jenergetiki Rossijskoj Federacii, 2025, 107 p.
3. Shmal' G.I. Problemy pri razrabotke trudnoizvlekaemyh zapasov nefiti v Rossii i puti ih reshenija. *Georesursy*, no 18(4), 2016: 256–260.
4. Kalarash R.A., Korotkova T.G. Statistika avarij na ob'ektah neftehimicheskoj i neftepererabatyvajushhej promyshlennosti. *Nauchnye trudy KubGTU*, no 7, 2019: 314–324.
5. Uroki, izvlechennye iz avarij. Tekst: jelektronnyj. Rostehnadzor: [sajt]. URL <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (28.05.2025).
6. Rukovodstvo po bezopasnosti “Metodicheskie rekomendacii po klassifikacii avarijno opasnyh proisshestvij na opasnyh proizvodstvennyh ob'ektah neftegazovogo kompleksa”. Utv. Prikazom Rostehnadzora ot 20.11.2023, no 410, 17 p.
7. Zviaginceva A.V., Guchmazova T.K., Klemenjuk V.R. Vyjavlenie vzaimosvjazi slozhnyh sobytij na primere analiza statisticheskix dannyh o chrezvychajnyh situacijah. *Vestnik DonNU. Serija G: Tehnicheskie nauki*, no 3, 2024: 45–54.
8. Alvarez G. Operational Risk Quantification: Mathematical Solutions for Analyzing Loss Data, 2001, 18 p.
9. Upravlenie riskami organizacij. Integrirovannaja model'. Kratkoe izlozhenie. Konceptual'nye osnovy. Proektnyj konsul'tativnyj sovet COSO, 2004, 111 p.
10. Zviaginceva A.V. Verojatnostnye metody kompleksnoj ocenki prirodno-antropogennyh sistem. Moscow, Spekr, 2016, 258 p.
11. Черновалова М.В., Черненский Л.Л., Макарова М.М. Прецедентный подход для оценки влияния молний на системы уличного освещения с использованием онтологий. *Программные продукты и системы*, no 35(4), 2022: 729–736.
12. Микрюков А.А., Куулар А.В. Совершенствование процесса управления инцидентами на основе прецедентного подхода. *Открытое образование*. V.25, no 4, 2021: 47–54.
13. Рычка О.В. Анализ эффективности усовершенствованных методов поиска и обработки аномалий для нелинейных моделей с внутренней линейностью. *Проблемы искусственного интеллекта*, no 3(18), 2020: 101–110.
14. Кривов М.В., Асламова Е.А., Асламова В.С. Система выработки стратегий управления промышленной безопасностью. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika*, no 59, 2022: 55–65.
15. Safonov V.S., Odisharija G.Je., Shvyryjaev A.A. Teorija i praktika analiza riska v gazovoj promyshlennosti. Moscow, NUMC Minprirody Rossii, 1996, 207 p.

16. David M.W. Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation // International Journal of Machine Learning Technology. Vol.2, no 1, 2011: 37–63.
17. NORSOK D-010 Well integrity in drilling and well operations. 2013. Standards Norway, 224 p.
18. GOST R 54483-2021. Neftjanaja i gazovaja promyshlennost'. Sooruzhenija neftegazopromyslovyje morskije. Obshhie trebovanija. Moscow, Rossijskij institut standartizacii, 2021, 45 p.
19. GOST R 53554-2009. Poisk, razvedka i razrabotka mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ja. Terminy i opredelenija. Moscow, Standartinform, 2020, 19 p.
20. R.E.V. Vargas, et al. A realistic and public dataset with rare undesirable real events in oil wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. . Vol.181, 2019, 9 p.
21. GOST R 59304-2021. Neftjanaja i gazovaja promyshlennost'. Sistemy podvodnoj dobychi. Terminy i opredelenija. Moscow, Standartinform, 2021, 16 p.
22. 3W Dataset [online]. Available at: [https://github.com/ricardovargas/3w\\_dataset](https://github.com/ricardovargas/3w_dataset) (accessed May 20, 2025).

## RESUME

*A. V. Zviagintseva, I. Y. Kovalev*

*Analysis of classification models for recognizing precedent events in oil and gas production processes*

**Background:** The oil and gas industry plays a vital role in the global economy, impacting transportation, power generation, petrochemical industry, and national security. Accidents such as platform explosions or oil spills cause serious environmental disasters and human casualties. Timely recognition of hazardous events based on process monitoring data, as well as identifying precedents based on historical data, is a pressing issue for many industries. The purpose of this paper is to conduct a comparative analysis of classification models for identifying precedents using a dataset of accidents at oil wells with natural oil and gas inflows as an example.

**Materials and methods:** data analysis and processing were performed, hyperparameters of each model were tuned using the GridSearchCV and RandomizedSearchCV tools, models of two categories were trained: unsupervised (One Class SVM, Local outlier factor, Isolation Forest), supervised (Linear SVM, RBF SVM, Naive Bayes, Neural Net, QDA, AdaBoost, Nearest Neighbors, CatBoost, Histogram-Based Gradient Boosting, Decision Tree, XGBoost, Extra Trees, Random Forest, Bagging Classifier), testing was performed and the following metrics were calculated: *Precision*, *Recall*, *F1 (F-measure)*, *ROC AUC*, training time, testing time.

**Results:** unsupervised classification models are theoretically well suited for detecting anomalies in unlabeled data, but in practice, these models showed poor results (40–58% correct answers) for classifying precedent events using the accident dataset as an example. This is largely due to the fact that normal instances are too close to anomalies. Supervised classification models based on ensembles of decision trees coped with the classification task perfectly, showing approximately 99% of correct answers, high speed of training and operation.

**Conclusion:** the experience gained can be used to detect accidents in various areas of human activity. In future work, it is planned to study the capabilities of classification algorithms to determine specific classes of events (pre-accident and emergency) so that it is possible to recommend actions depending on the class of malfunction. Very often, the data is temporal, and the time sign plays a significant role in predicting emergency situations using regression algorithms, which must also be taken into account to improve the results.

## РЕЗЮМЕ

*А. В. Звягинцева, И. Ю. Ковалев*

*Анализ моделей классификации для распознавания прецедентных событий в технологических процессах добычи нефти и газа*

Нефтегазовая отрасль играет важнейшую роль в мировой экономике, оказывая влияние на транспорт, производство электроэнергии, нефтехимическую промышленность и национальную безопасность. Аварии, такие как взрывы на платформах или разливы нефти, приводят к серьезным экологическим катастрофам и человеческим жертвам. Своевременное распознавание опасных событий на основе данных технологического мониторинга, а также выявление прецедентов по ретроспективным данным – актуальная задача для многих отраслей промышленности. Цель работы – провести сравнительный анализ моделей классификации для выявления прецедентов на примере датасета аварий на нефтяных скважинах с естественным притоком нефти и газа.

Выполнен анализ и обработка данных, проведена настройка гиперпараметров каждой модели при помощи инструментов GridSearchCV и RandomizedSearchCV, выполнено обучение моделей двух категорий: без учителя (One Class SVM, Local outlier factor, Isolation Forest), с учителем (Linear SVM, RBF SVM, Naive Bayes, Neural Net, QDA, AdaBoost, Nearest Neighbors, CatBoost, Histogram-Based Gradient Boosting, Decision Tree, XGBoost, Extra Trees, Random Forest, Bagging Classifier), проведено тестирование и рассчитаны метрики *Precision* (точность), *Recall* (полнота), *F1 (F-мера)*, *ROC AUC*, время обучения, время тестирования.

Модели классификации без учителя в теории хорошо подходят для выявления аномалий в неразмеченных данных, однако на практике для классификации прецедентных событий эти модели на примере датасета аварий показали плохие результаты (40–58% правильных ответов). В большей степени это связано с тем, что нормальные экземпляры находятся слишком близко к аномалиям. Модели классификации с учителем на основе ансамблей деревьев решений справились с задачей отлично, показав примерно 99% правильных ответов, высокую скорость обучения и работы.

Полученный опыт можно использовать для обнаружения аварий в различных сферах деятельности человека. В дальнейшей работе планируется исследовать возможности алгоритмов классификации для определения конкретных классов событий (предаварийных и аварийных), чтобы можно было рекомендовать действия в зависимости от класса неисправности. Очень часто данные являются темпоральными, и признак времени играет значительную роль при прогнозировании аварийных ситуаций с помощью алгоритмов регрессии, что также необходимо учесть для улучшения результатов.

**Звягинцева Анна Викторовна** – д.т.н., доцент, профессор кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «ДонГУ», 283001, Донецк, ул. Университетская, 24, [zviagintsevaav@gmail.com](mailto:zviagintsevaav@gmail.com). *Область научных интересов:* системный анализ, событийная и комплексная оценка; безопасность и управление социально-экономическими и техногенными системами; информационно-аналитические системы; обработка и анализ данных. Число научных публикаций – более 150.

**Ковалев Илья Юрьевич** – аспирант кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «ДонГУ», 283001, Донецк, ул. Университетская, 24, [ilyakovalev2023@mail.ru](mailto:ilyakovalev2023@mail.ru). *Область научных интересов:* машинное обучение, рекомендательные системы, нейронные сети, интеллектуальный анализ данных, прогнозирование событий. Число научных публикаций – более 3.

Статья поступила в редакцию 01.06.2025

К. А. Никитенко, А. В. Звягинцева

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Донецкий государственный университет»  
283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24

## ИНТЕРПРЕТИРУЕМОСТЬ НЕЙРОСЕМАНТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ИХ ПРИМЕНЕНИИ В ПРИКЛАДНЫХ ОБЛАСТЯХ

K. A. Nikitenko, A. V. Zviagintseva

Federal State Educational Institution of Higher Education «Donetsk State University»  
283001, Donetsk, University str, 24

## INTERPRETABILITY OF NEUROSEMANTIC MODELS IN THEIR APPLICATION IN APPLIED FIELDS

К. А. Нікітенко, Г. В. Звягінцева

Федеральна державна бюджетна освітня установа  
вищої освіти «Донецький державний університет»  
283001, м. Донецьк, вул. Університетська, 24

## ИНТЕРПРЕТОВАНИСТЬ НЕЙРОСЕМАНТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ЇХНЬОМУ ЗАСТОСУВАННІ У ПРИКЛАДНИХ ОБЛАСТЯХ

В статье рассматриваются вопросы интерпретируемости нейросемантических моделей при их применении в прикладных областях, таких как медицина, право, финансы, образование и промышленная автоматизация. Обсуждаются ключевые сложности интерпретации высокоразмерных векторных представлений, контекстно-зависимых признаков и скрытых слоев трансформерных архитектур в реальных сценариях. Представлены современные встроенные и пост-хок методы объяснения, адаптированные к требованиям практических задач, а также анализ баланса между точностью и прозрачностью моделей. Статья завершается представлением перспективных направлений исследования, направленных на повышение доверия и безопасности ИИ-систем в прикладных приложениях.

**Ключевые слова:** интерпретируемость, нейросемантические модели, прикладные области, трансформер, объяснимость, практическое применение.

The article addresses the problem of interpretability in neurosemantic models used for natural language processing tasks. It discusses the main challenges related to the interpretation of high-dimensional vector representations, context-dependent features, and deep transformer architectures. The paper outlines current approaches to interpretability, including both intrinsic and post-hoc methods. Special attention is given to the trade-off between accuracy and interpretability, as well as to the prospects for further development in this area.

**Keywords:** interpretability, neurosemantic models, applied areas, transformer, explainability, practical application.

У статті розглядаються питання інтерпретованості нейросемантичних моделей при їхньому застосуванні в прикладних областях, таких як медицина, право, фінанси, освіта та промислова автоматизація. Обговорюються ключові складності інтерпретації високорозмірних векторних уявлень, контекстно-залежних ознак і прихованих шарів трансформерних архітектур в реальних сценаріях. Представлено сучасні вбудовані та пост-хок методи пояснення, які адаптовано до вимог практичних завдань, а також аналіз балансу між точністю та прозорістю моделей. Стаття завершується поданням перспективних напрямків дослідження, які спрямовано на підвищення довіри та безпеки ШІ-систем у прикладних додатках.

**Ключові слова:** інтерпретованість, нейросемантичні моделі, прикладні області, трансформер, пояснюваність, практичне застосування.

## Введение

Современные нейросемантические модели обработки естественного языка (NLP), включая архитектуры Transformer (BERT, GPT и их производные), находят активное применение не только в академических исследованиях, но и в широком спектре прикладных областей.

Нейросемантические модели – это подкласс нейросетевых архитектур, ориентированных на представление, обработку и интерпретацию семантической информации в языковых данных [1]. Сегодня применение нейросемантических моделей охватывает широкий спектр задач и отраслей: автоматическая обработка и анализ текстов, машинный перевод, извлечение знаний и построение онтологий, интеллектуальные диалоговые системы, автоматизация документооборота, цифровая гуманитаристика и анализ общественного мнения, биомедицинские исследования, образовательные технологии, правоприменение и обеспечение нормативного соответствия [2].

С учётом широкого спектра задач, в которых применяются нейросемантические модели, представляется целесообразным проанализировать их характерные особенности с точки зрения архитектуры, объёмов обучающих данных и прикладной направленности. Основные модели, используемые в различных отраслях, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Нейросемантические модели, область их применения и характеристики

Модель	Область применения	Характеристики и параметры	Обучающие данные
1	2	3	4
BERT [3]	Обработка естественного языка, лингвистика	12-24 слоёв, 110 млн параметров; двунаправленные трансформеры; высокая интерпретируемость через attention-механизмы	Книги, википедия (англоязычные тексты) (~16 гб)
GPT-2/3/4 [4]	Генерация текста, диалоговые системы	96 слоёв, 175 млрд параметров; автогенерация текста; ограниченная интерпретируемость	Интернет-корпусы, википедия, цифровые книги, статьи, журналы и т.п. (~570 гб для GPT-3)
BioBERT [5]	Биомедицина, извлечение информации из научно-медицинских текстов	Основана на BERT; дообучена на биомедицинских текстах; улучшена интерпретируемость в медицинских задачах	PubMed, PMC (биомедицинские статьи) (~18 гб)
ClinicalBERT [6]	Клинические заметки, прогнозирование госпитализаций	Основана на BERT; дообучена на клинических записях; адаптирована для медицинских терминов	MIMIC-3 (корпус с клиническими записями) (~600мб)
RuBERT [7]	Обработка русского языка, анализ тональности	12 слоёв; 180 млн параметров; дообучена на русскоязычных текстах; высокая интерпретируемость для рус. языка	Википедия, новостные статьи на русском языке (~12 гб)
T5 [7]	Универсальный NLP (перевод, математика, анализ данных)	Однонаправленный Transformer; около 11 млрд параметров	Colossal Clean Crawled Corpus (~750 гб)
DistilBERT [8]	Мобильные и быстрые приложения	Упрощённая версия BERT; до 6 слоёв, быстрее в 2 раза при сохранении 95% качества	Книги, википедия, статьи (~17 гб)
XLNet-RoBERTa [9]	Перевод, многоязычные классификации	До 550 тыс. токенов, 100 языков, большая глубина обработки	CommonCrawl (~2,5 тб)

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
SciBert [10]	Научные публикации	Дообучен на научных статьях	1,14 млн статей Semantic Scholar (~3,2 гб)
mBERT [11]	Многоязычные задачи	104 языка; 12 слоёв	Wikipedia на 104 языках (~110 гб)
Reformer [12]	Работа с длинными документами	Transformer с долгой памятью	Enwik8 и текстовые выборки (~10 гб)
LongFormer [13]	Обработка длинных текстов (более 100.000 символов)	Использованы механизмы global attention; упрощённая интерпретируемость	ArXiv, Wikipedia (~40 гб)
SqueezeBERT [14]	NLP для мобильных устройств	Свёрточные attention-блоки; низкое ожидание ответа	Wikipedia, BooksCorpus (~16 гб)
MiniLM [15]	Лёгкие NLP задачи	22 млн параметров, высокая точность, дистилляция	Wikipedia, BooksCorpus (~16 гб)
T5 1.1 [16]	Улучшенный T5	Улучшен препроцессинг, оптимизация обучения	C4 (~750 гб)
PalM [17]	Универсальный ИИ, высокая интерпретируемость	540 млрд параметров	C4, Wikipedia, BooksCorpus (~780 Гб)
YaLM (SberAI) [18]	Русскоязычные генеративные задачи	Архитектура GPT, оптимизирована под русский язык, 100 млрд параметров	Large Russian Text Courpus (~100 гб)
GShard [19]	Мультиязычные и масштабируемые системы	Обучение параллельно на 600+ языках	GShard corpus (~2 тб)
Godel [20]	Универсальный генератор диалогов	Использует T5 как основу, углублён в научные знания	WebGPT, Wizrd of Wikipedia (~60 гб)
DialoGPT [21]	Диалоговые системы с разными персонажами из игр\фильмов	GPT-2, специализирован для диалогов	Reddit conversations dataset (~147 млн. Диалогов, ~40 гб)

Как видно из табл. 1, модели демонстрируют разнообразие в архитектуре, объёмах обучающих данных и областях применения.

Проблема интерпретируемости (explainability) нейросемантических моделей приобретает особую значимость. Под интерпретируемостью в данной работе понимается способность модели предоставлять понятное объяснение своих решений, структуры и внутренних представлений (эмбеддингов), достаточное для их оценки человеком-экспертом. В отличие от традиционных алгоритмов машинного обучения (например, решающих деревьев или логистической регрессии), поведение глубоких нейросетевых моделей трудно поддаётся интуитивному осмыслению без дополнительных инструментов [22].

## Проблемы интерпретации нейросемантических моделей

Современные нейросемантические модели обладают высокой производительностью, однако их применение сопряжено с рядом затруднений, связанных с недостаточной прозрачностью и воспроизводимостью их решений. К числу ключевых проблем интерпретируемости относятся следующие [23].

1. Непрозрачность векторных представлений при анализе смысла. Пути решения: разложение (РСА, ИСА), кластеризация, выделение семантических осей.
2. Недостаточная прослеживаемость выводов для эксперта. Пути решения: трассировка активаций, использование attention, интерпретируемые промежуточные слои.
3. Контекстная изменчивость. Методы совершенствования: отслеживание семантических сдвигов, контекстные аннотации.

4. Уязвимость к небольшим искажениям. Методы совершенствования: регуляризация, симметричные архитектуры, контрастивное обучение.
5. Расхождения с логикой мышления эксперта. Пути решения: обучение с учётом пользовательских оценок, интеграция онтологических знаний.
6. Уязвимость к искажениям и атакам. Методы защиты: adversarial training, устойчивые эмбединги, фильтрация.
7. Отсутствие универсальных метрик интерпретируемости. Решение проблемы: разработка формальных метрик, стандартизация пользовательских опросов.

Нейросемантические модели, как правило, основаны на трансформерных архитектурах и обучаются на больших неразмеченных корпусах, кодируя знания в виде плотных эмбедингов. Их многослойная структура и нелинейность усложняют понимание логики вывода, что снижает прозрачность и доверие. В свою очередь, интерпретируемость позволяет обеспечивать доверие пользователей, соблюдение правовых и этических норм, отладку и верификацию модели, снижение ошибок в критически важных задачах, а также анализ и улучшение архитектур. Интерпретируемые модели обеспечивают лучшую диагностику, контроль, адаптацию и повышение надёжности при внедрении в реальные приложения.

## Современные методы интерпретации нейросемантических моделей

В условиях увеличивающейся сложности архитектур, задача интерпретации работы нейросемантических моделей становится всё более актуальной. Современные подходы к объяснению решений таких моделей принято делить на две основные группы: встроенные (intrinsic) и постобучающие (post hoc) методы [24].

Встроенные методы предполагают закладывание интерпретируемости непосредственно в архитектуру модели на этапе проектирования (Concept Bottleneck Models (CBM); модульные архитектуры; интерпретируемые эмбединги; механизмы внимания (Attention Mechanisms)).

Постобучающие методы применяются к уже обученным моделям и не требуют модификации их внутренней структуры:

- Attention-based интерпретация [25];
- LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations), метод локального приближения;
- SHAP (SHapley Additive exPlanations) – метод, использующий теорию игр [26];
- Embedding Projection – визуализация векторных представлений;
- Rationales – методы построения минимального подмножества входа, достаточного для сохранения прежнего предсказания [27].

В таблице 2 представлена сравнительная характеристика отдельных методов.

Таблица 2 – Краткий обзор актуальных решений

Метод	Интерпретируемость	Применимость к NLP	Основные ограничения
Attention maps	Умеренная	Высокая	Не всегда объясняют причинность
SHAP	Высокая	Средняя	Высокая вычислительная сложность
LIME	Средняя	Высокая	Чувствительность к параметрам
Rationales	Высокая	Высокая	Требует обучения специальных дополнительных моделей
CBM	Очень высокая	Средняя	Для обучения требуются тщательно аннотированные данные

## Глобальная и локальная интерпретируемость

Интерпретируемость моделей машинного обучения в зависимости от масштаба анализа и целей применения делится на глобальную и локальную. Глобальная интерпретируемость позволяет понять общую логику функционирования модели: какие признаки вносят наибольший вклад в предсказания, как распределяются веса или важности признаков, как модель принимает решения. Такой уровень анализа полезен, например, при проверке соответствия модели нормативным требованиям, оценке устойчивости поведения модели или при передаче результатов заинтересованным сторонам. К моделям с высокой глобальной интерпретируемостью относятся линейные классификаторы, решающие деревья и обобщённые аддитивные модели (GAM).

Локальная интерпретируемость, напротив, фокусируется на объяснении конкретного решения, принятого моделью для одного входного примера. Это позволяет ответить на вопрос: *почему модель приняла именно это решение в данной ситуации?* Такой подход особенно востребован в юридических приложениях, в онлайн-образовании. Для сложных моделей вроде трансформеров или нейросетей, методы локальной интерпретации позволяют «подсветить» важные фрагменты входных данных, например, слова, которые повлияли на классификацию текста как токсичного или нейтрального.

На практике используются следующие методы:

- LIME, позволяющий аппроксимировать поведение модели линейной моделью в окрестности конкретного примера;
- SHAP, вычисляющий вклад каждого признака в предсказание;
- Анализ внимания (attention weights) в трансформерах – визуализация какие токены модель считает более значимыми при генерации или классификации.

Таким образом, глобальная интерпретируемость необходима для построения доверия, анализа стабильности модели и объяснения её работы в целом. В свою очередь, локальная интерпретируемость критична в прикладных задачах, где каждое отдельное решение должно быть прозрачным, обоснованным и проверяемым.

## Компромисс между интерпретируемостью и точностью в прикладных задачах

При разработке нейросемантических моделей ключевой вызов заключается в поиске баланса между интерпретируемостью (способностью объяснить логику вывода) и предсказательной точностью. В разных прикладных областях оптимальные акценты могут сильно различаться:

### 1. Медицина

○ *Ситуация:* В системе поддержки принятия клинических решений важно не только вовремя обнаружить отклонение, но и обосновать выбор диагноза.

○ *Подход:* используют гибридные схемы: сначала быстрый интерпретируемый классификатор (логистическая регрессия или дерево решений) отбирает подозрительные случаи, а затем для уточнения применяют глубокую нейросеть с визуализацией активаций (Grad-CAM) или SHAP-анализом локальных вкладов признаков.

### 2. Финансовая экспертиза

○ *Ситуация:* при оценке кредитного риска или выявлении мошенничества нормативы требуют объяснять, почему клиенту отказано в кредите или почему операция помечена как подозрительная.

○ *Подход:* здесь часто комбинируют обобщённые аддитивные модели (GAM) для глобального анализа факторов риска с LIME/SHAP для локального обоснования

каждого решения. Для усиления точности к схемам иногда добавляют «чёрный ящик» (например, градиентный бустинг) и поверх него натягивают объяснитель.

### 3. Юриспруденция и комплаенс

○ *Ситуация*: Системы семантического анализа правовых документов должны обосновать, на каких положениях закона основано их заключение.

○ *Подход*: применяют модульные архитектуры, где один модуль («семантический движок») извлекает эмбединги нормативных актов, а второй – лёгкая логическая система на базе правил или решающих деревьев, формирующая объяснение на естественном языке.

### 4. Образование

○ *Ситуация*: Рекомендательные системы для онлайн-курсов предлагают студенту следующий шаг в обучении. Здесь важно понять, какие ответы или ошибки самого студента повлияли на рекомендацию.

○ *Подход*: используют **двухэтапную модель**: сначала нейросеть предсказывает потребность в повторении темы, затем к ней привязывают LIME-анализ, чтобы показать преподавателю ключевые вопросы или фрагменты теста, где у студента возникли затруднения.

### 5. Промышленность и IoT

○ *Ситуация*: При обслуживании оборудования нужно своевременно обнаружить аномалию и объяснить, какие параметры вышли за рамки нормы.

○ *Подход*: часто строят **ансамбли** из простых моделей (например, одноранговая кластеризация для обнаружения выбросов) и RNN/трансформеров для прогноза. Вершинный класс кластеризатора служит объяснителем, указывая, какие датчики «отклонились» от кластера нормального режима.

## Подходы к интерпретации нейросемантических моделей

Интерпретируемость нейросемантических моделей может быть достигнута за счёт различных стратегий, которые условно можно разделить на структурные, пост-хоковые и гибридные подходы. Ниже представлены ключевые направления, сжатое описание которых соответствует научной задаче выделения объяснимых компонентов в сложных языковых моделях [29].

1. Функционально-дистрибутивные модели (Functional Distributional Semantics). Преимущества: возможность формализованного вывода, структурной декомпозиции и семантической композиций. Ограничения: высокая вычислительная сложность и трудоёмкость построения аннотированных корпусов.
2. Методы локальной пост-хок интерпретации. Преимущества: модель-агностичность, гибкость применения. Недостатки: локальность, нестабильность при повторных запусках, сложность интерпретации в высокоразмерных пространствах.
3. Интерпретируемые архитектуры. Преимущества: высокая совместимость с современными трансформерами. Недостатки: не всегда внимание коррелирует с причинностью, а sparsity может снижать точность.
4. Методы декодирования скрытых представлений. Преимущества: высокая наглядность. Недостатки: неоднозначность декодирования и зависимость от внешних словарей.
5. Контрастивные и объясняющие задачи. Преимущества: высокая согласуемость с человеческими интерпретациями. Ограничения: необходимость дополнительной разметки и усложнение архитектуры.

## Интерпретируемость в текстовых моделях: особенности, сложности, перспективы

Интерпретируемость моделей в области NLP сталкивается с уникальными трудностями, обусловленными спецификой текстовых данных и архитектурой современных моделей. В отличие от изображений или табличных данных, текст обладает высокой степенью абстракции, неоднозначностью и вариативностью выражения одного и того же смысла, что усложняет извлечение прозрачных интерпретаций.

Особенности работы с текстовой информацией: линейность и дискретность текста; семантическая неоднозначность; привязка к языковому и культурному фону; неустойчивость к переформулировкам.

Основные сложности интерпретации: высокая размерность входных данных; неясность признаков; контекстуальность значений; глубокая архитектурная сложность.

Сегодня применяются следующие основные подходы к интерпретации: методы визуализации внимания (Attention-based); локальные методы интерпретации (LIME, SHAP); поиск рациональных обоснований (Rationale extraction); проекция эмбеддингов; построение логико-семантических цепочек.

## Перспективы и направления развития моделей

Перспективы в области интерпретируемости нейросемантических моделей связаны с развитием новых методов и инструментов, способных эффективно объяснять работу сложных архитектур. Использование методов визуализации эмбеддингов и анализа внимания в контексте моделей Transformer открывает возможности для более глубокого понимания их поведения. Например, в [31] предложен метод выравнивания эмбеддингов с семантическими признаками, что делает представления более интерпретируемыми и способствует интеграции нейросетей в семантически насыщенные системы.

Разработка таких подходов не только повысит доверие пользователей к искусственному интеллекту, но и расширит его применение в критически важных областях, таких как медицина, право и финансы. Исследователи подчеркивают, что «изучение возможностей нейросетей в решении математических задач позволяет определить пределы применимости искусственного интеллекта, а также диапазон задач, которые способствуют развитию самого ИИ» [32]. Интерпретируемость моделей станет важным шагом в определении их возможностей и ограничений.

В последние годы в области интерпретируемости нейросемантических моделей сформировались несколько многообещающих направлений, способных существенно расширить возможности объяснения поведения сложных архитектур. Ниже приведены ключевые векторы развития с указанием соответствующих источников.

1. Развитие self-interpretable архитектур [33]. Создание моделей, изначально нацеленных на объяснимость, без необходимости внешних интерпретирующих модулей. К таким подходам относятся атрибутивные, функционально-базированные, концепт-базированные, прототипные и правило-ориентированные модели, которые раскрывают логику вывода внутри самой архитектуры.
2. Механистическая интерпретируемость для безопасности ИИ [32]. Исследования, направленные на восстановление и анализ скрытых алгоритмов сложных моделей (например, трансформеров), с целью выявления потенциально опасных или неверных паттернов поведения и обеспечения надёжности систем.
3. Нейросимволическое объяснение через концепт-базированные модели [34]. Интеграция символических онтологий и концептов в распределённые эмбеддинги позволяет строить *Deep Concept Reasoner*, который генерирует интерпретируемые логические правила на основе семантических признаков.

4. Структурные *Neural Additive Models (SNAMs)* [35]. Совмещение классических статистических методов с мощностью DNN через *Structural Neural Additive Models*, где каждая компонентная функция остаётся простой и визуализируемой, обеспечивая баланс между точностью и прозрачностью.
5. Унификация и стандартизация метрик интерпретируемости [36]. Разработка общепринятых критериев оценки объяснимости (*fidelity, stability, comprehensibility*), создание бенчмарков для NLP-задач с пост-хок методами (LIME и SHAP).
6. Композиционность и причинная интерпретация в NLP [37]. Исследования в области *compositional behavior* и *causal probe-based* анализов, направленные на понимание того, как модели формируют сложные семантические конструкции и причинно-следственные связи при работе с текстом.
7. Генерация естественных объяснений [38]. Разработка подходов, при которых модели самостоятельно формируют пояснения на естественном языке, что повышает доступность интерпретации для неквалифицированных пользователей и облегчает верификацию решений.

## Выводы

В настоящей статье проведен комплексный анализ подходов к обеспечению интерпретируемости нейросемантических моделей, используемых в задачах обработки естественного языка. Рассмотрены как встроенные, так и пост-хок методы объяснения, включая attention-механизмы, проекцию эмбедингов и локальные методы интерпретации. Особое внимание уделено современным проблемам интерпретируемости: непрозрачность векторных представлений, нестабильность контекста, чувствительность к искажениям и отсутствие универсальных метрик. Выявлен компромисс между точностью и интерпретируемостью, особенно актуальный для глубинных моделей. Обоснована значимость интерпретируемости в критически важных приложениях, включая медицину, право и автономные системы. Представлены актуальные направления исследований: self-interpretable архитектуры, нейросимволические модели, генерация естественных объяснений и развитие метрик.

Таким образом, интерпретируемость следует рассматривать не как вспомогательную характеристику, а как ключевое условие надёжности и этической приемлемости ИИ-систем. Будущие исследования должны быть направлены на формализацию объяснений, унификацию критериев интерпретируемости и разработку гибридных моделей, сочетающих точность и прозрачность.

## Список литературы

1. Модели нейросетей: что такое и чем отличаются друг от друга // unisender:сайт – 2025 (24.05.2025).
2. Amodei D. Concrete Problems in AI Safety // arXiv. 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1606.06565> (accessed May 2, 2025).
3. Жарова, М. Модели BERT для машинного обучения // habr. 2024. URL: <https://habr.com/ru/companies/skillfactory/articles/862130> (28.05.2025).
4. ChatGPT 2025 // habr – 2025, URL: <https://habr.com/ru/companies/bothub/articles/887988/> (accessed May 28, 2025).
5. BioBERT – модель обработки биомедицинских текстов // neurohive – 2019, URL: <https://neurohive.io/ru/novosti/biobert/> (28.05.2025).
6. ClinicBERT // HuggingFace – 2023, URL: <https://huggingface.co/tdobrxl/ClinicBERT> (accessed May 2, 2025).
7. RuT5, RuRoBERTa, RuBERT: как мы обучили серию моделей для русского языка // habr – 2021, URL: <https://habr.com/ru/companies/sberdevices/articles/567776/> (28.05.2025).
8. DistilBERT: The compact NLP Powerhouse // opengenius – 2023, URL: <https://iq.opengenus.org/distilbert/> (accessed May 28, 2025).
9. XLM-RoBERTa // huggingface, URL: [https://huggingface.co/docs/transformers/model\\_doc/xlm-roberta](https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/xlm-roberta) (accessed May 28, 2025).

10. Beltagy L., Lo K., Cohan A., SciBERT: a pretrained language model for scientific text // arXiv. 2019, URL: [https://huggingface.co/docs/transformers/model\\_doc/xlm-roberta](https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/xlm-roberta) (accessed May 28, 2025).
11. T. Pires, E. Schlinger, D. Garrette, How multilingual is mBERT? // arxiv. 2020, URL: <https://arxiv.org/abs/2005.09093> (accessed May 28, 2025).
12. Reformer – эффективный трансформер // habr. 2020, URL: [https://habr.com/ru/articles/522622/\(29.05.2025\)](https://habr.com/ru/articles/522622/(29.05.2025)).
13. L. Beltagy, M. Peters, A. Cohan, LongFormer: the long-document Transformer // arxiv. 2020, URL: <https://arxiv.org/abs/2004.05150> (accessed May 29, 2025).
14. F. Landola, A. Shaw, R. Krishna, K. Keutzer, SqueezeBERT: what can computer vision teach NLP about efficient neural networks? // arxiv. 2020, URL: <https://arxiv.org/abs/2006.11316> (accessed May 29, 2025).
15. W. Wang, et al. MiniLM: Self Attention distillation for task-agnostic compression of pre-trained Transformers // arxiv. 2020, URL: <https://arxiv.org/abs/2002.10957> (accessed May 29, 2025).
16. Google T5 1.1 model // metatext – 2024, URL: [https://metatext.io/models/google-t5-v1\\_1-xxl](https://metatext.io/models/google-t5-v1_1-xxl) (accessed May 29, 2025).
17. Новая языковая модель Google PaLM // habr – 2022, URL: <https://habr.com/ru/news/659603/> (28.05.2025).
18. Яндекс выложил YaLM – крупнейшая GPT-подобная нейросеть // habr – 2022, URL: <https://habr.com/ru/companies/yandex/articles/672396/> (28.05.2025).
19. Lepikhin D., et al. GShard: Scaling giant models with conditional computation and automatic Sharding // arxiv. 2020, URL: <https://arxiv.org/abs/2006.16668> (accessed May 29, 2025).
20. GODEL: может ли чатбот работать в коротких беседах? Майкрософт говорит да! // analyticsindiamag 2022, URL: <https://analyticsindiamag.com/global-tech/can-a-chatbot-indulge-in-small-talks-microsoft-says-yes/> (29.05.2025).
21. DialoGPT – a state of the art large-scale pretrained response generation model // huggingface, URL: <https://huggingface.co/microsoft/DialoGPT-medium> (accessed May 29, 2025).
22. Zhao H., et al. Explainability for Large Language Models: A Survey // *arXiv preprint*. 2024. arXiv: 2309.01029. URL: <https://arxiv.org/pdf/2309.01029> (accessed May 29, 2025).
23. Räuker T., Ho A., Casper S., Hadfield-Menell D. Toward Transparent AI: A Survey on Interpreting the Inner Structures of Deep Neural Networks // arxiv. 2022, URL: <https://arxiv.org/pdf/2207.13243> (accessed May 28, 2025).
24. Xia B., Wang X., Yamasaki T., Semantic Explanation for Deep Neural Networks Using Feature Interactions // *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*. V.17, no2, 2021: 1–20. DOI: 10.1145/3474557.
25. Ермоленко Т.В., Классификация ошибок в тексте на основе глубокого обучения // *Проблемы искусственного интеллекта*. Т.3, №14, 2019. – С. 47–57.
26. Смирнов И.В., Интеллектуальный анализ текстов на основе методов разноуровневой обработки естественного языка. – М.: ФИЦ ИУ РАН, 2023. – 354 с.
27. Sun X., et al. Interpreting Deep Learning Models in Natural Language Processing: A Review // *arXiv*, 2021. arXiv:2110.10470. URL: <https://arxiv.org/pdf/2110.10470> (accessed May 29, 2025).
28. Ji Y., et al. A Comprehensive Survey on Self-Interpretable Neural Networks // *arXiv*, 2025. arXiv: 2501.15638. URL: <https://arxiv.org/pdf/2501.15638> (accessed May 2, 2025).
29. Анцыферов С.С. Методология развития интеллектуальных систем/ С.С. Анцыферов, А.С. Сигов, К.Н. Фазилова. *Проблемы искусственного интеллекта*, №2(25), 2022. – С.42–47.
30. Bereska L., Gavves S. Mechanistic Interpretability for AI Safety // *OpenReview:сайт*, URL: <https://arxiv.org/pdf/2501.15638> (accessed May 29, 2025).
31. Старченко С.Н., Рудаков А.В. Построение интерпретируемых моделей для анализа пользовательских отзывов // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2020. №3. – С. 73–83.
32. Luber M., Thielmann A., Safken B. Structural Neural Additive Models: enhanced Interpretable Machine Learning // arxiv:сайт, URL: <https://arxiv.org/pdf/2302.09275> (accessed May 2, 2025).
33. Madsen A., Reddy S., Chandar S. Post-Hoc Interpretability for Neural NLP: A Survey // *ACM Computing Surveys*, no55(155), 2022: 1–42.
34. Киселёв С.А. Архитектуры современных языковых моделей: от BERT до GPT-3 // *Системы и средства информатики*, Т.33, №2, 2023. – С. 95–114.
35. Мельникова Н.Н., Шкляр В.Л. Методы интерпретации решений нейросетевых моделей в задачах анализа текста // *Проблемы программирования*, №5, 2021. – С. 102–110.
36. Жураев И.И., Попов С.В. Интерпретируемость алгоритмов машинного обучения в задачах медицины // *Искусственный интеллект и принятие решений*, №1, 2022. – С. 54–64.
37. Чупров И.Ю., Фёдоров В.А. Интерпретируемость нейросетевых моделей: проблемы и подходы // *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика и механика*, №6, 2023. – С. 41–56.
38. Смирнов А.В., Кузнецова Е.П. Анализ композиционности в нейросетевых языковых моделях // *Вестник компьютерных и информационных технологий*, №2, 2024. – С. 58–67.

## References

1. Model neuroseteum: Chto takoe I Chem otlichayutsya drug OT druga // unisender: site – 2025 (accessed May 2, 2025).
2. Amodei D. Concrete Problems in AI Safety. // archive. 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1606.06565> (accessed May 2, 2025).
3. Jarowa M. Model BERT dlya mashinnogo obucheniya // habr. 2024. URL: <https://habr.com/ru/companies/skillfactory/articles/862130> (accessed May 28, 2025).
4. ChatGPT 2025 // habr-2025, URL: <https://habr.com/ru/companies/bothub/articles/887988/> (accessed May 28, 2025).
5. BioBERT-model obrabotki biomedisinskix tekstov // neurohive. 2019, URL: <https://neurohive.io/ru/novosti/biobert/> (accessed May 28, 2025).
6. ClinicBERT // HuggingFace-2023, URL: <https://huggingface.co/tdobrxl/ClinicBERT> (accessed May 2, 2025).
7. RuT5, RuRoBERTa, RuBERT: Kak Mi obuchili seriyu modeley dlya russkogo yazika // habr – 2021, URL: <https://habr.com/ru/companies/sberdevices/articles/567776/> (accessed May 28, 2025).
8. Distillbert: the compact NLP Powerhouse // opengenius-2023, URL: <https://iq.opengenus.org/distilbert/> (accessed May 28, 2025).
9. XLM-RoBERTa // huggingface, URL: < BR > [https://huggingface.co/docs/transformers/model\\_doc/xlm-roberta](https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/xlm-roberta) (accessed May 28, 2025).
10. Beltagy L., Lo K., Cohan A. SciBERT: a pretrained language model for scientific text // archive – 2019, URL: < br > [https://huggingface.co/docs/transformers/model\\_doc/xlm-roberta](https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/xlm-roberta) (accessed May 28, 2025).
11. T. Pires, E. Schlinger, D. Garrett, How multilingual is mBERT? // archive-2020, URL: <https://arxiv.org/abs/2005.09093> (accessed May 28, 2025).
12. Reformer-effektivniy transformer // habr. 2020, URL: <https://habr.com/ru/articles/522622/> (accessed May 29, 2025).
13. L. Beltagy, M. Peters, A. Cohan, LongFormer: the long-document Transformer // archive – 2020, URL: < BR > <https://arxiv.org/abs/2004.05150> (accessed May 29, 2025).
14. F. Landola, A. Shaw, R. Krishna, K. Keutzer, SqueezeBERT: what can computer vision teach NLP about efficient neural networks? // archive-2020, URL: <https://arxiv.org/abs/2006.11316> (accessed May 29, 2025).
15. W. Wang, et al. MiniLM: Self Attention distillation for task-agnostic compression of pre-trained Transformers // archives. 2020, URL: < BR > <https://arxiv.org/abs/2002.10957> (accessed May 29, 2025).
16. Google T5 1.1 model // metatext-2024, URL: [https://metatext.io/models/google-t5-v1\\_1-xxl](https://metatext.io/models/google-t5-v1_1-xxl) (accessed May 29, 2025).
17. Novaya yazikovaya model Google PalM // habr-2022, URL: <https://habr.com/ru/news/659603/> (accessed May 28, 2025).
18. Yandex vilojil YaLM-krupneyshaya GPT-podobnaya neuroset // habr. 2022, URL: <https://habr.com/ru/companies/yandex/articles/672396/> (accessed May 28, 2025).
19. Lepikhin D., et al. GShard: Scaling giant models with conditional computing and automatic Sharding // archive. 2020, URL: < BR > <https://arxiv.org/abs/2006.16668> (accessed May 29, 2025).
20. GODEL: mojet Lee chatbot rabotat v korotkix besedax? Mycrosoft Govorit da! // analyticsindiamag-2022, URL: <https://analyticsindiamag.com/global-tech/can-a-chatbot-indulge-in-small-talks-microsoft-says-yes/> (accessed May 29, 2025).
21. DialoGPT – a state of the art large-scale pretrained response generation model // huggingface, URL: < br > <https://huggingface.co/microsoft/DialoGPT-medium> (accessed May 29, 2025).
22. Zhao H., et al. Explainability for Large Language Models: a Survey // archive preprint. 2024. archive: 2309.01029. URL: <https://arxiv.org/pdf/2309.01029> (accessed May 29, 2025).
23. Räuber T., Ho A., Casper S., Hadfield-Menell D. Toward Transparent AI: a Survey on Interpreting the Inner Structures of Deep Neural Networks // archive: site. – 2022, URL: <https://arxiv.org/pdf/2207.13243> (accessed May 28, 2025).
24. Xia B., Wang X., Yamasaki T., Semantic exploration for Deep Neural Networks Using Feature Interactions // ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications. V.17, no 2, 2021: 1–20. DOI: 10.1145/3474557.
25. Ermolenko T.V., Classification oshibok V tekste na osnove glubokogo obucheniya // problemi iskusstvennogo intellekta. V.3, no 14, 2019: 47–57.
26. Smirnov I.V., Intellectualny analiz tekstov na osnove metodov raznourovnevoy obrabotki estestvennogo yazika. Moscow, FITS IO RAN, 2023, 354 p.

27. Sun X., et al. Interpreting Deep Learning Models in Natural Language Processing: a Review // archive, 2021. archive: 2110.10470. URL: <https://arxiv.org/pdf/2110.10470> (accessed May 29, 2025).
28. Ji Y., et al. A Comprehensive Survey on Self-Interpretable Neural Networks // archive, 2025. archive: 2501.15638. URL: <https://arxiv.org/pdf/2501.15638> (accessed May 2, 2025).
29. Antsiferov S.S. Methodology razvitiya intellektualnix system/ s.S. Antsiferov, A.S. Sigov, K.N. Fazilova. Problemi iskusstvennogo intellekta, no 2(25), 2022: 42–47.
30. Beresca L., Gavves S.. Mechanistic Interpretability for AI Safety // OpenReview: site, URL: <https://arxiv.org/pdf/2501.15638> (accessed May 29, 2025).
31. Starchenko S.N., Rudakov A.V. Postroenie interpretiruemix modeley dlya analiza polzovatel'skix otzivov // Informacionnie tehnologii I vichislitelnie system, no 3, 2020: 73–83.
32. Lubner M., Thielmann A., Safken B. Structural Neural Additive Models: enhanced Interpretable Machine Learning // archive: site, URL: <https://arxiv.org/pdf/2302.09275> (accessed May 2, 2025).
33. Madsen A., Reddy S., Chandar S. Post-Hoc Interpretability for Neural NLP: a Survey // ACM Computing Surveys, no 5(155), 2022: 1–42.
34. Kiselyov S.A. Architekturi sovremennix yazikovix modeley: OT BERT do GPT-3 // Sistemi I sredstva informatiki, V.33, no 2, 2023: 95–114.
35. Melnikova N.N., Shklyar V.L. Method interpretatsii resheniy neurosetevix modelei V zadachax analiza teksta // problemi programirovaniya, no 5, 2021: 102–110.
36. Zhuraev I.I., Popov S.V. Interpretiruemost algoritmov mashinnogo obucheniya V zadachax mediisini // iskusstvenniy intellekt I prinyatie resheniy, no 1, 2022: 54–64.
37. Chuprov I.Yu., Fyodorov V.A. Interpretiruemost neurosetevix modeley: problemi I podhodi // Vestnik Moskovskogo universiteta. Series 1: Mathematics I mechanics, no 6, 2023: 41–56.
38. Smirnov A.V., Kuznesova E.P. Analysis kompozitsionnosti v neurosetevix yazikovix modelyax // Vestnik komiternix I informacionnix tehnologiy, no 2, 2024: 58–67.

## RESUME

*K. A. Nikitenko, A. V. Zviagintseva*

### *Interpretability of Neurosemantic Models in Applied Domains*

Neurosemantic models based on deep learning and transformer architectures (e.g., BERT, GPT) are widely used in applied domains such as medicine, law, and computational linguistics. However, their complexity and opacity raise critical concerns about transparency, safety, and user trust. Interpretability is becoming a vital property for AI systems deployed in high-risk environments.

The article provides a structured review of interpretability types (global vs. local), methods (intrinsic and post-hoc), and evaluation approaches. A comparative table of modern neurosemantic models is included, presenting key features such as parameter count, domain-specific training data, and area of application. The study also discusses common interpretability issues: embedding opacity, contextual instability, lack of universal metrics, and sensitivity to input perturbations. Methodologies like attention visualization, PCA, LIME, SHAP, and symbolic grounding are reviewed and critically analyzed.

The analysis reveals a trade-off between interpretability and accuracy. While models with high precision often function as “black boxes,” interpretable models may sacrifice performance. A taxonomy of methods to overcome this trade-off is presented. Applied examples from clinical NLP (BioBERT, ClinicalBERT) and legal AI systems are discussed. The article also highlights emerging self-interpretable and neuro-symbolic models as promising solutions.

Interpretability should be considered a core requirement in neurosemantic modeling, not an optional feature. Future research should focus on developing hybrid models, integrating human-readable explanations, and standardizing interpretability benchmarks. These advances are crucial for building trustworthy, reliable AI systems in sensitive applications.

## РЕЗЮМЕ

*К. А. Никитенко, А. В. Звягинцева*  
*Интерпретируемость нейросемантических моделей*  
*при их применении в прикладных областях*

В статье исследуется проблема интерпретируемости нейросемантических моделей, получивших широкое распространение в различных прикладных сферах – от медицины и юриспруденции до информационной безопасности, цифровой лингвистики и технической диагностики. Акцент сделан на необходимость понимания внутренней логики нейросетей, особенно трансформерных архитектур (BERT, GPT, T5 и др.), в условиях их высокой точности и одновременно ограниченной прозрачности.

Представлена классификация подходов к интерпретируемости: по типу (глобальная и локальная), по способу реализации (встроенные и пост-хок методы), а также по формату выходной информации (визуализация, текстовые пояснения, атрибутивные признаки). Рассматриваются такие методы, как LIME, SHAP, attention-механизмы, PCA, embedding projection и пр.

Особое внимание уделено анализу компромисса между интерпретируемостью и точностью: приведены примеры архитектурных решений, позволяющих минимизировать потери в производительности при сохранении объяснимости. В статье представлена сводная таблица с характеристиками популярных нейросемантических моделей, данными их обучения и сферами применения. Анализируются такие модели как BioBERT, ClinicalBERT, RuBERT, T5, DistilBERT, Galactica, GatorTron, PaLM и другие, с фокусом на их способности обеспечивать интерпретируемые результаты в различных предметных областях.

Выделены ключевые проблемы интерпретации: непрозрачность векторных представлений, нестабильность интерпретаций в контексте, уязвимость к атакующим примерам, слабая согласуемость с человеческими объяснениями, отсутствие универсальных метрик. Для каждой проблемы предложены возможные пути устранения или снижения влияния.

Также рассмотрены перспективные направления развития: self-interpretable архитектуры, нейросимволические модели, использование онтологий, концепт-базированные и модульные архитектуры, генерация естественных языковых пояснений, стандартизация метрик интерпретируемости. Подчёркнута роль интерпретируемости как необходимого условия внедрения ИИ в критически значимые сферы.

**Никитенко Кирилл Андреевич** – аспирант кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «ДонГУ», 283001, Донецк, ул. Университетская, 24, n1kitenkok@yandex.ru. *Область научных интересов:* компьютерное зрение, машинное обучение, нейронные сети. Число научных публикаций – 5.

**Звягинцева Анна Викторовна** – д.т.н., доцент, профессор кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «ДонГУ», 283001, Донецк, ул. Университетская, 24, zviagintsevaav@gmail.com. *Область научных интересов:* системный анализ, событийная и комплексная оценка; безопасность и управление социально-экономическими и техногенными системами; информационно-аналитические системы; обработка и анализ данных. Число научных публикаций – более 150.

Статья поступила в редакцию 01.06.2025

УДК: 004.891+007.52+004.896+681.518+65.011.56 DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-91-104

Тимакова А.А.<sup>1</sup>, Смирягин В.А.<sup>1</sup>, Курнасов Е.В.<sup>1</sup>, Выскуб В.Г.<sup>2</sup>, Мути́н Д.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт искусственного интеллекта Российского технологического университета МИРЭА  
119454, Проспект Вернадского, д. 78, Москва, Россия

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

## СОЗДАНИЕ МИВАРНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Timakova A.A.<sup>1</sup>, Smiryagin V.A.<sup>1</sup>, Kurnasov E.V.<sup>1</sup>, Vyskub V.G.<sup>2</sup>, Mutin D.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Artificial Intelligence of the Russian Technological University MIREA  
119454, Vernadsky ave., bld. 78, Moscow, Russia

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

## CREATION OF A MIVAR EXPERT SYSTEM FOR AUTOMATION OF FREQUENCY CONVERTER SELECTION

В статье исследована проблема подбора частотных преобразователей. Обоснована актуальность работы и, в качестве решения, предложена разработка миварной экспертной системы (МЭС), задачей которой будет автоматизированный подбор частотных преобразователей на основе потребностей пользователей. Экспертная система разработана с использованием миварных технологий логического искусственного интеллекта на основе инструмента «КЭСМИ Wi!Mi Разуматор». Основой принятия решений будет служить миварная база знаний (МБЗ), для составления которой создана таблица правил для подбора частотных преобразователей. Результатом работы является МЭС для автоматизации выбора частотного преобразователя.

**Ключевые слова:** мивар, частотный преобразователь (ПЧВ), миварная экспертная система, база знаний, КЭСМИ Wi!Mi Разуматор.

The article investigated the problem of selecting frequency converters. The relevance of the work was formulated, and the development of a mivar expert system (MES) was proposed as a solution, the task of which would be the automated selection frequency converters based on user needs. The expert system has been developed using advanced technologies of logical artificial intelligence based on the tool "Wi!Mi Razumator". The basis for decision-making will be the mivar knowledge base, for which the selection sequence of frequency converters has been described. The result of the work is an MES for automating the selection of a frequency converter.

**Keywords:** mivar, frequency converter, mivar expert system, knowledge base, Wi!Mi Razumator.

## Введение

В современных экономических условиях имеет важное значение развитие научного направления «Умные производственные системы» (УМПС), которые используют методы и модели искусственного интеллекта (ИИ). Такие системы могут быть полезны и в процессе подбора частотных преобразователей. Не прекращаются научные исследования в области ИИ, направленные на развитие миварных технологий [1] логического ИИ, применение которых распространено в различных сферах науки и техники. Например, в последнее время миварные технологии использовались: для подбора тренажеров для операторов транспортных средств [2], в области технической поддержки вычислительной техники для анализа содержимого пакетных данных в локальной сети [4], выбора алгоритма консенсуса для распределенных реестров [5]; в области понимания и распознавания образов для определения деревьев с помощью анализа облаков точек [6], а также для принятия решений при выявлении падений людей [7]; в области АСУТП для их моделирования с использованием двудольных и трехдольных графов [7], а также для поддержки принятия решений по классификации критически важной информационной инфраструктуры [8]; в медицине для автоматизации диагностики открытого артериального протока и оценки слуха [9], персонального мониторинга функций внешнего дыхания [10], а также для рекомендаций по подбору полезных продуктов [11]. В области исследования этических аспектов искусственного интеллекта для оценки кредитоспособности [12]. Миварные технологии используются для автоматизированного создания миварных баз знаний (МБЗ) [13], они нашли широкое применение в обработке текстов на смысловом уровне [14], сравнительном анализе многомерных динамических векторов в режиме реального времени [15] и трехмерном моделировании [16]. Также были разработаны методы формирования миварных баз знаний, созданные когнитологами-инженерами [17]. Помимо этого, миварные технологии успешно применялись в медицине [18], а также в других специализированных сферах, например, также в уходе за растениями, включая использование технологий в теплицах [19].

С учетом этого целесообразно проводить исследования по внедрению технологий искусственного интеллекта в умные производственные системы для подбора частотных преобразователей в рамках концепции Больших Знаний [20] и расширения сфер применения миварных технологий ИИ [21].

Научная новизна работы состоит в создании новой математической модели предметной области подбора частотных преобразователей в формализме двудольных ориентированных графов миварных сетей, которые принято описывать в виде таблицы продукционных правил «Если, То». Миварная база знаний создается на основе такой таблицы правил, которая загружается в программный комплекс КЭСМИ Wi!Mi Разуматор для создания миварной экспертной системы автоматизации выбора частотного преобразователя. Таким образом, тема работы является актуальной и обладает значительным практическим потенциалом.

## Описание предметной области

Преобразователь частоты (ПЧВ) или «частотник» – это электронное устройство, задачей которого является преобразование параметров частоты электрического тока. Его применение обеспечивает непрерывное управления трансформацией входных электрических параметров в выходные.

Область применения частотных преобразователей – управление скоростью вращения синхронных и асинхронных электродвигателей. Использование частотников позволяет значительно оптимизировать производство, сократить потребление энергоресурсов и продлить срок службы подключённого к ним электрооборудования.

Принцип действия преобразователей частоты заключается в следующем: выпрямитель входного тока выпрямляет поступающий ток на диодном мосту и «сглаживает» его на конденсаторе, а генератор выходного тока формирует сигнал желаемой последовательности с необходимыми параметрами амплитуды и частоты.

В данной статье будут рассматриваться ПЧВ от производителя, у которого представлено две линейки: ПЧВ1 и ПЧВ3. По величине и типу электропитания обе линейки представлены трехфазными частотниками (напряжение питающей сети 380В), в линейке ПЧВ1 также есть однофазные модели (напряжение питающей сети 220В). ПЧВ1 используются в общепромышленном режиме, ПЧВ3 – для вентиляторно-насосной нагрузки, однако ПЧВ3 можно использовать и в общепромышленном режиме при условии выбора модификации на одну ступень номинального ряда выше рассчитанной.

При подборе ПЧВ сначала определяется серия, если это возможно: ПЧВ1 при напряжении питания 220 В, либо ПЧВ3 при необходимости использования дополнительных опций расширения или контроля обрыва ремня привода без датчика. Далее определяется номинальный ток двигателя и тип нагрузки, на основе чего рассчитывается номинальный выходной ток ПЧВ, по которому и подбирается подходящая модель частотника. Для определенных моделей клиенту необходимо сообщать дополнительную информацию, связанную с эксплуатацией устройства, что будет представлено далее.

Таким образом, для создания МЭС в области автоматизированного выбора частотного преобразователя требуется комплексная научная и практическая работа, осуществляемая специалистами различных направлений, объединёнными в единую команду. Перейдём к решению задачи разработки МЭС для автоматизации процесса выбора частотного преобразователя.

## Создание миварной базы знаний для МЭС

МБЗ служит механизмом взаимодействия между интеллектуальной системой и непосредственно самими знаниями. В рамках данной работы было составлено множество продукционных правил формата «ЕСЛИ условие – ТО событие», на основе которых должна функционировать МЭС. Всего создано 75 правил, часть которых показана в Таблице 1.

Таблица 1 — Миварная база знаний (фрагмент)

Правило	ЕСЛИ	ТО
1	напряжение питания 220 В	ПЧВ1
2	нужны дополнительные опции расширения	ПЧВ3
3	требуется контроль обрыва ремня привода без датчика	ПЧВ3
4	тип механизма вентилятор осевой (аксиальный)	К = 1
5	тип механизма вентилятор центробежный (радиальный)	К = 1
6	тип механизма вентилятор диаметального сечения (тангенциальный)	К = 1
7	тип механизма компрессор шестипоршневой	К = 1

Продолж. табл. 1

15	тип механизма насос погружной	К = 1.1
16	тип механизма станок ленточно-шлифовальный	К = 1.1
17	тип механизма компрессор четырёхпоршневой	К = 1.2
18	тип механизма куттер (измельчитель)	К = 1.2
19	тип механизма мельница	К = 1.2
30	тип механизма компрессор двухпоршневой	К = 1.35
31	тип механизма конвейер питателя	К = 1.35
32	тип механизма миксер (мешалка)	К = 1.35
35	тип механизма дробилка щековая	К = 1.7
36	тип механизма машина протяжки проволоки	К = 1.7
37	номинальный выходной ток ниже 4А	подходит ПЧВ1-К75-А или ПЧВ3-1К5-В или ПЧВ1-1К5-В
38	номинальный выходной ток ниже 7А	подходит ПЧВ1-1К5-А
39	номинальный выходной ток ниже 10А	подходит ПЧВ1-2К2-А
40	номинальный выходной ток ниже 3А	подходит ПЧВ1-К75-В или ПЧВ3-К75-В
41	номинальный выходной ток ниже 4А	подходит ПЧВ1-К75-А или ПЧВ3-1К5-В
42	номинальный выходной ток ниже 5А	подходит ПЧВ1-2К2-В
43	номинальный выходной ток ниже 9.5А	подходит ПЧВ1-4К0-В
50	номинальный выходной ток ниже 6А	подходит ПЧВ3-2К2-В
51	номинальный выходной ток ниже 32.5А	подходит ПЧВ3-15К-В
52	номинальный выходной ток ниже 60А	подходит ПЧВ3-30К-В
68	номинальный выходной ток ниже 750А	подходит ПЧВ3-400К-В
69	номинальный выходной ток ниже 810А	подходит ПЧВ3-450К-В
71	мощность ПЧВ более 90 кВт	моторные дроссели не предусмотрены
72	есть необходимость использовать тормозной резистор	указать, что продолжительность его включения составляет 10%
74	тормозной резистор модификации РБЗ	степень защиты IP54

## Решение задачи создания МЭС

Приведем только фрагмент формального описания миварной сети, загруженной в МЭС, т.к. полное описание составляет большое количество строк.

```
<model id="{0b9565dd-9cdb-4c9d-9ac0-0b39f19778fb}" shortName="Model 1"
formatXmlVersion="2.0" description="Model 1">
  <class id="{1c701c62-6dcf-44d5-9c04-9a6a04b137a2}" shortName="Подбор
ПЧВ">
  <parameters/>
  <rules>
    <rule id="0504df6b-942c-4a07-abdb-0a7249d187cc" shortName="инф_2"
relation="f3ac8c2c-d039-44cf-9463-45ae0ab3b8cd" resultId="y:1eded6fb-f2d8-4ea8-
b428-d8d585bb2a67" initId="a:5bc2bcc-d12a-4d00-8184-db966e4a1439"/>
    <rule id="3d777246-f3ef-458d-b8c8-449f2abcaae" shortName="инф_1"
relation="a4843667-5b5d-46cd-8114-6bd54d86f612" resultId="y:25dc7702-c08e-4425-
8883-431fba5789a2" initId="a:5bc2bcc-d12a-4d00-8184-db966e4a1439"/>
    <rule id="540f75d9-8484-4780-8de4-48264168d410" shortName="расчет
номинального выходного тока ПЧВ" relation="d401ac2c-fd19-4efe-8cfa-
e6de56608ede" resultId="y:0bd6cfca-ea42-4d58-b0bf-76be11085af5" initId="a:b25cd215-
a571-4c29-839b-40c3c0bfafef;b:ce5410e7-7830-4764-8bbd-c29fb8074283"/>
```

```
<rule id="56107a09-6a8a-48a1-830a-1451a80d570e" shortName="определение
ПЧВ3" relation="afbe1eac-b094-4b56-a61a-e5551ad929d9" resultId="y:5d9aa7e8-91d0-
4a11-a081-bd79748b6dea" initId="a:930e7767-4a40-4291-9807-
b40f4746cb5c;b:ab5d9513-d02c-4df9-b3ac-bebb49c1100f"/>
```

```
<rule id="75cdf272-1933-4ef5-ae6a-1a396a2dfe6b" shortName="определение
ПЧВ1" relation="bc7ec3d3-9828-4250-b3bb-cf25b70c3766" resultId="y:5d9aa7e8-91d0-
4a11-a081-bd79748b6dea" initId="a:b58053d5-8b4e-410c-87cc-1212b72ab514"/>
  if (b>600 & amp; b<=670) { c=355 } &#xd;
  if (b>670 & amp; b<=750) { c=400 } &#xd;
</relations>
</model>
```

После разработки миварной базы знаний – МБЗ, была создана миварная экспертная система – МЭС. На Рисунке 1 представлены классы и параметры.

Наименование	Тип
Подбор ПЧВ	
вход	
контроль обрыва ремня привода без датчика, да/нет	ABC
наличие доп. опций расширения, да/нет	ABC
напряжение питания, В	123
номинальный ток двигателя, А	123
тип оборудования	ABC
выход	
информ-е про мот.дрессели	ABC
информ-е про торм.резисторы	ABC
ПОДОБРАННАЯ МОДЕЛЬ ПЧВ	ABC
параметры при подборе	
коэффициент запаса	123
мощность ПЧВ, кВт	123
номинальный выходной ток ПЧВ, А	123
серия ПЧВ	ABC

Рисунок 1 — Параметры и классы

На Рисунке 2 представлены отношения, записанные на основе разработанной миварной базы знаний. Отношения задают шаблоны для правил. Используются отношения типа «Формула», «Условное отношение» и «Сложное отношение».

- > определение коэффициента запаса
- >  $y = a * b$
- > определение серии ПЧВ\_1
- > информирование\_1
- > определение мощности
- > информирование\_2
- > определение модели ПЧВ
- > определение серии ПЧВ\_2

Рисунок 2 — Отношения

На Рисунке 3 представлено правило для расчета номинального выходного тока ПЧВ. Аналогично были созданы остальные правила в соответствии с принадлежностью к определенному отношению.

расчет номиналь...

Отношение  
y=a\*b

Наименование  
расчет номинального выходного тока ПЧВ

Описание

Входные параметры

Наименование	Параметр		
1 a	номинальный ток двигателя, А	...	
2 b	коэффициент запаса	...	

Выходные параметры

Наименование	Параметр		
1 y	номинальный выходной ток ПЧВ, А	...	

Рисунок 3 — Пример правил

## Тестирование МЭС для подбора ПЧВ

После создания классов, параметров, отношений и правил система была протестирована для того, чтобы убедиться в корректности её работы.

**Тест 1.** Подбор ПЧВ для управления двигателем с номинальным током 20 А, тип нагрузки – конвейер, напряжение питания – 380 В, есть возможность подключения дополнительных плат расширения. Результат теста 1 представлен на Рисунке 4.

Проект

Тест: Подбор ПЧВ

Объект

Объект	Значение	Найти
Подбор ПЧВ		
вход		
контроль обрыва ремня привода без датчика, да/нет	нет	<input type="checkbox"/>
наличие доп. опций расширения, да/нет	да	<input type="checkbox"/>
напряжение питания, В	380	<input type="checkbox"/>
номинальный ток двигателя, А	20	<input type="checkbox"/>
тип оборудования	конвейер	<input type="checkbox"/>
выход		
информ-е про мот.дроссели		<input checked="" type="checkbox"/>
информ-е про торм.резисторы		<input checked="" type="checkbox"/>
ПОДОБРАННАЯ МОДЕЛЬ ПЧВ	ПЧВ3-11К-В	<input checked="" type="checkbox"/>
параметры при подборе		
коэффициент запаса	1.1	<input checked="" type="checkbox"/>
мощность ПЧВ, кВт	11	<input checked="" type="checkbox"/>
номинальный выходной ток ПЧВ, А	22	<input checked="" type="checkbox"/>
серия ПЧВ	ПЧВ3	<input checked="" type="checkbox"/>

Консоль

```

if (b > 750 && b <= 810) { c = 450; }
}
Результат: мощность ПЧВ, кВт = 11;

Шаг № 5
Отношение: информирование_2
Правило: инф_2
Входные параметры:
мощность ПЧВ, кВт = 11;
формула:
if (a > 30) (y = "для подключения тормозного резистора необходимо дополнительно использовать внешний тормозной модуль"); else (y = "");
Результат: информ-е про торм.резисторы = ;

Шаг № 6
Отношение: информирование_1
Правило: инф_1
Входные параметры:
мощность ПЧВ, кВт = 11;
формула:
if (a > 90) (y = "тормозные дроссели не предусмотрены"); else (y = "");
Результат: информ-е про мот.дроссели = ;

```

Рисунок 4 — Результат теста 1

Был подобран ПЧВЗ-11К-В. Коэффициент запаса был определен верно в соответствии с нагрузкой (конвейер), номинальный ток рассчитан верно в соответствии с формулой, выбрана серия ПЧВЗ, так как необходимо наличие дополнительных опций расширения. Модель ПЧВ и мощность определены верно в соответствии с имеющимися данными. Граф теста 1 представлен на Рисунке 5.

**Тест 2.** Подбор ПЧВ для управления двигателем с номинальным током 65 А, тип нагрузки – машина протяжки проволоки, напряжение питания – 380 В. Результат теста 1 представлен на Рисунке 6.

Был подобран ПЧВЗ-75К-В. Коэффициент запаса был определен верно в соответствии с нагрузкой (машина протяжки проволоки), номинальный ток рассчитан верно в соответствии с формулой. Модель ПЧВ и мощность определены верно в соответствии с имеющимися данными. Также есть информирование о том, что для подключения тормозного резистора необходимо дополнительно использовать внешний тормозной модуль, так как полученная мощность больше 30 кВт. Граф теста 2 представлен на Рисунке 7.

**Тест 3.** Подбор ПЧВ для управления двигателем с номинальным током 15 А, тип нагрузки – рубанок, напряжение питания – 380 В. Результат теста 3 представлен на Рисунке 8. В данном случае можно выбрать из двух ПЧВ: ПЧВ1-7К5-В или ПЧВЗ-7К5-В. Коэффициент запаса был определен верно в соответствии с нагрузкой (рубанок), номинальный ток рассчитан верно в соответствии с формулой. Модели ПЧВ и мощность определены верно в соответствии с имеющимися данными. Граф теста 3 представлен на Рисунке 9.

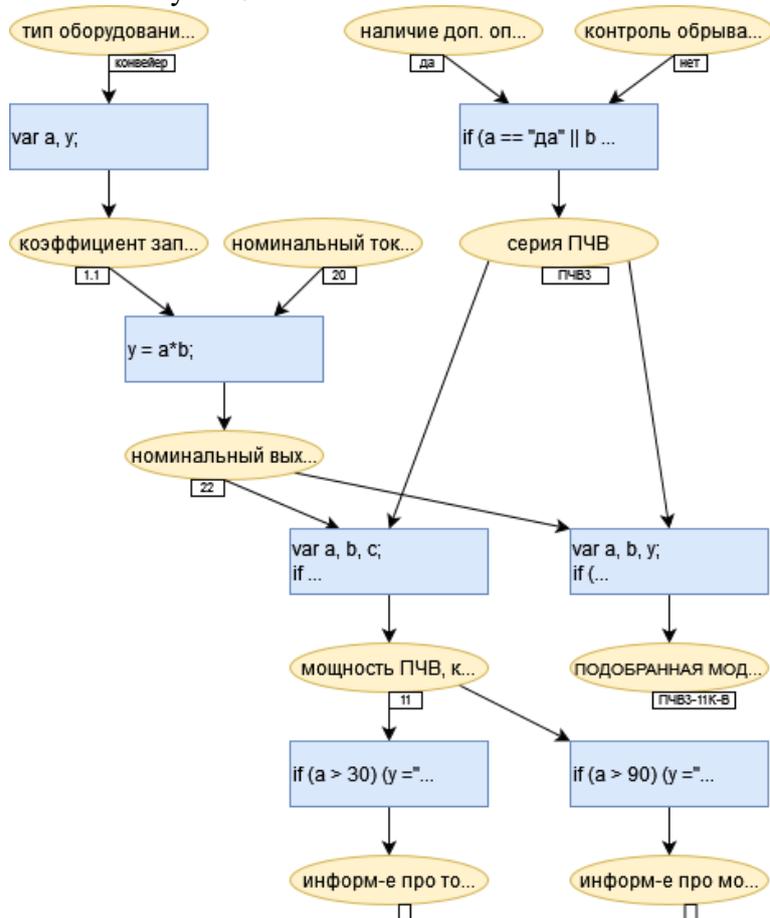


Рисунок 5 — Граф теста 1

Проект

Тест: Подбор ПЧВ

Объект

Подбор ПЧВ	Значение	Найти
вход		
контроль обрыва ремня привода без датчика, да/нет	нет	<input type="checkbox"/>
наличие доп. опций расширения, да/нет	нет	<input type="checkbox"/>
напряжение питания, В	380	<input type="checkbox"/>
номинальный ток двигателя, А	65	<input type="checkbox"/>
тип оборудования	машина протяжки	<input type="checkbox"/>
выход		
информ-е про мот.дроссели		<input checked="" type="checkbox"/>
информ-е про торм.резисторы	внешний торм	<input checked="" type="checkbox"/>
ПОДОБРАННАЯ МОДЕЛЬ ПЧВ	ПЧВ3-75К-В	<input checked="" type="checkbox"/>
параметры при подборе		
коэффициент запаса	1.7	<input checked="" type="checkbox"/>
мощность ПЧВ, кВт	75	<input checked="" type="checkbox"/>
номинальный выходной ток ПЧВ, А	110.5	<input checked="" type="checkbox"/>
серия ПЧВ		<input checked="" type="checkbox"/>

Отношение

Наименование

- определение коэффициента запаса
- коэффициент запаса
- $y = a \cdot b$
- расчет номинального выходно...
- определение серии ПЧВ\_1
- определение ПЧВ3
- определение мощности
- определение модели ПЧВ
- определение модели ПЧВ
- модель
- определение серии ПЧВ\_2
- определение ПЧВ1
- информирование\_1
- инф\_1
- информирование\_2
- инф\_2

Ошибки

Консоль

```

if (b > 750 && b <= 810) { c = 450; }
}
Результат: мощность ПЧВ, кВт = 75;

Шаг № 5
Отношение: информирование_2
Правило: инф_2
Входные параметры:
мощность ПЧВ, кВт = 75;
Формула:
if (a > 30) { y = "для подключения тормозного резистора необходимо дополнительно использовать внешний тормозной модуль"; } else { y = ""; }
Результат: информ-е про торм.резисторы=для подключения тормозного резистора необходимо дополнительно использовать внешний тормозной модуль;

Шаг № 6
Отношение: информирование_1
Правило: инф_1
Входные параметры:
мощность ПЧВ, кВт = 75;
Формула:
if (a > 90) { y = "некоторые дроссели не предусмотрены"; } else { y = ""; }
Результат: информ-е про мот.дроссели = ;

```

Рисунок 6 — Результат теста 2

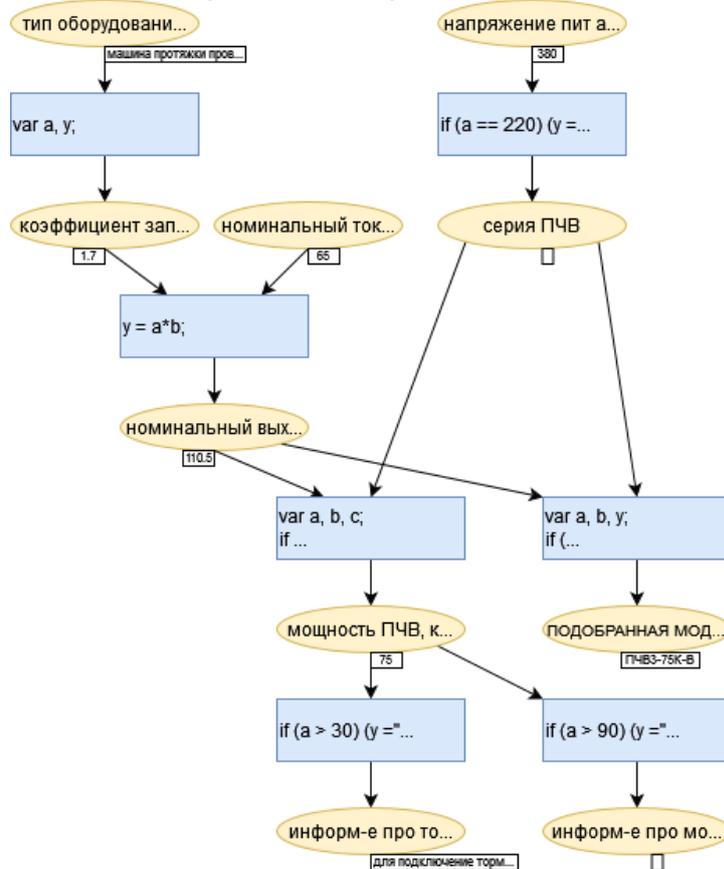


Рисунок 7 — Граф теста 2

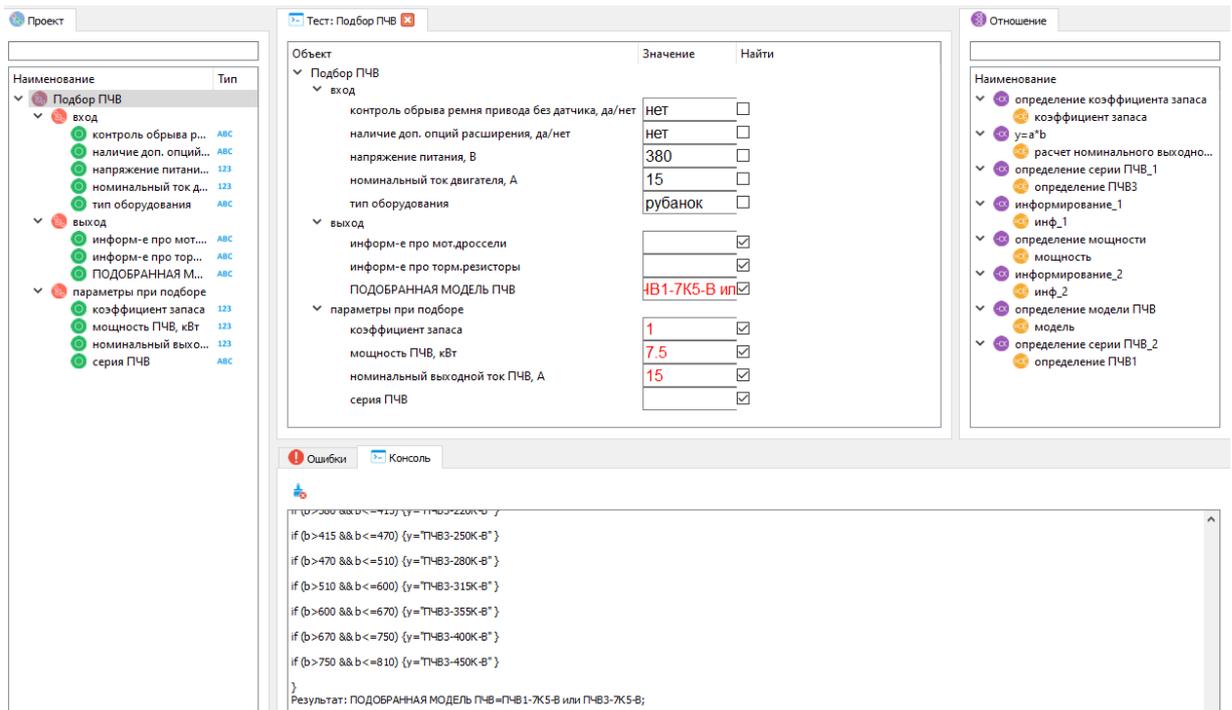


Рисунок 8 — Результат теста 3

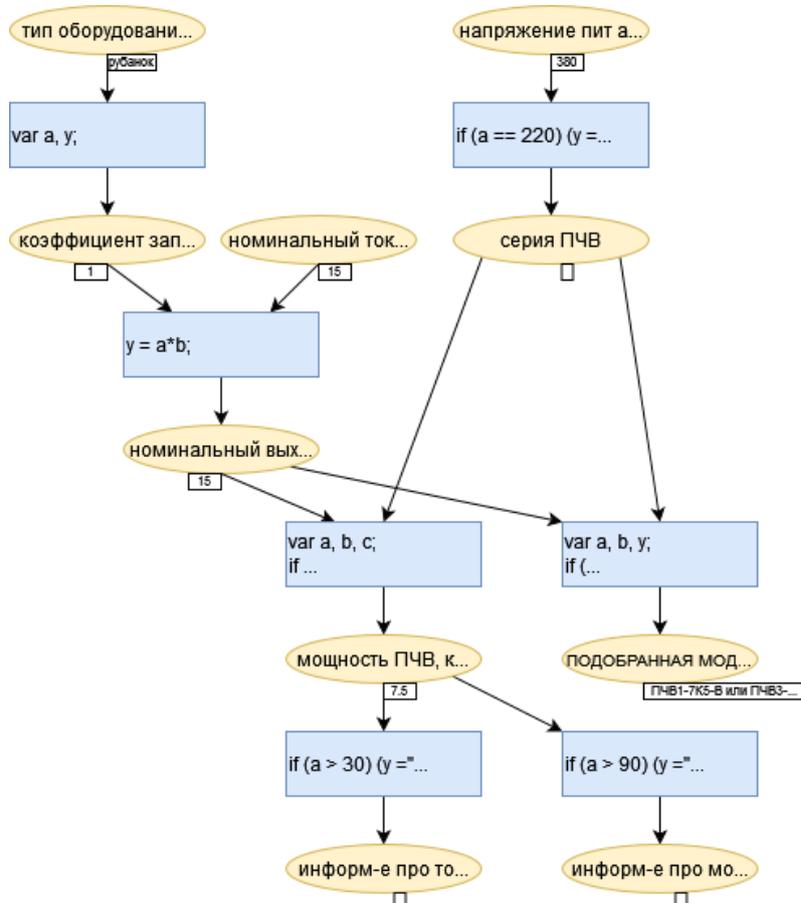


Рисунок 9 — Граф теста 3

## Заключение

Проведённое научное исследование показало, что применение миварной экспертной системы в области автоматизированного выбора частотного преобразователя является целесообразным и эффективным. Использование МЭС позволяет оптимизировать процесс подбора оборудования, снизить вероятность ошибок, повысить точность принимаемых решений и автоматизировать рутинные процессы, связанные с анализом технических параметров и требований к частотным преобразователям. Это, в свою очередь, ведёт к улучшению качества работы автоматизированных систем управления электроприводами.

Научная новизна работы состоит в создании новой математической модели предметной области подбора частотных преобразователей в формализме двудольных ориентированных графов миварных сетей, которые принято описывать в виде таблицы продукционных правил «Если, То». Миварная база знаний создается на основе такой таблицы правил, которая загружается в программный комплекс КЭСМИ Разуматор для создания миварной экспертной системы для автоматизации выбора частотного преобразователя.

В ходе реализации проекта выполнены следующие ключевые работы: проведён анализ предметной области выбора частотных преобразователей; разработано формализованное описание критериев выбора и параметров работы оборудования; создана миварная база знаний в виде табличного представления 75 правил миварной сети, описывающих процессы принятия решений в данной области; обоснован выбор традиционного для КЭСМИ Wi!Mi Разуматор версии 2.1 метода и алгоритмов решения задач автоматизированного выбора оборудования; реализована миварная сеть в программном комплексе КЭСМИ Wi!Mi Разуматор версии 2.1; проведено тестирование миварных моделей, что подтвердило корректность работы экспертной системы.

Эволюционное развитие созданной миварной экспертной системы обеспечивается её способностью к модификации: в любой момент времени возможно добавление, изменение или удаление правил, что позволяет системе адаптироваться к новым требованиям и условиям эксплуатации. В процессе выполнения проекта данный аспект был проверен на практике — по мере уточнения методик выбора частотных преобразователей в систему добавлялись новые правила, что подтверждает её гибкость и практическую ценность.

## Список литературы

1. Варламов О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. Миварное информационное пространство. М.: «Радио и связь», 2002. 286 с. EDN RWTCOP.
2. Коваленко А.В., Кондрахин С.С., Смыслов Д.О. МЭС по подбору игрового тренажера для развития навыков управления транспортным средством // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 67-72. EDN ZOHOUI.
3. Федюнев А.Ю., Нестеров Ю.Г., Правдина А.Д. МЭС для контроля микроклимата в оранжерее // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 107-112. EDN HSWYCSJ.
4. Старых Ф.А. МЭС оценки содержимого пакетных данных в локальной сети // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 102-106. EDN FKVQMO.
5. Подопрigorova Н.С., Козырев С.А., Подопрigorova С.С. и др. Разработка миварной экспертной системы для выбора алгоритма консенсуса распределённых реестров // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 4(35). С. 126-138. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-126-138. EDN AVXOTO.
6. Ovchinnikov D.A., Milevich A.A., Fonin M.A. et al. MES for improving the segmentation of trees from a point cloud // MIVAR'24, 2024. P. 293-297. EDN NOGUPU.

7. Коценко А.А. Анализ применения для АСУТП миварных сетей в формате двудольных и трехдольных графов // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 432-438. EDN GLJGZV.
8. Хабчаева А.Р., Чежегова П.А. и др. МЭС для категорирования КИИ в АСУТП // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 37-41. EDN VEAGPO.
9. Штрак А.А. Миварная база знаний для автоматизации исследования открытого артериального протока и слуха // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 548-556. EDN SXPYDW.
10. Клинова В.К. МБЗ портативного спирометра для обеспечения индивидуального контроля функций внешнего дыхания // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 557-561. EDN GHUNIK.
11. Аброчнов Е.С., Соловьева А.М., Макеев В.А. и др. МЭС подбора полезных продуктов // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 536-542. EDN MRVKXS.
12. Торжков М.С., Королева Ю.П., Балдин А.В. и др. 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 BHOQXX.
13. Абдрашитова А.Н., Вардумян А.Т., Головацкий А.Д. и др. Облачная система создания МБЗ // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 455-459. EDN LKDKGC.
14. Варламов О.О., Егоров С.А. Развитие миварных технологий смысловой обработки потоков текстовых данных // Мивар'22 : Сборник научных статей. Москва : Издательский Дом "Инфра-М", 2022. С. 194-212. EDN PBFFTZ.
15. Семенов А. А. Исследование способов подбора рекламных кампаний на основе сравнения многомерных векторов // Проблемы искусственного интеллекта. 2020. № 1(16). С. 89-104. EDN UEBEPL.
16. Chuvikov D. A. et al. 3D Modeling and 3D Objects Creation Technology Analysis for Various Intelligent Systems // International Journal of Advanced Studies. 2014. Vol. 4, No. 4. P. 16-22. DOI 10.12731/2227-930X-2014-4-3. EDN TEBOFL.
17. Владимиров А.Н., Носов А.В., Потапова Т.С. Применение многопроцессорного вычислительного кластера НИИР для распараллеливания алгоритмов в научно-технических и вычислительных задачах // Труды НИИ Радио. 2009. № 3. С. 120-123. EDN KYNLNN.
18. Chuvikov D. A. et al. A new method for creating Mivar knowledge bases in tabular-matrix form for ground intelligent vehicle control systems // Journal of Physics: Conference Series : International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering. 2021. P. 012123. DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012123. EDN SLARYS.
19. Aladin D. V. et al. Creating a "Logical intelligent plant care system" in digital agriculture based on Mivar approach // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022. P. 012004. DOI 10.1088/1755-1315/954/1/012004. EDN HODWVY.
20. Варламов О.О. Создание Больших Знаний и расширение областей применения миварных технологий логического искусственного интеллекта // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. № 4(32). С. 30-41. DOI 10.25729/ESI.2023.32.4.003. EDN THBEWN.
21. Варламов О.О. 2024: обзор областей применения миварных технологий ЛИИ // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 7-15. EDN ATMAZU.

## References

1. Varlamov O. O. Evolutionary databases and knowledge for adaptive synthesis of intelligent systems. Mivar information space. Moscow: "Radio and communication", 2002. 286 p. EDN RWTCOP.
2. Kovalenko A.V., Kondrakhin S.S., Smyslov D.O. MES on selection of game simulator for development of vehicle driving skills // MIVAR'24: Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 67-72. EDN ZOYOUI.
3. Fedyunev A.Yu., Nesterov Yu.G., Pravdina A.D. MES for monitoring the microclimate in a greenhouse // MIVAR'24: Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 107-112. EDN HSWYCI.
4. Starykh F.A. MEV for assessing the contents of packet data in a local network // MIVAR'24: Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 102-106. EDN FKVQMO.
5. Podoprigorova N.S., Kozyrev S.A., Podoprigorova S.S. et al. Development of a mivar expert system for selecting a consensus algorithm for distributed registries // Problems of Artificial Intelligence. 2024. No. 4(35). Pp. 126-138. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-126-138. EDN AVXOTO.

6. Ovchinnikov D.A., Milevich A.A., Fonin M.A. et al. MES for improving the segmentation of trees from a point cloud // MIVAR'24, 2024. pp. 293-297. EDN NOGUPU.
7. Kotsenko A.A. Analysis of application of mivar networks in the format of bipartite and tripartite graphs for automated process control systems // MIVAR'24: Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 432-438. EDN GLJGZV.
8. Khabchaeva A.R., Chezhegova P.A. et al. MES for categorizing critical information infrastructure in automated process control systems // MIVAR'24: Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 37-41. EDN VEAGPO.
9. Shtrak A.A. Mivar knowledge base for automating the study of patent ductus arteriosus and hearing // MIVAR'24: Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 548-556. EDN SXPYDW.
10. Klinova V.K. MBZ of a portable spirometer for ensuring individual monitoring of external respiration functions // MIVAR'24: Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 557-561. EDN GHUNIK.
11. Abrochnov E.S., Solovieva A.M., Makeev V.A. et al. MES for selection of useful products // MIVAR'24: Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 536-542. EDN MRBKXC.
12. Torzhkov M.S., Koroleva Yu.P., Baldin A.V. et al. Creation of a mivar expert system for ethical aspects of AI in credit scoring // Problems of Artificial Intelligence. 2024. No. 4(35). Pp. 139-150. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-139-150. EDN BHOQXX.
13. Abdrashitova A.N., Vardumyan A.T., Golovatsky A.D. et al. Cloud system for creating MBZ // MIVAR'24: Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 455-459. EDN LKDKGC.
14. Varlamov O.O., Egorov S.A. Development of mivar technologies for semantic processing of text data flows // MIVAR'22: Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2022. Pp. 194-212. EDN PBFFTZ.
15. Semenov A.A. Study of methods for selecting advertising campaigns based on multidimensional vector comparison // Problems of Artificial Intelligence. 2020. No. 1(16). Pp. 89-104. EDN UEBEPL.
16. Chuvikov D. A. et al. 3D Modeling and 3D Objects Creation Technology Analysis for Various Intelligent Systems // International Journal of Advanced Studies. 2014. Vol. 4, No. 4. P. 16-22. DOI 10.12731/2227-930X-2014-4-3. EDN TEBOFL.
17. Vladimirov A.N., Nosov A.V., Potapova T.S. Application of the multiprocessor computing cluster of the FSBI NII Radio or NIIR for parallelization of algorithms in scientific, technical and computational tasks // Proceedings of the Radio Research Institute. 2009. No 3. Pp. 120-123. EDN KYNLNN.
18. Chuvikov D. A. et al. A new method for creating Mivar knowledge bases in tabular-matrix form for ground intelligent vehicle control systems // Journal of Physics: Conference Series : International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering. 2021. P. 012123. DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012123. EDN SLARYS.
19. Aladin D. V. et al. Creating a "Logical intelligent plant care system" in digital agriculture based on Mivar approach // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022. P. 012004. DOI 10.1088/1755-1315/954/1/012004. EDN HODWVY.
20. Varlamov O.O. Creation of Great Knowledge and expansion of the fields of application of mivar technologies of logical artificial intelligence // Information and mathematical technologies in science and management. 2023. No. 4(32). Pp. 30-41. DOI 10.25729/ESI.2023.32.4.003. EDN THBEWN.
21. Varlamov O.O. 2024: Review of Application Areas of LII MIVAR Technologies // MIVAR'24: Collection of Scientific Articles. Moscow: INFRA-M, 2024. Pp. 7-15. EDN ATMAZU.

## RESUME

*Timakova A.A., Smiryagin V.A., Kurnasov E.V., Vyskub V.G., Mutin D.I.*  
**CREATION OF A MIVAR EXPERT SYSTEM FOR AUTOMATION OF  
FREQUENCY CONVERTER SELECTION**

A significant number of scientific works are devoted to the issues of research of smart automated systems. The present study for the first time substantiates the possibility of using mivar technologies of logical artificial intelligence to intellectualize the processes of selection and tuning of frequency converters. The main innovation of the work is the creation of a mivar expert system (MES) for automation of frequency converter selection in various technological processes. A new approach to the application of methods of scientific specialty "system analysis, control and information processing" in this applied area is substantiated and practically demonstrated.

The conducted scientific research has shown that the use of mivar expert system in the field of automated selection of frequency converter is reasonable and effective. The use of MES allows to optimize the process of equipment selection, reduce the probability of errors, improve the accuracy of decisions and automate routine processes associated with the analysis of technical parameters and requirements for frequency converters. This, in turn, leads to the improvement of the quality of work of automated control systems of electric drives.

In the course of the project implementation the following key works were performed: system analysis of the subject area of frequency converters selection was carried out; a formalized description of selection criteria and equipment operation parameters was developed; a mivar knowledge base was created in the form of a tabular representation of 75 mivar network rules describing decision-making processes in this area; the choice of a method and algorithms for solving problems of automated equipment selection, traditional for Wi!Mi Razumator version 2.1, was justified; a mivar network was implemented in the software Wi!Mi Razumator.

Evolutionary development of the created mivar expert system is ensured by its ability to modify: at any moment of time it is possible to add, change or delete rules, which allows the system to adapt to new requirements and operating conditions. In the course of the project implementation this aspect was tested in practice - as the methods of frequency converters selection were refined, new rules were added to the system, which confirms its flexibility and practical value.

*Тимакова А.А., Смирязин В.А., Курнасов Е.В., Выскуб В.Г., Мутин Д.И.  
Создание миварной экспертной системы для автоматизации выбора  
частотного преобразователя*

Исследованию умных автоматизированных систем посвящено значительное количество научных работ. Настоящее исследование впервые обосновывает возможность применения миварных технологий логического ИИ для интеллектуализации процессов выбора и настройки частотных преобразователей. Основным нововведением работы является создание миварной экспертной системы (МЭС) для автоматизации выбора частотного преобразователя в различных технологических процессах. Обоснован и практически продемонстрирован новый подход к применению методов научной специальности «системный анализ, управление и обработка информации» в данной прикладной области.

Проведённое научное исследование показало, что применение миварной экспертной системы в области автоматизированного выбора частотного преобразователя является целесообразным и эффективным. Использование МЭС позволяет оптимизировать процесс подбора оборудования, снизить вероятность ошибок, повысить точность принимаемых решений и автоматизировать рутинные процессы, связанные с анализом технических параметров и требований к частотным преобразователям. Это, в свою очередь, ведёт к улучшению качества работы автоматизированных систем управления электроприводами.

Научная новизна работы состоит в создании новой математической модели предметной области подбора частотных преобразователей в формализме двудольных ориентированных графов миварных сетей, которые принято описывать в виде таблицы продукционных правил «Если, То». Миварная база знаний создается на основе такой таблицы правил, которая загружается в программный комплекс КЭСМИ Разуматор для создания миварной экспертной системы для автоматизации выбора частотного преобразователя.

В ходе реализации проекта выполнены следующие ключевые работы: проведён анализ предметной области выбора частотных преобразователей; разработано формализованное описание критериев выбора и параметров работы оборудования; создана миварная база знаний в виде табличного представления 75 правил миварной сети, описывающих процессы принятия решений в данной области; обоснован выбор традиционного для КЭСМИ Wi!Mi Разуматор версии 2.1 метода и алгоритмов решения задач автоматизированного выбора оборудования; реализована миварная сеть в программном комплексе КЭСМИ Wi!Mi Разуматор версии 2.1; проведено тестирование миварных моделей, что подтвердило корректность работы экспертной системы.

Эволюционное развитие созданной миварной экспертной системы обеспечивается её способностью к модификации: в любой момент времени возможно добавление, изменение или удаление правил, что позволяет системе адаптироваться к новым требованиям и условиям эксплуатации. В процессе выполнения проекта данный аспект был проверен на практике — по мере уточнения методик выбора частотных преобразователей в систему добавлялись новые правила, что подтверждает её гибкость и практическую ценность.

**Тимакова Анастасия Анатольевна**, студент Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, [nastyia.1227@yandex.ru](mailto:nastyia.1227@yandex.ru)

Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, умные производственные системы, обработка информации, распознавание образов, кибернетика

**Смирягин Вадим Анатольевич**, студент Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, [wertu1505@yandex.ru](mailto:wertu1505@yandex.ru)

Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, умные производственные системы, обработка информации, распознавание образов, кибернетика

**Курнасов Евгений Вячеславович**, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной информатики Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, [kurnasv@mirea.ru](mailto:kurnasv@mirea.ru)

Область научных интересов: искусственный интеллект, предиктивный анализ данных, системная интеграция в области промышленной автоматизации и управления, разработка интеллектуальных систем управления технологическими объектами и процессами, умные IT-решения для промышленности.

**Выскуб Виктор Гаврилович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник АО НИИ «Вычислительных комплексов», г. Москва, Россия, [Vyskub08@mail.ru](mailto:Vyskub08@mail.ru)

Область научных интересов: научно-техническая экспертиза, оценка проектов, искусственный интеллект, экспертные системы, логика, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, принятие решений, распознавание образов, понимание естественного языка, кибернетика, автономные робототехнические комплексы.

**Мутин Денис Игоревич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник АО «НИИ «Вычислительных комплексов»», г. Москва, Россия, [mutin@niivk.ru](mailto:mutin@niivk.ru)

Область научных интересов: вычислительные комплексы, искусственный интеллект, экспертные системы, логика, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, принятие решений, распознавание образов, понимание естественного языка, кибернетика.

Статья поступила в редакцию 10.06.2025

Раздел 4  
*Section 4*

Автоматизация и управление  
технологическими процессами  
и производствами

---

*Automation and control  
of technological processes  
and production*

УДК 519.4

DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-106-115

Д. В. Бажутин, В. Н. Павлыш  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»  
283001, г. Донецк, ул. Артема, 58

## ОЦЕНКА АМПЛИТУДЫ ОСТАТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КРАНОВЫХ УСТАНОВКАХ В УСЛОВИЯХ НЕТОЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ПОДВЕСА

D. V. Bazhutin, V. N. Pavlysh  
Donetsk National Technical University  
283001, c. Donetsk, Artema str., 58

## ESTIMATION OF RESIDUAL PAYLOAD SWING AMPLITUDE FOR AUTOMATED CRANE UNITS SUBJECTED TO INACCURATE CABLE LENGTH VALUE

Работа посвящена вопросам совершенствования алгоритмов демпфирования колебаний грузов, перемещаемых мостовыми кранами, путем применения релейных диаграмм разгона электроприводов горизонтального перемещения. Приведен анализ влияния погрешностей определения длины подвеса на точность работы трехэтапного алгоритма демпфирования колебаний груза в автоматизированных системах управления движения мостовых кранов. Получены аналитические зависимости амплитуды и начальной фазы остаточных колебаний груза от относительной погрешности определения длины подвеса и параметров разгона электропривода. Корректность полученных результатов проверена методами математического моделирования

**Ключевые слова:** мостовой кран, демпфирование колебаний, трехэтапная диаграмма разгона, остаточные колебания.

The paper considers the problem of improving the payload swing elimination algorithms for gantry cranes implementing stepwise acceleration diagrams for horizontal motion electric drives. The analysis inaccurate cable length estimation effect on the accuracy of three-stage payload swing elimination algorithm for gantry crane automated motion control systems is given. The analytical dependencies of amplitude and starting phase of payload residual sway from relative cable length estimation error and electric drive acceleration parameters were derived. The correctness of obtained results was confirmed via computer simulation.

**Key words:** gantry crane, anti-swing control, three-stage acceleration diagram, residual sway, computer simulation.

## Введение

В современном производственном процессе крановые установки выполняют транспортировочные функции, являясь связующим звеном между отдельными производственными линиями и участками хранения продукции. При разработке систем автоматизированного управления движением крановых установок должное внимание необходимо уделять проблеме демпфирования колебательных движений груза, которые ухудшают энергетические показатели и надежность систем электропривода, а также могут приводить к возникновению аварийных ситуаций [1], [2].

Проблеме демпфирования колебаний груза посвящено немало научных работ. В последние годы наблюдается тенденция развития сложных алгоритмов управления, использующих адаптивные технологии [3], [4], системы нечеткой логики [5], [6], и нейронные сети. В такие алгоритмы также закладывается возможность адаптации к изменению длины подвеса [7], [8]. Одновременно с этим внимание также уделяется более простым алгоритмам, построенным на формировании компенсационной обратной связи по сигналу отклонения груза, подаваемой на вход контура регулирования скорости механизма горизонтального перемещения [9-12]. Все эти алгоритмы показывают высокую эффективность, однако требуют наличия специализированных датчиков измерения углового положения груза, установка которых на практике не всегда возможна или целесообразна.

Из существующих методов демпфирования колебаний в отдельную категорию можно выделить алгоритмы, формирующие линейное ускорение точки подвеса груза в горизонтальной плоскости в виде последовательности прямоугольных импульсов определенной длительности и амплитуды [13-18]. Преимуществом таких методов является простота их реализации и интеграции в существующие системы управления движением крановых установок. Однако, существенным их недостатком является привязка к частоте собственных колебаний груза  $\Omega_0$ , в функции которой определяются моменты изменения величины ускорения. Известно, что эта частота может быть вычислена по формуле:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{g(M+m)}{LM}} \approx \sqrt{\frac{g}{L}}, \quad (1)$$

где  $M$  – масса подвижной платформы, к которой подвешен груз;  $m$  – масса груза;  $L$  – длина подвеса;  $g$  – ускорение свободного падения. Исходя из этого выражения можно сделать вывод, что от точного определения длины подвеса будет зависеть точность расчета моментов изменения ускорения, а следовательно, и качество демпфирования колебаний груза. Исследованию эффективности алгоритмов демпфирования колебаний груза посвящены, в частности, работы [6], [7].

## Постановка задачи исследования

В [19] приведена качественная оценка амплитуды остаточных колебаний при неточном определении длины подвеса. В этой статье отмечено, что относительная погрешность вычисления длины подвеса является более точным показателем оценки качества функционирования алгоритмов демпфирования колебаний, однако более точная информация отсутствует. При этом ожидаемое значение амплитуды остаточных колебаний необходимо оценивать при разработке алгоритмов управления движением для выбора общей структуры системы автоматического управления.

Целью данной работы является вывод математических зависимостей, связывающих амплитуду остаточных колебаний груза и относительную погрешность определения длины подвеса на примере алгоритма демпфирования колебаний груза с трехэтапной диаграммой изменения ускорения.

## Вывод уравнений остаточных колебаний

С целью упрощения расчетов в качестве математической модели объекта исследований примем упрощенную линейризованную модель, полученную исходя из условия наличия быстродействующей системы автоматического регулирования скорости движения грузоподъемной платформы в виде [2], [20]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 s}{dt^2}(t) &= F(t)/(M + m), \\ L \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2}(t) + \varphi(t) &= a(t). \end{aligned} \quad (2)$$

На рисунке 1 приведены диаграммы переходных процессов в такой модели при точном определении длины подвеса и при относительной погрешности, равной 20%.

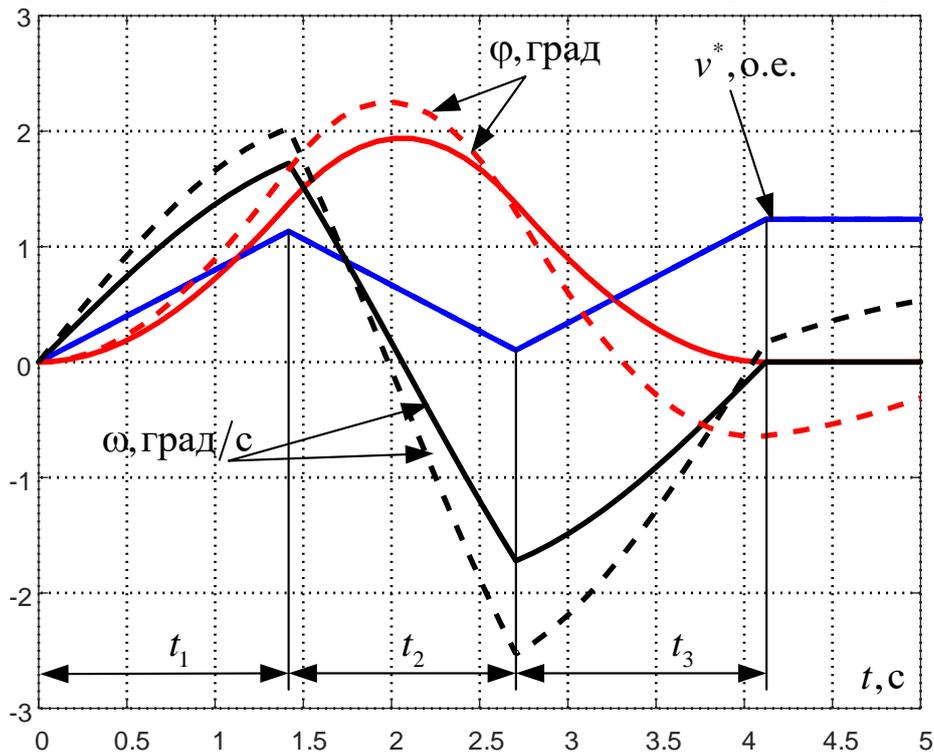


Рисунок 1 – Диаграммы переходных процессов при корректном (сплошные линии) и неточном (пунктирные линии) определении длины подвеса

Расчеты будем проводить на основании условий полного демпфирования колебаний груза, (2), выведенного из частного решения системы дифференциальных уравнений для конечной точки третьего этапа разгона в виде [9]:

$$\begin{cases} -\frac{a_3}{\Omega_0^2 L} \left( \cos(\Omega_0 t_p) - 2 \cos(\Omega_0 (t_1 + t_2)) + 2 \cos(\Omega_0 t_3) - 1 \right) = 0, \\ \frac{a_3}{\Omega_0 L} \left( \sin(\Omega_0 t_p) - 2 \sin(\Omega_0 (t_1 + t_2)) + 2 \sin(\Omega_0 t_3) \right) = 0, \\ a_3 (t_1 + t_3) - a_3 t_2 = v_3, \end{cases} \quad (3)$$

где  $t_p = t_1 + t_2 + t_3$ .

Третье уравнение данной системы определяет конечное значение линейной скорости движения грузоподъемной платформы. В рамках данного исследования это значение не будем учитывать, т.к. оно не оказывает влияния на процесс демпфирования колебаний и не содержит  $\Omega_0$ .

Первое и второе уравнения данной системы описывают, соответственно, поведение угла отклонения груза от вертикали  $\varphi$  и его угловой скорости  $\omega$ . Анализируя численные значения компонент этих уравнений при различных значениях параметров диаграммы разгона можно сделать вывод о величине остаточных колебаний. В случае, если фактическое значение длины подвеса отличается от расчетного, угол отклонения груза от вертикали будет изменяться по формуле:

$$\varphi(t) = \frac{\omega_k}{\Omega_0} \sin(\Omega_0 t) + \varphi_k \cos(\Omega_0 t) = A_{\text{ост}} \sin(\Omega_0 t + \theta_{\text{ост}}), \quad (4)$$

где  $\omega_k$  и  $\varphi_k$  – значения угловой скорости груза и угла его отклонения в конечный момент работы алгоритма демпфирования колебаний,  $A_{\text{ост}}$  – амплитуда остаточных колебаний,  $\theta_{\text{ост}}$  – угловое смещение при остаточных колебаниях. Таким образом, оценив значения  $\omega_k$  и  $\varphi_k$ , можно вычислить амплитуду остаточных колебаний.

## Оценка амплитуды остаточных колебаний

Для определения длительности каждого из интервалов  $t_i$  необходимо решить следующее алгебраическое уравнение итерационными методами относительно переменной  $\tau$ , являющейся косвенной оценкой длительности переходных процессов:

$$\frac{v_3}{a_3} = \tau - 4 \arcsin \left( \frac{1}{2} \sin \left( \frac{\tau}{2} \right) \right). \quad (5)$$

Искомые значения  $t_i$  вычисляются из выражений:

$$\Omega_0 t_1 = \Omega_0 t_3 = \frac{\tau}{2} - \arcsin \left( \frac{1}{2} \sin \left( \frac{\tau}{2} \right) \right), \quad (6)$$

$$\Omega_0 t_2 = 2 \arcsin \left( \frac{1}{2} \sin \left( \frac{\tau}{2} \right) \right). \quad (7)$$

Анализируя выражения (5)-(7) можно сделать следующие выводы:

1. Поскольку круговая частота собственных колебаний груза  $\Omega_0$  находится в левой части выражений (6) и (7) и отсутствует в выражении (5), расчетные длительности интервалов диаграммы разгона при различных значениях  $\Omega_0$ , выраженные в секундах, будут отличаться, однако соответствующие им фазы гармонических составляющих в радианах будут совпадать.

2. Форма диаграммы разгона и соотношение длительностей отдельных этапов диаграммы зависит от минимального времени разгона электропривода без учета необходимости демпфирования колебаний  $t_{\min}$ :

$$t_{\min} = v_3 / a_3. \quad (8)$$

Результаты моделирования свидетельствуют о корректности обоих утверждений. В таком случае оценку амплитуды остаточных колебаний можно проводить в функции одного параметра. Поскольку аналитически оценить изменение значений тригонометрических функций затруднительно, эту задачу будем решать численными методами. На рисунке 2 приведены зависимости параметров  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , полученных умножением значений  $t_1$  и  $t_2$  соответственно на круговую частоту собственных колебаний, от времени  $t_{\min}$ .

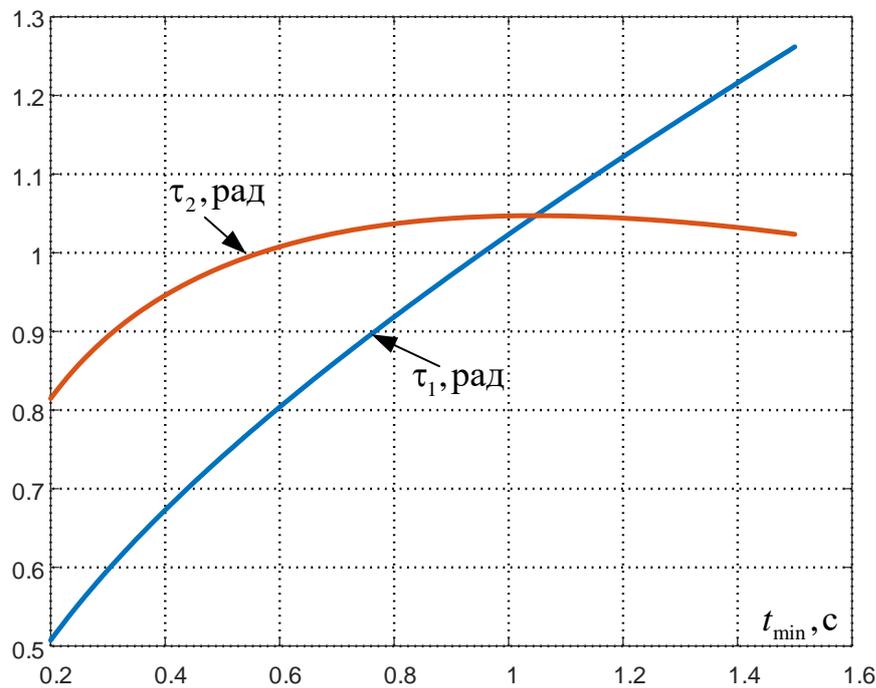


Рисунок 2 – Зависимости параметров  $\tau_1$  и  $\tau_2$  от времени  $t_{\min}$

С учетом того, что  $\tau_1 = \tau_3$ , перепишем первые два уравнения системы (3) в виде:

$$\begin{cases} -\frac{a_3}{\Omega_0^2 L} (\cos(2\tau_1 + \tau_2) - 2\cos(\tau_1 + \tau_2) + 2\cos(\tau_1) - 1) = 0, \\ \frac{a_3}{\Omega_0 L} (\sin(2\tau_1 + \tau_2) - 2\sin(\tau_1 + \tau_2) + 2\sin(\tau_1)) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

С учетом того, что моменты переключения ускорения рассчитываются для одного значения длины подвеса, которой соответствует круговая частота колебаний груза  $\Omega_{0p}$ , а при моделировании работы системы фактическое значение длины подвеса соответствует круговой частоте  $\Omega_{0ф}$ , выполним пересчет фазовых переменных  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в системе (9). Также обозначим результат вычислений первого из уравнений системы как  $\varphi_k$ , а второго –  $\omega_k$ . В результате получим следующие выражения для расчета

конечных значений угла и угловой скорости в конечный момент времени работы алгоритма демпфирования колебаний груза:

$$\varphi_k = -\frac{a_3}{\Omega_0^2 L} \left( \cos \left( (2\tau_1 + \tau_2) \frac{\Omega_{0\phi}}{\Omega_{0p}} \right) - 2 \cos \left( (\tau_1 + \tau_2) \frac{\Omega_{0\phi}}{\Omega_{0p}} \right) + 2 \cos \left( \tau_1 \frac{\Omega_{0\phi}}{\Omega_{0p}} \right) - 1 \right), \quad (10)$$

$$\omega_k = \frac{a_3}{\Omega_0 L} \left( \sin \left( (2\tau_1 + \tau_2) \frac{\Omega_{0\phi}}{\Omega_{0p}} \right) - 2 \sin \left( (\tau_1 + \tau_2) \frac{\Omega_{0\phi}}{\Omega_{0p}} \right) + 2 \sin \left( \tau_1 \frac{\Omega_{0\phi}}{\Omega_{0p}} \right) \right). \quad (11)$$

По завершении работы алгоритма демпфирования колебаний угол отклонения груза от вертикали будет изменяться в соответствии с выражением (4), для которого параметры можно вычислить следующим образом:

$$A_{\text{ост}} = \sqrt{\varphi_k^2 + \left( \frac{\omega_k}{\Omega_{0\phi}} \right)^2}, \quad (12)$$

$$\theta_{\text{ост}} = \arctan \left( \frac{\varphi_k \Omega_{0\phi}}{\omega_k} \right). \quad (13)$$

Для проверки корректности выполненных расчетов выполним моделирование исследуемой системы при фактической длине подвеса  $L_\phi = 15$  м при настройке алгоритма демпфирования колебаний на значение  $L_p = 10$  м при минимальном времени разгона привода  $t_{\min} = 1.25$  с. Результаты моделирования приведены на рисунке 3.

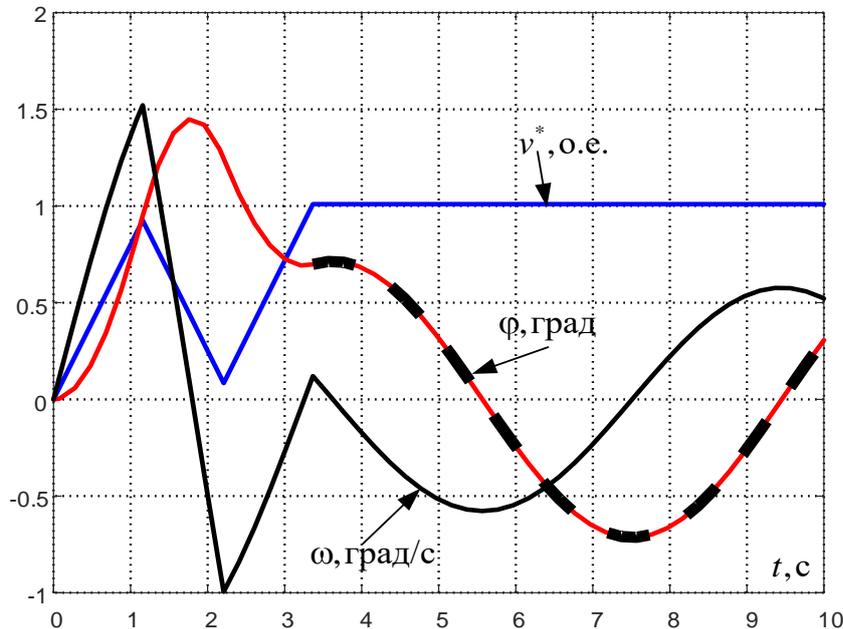


Рисунок 3 – Результаты моделирования процесса демпфирования колебаний при ошибочном определении длины подвеса с расчетом кривой остаточных колебаний груза (пунктирная линия)

На данном рисунке черным пунктиром обозначена расчетная кривая изменения угла отклонения груза от вертикали в режиме остаточных колебаний. Из графика видно, что данная кривая полностью совпадает с графиком угла отклонения груза, полученным из модели, что свидетельствует о корректности выполненных расчетов.

Используя приведенную методику, можно оценить, насколько существенной будет амплитуда остаточных колебаний груза при известной погрешности оценки длины подвеса.

## Выводы

Для оценки амплитуды остаточных колебаний при использовании трехэтапных диаграмм разгона электроприводов механизмов горизонтального перемещения грузов можно использовать частное решение дифференциального уравнения колебательного движения груза. Приведенная методика дает точный результат только для упрощенной модели, в которой не учитывается динамика механизмов, однако, как показывают предыдущие исследования, при синтезе быстродействующей системы автоматического регулирования скорости погрешность расчетов не превышает 2%. Следовательно, рассмотренная в рамках данной статьи методика может использоваться для решения практических задач при автоматизации процессов перемещения крановых установок.

## Список литературы

1. Nguyen V.C. An integrated solution for 3D overhead cranes: Time-optimal motion planning, obstacle avoidance, and anti-swing / V.C. Nguyen et. al. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 59, 2024 22 P.
2. Buch A. *Optimale Bewegungssteuerung von schwingungsfähigen mechatronischen Systemen mit zwei Freiheitsgraden am Beispiel eines Krans mit Pendelnder Last und elastischer Mechanik. Dissertation* [Dr.-Ing]. Magdeburg, 1999. - 250 p.
3. A. A. M. Fadlalla and M. Hassan, "Dynamic Modeling and Feedback Linearization Control of a 3-D Overhead Gantry Crane System," 2021 *IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, Toronto, ON, Canada, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422566.
4. W. Liu, W. Yao, R. Chi and C. Mu, "Anti-Sway Control for Bulk Terminal Gantry Cranes Based on MFAC," 2023 *IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)*, Xiangtan, China, 2023, pp. 78-82, doi: 10.1109/DDCLS58216.2023.10165880.
5. H. Budiarto, V. T. Widyaningrum, A. Dafid, A. Kusairi and A. S. Romadhon, "Speed Control System in Gantry Crane Prototype for Horizontal Axis Using Fuzzy Method," 2024 *IEEE 10th Information Technology International Seminar (ITIS)*, Surabaya, Indonesia, 2024, pp. 40-44, doi: 10.1109/ITIS64716.2024.10845647.
6. Nguyen, H. Ph. Tracking Control Based on Takagi-Sugeno Fuzzy Descriptor Model for Overhead Crane Combined With Input Shaping / H. Ph. Nguyen, N. T. Bui, T. V. A. Nguyen. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 127507-127521.
7. J. S. Radaideh and M. K. AlAjilouni, "Dynamical Modeling and Control of Motion System of the Gantry Crane to Minimize Swing Angle of the Payload," 2023 *IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT)*, Amman, Jordan, 2023, pp. 87-92, doi: 10.1109/JEEIT58638.2023.10185684.
8. Li X. Anti-swing control for 2-D under-actuated cranes with load hoisting/lowering: A coupling-based approach / X. Li, X. Peng, Z. Geng. *ISA Transactions*, vol. 95, 2019 – P. 372-378.
9. Wang S. A novel payload swing control method based on active disturbance rejection control for 3D overhead crane systems with time-varying rope length / S. Wang, W. Jin, W. Chen. *Journal of the Franklin Institute*, vol. 361, No. 6, 2024.
10. S. Feng, Y. Liu, Z. Chen, Z. Chen and B. Yao, "Active Anti-Sway Control of Multi-Ropes Gantry Cranes with Scale Model Test," *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore*, Singapore, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON51785.2023.10312070.
11. Аксаментов, Д. Н. Исследование адаптивного закона управления мостовым краном на его макете / Д. Н. Аксаментов. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2022. № 2. С. 47-57.
12. Щербаков В.С. Активный способ гашения колебаний груза после остановки мостового крана / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Шершнева. *Мехатроника, автоматизация, управление*, т. 17. № 6. 2016. С. 368-374.

13. A. Stein and T. Singh, "Input Shaped Control of a Gantry Crane with Inertial Payload," 2022 *American Control Conference (ACC)*, Atlanta, GA, USA, 2022, pp. 4127-4132, doi: 10.23919/ACC53348.2022.9867494.
14. T. H. Do, M. D. Duong, M. L. Nguyen and Q. T. Dao, "A Combination of Distributed Delays Shapers and ADRC for Gantry Crane Control," 2020 *International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)*, Hanoi, Vietnam, 2020, pp. 124-128, doi: 10.1109/ICAMechS49982.2020.9310161.
15. Optimization-Based Input-Shaping Swing Control of Overhead Cranes / W. Tang, R. Ma, W. Wang, H. Gao. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023. Vol. 13, No. 17. P. 9637.
16. V. Orsini, "A Robust Offline Precomputed Optimal Feedforward Control Action for the Real Time Feedback/Feedforward Control of Double Pendulum Gantry Cranes," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158273-158286, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3131032
17. C.Y. Chang, The switching algorithm for the control of overhead crane. *Neural Computing & Applications* vol. 15, 2006 P. 350-358.
18. C. Forest, D. Frakes, W. Singhose. Input-shaped control of gantry cranes: simulation and curriculum development. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, Vol. 6B. 2001. p. 1877-1884.
19. Толочко, О. И. Влияние неточного определения длины каната на эффективность гашения колебаний груза / О. И. Толочко, Д. В. Бажутин. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2011. № 3(79). С. 175-177.
20. Толочко О.И. Алгоритм расчета многоэтапного закона управления для электропривода тележки мостового крана / О.И. Толочко, Д.В. Бажутин. *Научные труды ДонНТУ. Серия: «Электротехника и энергетика»*. – Донецк: ГБУЗ «ДонНТУ», 2011.- вып. 10(180). – С. 183–187.

## References

1. Nguyen V.C. An integrated solution for 3D overhead cranes: Time-optimal motion planning, obstacle avoidance, and anti-swing / V.C. Nguyen et. al. // *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 59, 2024 – 22 P.
2. Buch A. Optimale Bewegungssteuerung von schwingungsfähigen mechatronischen Systemen mit zwei Freiheitsgraden am Beispiel eines Krans mit Pendelnder Last und elastischer Mechanik. Dissertation [Dr.-Ing]. Magdeburg, 1999. - 250 p.
3. A. A. M. Fadlalla and M. Hassan, "Dynamic Modeling and Feedback Linearization Control of a 3-D Overhead Gantry Crane System," 2021 *IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, Toronto, ON, Canada, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422566.
4. W. Liu, W. Yao, R. Chi and C. Mu, "Anti-Sway Control for Bulk Terminal Gantry Cranes Based on MFAC," 2023 *IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)*, Xiangtan, China, 2023, pp. 78-82, doi: 10.1109/DDCLS58216.2023.10165880.
5. H. Budiarto, V. T. Widyaningrum, A. Dafid, A. Kusairi and A. S. Romadhon, "Speed Control System in Gantry Crane Prototype for Horizontal Axis Using Fuzzy Method," 2024 *IEEE 10th Information Technology International Seminar (ITIS)*, Surabaya, Indonesia, 2024, pp. 40-44, doi: 10.1109/ITIS64716.2024.10845647.
6. Nguyen, H. Ph. Tracking Control Based on Takagi-Sugeno Fuzzy Descriptor Model for Overhead Crane Combined With Input Shaping / H. Ph. Nguyen, N. T. Bui, T. V. A. Nguyen // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – P. 127507-127521.
7. J. S. Radaideh and M. K. AlAjilouni, "Dynamical Modeling and Control of Motion System of the Gantry Crane to Minimize Swing Angle of the Payload," 2023 *IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT)*, Amman, Jordan, 2023, pp. 87-92, doi: 10.1109/JEEIT58638.2023.10185684.
8. Li X. Anti-swing control for 2-D under-actuated cranes with load hoisting/lowering: A coupling-based approach / X. Li, X. Peng, Z. Geng // *ISA Transactions*, vol. 95, 2019 – P. 372-378.
9. Wang S. A novel payload swing control method based on active disturbance rejection control for 3D overhead crane systems with time-varying rope length / S. Wang, W. Jin, W. Chen // *Journal of the Franklin Institute*, vol. 361, No. 6, 2024.
10. S. Feng, Y. Liu, Z. Chen, Z. Chen, Z. Chen and B. Yao, "Active Anti-Sway Control of Multi-Ropes Gantry Cranes with Scale Model Test," *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore*, Singapore, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON51785.2023.10312070.
11. Aksamentov, D.N. Study od adaptive control law for an overhead crane using its model // *Proceedings of Ivanovo State Power Engineering uUniversity*. – 2022. – №2. – P. 47-57.

12. Scherbakoov V.S. Active means of payload swing elimination after gantry crane stop / V.S. Scherbakov, M.S. Korytov, Ye. O. Shershneva // *Mechatronics, automation, control*, vol. 17. № 6. – 2016. – P. 368-374.
13. A. Stein and T. Singh, "Input Shaped Control of a Gantry Crane with Inertial Payload," 2022 American Control Conference (ACC), Atlanta, GA, USA, 2022, pp. 4127-4132, doi: 10.23919/ACC53348.2022.9867494.
14. T. H. Do, M. D. Duong, M. L. Nguyen and Q. T. Dao, "A Combination of Distributed Delays Shapers and ADRC for Gantry Crane Control," *2020 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)*, Hanoi, Vietnam, 2020, pp. 124-128, doi: 10.1109/ICAMechS49982.2020.9310161.
15. Optimization-Based Input-Shaping Swing Control of Overhead Cranes / W. Tang, R. Ma, W. Wang, H. Gao // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2023. – Vol. 13, No. 17. – P. 9637.
16. V. Orsini, "A Robust Offline Precomputed Optimal Feedforward Control Action for the Real Time Feedback/Feedforward Control of Double Pendulum Gantry Cranes," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158273-158286, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3131032
17. C.Y. Chang. The switching algorithm for the control of overhead crane // *Neural Computing & Applications* vol. 15, 2006 – P. 350-358.
18. C. Forest, D. Frakes, W. Singhose. Input-shaped control of gantry cranes: simulation and curriculum development // *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, Vol. 6B. – 2001. – p. 1877-1884.
19. Tolochko, O.I. Effect of inaccurate cable length estimation on payload swing elimination efficiency / O.I. Tolochko, D.V. Bazhutin // *Electrotechnical and computer systems*. – 2011. – №3 (79). – P. 175-177.
20. Tolochko, O.I. Calculation algorithm for a multi-stage control law for overhead crane trolley electric drive // O.I. Tolochko, D.V. Bazhutin // *Proceedings of Donetsk National Technical University. Series: "Electrical engineering and power systems"*. – Donetsk: DonNTU, 2011. – vol. 10 (180). – P. 183-187.

## RESUME

*D. V. Bazhutin, V. N. Pavlysh*

*Estimation of residual payload swing amplitude for automated crane units subjected to inaccurate cable length value*

Elimination of payload swing is crucial for effective payload transportation using automated crane units. Despite direct measurement of payload sway angle being able to provide means for effective crane motion control the sensors required for these algorithms cannot be installed in some cases. In these situations an input-shaping algorithm can be used providing bang-bang control action on electric drive system. The duration of these control pulses is calculated according to current value of payload hoisting cable, which may be inaccurate. Hence it is advised to estimate the effect of cable length calculation error on payload swing effectiveness.

As shown in [20] inaccurate cable length estimation results in residual swing with its magnitude being dependent on various motion parameters. This effect is studied using the analytical solution of linearized differential equations of crane with payload motion. The correctness of obtained results is verified using numerical simulation.

The described approach yielded analytical expressions that describe magnitude and phase of the residual swing using the ratio of estimated and exact cable length values. The simulation results show negligible deviations of calculated swing transients compared to linearized crane model.

The provided technique can be used to determine whether used cable length estimation accuracy will affect the payload swing elimination efficiency, thus providing an information of applicability of designed crane control systems for certain industrial applications.

## РЕЗЮМЕ

*Д. В. Бажутин, В. Н. Павлыш*

*Оценка амплитуды остаточных колебаний груза в автоматизированных крановых установках в условиях неточного определения длины подвеса*

Демпфирование колебаний груза является жизненно важной задачей для эффективной транспортировки грузов с помощью крановых установок. Несмотря на то, что прямое измерение угла отклонения груза дает возможность синтезировать эффективные системы управления движением, установка необходимых для таких алгоритмов управления датчиков в ряде случаев невозможна. В таких условиях могут использоваться алгоритмы ступенчатого управления, формирующие релейное изменение управляющего воздействия на систему электропривода. Длительность импульсов управления рассчитывается исходя из текущего значения длины подвеса, которое может быть неточным. Соответственно, целесообразным представляется предварительная оценка влияния погрешностей определения длины подвеса на эффективность демпфирования колебаний.

Как показано в [20] неточное определение длины подвеса приводит к возникновению остаточных колебаний, амплитуда и начальная фаза которых зависит от различных параметров процесса движения. Данный эффект рассмотрен с помощью аналитического решения системы линеаризованных дифференциальных уравнений движения крана с подвешенным грузом. Адекватность полученных результатов была проверена путем численного моделирования.

С помощью приведенной методики получены аналитические выражения для амплитуды и начальной фазы остаточных колебаний в функции соотношения между оценочным и точным значениями длины подвеса. Результаты моделирования показали пренебрежимо малое расхождение формы переходных процессов движения груза между численными расчетами и линеаризованной моделью крана.

Рассмотренная методика может использоваться для оценки степени влияния точности используемого метода определения длины подвеса на эффективность демпфирования колебаний груза, на основании которой можно сделать вывод о применимости синтезированной системы управления крановой установкой для конкретных условий работы.

**Бажутин Денис Владимирович** – старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк. *Область научных интересов:* микропроцессорные системы автоматического управления электроприводами, робототехника, эл. почта [dv.bazhutin@yandex.ru](mailto:dv.bazhutin@yandex.ru), адрес 283112, г. Донецк, ул. Туполева, дом 26, квартира 68, телефон +7949 334-93-04.

**Павлыш Владимир Николаевич** – заведующий кафедрой прикладной математики и искусственного интеллекта, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк. *Область научных интересов:* математическое моделирование и управление процессами в сложных динамических системах, эл. почта [pavlyshvn@mail.ru](mailto:pavlyshvn@mail.ru), телефон +7949 322-30-67.

Статья поступила в редакцию 25.05.2025.

УДК 658.011.56

DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-116-128

Н. В. Водолазская, Е. В. Копытова, К.В. Лаврентьева, В.Д. Черненко  
МИРЭА-Российский технологический университет,  
119454, г. Москва, проспект Вернадского д.78

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ДОСТУПА И ОТСЛЕЖИВАНИЯ ЭТАПОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

N. V. Vodolazskaya, E. V. Kopytova, K. V. Lavrentieva, V.D. Chernenko  
MIREA-Russian Technological University,  
119454 Moscow, Vernadsky Avenue, 78

## INFORMATION SYSTEM FOR ACCESS CONTROL AND TRACKING OF PRODUCTION PROCESS STAGES

В статье предложена комплексная информационная система на основе RFID-технологий для повышения прозрачности производственных процессов. Система объединяет мониторинг движения изделий и контроль доступа персонала. Проведен анализ технологического цикла, разработаны функциональные модели и структура базы данных. Решение обеспечивает полную прослеживаемость продукции и учет трудовых ресурсов.

**Ключевые слова:** информационная система, RFID-технология, отслеживаемость перемещения комплектующих.

The paper proposes a comprehensive information system based on RFID technologies to increase the transparency of production processes. The system combines product movement monitoring and personnel access control. Analysis of the technological cycle was carried out, functional models and database structure were developed. The solution provides complete product traceability and labor accounting.

**Keywords:** information system, RFID technology, traceability of movement of components.

## Введение

В условиях современной рыночной экономики, где конкуренция становится всё более интенсивной, к качеству товаров, их стоимости, срокам изготовления и доставки предъявляются все более высокие требования [1-5]. Чтобы предприятие могло соответствовать таким критериям необходимо обеспечивать максимальную прозрачность производственных процессов, которая является ключевым условием для поддержания устойчивого роста объемов производства и стабильности выпуска.

Принцип прозрачности в производстве [2-6] подразумевает, что все основные и сопутствующие процессы, связанные с изготовлением продукции, можно охарактеризовать отслеживаемостью, контролируемостью и управляемостью. Из этого следует, что прозрачность предполагает сбор, анализ и использование полной информации о состоянии производственных ресурсов, реализуемых технологических процессах и операциях, а также о перемещении сырья, компонентов, готовых изделий между производственными подразделениями предприятия в процессе производства.

Недостаточная информационная открытость производственных процессов, затрудняет принятие обоснованных управленческих решений, проведение оптимизации производства, контроль расходов и потерь и управление себестоимостью продукции. При этом эффективность функционирования предприятия может значительно снижаться, что негативно сказывается на финансовых показателях и его конкурентоспособности.

Как правило, значительные разрывы в информационных потоках (ИП) ощущаются между разными этапами производства, где остаются границы между складами и конструкторско-технологическими, плановыми и производственными, а также другими подразделениями, где отсутствие или опоздание информации влияет на дополнительные расходы на предприятии в целом [7-13]. В условиях многономенклатурного дискретного производства такие сложности могут возникать в пределах одного подразделения предприятия. Несогласованность в планировании и учете ресурсов (сырья, инструментов, оснастки), а также сроков передачи незавершенного производства между операциями приводит к неоправданным простоям оборудования, что влечет существенные финансовые потери.

Целью работы является обеспечение прозрачности производственного процесса на предприятии по изготовлению складского оборудования и его комплектующих путем разработки информационной системы, позволяющей отслеживать путь продукта и его составных частей внутри предприятия и осуществлять контроль за сотрудниками, задействованными в выполнении того или иного производственного задания.

### Постановка задач

Для реализации поставленной цели необходимо:

- детально изучить технологический процесс предприятия, чтобы определить ключевые этапы, требующие автоматизированного контроля и трекинга;
- на основе проведенного анализа следует выделить участки, где внедрение системы мониторинга позволит повысить прозрачность и управляемость производства;
- необходимо определить ключевые модули и их взаимосвязи;
- следует формализовать потоки данных между оборудованием, RFID-метками, СКУД и централизованной базой данных;
- важно обеспечить синхронизацию данных между RFID-трекингом и учетными записями сотрудников для персонализированного учета рабочего времени;

- необходимо разработать эффективную схему хранения и обработки информации о перемещении продукции, действиях персонала и системных событиях.

Следовательно, необходимо дополнить функции классической СКУД, расширенной функцией контроля присутствия оператора-станочника на своем рабочем месте, а также возможностью осуществлять контроль за подетальным перемещением изготавливаемой продукции. Реализация подобного механизма позволит более эффективно отслеживать путь перемещения изготавливаемых деталей, комплектующих, узлов и готовой продукции на предприятии, а также контролировать объем выполнения сменного задания операторами-станочниками, что сделает работу предприятия более надежной, гарантировать соответствие продукта требованиям качества и открытость производственного процесса для всех его участников.

## Материалы и методы

Для реализации информационной системы контроля доступа и отслеживания этапов производственного процесса предложено комплексное решение, включающее **RFID-технологии** и **систему контроля и управления доступом (СКУД)**. RFID-метки, закрепляемые на деталях, комплектующих и сборочных узлах, позволяют в режиме реального времени фиксировать их местоположение и перемещение между производственными участками [14-20]. Считывание данных осуществляется с помощью стационарных и портативных RFID-ридеров, что обеспечивает автоматизацию учета и исключает ошибки ручного ввода.

Контроль доступа персонала к оборудованию и производственным зонам организован с использованием **СКУД на основе бесконтактных карт или биометрии**, что позволяет идентифицировать сотрудников и регистрировать их действия [21-26]. Система фиксирует время работы на каждом участке, формируя журнал событий для последующего анализа. Интеграция RFID и СКУД в единую платформу обеспечивает сквозной мониторинг производственного цикла — от поступления сырья до выпуска готовой продукции.

Для обработки данных применяется **специализированное** программное обеспечение с возможностью генерации отчетов, визуализации маршрутов перемещения продукции и анализа производительности труда.

## Основная часть

Для определения ключевых параметров контроля проанализирован технологический процесс изготовления стеллажей полочного типа. Обобщенная структура технологического процесса показана рисунке 1.



Рисунок 1 – Обобщенная структура технологического процесса изготовления стеллажного оборудования

Результатом анализа технологического процесса является структурная схема взаимодействия элементов системы контроля доступа и отслеживания этапов производственного процесса (рис. 2). Алгоритм работы системы реализуется следующим образом: после получения сменного задания и доставки партии заготовок к рабочему месту, оператор-станочник с помощью стационарного RFID-считывателя регистрирует принятие партии в обработку, при этом данные с метки изделия автоматически передаются в централизованную базу данных производственного сервера. Для авторизации и подтверждения своего присутствия оператор использует персональную RFID-карту, которая прикладывается к считывателю, интегрированному с оборудованием. В момент идентификации система в реальном времени фиксирует: уникальный идентификатор сотрудника, временную метку начала операции и привязку к конкретной производственной задаче. Серверная часть системы, получив эти данные, выполняет комплексную проверку прав доступа, включая: валидацию уровня допуска сотрудника, соответствие квалификации выполняемой операции и проверку закрепленного оборудования.

На основании результатов верификации система генерирует управляющий сигнал ("разрешение/запрет доступа") и либо активирует оборудование для выполнения технологической операции, либо инициирует запрос на выполнение корректирующих действий через интерфейс диспетчера. При этом все события фиксируются в журнале учета с указанием временных меток, что обеспечивает полную прослеживаемость производственного процесса.



Рисунок 2 – Схема взаимодействия элементов системы

В процессе обработки деталей система в автоматическом режиме осуществляет динамическое обновление данных RFID-метки. После завершения обработки каждой единицы продукции счетчик количества заготовок в метке декрементируется. При достижении нулевого значения счетчика, метка автоматически перезаписывается, фиксируя фактическое количество качественно обработанных деталей, что позволяет вести точный учет выработки, контролировать процент брака и формировать статистику производительности.

После полной обработки партии система инициирует процедуру ее дальнейшего перемещения. RFID-считыватель фиксирует завершение операции, данные передаются на центральный сервер в реальном времени и сервер интегрируется с MES-системой через API-интерфейс.

MES-система на основе актуальных производственных данных выполняет следующие операции: определяет следующую технологическую операцию, выбирает оптимальный маршрут перемещения, резервирует необходимые производственные ресурсы и формирует задание для логистической службы

Для временно хранимых партий система дополнительно:

- генерирует адрес хранения на складе НЗП,
- обновляет складскую учетную систему,
- устанавливает сроки следующего этапа обработки,
- контролирует соблюдение условий хранения.

Все изменения дублируются в блокчейн-реестре для обеспечения неизменяемости и достоверности данных производственного учета.

На декомпозиции контекстной диаграммы информационной системы контроля доступа и отслеживания этапов производственного процесса в нотации IDEF0 более подробно продемонстрировано взаимодействие подсистем, входящих в ее состав. А также показаны управляющие и информационные связи между подсистемами.

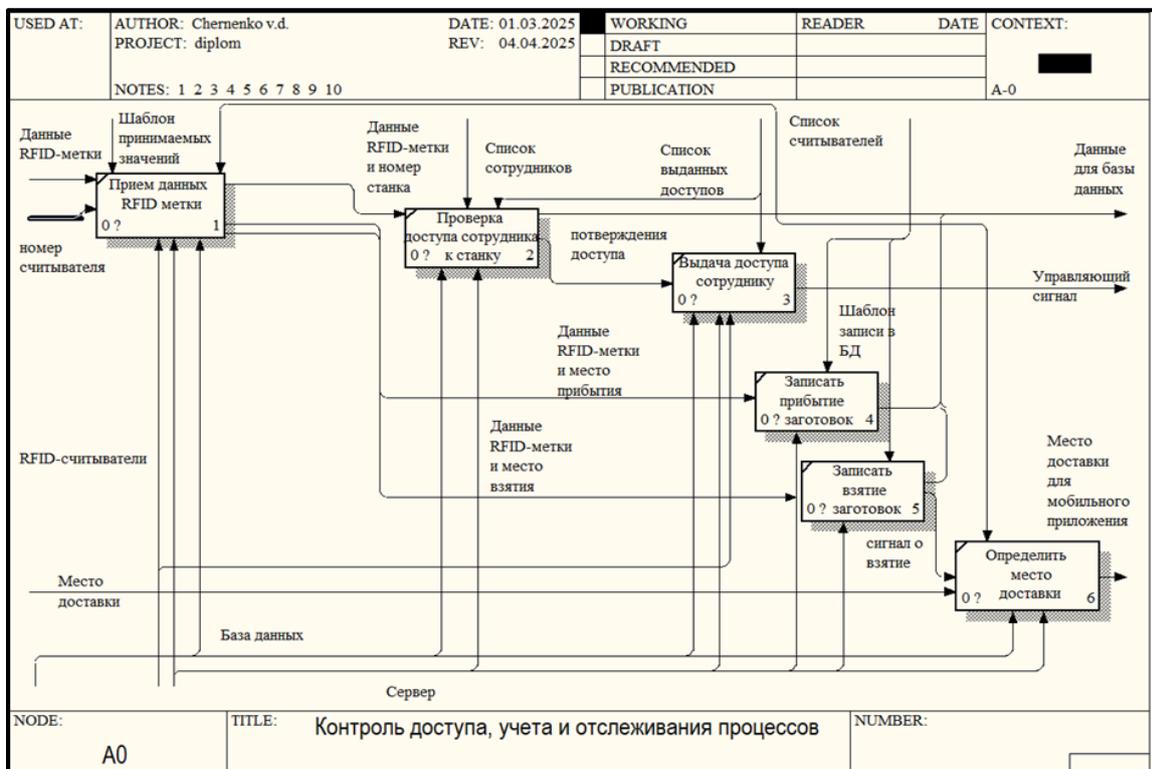


Рисунок 3 – Декомпозиция контекстной диаграммы информационной системы контроля доступа и отслеживания этапов производственного процесса в нотации IDEF0

Как показывает диаграмма (рис. 3) последовательность обработки данных в системе осуществляется по следующему алгоритму. 1. На вход поступают данные RFID-метки оператора-станочника и номер считывателя станка. 2. Данные сравниваются с информацией из сформированной таблицы RFID-считывателей. В зависимости от того к какому типу считывателей они принадлежат определяется дальнейшее направление сигнала. 3. Выполняется проверка доступа сотрудника к оборудованию. На вход идет запрос на проверку доступа сотрудника к станку, в котором хранятся данные RFID-метки и номер считывателя. Доступ логируется и формируется разрешение на выдачу доступа сотруднику для выполнения операции на данном станке. 4.

Затем осуществляется запись прибытия заготовок на обработку. На вход системы идет запрос на обработку информации о прибывшей партии деталей. 5. Сохраняются данные RFID-метки и номера считывателя. 6. Данные обрабатываются и записываются в таблицу «прибытия».

Блок «запись взятия заготовок». Модуль регистрации заготовок принимает запрос на обработку, содержащий идентификатор RFID-метки и номер считывателя для фиксации данных об успешно обработанной заготовке. После записи в журнал взятия система инициирует запрос на определение точки назначения партии. Маршрутизация осуществляется на основе данных MES-системы, а локация определяется через справочник считывателей с отображением на интерактивной карте цеха. Результирующие данные передаются в мобильное приложение и сохраняются в БД."

С помощью нотации ArchiMate смоделирована архитектура информационной системы (рис. 5). Визуализация полного архитектурного описания ключевых элементов информационной системы делает процесс принятия решений более обоснованным и эффективным. Модель архитектуры содержит три уровня (слоя). На бизнес слое представлена работа системы. Система получает данные от RFID-метки и номер считывателя, дальше в зависимости от того какому элементу системы принадлежит этот считыватель р разная реализуются разные алгоритмы.

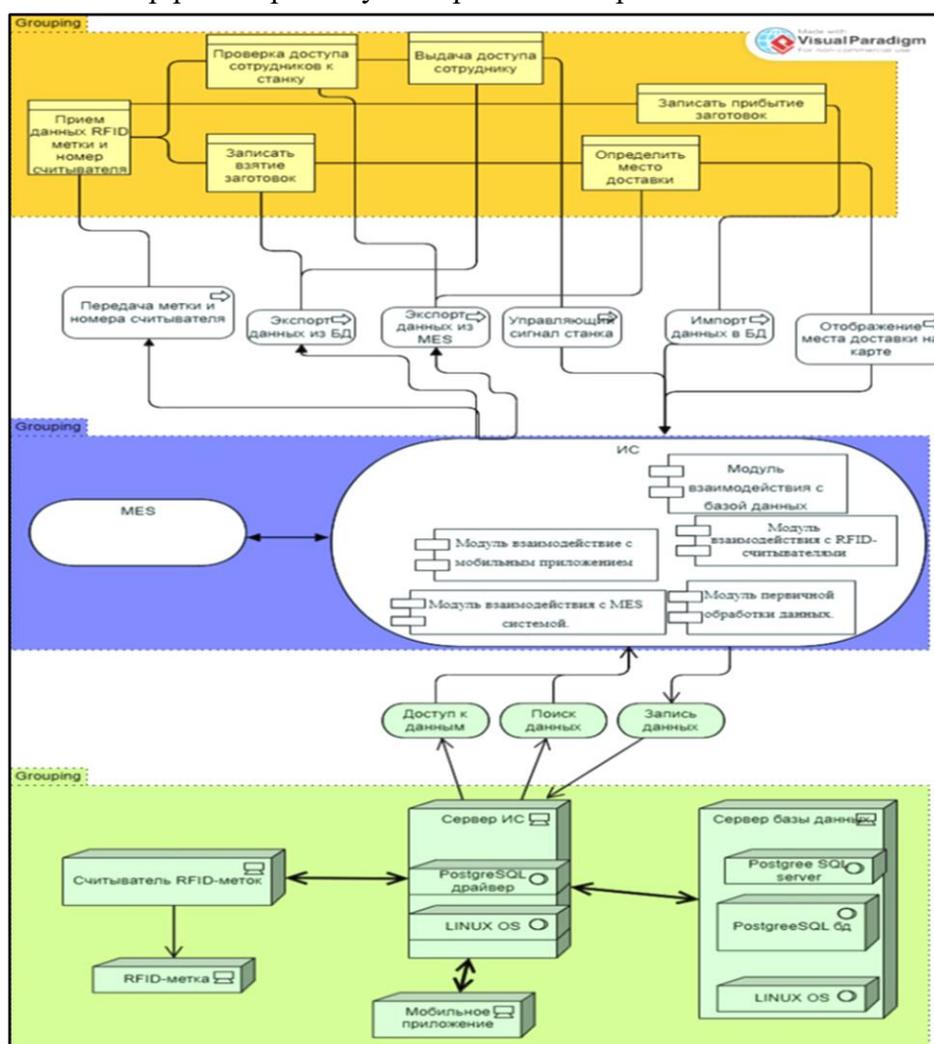


Рисунок 4 – Архитектура информационной системы

Если считыватель принадлежит станку, то осуществляется проверка доступа сотрудника к возможности работы данного специалиста за конкретным станком и разрешается доступ сотруднику. Если сигнал формируется в момент приема партии для обработки, то выполняется запись в базу данных о поступлении новой партии. Когда оператор заканчивает обработку принятой партии деталей в обработку в базу данных записывается информация о необходимости определения следующей операции и единица оборудования, к которому необходимо переместить обработанную партию деталей. Бизнес-слой и слой приложений связываются данными RFID-метки и номера считывателя, данными из базы данных, из MES-системы и другими. Слой приложений содержит MES и разрабатываемую информационную систему (ИС). Она состоит из модулей:

1. Модуль взаимодействия с базой данных.
2. Модуль взаимодействия с RFID-считывателем.
3. Модуль первичной обработки данных.
4. Модуль взаимодействия с мобильным приложением.
5. Модуль взаимодействия с MES системой.

Модуль взаимодействия с базой данных решает единственную задачу – формирование управляющих команд для работы с базой данных. Модуль взаимодействия с RFID-считывателем реализует следующие функции: отправляет сформированные управляющие сигналы на RFID и принимает пакеты данных от считывателей, затем перенаправляет их в модуль обработки.

Модуль первичной обработки данных необходим для корректной распаковки пакетов данных с оборудования и обработки этих данных с целью выявления ошибок и их корректировки, и/или отправки уведомления об ошибке в другие системы.

Модуль взаимодействие с мобильным приложением отправляет данные на мобильное приложение. Принимает данные с приложения.

Модуль взаимодействия с MES системой необходим для формирования запросов данных о сотрудниках и об операция технологического процесса.

Между слоем приложений и технологическим слоем связь обеспечивается посредством обеспечения доступа к данным, поиска данных и записи данных сервером ИС.

Технологический слой содержит считыватель RFID-меток, RFID-метки, сервер ИС — место основной обработки данных, мобильное приложение и сервер базы данных. Модель разработанной базы данных показана на рисунке 5.

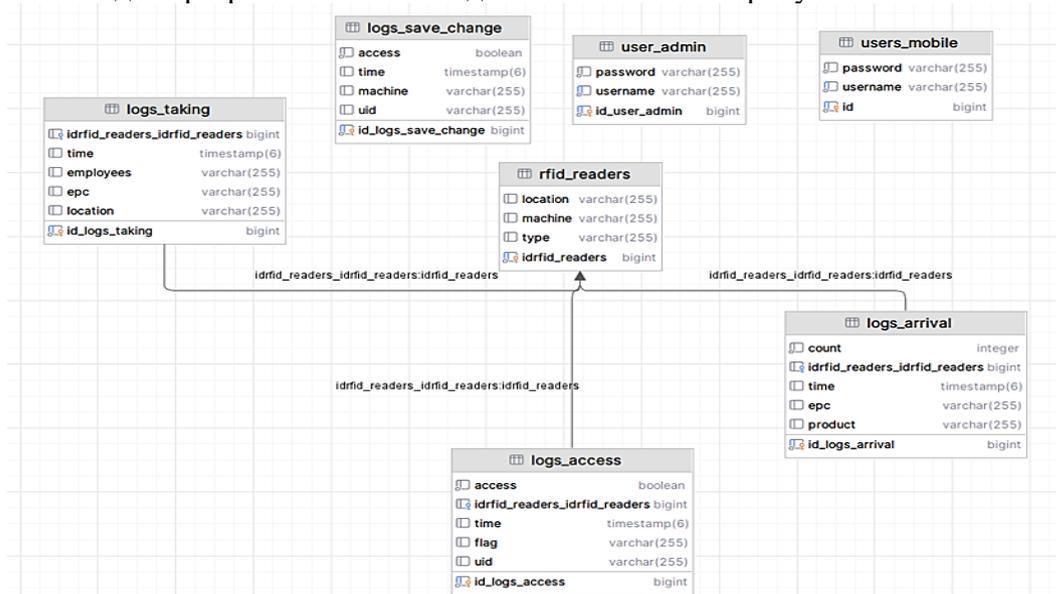


Рисунок 5 – Модель базы данных

Таблица “logs\_taking” – необходима для сохранения информации о выдаче партии заготовок со склада.

- idrfid\_readers\_idrfid\_readers – id RFID считывателя;
- new\_delivery\_place\_id\_new\_delivery\_place – id места доставки, которое определено после приема заготовки на обработку;
- ерс – код RFID считанной метки;
- employees – данные сотрудника, обозначенного как username (логин) из таблицы user\_mobile, используемого для входа в мобильное приложение;
- location – место доставки, которое определяется в результате запроса в MES систему.

Таблица “rfid\_readers” – используется для хранения параметров считывателей.

- location – место, где установлен считыватель;
- machine – станок, на котором установлен считыватель;
- type – тип считывателя.

Таблица “logs\_access” – хранит данные о попытке получить доступ.

- access – успешный ли доступ;
- idrfid\_readers\_idrfid\_readers – id считывателя к которому был получен доступ.
- flag – определяет какое действие было выполнено (обработка, брак, выключение);
- UID – уникальный идентификатор RFID карты сотрудника.

Таблица “logs\_arrival” – используется для хранения логов прибытия заготовок к станку.

- count – количество заготовок в ящике;
- idrfid\_readers\_idrfid\_readers – id считывателя, к которому была доставлена партия деталей на обработку;
- ерс – номер метки, используемой для идентификации обрабатываемой партии;
- product – заготовка из обрабатываемой партии.

Таблица “logs\_save\_change” – таблица для логов изменения доступов к станку в mes системе.

- access – наличие доступа к станку;
- machine – станок, у которого изменили доступ;
- UID – сотрудника, которому меняют доступ.

Таблица “users\_mobile” и “user\_admin” нужны для хранения логина и пароля мобильного приложения и страницы для изменения доступа сотрудника.

Для взаимодействия с базой данных были созданы классы с аннотацией @Entity. Для примера приведен листинг создания таблицы “logs\_access” базы данных (Листинг 1). В классе созданы id с аннотациями @Id и @GeneratedValue для автогенерации ключей.

*Листинг1 Класс базы данных*

```
@Entity
public class Logs_access implements Serializable {
    @Id
    @GeneratedValue(strategy = GenerationType.AUTO)
    private Long idLogs_access;
    private String UID; // TID (E280116060000207B533B5F3)
    private String flag;
    private LocalDateTime time;
    private boolean access;
    @ManyToOne
    private RFID_readers idRFID_readers;
    // Геттеры и сеттеры}
```

Аналогично были созданы остальные таблицы базы данных. Переменная `idRFID_readers` с аннотацией `@ManyToOne` применена для определения связей между таблицами. Для обеспечения возможности использовать созданные классы определены репозитории JPA, которые используются для получения доступа к данным.

## Заключение

Для обеспечения сквозного мониторинга материальных потоков в производственном цикле разработано решение на основе RFID-технологий, обеспечивающее: точное определение местонахождения производственных единиц (деталей, комплектующих, сборочных узлов) в реальном времени; автоматизированную фиксацию прохождения технологических этапов и формирование цифрового следа перемещения продукции. Для персонализированного учета трудовых ресурсов предусмотрена интеграция системы контроля и управления доступом (СКУД), выполняющей следующие функции: идентификацию сотрудников при работе с оборудованием; фиксацию времени выполнения технологических операций и контроль соблюдения производственных регламентов.

Интеграция RFID-технологии и СКУД в единую информационную систему предприятия обеспечивает повышение прозрачности производственного процесса путем осуществления комплексного мониторинга как материальных, так и человеческих ресурсов в едином информационном пространстве предприятия. Внедрение перечисленных технологий позволяет сократить временные затраты на определение местоположения продукции, сократить количество ошибок учета и повысить общую эффективность управления производством. Применение разработанной системы приводит к оптимизации производственных процессов, сокращению времени простоев технологического оборудования и сотрудников, а также к повышению управляемости предприятием.

## Список литературы

1. *Бережливое производство ГОСТ Р 56020-2020* / разработан Центром «Приоритет» (ООО «Центр «Приоритет») и др. Изд. офиц. Москва : Стандартинформ, 2020. IV, 15 с. ил.; 29. (Национальный стандарт Российской Федерации).
2. Dastres R., Soori M., Asamel M. Radio Frequency Identification (RFID) based wireless manufacturing systems, a review. *Independent Journal of Management & Production*. 2022. Т. 13. №. 1. С. 258-290.
3. Munoz-Ausecha C., Ruiz-Rosero J., Ramirez-Gonzalez G. RFID applications and security review. *Computation*. 2021. Т. 9. №. 6. С. 69.
4. Тарасов И.Е., Советов П.Н., Люлява Д.В., Мирзоян Д.И. Методика проектирования специализированных вычислительных систем на основе совместной оптимизации аппаратного и программного обеспечения. *Russian Technological Journal*. 2024;12(3):37–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45>. EDN: [PXKDKR](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45)
5. Водолазская, Н. В. Проблемы модернизации современных видов технических систем / Н. В. Водолазская. *Вызовы и инновационные решения в аграрной науке* : Материалы XXVII Международной научно-производственной конференции, Майский, 12 апреля 2023 года. Том 4. Майский: Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2023. С. 24-25. EDN FGKQUT
6. Марков, В. Д. Особенности взаимодействия с генеративным искусственным интеллектом / В. Д. Марков, А. В. Мешков, Н. В. Водолазская. *Ресурсосбережение. Эффективность. Развитие* : Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, Донецк, 01 ноября 2024 года – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. С. 184-188. EDN ZDXHQE.
7. Лямкин, А. И. Автоматизация оценки и мониторинга системы менеджмента качества с помощью цифровых технологий / А. И. Лямкин, Е. И. Хунузиди. *Контроль. Диагностика*. 2025. Т. 28, № 3(321). С. 56-63. DOI 10.14489/td.2025.03.pp.056-063. EDN BPMGGN.

8. Vodolazskaya, N. V. Types and ways of modernization in a context of the international experience / N. V. Vodolazskaya. *Virtual Economics*. 2019. Vol. 2, No. 1. P. 81-93. – DOI 10.34021/ve.2019.02.01. EDN ZIJJQT.
9. Анцыферов, С. С. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, К. Е. Русанов. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 2(33). С. 37-44. DOI 10.24412/2413-7383-2024-2-37-44. EDN WLSZIT.
10. Соловьев, А. В. Методическое обеспечение информационных систем при оценке надежности / А. В. Соловьев // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2024. – № 2. – С. 15-25. – DOI 10.14357/20718632240202. – EDN HZUPOR.
11. Программная реализация математической модели расчета технологических параметров электротермических реакторов / В. А. Орехов, В. И. Бобков, А. А. Быков, С. В. Незамаев. *Программные продукты и системы*. 2024. № 4. С. 611-621. DOI 10.15827/0236-235X.148.611-621. EDN ZITPUF.
12. Анцыферов, С. С. Принципы структурного построения систем «документальный информационный поток» / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, К. Е. Русанов. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. № 3(30). С. 28-35. DOI 10.34757/2413-7383.2023.30.3.002. EDN UXQZNN.
13. Разработка информационной системы для хранения и обработки результатов мониторинга сельскохозяйственных угодий Юга Дальнего Востока / Д. В. Федосеев, А. С. Степанов, Л. В. Илларионова [и др.]. *Системы и средства информатики*. 2024. Т. 34, № 1. С. 44-56. DOI 10.14357/08696527240104. EDN XPPVVV.
14. Беликова, С. А. Метод визуализации интерфейса с отражением бизнес-логики взаимодействия с пользователем / С. А. Беликова, Ю. Ю. Липко. *Программная инженерия*. 2024. Т. 15, № 1. С. 44-52. DOI 10.17587/prin.15.44-52. EDN EPTNKK.
15. Лазаренко, Е. Н. Анализ систем контроля версий / Е. Н. Лазаренко, Г. В. Дорохина, Д. А. Гаркуша. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. № 2(29). С. 40-48. EDN CUILQN.
16. Язов, Ю. К. Составные сети Петри-Маркова со специальными условиями построения для моделирования угроз безопасности информации / Ю. К. Язов, А. П. Панфилов. *Вопросы кибербезопасности*. 2024. № 2(60). С. 53-65. DOI 10.21681/2311-3456-2024-2-53-65. EDN TEJAVM.
17. Vodolazskaya, N. Process modeling of increasing reliability of assembly responsible connections. *Advanced Engineering Letters*. 2024. Vol. 3, No. 3. P. 91-99. DOI 10.46793/adeletters.2024.3.3.1. EDN DBBCYW.
18. Янковая, В. Ф. Нормативное регулирование архивного хранения электронных документов в организациях / В. Ф. Янковая. *Отечественные архивы*. 2022. № 1. С. 38-46. EDN BVFYGH.
19. Механизм автоматизации рабочего места машиниста подвижного состава / З. В. Лященко, О. В. Игнатьева, А. М. Лященко, Д. В. Глазунов. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2023. № 3. С. 133-138. DOI 10.52261/02346206\_2023\_3\_133. EDN TTSPLL.
20. Картамышев, А. С. Подход к формированию данных для аналитической отчетности в системе управления предприятием / А. С. Картамышев, Б. А. Черныш. *Информационные технологии*. 2023. Т. 29, № 10. С. 540-548. DOI 10.17587/it.29.540-548. EDN WBODBJ.
21. Устенко, В. Ю. Разработка программного комплекса аннотирования данных для задач компьютерного зрения: объектно-ориентированный подход на основе WINFORMS / В. Ю. Устенко, В. И. Бондаренко. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 4(35). С. 151-163. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-151-163. EDN ICNMYY.
22. Поляков, В. И. Модели вычислительных процессов информационной системы / В. И. Поляков, Ф. Ф. Зиннатулин. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2023. Т. 66, № 3. С. 195-199. DOI 10.17586/0021-3454-2023-66-3-195-199. EDN EEZWQH.
23. Картамышев, А. С. Подход к формированию данных для аналитической отчетности в системе управления предприятием / А. С. Картамышев, Б. А. Черныш. *Информационные технологии*. 2023. Т. 29, № 10. С. 540-548. DOI 10.17587/it.29.540-548. – EDN WBODBJ.
24. Боровиков, А. И. Взаимодействие основных потоков предприятия / А. И. Боровиков, О. А. Криводубский. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 4(35). С. 76-87. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-76-87. EDN UTHPGD.
25. Соломаха, Г. М. Программный комплекс планирования производства и управления запасами / Г. М. Соломаха, С. В. Хижняк, В. А. Тулуева. *Программные продукты и системы*. 2023. № 3. С. 459-465. DOI 10.15827/0236-235X.143.459-465. EDN SUDWPH.
26. Микони, С. В. Подход к оцениванию уровня интеллектуальности информационной системы / С. В. Микони. *Онтология проектирования*. 2023. Т. 13, № 1(47). С. 29-43. DOI 10.18287/2223-9537-2023-13-1-29-43. EDN NDDERZ.

## References

1. Lean manufacturing GOST R 56020-2020 / developed by the Center "Priority" (LLC "Center "Priority"), etc.. — Ed. ofits.. — Moscow : Standartinform, 2020. — IV, 15 p. ill.; 29. — (National Standard of the Russian Federation).
2. Dastres R., Soori M., Asamel M. Radio Frequency Identification (RFID) based wireless manufacturing systems, a review //Independent Journal of Management & Production. — 2022. — Vol. 13. — No. 1. — pp. 258-290
3. Munoz-Ausecha C., Ruiz-Rosero J., Ramirez-Gonzalez G. RFID applications and security review //Computation. — 2021. — Vol. 9. — No. 6. — p. 69
4. Tarasov I.E., Sovetov P.N., Lyulyava D.V., Mirzoyan D.I. Methods of designing specialized computer systems based on joint optimization of hardware and software. Russian Technological Journal. 2024;12(3):37-45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45>. EDN: PXKDKR
5. Vodolazskaya, N.V. Problems of modernization of modern types of technical systems/N.V. Vodolazskaya//Challenges and innovative solutions in agricultural science: Materials of the XXVII International Scientific and Production Conference, May, April 12, 2023. Volume 4. - May: Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorina, 2023. - S. 24-25. — EDN FGKQUT
6. Markov, V. D. Features of interaction with generative artificial intelligence/V. D. Markov, A. V. Meshkov, N. V. Vodolazskaya//Resource saving. Efficiency. Development: Collection of materials of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference, Donetsk, November 01, 2024. - Donetsk: Donetsk National Technical University, 2024. - S. 184-188. — EDN ZDXHQE.
7. Lyamkin, A.I. Automation of assessment and monitoring of the quality management system using digital technologies/A.I. Lyamkin, E.I. Khunuzidi//Control. Diagnostics. — 2025. - T. 28, NO. 3 (321). - S. 56-63. — DOI 10.14489/td.2025.03.pp.056-063. — EDN BPMGGN.
8. Vodolazskaya, N. V. Types and ways of modernization in a context of the international experience / N. V. Vodolazskaya // Virtual Economics. — 2019. — Vol. 2, No. 1. — P. 81-93. — DOI 10.34021/ve.2019.02.01. — EDN ZIJJQT.
9. Antsyferov, S. S. Intelligent process control systems/S. S. Antsyferov, K. N. Fazilova, K. E. Rusanov//Problems of artificial intelligence. — 2024. — № 2(33). - S. 37-44. — DOI 10.24412/2413-7383-2024-2-37-44. — EDN WLSZIT.
10. Soloviev, A. V. Methodological support of information systems in assessing reliability/A. V. Soloviev//Information technologies and computer systems. — 2024. — № 2. - S. 15-25. — DOI 10.14357/20718632240202. — EDN HZUPOR.
11. Software implementation of the mathematical model for calculating the technological parameters of electrothermal reactors/V. A. Orekhov, V. I. Bobkov, A. A. Bykov, S. V. Nezamaev//Software products and systems. — 2024. — № 4. - S. 611-621. — DOI 10.15827/0236-235X.148.611-621. — EDN ZITPUF.
12. Antsyferov, S. S. Principles of structural construction of systems "documentary information flow "/S. S. Antsyferov, K. N. Fazilova, K. E. Rusanov//Problems of artificial intelligence. — 2023. — № 3(30). - S. 28-35. — DOI 10.34757/2413-7383.2023.30.3.002. — EDN UXQZNN.
13. Development of an information system for storing and processing the results of monitoring agricultural land in the South of the Far East/D. V. Fedoseev, A. S. Stepanov, L. V. Illarionova [et al. ]//Systems and means of computer science. — 2024. - T. 34, NO. 1. - S. 44-56. — DOI 10.14357/08696527240104. — EDN XPPVVV.
14. Belikova, S. A. Method of visualizing the interface with a reflection of the business logic of user interaction/S. A. Belikova, Yu. Yu. Lipko//Software Engineering. — 2024. - T. 15, NO. 1. - S. 44-52. — DOI 10.17587/prin.15.44-52. — EDN EPTNKK.
15. Lazarenko, E. N. Analysis of version control systems/E. N. Lazarenko, G. V. Dorokhina, D. A. Garkusha//Problems of artificial intelligence. — 2023. — № 2(29). - S. 40-48. — EDN CUILQN.
16. Yazov, Yu. K. Petri-Markov composite networks with special construction conditions for modeling information security threats/Yu. K. Yazov, A.P. Panfilov//Cybersecurity issues. — 2024. — № 2(60). - S. 53-65. — DOI 10.21681/2311-3456-2024-2-53-65. — EDN TEJAVM.
17. Vodolazskaya, N. Process modeling of increasing reliability of assembly responsible connections / N. Vodolazskaya // Advanced Engineering Letters. — 2024. — Vol. 3, No. 3. — P. 91-99. — DOI 10.46793/adeletters.2024.3.3.1. — EDN DBBCYW.
18. Yankova, V.F. Regulatory Regulation of Archival Storage of Electronic Documents in Organizations/V.F. Yankova//Domestic Archives. — 2022. — № 1. - S. 38-46. — EDN BVFYGH.

19. Mechanism for automating the workplace of a rolling stock driver/Z. V. Lyashchenko, O. V. Ignatiev, A. M. Lyashchenko, D. V. Glazunov//Problems of mechanical engineering and automation. – 2023. – № 3. – S. 133-138. – DOI 10.52261/02346206\_2023\_3\_133. – EDN TTSPLL.
20. Kartamyshev, A. S. Approach to the formation of data for analytical reporting in the enterprise management system/A. S. Kartamyshev, B. A. Chernysh//Information technologies. – 2023. – T. 29, NO. 10. – S. 540-548. – DOI 10.17587/it.29.540-548. – EDN WBODBJ.
21. Ustenko, V. Yu. Development of a software package for annotating data for computer vision problems: an object-oriented approach based on WINFORMS/V. Yu. Ustenko, V. I. Bondarenko//Problems of artificial intelligence. – 2024. – № 4(35). – S. 151-163. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-151-163. – EDN ICNMY Y.
22. Polyakov, V.I. Models of computational processes of the information system/V.I. Polyakov, F.F. Zinnatuln//News of higher educational institutions. Instrument making. – 2023. – T. 66, NO. 3. – S. 195-199. – DOI 10.17586/0021-3454-2023-66-3-195-199. – EDN EEZWQH.
23. Kartamyshev, A. S. Approach to the formation of data for analytical reporting in the enterprise management system/A. S. Kartamyshev, B. A. Chernysh//Information technologies. – 2023. – T. 29, NO. 10. – S. 540-548. – DOI 10.17587/it.29.540-548. – EDN WBODBJ.
24. Borovikov, A. I. Interaction of the main flows of the enterprise/A. I. Borovikov, O. A. Krivodubsky//Problems of artificial intelligence. – 2024. – № 4(35). – S. 76-87. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-76-87. – EDN UTHPGD.
25. Solomakha, G.M. Production Planning and Inventory Management Software Package/G.M. Solomakha, S.V. Khizhnyak, V.A. Tulueva//Software Products and Systems. – 2023. – № 3. – S. 459-465. – DOI 10.15827/0236-235X.143.459-465. – EDN SUDWPH.
26. Mikoni, S.V. Approach to assessing the level of intelligence of the information system/S.V. Mikoni//Ontology of design. – 2023. – T. 13, NO. 1 (47). – S. 29-43. – DOI 10.18287/2223-9537-2023-13-1-29-43. – EDN NDDERZ.

## RESUME

*N.V. Vodolazskaya, E.V. Kopytova, K.V. Lavrentieva, V.D. Chernenko*  
**INFORMATION SYSTEM FOR ACCESS CONTROL AND TRACKING OF  
PRODUCTION PROCESS STAGES**

In the context of increasing market competition, transparency of production processes becomes a key factor in the success of the enterprise. The authors of the article justify the need to create an integrated information system that combines personnel access control and real-time tracking of product movement.

It is proposed to implement RFID technology for automated monitoring of movement of parts, assemblies and finished products with fixation of their location and processing stages in real time. In parallel, for personnel control, integration of MCDS is provided, which provides identification of employees and accounting of their work with equipment. The joint application of these systems creates a single mechanism for tracking both material flows and labor resources of the enterprise.

The proposed solution expands the functionality of traditional ACS, adding monitoring of operators' working hours and detailed tracking of products at all stages of production.

The implementation of such a system allows minimizing equipment downtime, optimizing the logistics of work in progress and increasing the controllability of technological processes. The introduction of development is especially important for machine-building enterprises with a discrete type of production, where there is a problem of gaps in information flows between departments

## РЕЗЮМЕ

*Н. В. Водолазская, Е. В. Копытова, К. В. Лаврентьева, В. Д. Черненко*  
*Информационная система контроля доступа и отслеживания этапов производственного процесса*

В условиях ужесточающейся рыночной конкуренции ключевым фактором успеха предприятия становится обеспечение прозрачности производственных процессов. Авторы статьи обосновывают необходимость создания комплексной информационной системы, объединяющей контроль доступа персонала и отслеживание движения продукции в реальном времени.

Предлагается внедрение RFID-технологии для автоматизированного мониторинга перемещения деталей, узлов и готовых изделий с фиксацией их местоположения и этапов обработки в реальном времени. Параллельно для контроля персонала предусматривается интеграция СКУД, обеспечивающей идентификацию сотрудников и учет их работы с оборудованием. Совместное применение этих систем создает единый механизм отслеживания как материальных потоков, так и трудовых ресурсов предприятия.

Предлагаемое решение расширяет функционал традиционных СКУД, добавляя мониторинг рабочего времени операторов и подетальное прослеживание изделий на всех этапах производства.

Реализация такой системы позволяет минимизировать простои оборудования, оптимизировать логистику незавершенного производства и повысить управляемость технологических процессов. Внедрение разработки особенно актуально для машиностроительных предприятий с дискретным типом производства, где существует проблема разрывов в информационных потоках между подразделениями

**Водолазская Н. В.** – к.т.н., доцент, МИРЭА — Российский технологический университет, кафедра промышленной информатики, 119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, +7-909-202-51-27, [vnv26@bk.ru](mailto:vnv26@bk.ru). *Область научных интересов:* цифровые технологии для автоматизации производственных процессов, моделирование технических систем, обеспечение надежности и безопасности технических систем.

**Копытова Е. В.** – ст. преподаватель, МИРЭА — Российский технологический университет, 119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, +7 916 473 5973, [kopytova@mirea.ru](mailto:kopytova@mirea.ru). *Область научных интересов:* комплексные системы управления производством.

**Лаврентьева К. В.** – студент, МИРЭА — Российский технологический университет, 119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, [lavrentyeva@mirea.ru](mailto:lavrentyeva@mirea.ru). *Область научных интересов:* интеграция информационной системы с ERP-, MES- и SCADA-платформами.

**Черненко В. Д.** – студент, МИРЭА — Российский технологический университет, 119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, +7 963 570-37-42, [mr\\_skeleton\\_1000@mail.ru](mailto:mr_skeleton_1000@mail.ru). *Область научных интересов:* вопросы контроля доступа и мониторинга этапов производственного процесса с учетом отраслевых стандартов.

Статья поступила в редакцию 01.06.2025

УДК 65.011.56:681.5.08

DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-129-147

В. Ю. Подлесный, Е. В. Колесник, И. А. Третьяков, В. В. Данилов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Донецкий государственный университет»

283001, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Университетская, 24

## ОПТИМАЛЬНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСУ И АСНИ

V. Yu. Podlesnyi, E. V. Kolesnik, I. A. Tretiakov., V. V. Danilov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"Donetsk State University"

283001, Donetsk People's Republic, Donetsk, st. Universitetskaia, 24

## OPTIMAL INTERPOLATION OF CONTINUOUS MEASUREMENT PROCESSES IN ACS AND ASRS

В настоящей работе продолжены результаты исследования основ информационно-измерительных технологий в автоматизированных системах управления и автоматизированных системах научных исследований, в частности, дискретной формы представления непрерывных измерительных процессов, а именно: оптимальный способ интерполяции, оценка методов интерполяции; непрерывные сообщения в виде регулярных выборок при восстановлении методом наименьших квадратов; разностные и дельта-дискретные представления; погрешность дискретного представления по показателю равномерного приближения; погрешности экстраполяции.

**Ключевые слова:** АСУ, АСНИ, ИИС, измерительные сообщения, информационные характеристики, дискретные представления, интерполяция, экстраполяция, погрешности, выборки, погрешности

This paper continues the results of the study of the basics of information and measurement technologies in automated control systems and automated scientific research systems, in particular, the discrete form of representation of continuous measurement processes, namely: the optimal method of interpolation, evaluation of interpolation methods; continuous messages in the form of regular samples during least squares reconstruction; difference and delta-discrete representations; the error of discrete representation by the indicator of uniform approximation; extrapolation errors.

**Key words:** ACS, ASRS, IMS, measurement messages, information characteristics, discrete representations, interpolation, extrapolation, errors, samples, errors

## Введение

Повсеместный рост применения автоматизированных систем управления (АСУ) и автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) в современных производственных процессах невозможен без постоянного качественного улучшения их информационно-измерительных систем (ИИС) и подсистем [1-11]. Особую актуальность приобретают информационные технологии при создании АСНИ, где остро стоит вопрос о точности обрабатываемой информации [2], [3], [6], [9].

Настоящая работа является логическим продолжением исследований авторов [12-14] по основам информационно-измерительных технологий в автоматизированных системах управления (АСУ) и автоматизированных системах научных исследований (АСНИ). Так в [12], следуя общей теме, рассматривались, в частности, модели измерительных сообщений, модели стационарных случайных измерительных процессов, модели нестационарных измерительных процессов, погрешности при измерениях и передаче. Продолжая работу в этом направлении в [13], [14] были представлены результаты исследования дискретной формы представления непрерывных измерительных процессов: дискретное представление непрерывных процессов и погрешности при их восстановлении; оптимальное дискретное представление; дискретизация полиномами Лежандра; восстановление непрерывных сообщений, интерполяционными алгебраическими полиномами; интерполятор по показателю среднего квадратического приближения.

В настоящей работе продолжены результаты исследования основ информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ, в частности, дискретной формы представления непрерывных измерительных процессов, а именно, оптимальный способ интерполяции, оценка методов интерполяции; непрерывные сообщения в виде регулярных выборок при восстановлении методом наименьших квадратов; разностные и дельта-дискретные представления; погрешность дискретного представления по показателю равномерного приближения; погрешности экстраполяции. Сообщения измерительной информации описываются функциями непрерывного времени  $\lambda(t)$ . Процесс их преобразования в виде дискретного времени  $\lambda_i$ , как совокупности координат, представляет дискретное представление, по значениям которого может быть получена оценка исходного непрерывного сообщения  $\lambda^*(t)$  [15], [16].

## 1 Оптимальный способ интерполяции

Поиск оптимального способа интерполирования сообщения с известной корреляционной функцией (спектральной плотностью) при регулярном опросе сводится к отысканию такой оптимальной весовой (передаточной) функции интерполирующего устройства, которая обеспечивает минимальную частоту опроса при фиксированной погрешности интерполяции. Математически эту задачу можно записать так:  $W_{u.omm}[l-i, \xi]; \sigma_u = \min; T_0 = const$  или  $W_{u.omm}[l-i, \xi]; T_0 = \max; \sigma_u = const$ . Исследования показывают, что при восстановлении реализаций стационарного случайного процесса при постоянном интервале дискретизации оптимальная интерполирующая (весовая) функция должна представлять собой линейную композицию взвешенных значений корреляционной функции восстанавливаемого процесса в точках опроса [3]:

$$W_{u.omm}(t-t_i) = \sum_{i=0}^{N_k} q_i r_{\lambda}(t, t_i), \text{ где } q_i - \text{весовые коэффициенты.}$$

Если при этом интервал корреляции восстанавливаемого процесса конечен, то оптимальной интерполирующей функцией является просто корреляционная функция процесса (без весовых коэффициентов). Получить выражение для дисперсии интерполяционной погрешности для широкого класса случайных процессов, например, с описываемой полиномом Баттерворта, при оптимальных методах интерполяции затруднительно. Вместе с тем представляет значительный интерес получить такое выражение хотя бы для некоторого квазиоптимального метода интерполяции. В качестве такого метода может быть принят метод введения предискажений и интерполяции с помощью бесконечного ряда Котельникова (идеального фильтра нижних частот).

Предположим, что предискажение сообщения обеспечивается с помощью идеального фильтра нижних частот (ФНЧ) с частотой среза  $F_{cp} = F / (2F_c)$ . Введение такого предискажения сводит любой процесс с неограниченным спектром к процессу с ограниченным спектром, который может быть восстановлен в соответствии с теоремой Котельникова без искажений. При введении идеального предискажающего фильтра в сообщение вносятся искажения, дисперсия которых будет равна мощности обрванных ФНЧ частотных составляющих спектра и определяться выражением:

$$\sigma_H^2 = 1 / (2\pi) \cdot \int_{F_{cp}}^{\infty} S_{\lambda}(\omega) d\omega. \quad (1)$$

Подставив в (1) выражение  $S_{\lambda}(\omega) = \mu(k) / [1 + (\omega_c / \Omega_c)^{2k}]$ ;  $k = 1, 2, \dots, \infty$  [12] спектра Баттерворта в  $\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_H^2 + \gamma_{\phi} \sigma_u^2$  [13], получим выражение средней квадратической погрешности интерполяции в развернутом виде (при условии равенства частот среза ФНЧ на передающей и приемной стороне и  $F_{cp} = F_0 / 2$ ):

$$\delta_H^2 = v^{-(2k-1)} / (2k-1) \cdot \sin \pi / 2k / (\pi / 2k). \quad (2)$$

Результаты определения по полученной формуле (2) представлены на рисунке 1. Из полученных графиков и формул видно, что значение средней квадратической погрешности интерполяции зависит от вида спектральной плотности мощности передаваемого сообщения (степени полинома  $k$ ), при заданных требованиях к  $\delta_H^2$  (2). Наименьшая тактовая частота опроса  $F_0$  требуется при равномерной спектральной плотности мощности сообщения ( $k \rightarrow \infty$ ), а наибольшая, при спектральной плотности мощности сообщения с  $k = 1$ . В предельном случае (при  $k = 1$ ),  $\delta_H^2 \approx 2 / (\pi v)$ .

## 2 Методы интерполяции и их сравнительная оценка

Используем процедуру применения различных физически реализуемых фильтров и сравним их между собой [17], [18]. В основном будем ориентироваться на использование в качестве интерполирующих устройств фильтров Баттерворта, модуль передаточной функции которых определяется выражением  $|W_H(j\omega)|^2 = 1 / [1 + (\omega / \Omega_{cp})^{2m}]$ , где  $m = 1, 2, \dots$  - порядок фильтра;  $\Omega_{cp}$  - частота среза на уровне 0,5. Следует отметить, что в реальных условиях при расчете интерполяционных ошибок должна учитываться форма импульсов на входе интерполатора. К сожалению, получение аналитических зависимостей для дисперсии интерполяционной погрешности для рассматриваемых случаев встречает ряд математических трудностей. Некоторые результаты численных расчетов при использовании различных методов интерполяции представлены в таблице 1.

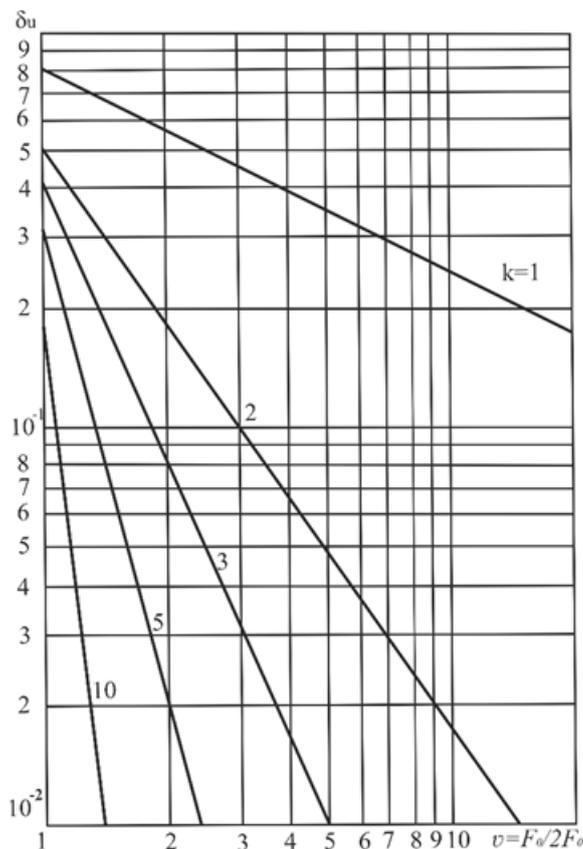


Рисунок 1 – Средняя квадратическая погрешность интерполяции баттервортовского процесса при использовании идеальных интерполирующего и предсказывающего фильтров нижних частот ( $k$  - степень полинома Баттерворта при описании спектральной плотности мощности процесса)

Таблица 1 - Результаты численных расчетов при использовании различных методов интерполяции

Интерполяция	$v = F_0 / (2F_c) \dots$ при $\delta_{и} = 2 \cdot 10^{-3}$					
	Степень полинома Баттерворта $k$ при описании $S_{\lambda}(\omega)$					
	1	2	3	4	5	$\infty$
Фильтр Винера	$2,05 \cdot 10^5$	46,5	9,5	5	1,7	1
Фильтр Баттерворта ( $m=1$ )	-	$0,55 \cdot 10^3$	150	80	80	80
Фильтр Баттерворта ( $m=2$ )	-	215	50	23	23	23
Фильтр Баттерворта ( $m=3$ )	-	145	30,5	13	13	13
Простейший RC фильтр	-	$10^3$	425	270	270	270
Ступенчатая (полиномом Лагранжа 0 порядка)	$3,0 \cdot 10^5$	445	315	260	255	255
Линейная (полиномом Лагранжа 1 порядка)	$2,05 \cdot 10^5$	60	21	14,5	14,5	14,5
Квадратичная (полиномом Лагранжа 2 порядка)	$2,05 \cdot 10^5$	52,5	12,5	8,5	-	6
Кубическая (полиномом Лагранжа 3 порядка)	$2,05 \cdot 10^5$	50	10,5	6,5	-	3,8

Из приведенных данных видно, что эффективность интерполяционного фильтра Баттерворта повышается с повышением его степени и степени полинома, описывающего спектр мощности восстанавливаемого случайного процесса, причем интерполяционный фильтр Баттерворта 4-го порядка примерно эквивалентен линейной интерполяции. Простейший RC - фильтр обладает наилучшими интерполирующими свойствами [16], [19].

### 3 Восстановление сообщений методом наименьших квадратов

При представлении непрерывного сообщения  $\lambda(t)$  регулярными выборками  $\lambda_i = \lambda(t_i)$ ,  $t_i = iT_0$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ , на интервале  $T = t_n - t_0^* = nT_0$  его восстановление на приемной стороне по полученным  $(n+1)$  выборкам предлагается выполнять методом наименьших квадратов. При этом восстанавливающий (аппроксимирующий) полином степени  $N_k$  определяется выражением:

$$\lambda^*(t) = \sum_{k=0}^{N_k} b_k W_k(t). \tag{3}$$

Коэффициенты  $b_k$  выбирают так, чтобы был минимальным квадрат среднего квадратического отклонения восстанавливающего полинома от исходного сообщения в полученных моментах опроса  $\sigma_{\lambda}^2 = (n+1)^{-1} \sum_{i=0}^n [\lambda^*(t_i) - \lambda(t_i)]^2 = \min$ . Последнее наиболее просто достигается вычислением коэффициентов по формуле  $b_k = \sum_{i=0}^n \lambda_i W_k(t_i)$  при условии, что базисные функции  $W_k(t)$  ортонормированы на множестве точек опроса:

$$\sum_{i=0}^n W_k(t) W_i(t_i) = \begin{cases} 1; & k = i; \\ 0; & k \neq i. \end{cases} \tag{4}$$

Оценим дисперсию погрешности представления непрерывного сообщения  $\lambda(t)$  на интервале  $T = nT_0$  полиномом (3). При использовании полиномов Чебышева в соответствии с общим выражением (3), которое в данном случае примет вид:

$$\sigma_{\lambda}^2 = 1 - 2/T \cdot \sum_{k=0}^{N_k} \sum_{i=0}^n W_k(t_i) \int_0^T r_{\lambda}(t - t_i) \times W_k(t) dt + T^{-1} \sum_{k=0}^{N_k} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n r_{\lambda}(t_i - t_j) W_k(t_i) W_k(t_j) \|W_k\|^2. \tag{5}$$

Рассматриваемые полиномы Чебышева определяются следующим выражением:

$$W_k(t) = \left[ \frac{(2k+1)n^{[k]}}{(n+k+1)^{[k+1]}} \right]^{0,5} \sum_{s=0}^k (-1)^{k+1} C_k^s C_{k+s}^s (t/T)^{[s]} n^{-[s]}, \quad 0 \leq t \leq nT_0,$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots, N_k$ ,  $a^{[s]} = a(a-1)(a-2)\dots(a-s+1)$ .

В частности, первые два полинома Чебышева определяются формулами:

$$W_0(t) = 1/\sqrt{n+1}; \quad W_1(t) = \sqrt{\frac{3}{n(n+1)(n+2)}} \left( \frac{2t}{T_0} - n \right); \quad n \geq 1; \quad 0 \leq t \leq nT_0.$$

Подставляя выражения  $W_0(t)$ , а затем  $W_0(t)$  и  $W_1(t)$  в (4), получим следующие выражения погрешностей представления при восстановлении по методу наименьших квадратов полиномами соответственно нулевой и первой степеней:

$$\delta_{\lambda}^2 = 1 - 2/(n+1) \cdot \sum_{i=0}^n (nT_0)^{-1} \int_0^{nT_0} r_{\lambda}(t - iT_0) dt + \frac{1}{(n+1)^2} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n r_{\lambda}[(i-j)T_0]; \tag{6}$$

$$\delta_{пп}^2 = 1 - 2 / (n + 1) \cdot \sum_{i=0}^n (nT_0)^{-1} \int_0^{nT_0} r_\lambda(t - iT_0) dt + \frac{1}{(n+1)^2} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n r_\lambda[(i-j)T_0] - \frac{6}{n(n+1)(n+2)} \sum_{i=0}^n (2i-n)(nT_0)^{-1} \int_0^{nT_0} r_\lambda(t - iT_0)(2i-n) dt + \frac{3}{(n+1)^2(n+2)^2} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n ((i-j)T_0) r_\lambda(t - iT_0)(2i-n)(2j-n). \quad (7)$$

Пусть, например,  $\Lambda(t)$  бесконечно дифференцируемый процесс с корреляционной функцией  $r_\lambda(\tau) = \frac{\sin \Omega_c \tau}{\Omega_c \tau} = \frac{\sin \frac{\pi}{vT_0} \tau}{\frac{\pi}{vT_0} \tau}$ , где  $v = F_0 / (2F_c)$ . Пользуясь разложением  $r_\lambda(\tau)$  в ряд

Тейлора, подставляя его в (7) и ограничиваясь в итоговом выражении для  $\delta_{пп}^2$  первым не равным нулю членом, получим искомое расчетное выражение для погрешности представления этого процесса выборками при восстановлении по методу наименьших квадратов полиномом первой степени  $\delta_{пп}^2 \approx (\pi n)^2 / (36v^2)$ . При  $v/n \geq \pi$  погрешность вычисления  $\delta_{пп}^2$ , вызванная отбрасыванием последующих членов ряда, меньше 1%.

Аналогичным образом на основании (6) и (7) получены расчетные формулы (табл. 2) для нескольких видов типовых корреляционных функций.

Таблица 2 - Расчетные формулы для нескольких видов типовых корреляционных функций

Метод представления	Метод восстановления	$N_k$	$\delta_{пп}^2$		
			$r_\lambda(\tau) = e^{(-\Omega_c \tau )}$	$r_\lambda(\tau) = (1 + \Omega_c \tau ) \times \exp(-\Omega_c \tau )$	$r_\lambda(\tau) = \sin(\Omega_c\tau) / (\Omega_c\tau)$
Регулярные выборки	Метод наименьших квадратов	0	$\pi / (2v)n = 1$ $\pi n / (3v); n \gg 1$	$n^2 \pi^2 / (12v^2)$	$n^2 \pi^2 / (36v^2)$
		1	$\pi / (3v)n = 1$ $2\pi n / (15v); n > 10$	$2\pi^3 / (45v^3)n = 1$ $\pi^3 n^3 / (105v^3); n > 10$	$\pi^4 n^4 / (600v^4)n = 1$ $\pi^4 n^4 / (3000v^4); n > 10$
	Полином Лагранжа	0	$\pi / (2v)$	$\pi^2 / (12v^2)$	$\pi^3 / (36v^3)$
		1	$\pi / (3v)$	$2\pi^3 / (45v^3)$	$\pi^4 / (600v^4)$

При сравнении этих выражений с соответствующими оценками для ступенчатой и линейной интерполяции полиномами Лагранжа видно, что при  $n = 1$  (две выборки на интервале представления  $T$ ) они совпадают, а при  $n > 1$  интерполяция дает меньшую погрешность.

Оценим коэффициент фильтрации  $\gamma_\phi$  внешних помех при использовании метода наименьших квадратов. Пусть значения ординат  $\lambda_i = \lambda(t_i)$ , поступающих на устройство восстановления, искажены внешним аддитивным некоррелированным шумом  $z_i$  с дисперсией  $\sigma_{z_i}^2$ :  $\lambda_{ui}^* = \lambda_i + z_i$ . Вычисленные по ним коэффициенты восстанавливающего полинома будут определяться выражением  $b_k = \sum_{i=0}^n \lambda_i^* W_k(t_i) = \sum_{i=0}^n (\lambda_i + z_i) W_k(t_i)$ . Подставляя это в (3), и проводя выкладки, получим  $\delta_\Sigma^2 = \delta_{пп}^2 + \delta_\Pi^2$ , где погрешность представления  $\delta_{пп}^2$  по-прежнему определяется выражением (5), а составляющая  $\delta_\Pi^2$  вызванная помехами:

$$\delta_\Pi^2 = \sigma_\Pi^2 / \sigma_\lambda^2 = 1 / \sigma_\lambda^2 \cdot \sum_{k=0}^{N_k} \sum_{i=0}^{N_k} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n m[Z_i Z_j] W_k(t_i) W_l(t_j) \cdot T^{-1} \int_0^T W_k(t) W_l(t) dt.$$

Учитывая некоррелированность помех  $m[Z_i Z_j] = \begin{cases} \sigma_{uu}^2; & i = j; \\ 0; & i \neq j \end{cases}$  и считая, как и раньше, что базисные функции удовлетворяют условию (4), окончательно найдем  $\sigma_{\Pi}^2 = T^{-1} \sigma_{uu}^2 \sum_{k=0}^N \|W_k\|^2 = \gamma_{\phi} \sigma_{uu}^2$ , откуда следует выражение  $\gamma_{\phi} = (1/T) \sum_{i=0}^{N_k} \|W_i(t)\|^2$  [13].

В частности, при восстановлении сообщения полиномами нулевой и первой степеней по методу наименьших квадратов получим из  $\gamma_{\phi} = (1/T) \sum_{i=0}^{N_k} \|W_i(t)\|^2$ , используя выражения для первых двух полиномов Чебышева  $W_0(t)$  и  $W_1(t)$  при  $N_k = 0$   $\gamma_{\phi} = (m+1)^{-1}$ ; при  $N_k = 1$   $\gamma_{\phi} = 2(m+2)^{-1}$ .

### 4 Дельта-дискретные и разностные представления

Известно большое число разновидностей разностных и дельта-дискретных представлений (например, с использованием разностей различного порядка; классическое, многоуровневое и дельта-сигма представление и т.п.) [17-19].

Суть разностных представлений непрерывных сообщений состоит в том, что вначале, как и при любом дискретном представлении, формируются выборки  $\lambda(t_i)$ , а затем на основании вероятностных свойств и конкретных  $N$  значений предыдущих выборок с условными номерами  $i = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$  осуществляется предсказание полиномом Лагранжа  $(N-1)$ -го порядка  $\lambda_{np}(t_i)$  очередной  $N$ -й выборки, которое сравнивается с действительным значением выборки, и формируется разность предсказания  $N$ -го порядка  $\Delta^N \lambda(t_i) = \lambda(t_i) - \lambda_{np}(t_i)$ . Последовательность этих конечных разностей запоминается или передается. По ним в последующем должно восстанавливаться исходное сообщение. Например, при использовании для предсказания полинома нулевого порядка (разностного представления первого порядка) передаются (запоминаются) разности  $\Delta \lambda(t_i) = \lambda(t_i) - \lambda(t_{i-1})$ , где в качестве прогнозирующего значения используется значение предыдущей выборки. Принципиально при удовлетворении некоторых условий могут использоваться различные алгоритмы разностного представления, отличающиеся комбинациями разностей различного порядка, и соответственно различным алгоритмом восстановления исходного процесса.

Конечная разность  $\Delta^N \lambda(t)$  произвольного порядка  $N$  в понятиях смещенных решетчатых функций на основании  $\Delta^N \lambda(t_i) = \sum_{k=0}^N (-1)^k C_N^k \lambda(t_i k T_0)$  [13] имеет вид:  $\Delta^N \lambda(t) = \Delta^N \lambda(l + \xi) = \sum_{i=0}^N (-1)^i C_N^i \lambda(l + \xi - i)$  и для нормального стационарного случайного процесса  $\lambda(t)$  с нулевым средним является также нормальным стационарным процессом с нулевым средним, причем дисперсия ее [15]:

$$\sigma_{\Delta N, \lambda}^2 = \sigma_{\lambda}^2 \{ C_{2N}^N + \sum_{i=0}^N \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^N (-1)^{i+j} C_N^i C_N^j r_{\lambda}[i-j] \}, \tag{8}$$

где  $i, j$  - целые натуральные числа;  $C_N^i$  - число сочетаний из  $N$  по  $i$ .

В частности, дисперсия разностей первых четырех порядков согласно (8) будет иметь вид [18]:

$$\begin{cases} \sigma_{\Delta\lambda}^2 = 2\sigma_\lambda^2[1 - r_\lambda[1]]; \\ \sigma_{\Delta^2\lambda}^2 = 2\sigma_\lambda^2(3 - 4r_\lambda[1] + r_\lambda[2]); \\ \sigma_{\Delta^3\lambda}^2 = 2\sigma_\lambda^2(10 - 15r_\lambda[1] + 6r_\lambda[2] - r_\lambda[3]); \\ \sigma_{\Delta^4\lambda}^2 = 2\sigma_\lambda^2(35 - 56r_\lambda[1] + 28r_\lambda[2] - 8r_\lambda[3] + r_\lambda[4]); \end{cases} \quad (9)$$

Результаты расчетов по (9) приведенных дисперсий разностных процессов для некоторых типов случайных процессов приведены в таблице 3. Соответственно, коэффициент передачи линейных устройств, может быть определен согласно [15] как  $W_p(j\omega) = [1 - \exp(-j\omega T_0)]^N$ .

Таблица 3 - Результаты расчетов приведенных дисперсий разностных процессов для некоторых типов случайных процессов

Характеристика процесса $\lambda(t)$		Приведенная дисперсия конечной разности $\sigma_{\Delta^N\lambda}^2$			
$r_\lambda(\tau)$	Порядок дифференцируемости процесса	$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
$e^{-\Omega_c \tau }$	0	$2\pi / v$	$4\pi / v$	$12\pi / v$	$40\pi / v$
$e^{-\Omega_c \tau }(1 + \Omega_c \tau )$	1	$\pi^2 / v^2$	$8\pi^3 / (3v^3)$	$4\pi^3 / (v^3)$	$32\pi^3 / (3v^3)$
$e^{-\Omega_c \tau }(1 + \Omega_c \tau  + \Omega_c^2\tau^2 / 3)$	2	$\pi^2 / (3v^2)$	$\pi^4 / v^4$	$44\pi^5 / (15v^5)$	$32\pi^5 / (9v^5)$
$\sin \Omega_c \tau / (\Omega_c \tau)$	$\infty$	$\pi^2 / (3v^2)$	$\pi^4 / (5v^4)$	$\pi^6 / (7v^6)$	$\pi^8 / (9v^8)$

Как видно из таблицы 3, дисперсия разностного процесса соответствующего порядка имеет минимальное значение при порядке конечной разности, на единицу превышающем порядок дифференцируемости исходного процесса. С учетом требования простоты технической реализации квазиоптимальными при невысоких порядках дифференцируемости исходного процесса являются разности невысоких степеней (не выше 3-4). Важно также, что для разностного процесса характерно, что значения в соседних точках опроса оказываются существенно менее коррелированы, нежели выборки исходного процесса в тех же точках опроса.

Разностным представлениям свойствен известный недостаток, который заключается в накоплении и размножении ошибок при передаче и записи сигналов. Так, ошибка в восстановлении одной выборки (координаты) приводит к ошибочному восстановлению последующих предсказанных выборок сообщения и соответственно к искажению постоянной и низкочастотной составляющих восстанавливаемого сообщения.

При передаче сообщений, имеющих постоянную составляющую (например, при передаче измерительной информации), целесообразно передаваемые конечные разности объединить в блоки и в начале блока передавать полную (опорную) выборку и все разности низших порядков. Для сообщений, не содержащих постоянной составляющей (например, при передаче речевых сообщений), этого, как правило, не делается.

Дельта-представления в классическом понимании являются некоторым развитием дискретно-квантованного представления конечными разностями. При достаточно большой частоте опроса конечная разность между соседними выборками

ввиду ее малости может квантоваться на два уровня  $|\Delta N_\lambda| \leq d_{кв}$ , где  $d_{кв}$  - шаг квантования. При этом может формироваться либо сигнал 0 (если  $\Delta N_\lambda \leq 0$ ), либо сигнал 1 (если  $\Delta N_\lambda \geq 0$ ). В литературе наиболее исследовано дельта-представление первыми разностями (классическое) [19].

Сигнал при классическом дельта-представлении без учета опорной выборки представляет собой последовательность символов 1 и 0, отображающих знак приращения входного непрерывного процесса (сообщения) в данной точке опроса относительно предыдущей выборки или относительно значения аппроксимирующего напряжения, восстановленного из выходного импульсного сигнала.

Отметим, что эффективность разностных и дельта-представлений зависит от правильного выбора алгоритмов работы прогнозирующего устройства, квантователя по уровню и интерполирующего устройства. Восстановление исходного процесса из разностного ведется путем первоначального восстановления выборок, из которых путем интерполяционной обработки восстанавливается исходное сообщение.

При разностных представлениях частоту опроса  $F_0 = 1/T_0$  сообщения  $\lambda(t)$  следует выбирать так же, как и при представлении регулярными выборками, т. е. исходя из требуемой точности восстановления при выбранном методе интерполяции. Таким образом, частота опроса  $F_0$  и параметр  $\nu$  при разностном представлении могут быть выбраны на основании данных, приведенных в [13].

При соответствующей процедуре формирования квантованных разностей и дельта-приращений накопления ошибок квантования не происходит. Если не считаться с возможным явлением накопления ошибок, то число координат при разностном представлении будет таким же, как и при любом другом представлении (например, по выборкам). Поэтому эффективность разностного представления может быть оценена лишь на основании учета объема каждой координаты. При разностном дискретно-квантованном представлении обычно образуются разности квантованных значений выборок. При дельта-дискретных представлениях имеют место два основных вида погрешностей: квантования и перегрузки по наклону. Восстановление исходного процесса из дельта-последовательности ведется обычно путем первоначального восстановления выборок, по которым соответствующей интерполяцией восстанавливается исходный процесс.

В этом случае погрешность дельта-представления будет определяться так же, как для разностного представления соответствующего порядка, с тем лишь отличием, что выбор частоты опроса должен быть подчинен дополнительному требованию:

$$\kappa_\Delta = 1 \text{ (при } a=2), \quad (10)$$

где  $\kappa_\Delta$  - число двоичных разрядов кода, используемое для передачи значения одной дельта-разности;  $a$  - основание кода. Вполне очевидно, что для того, чтобы не наступали перегрузки по наклону, период опроса следует выбирать исходя из следующего равенства по критерию равномерного доверительного приближения [19]:

$$\max_i \max_{t \in T} |\Delta N_{\lambda_i}(t)| \leq d_{кв} / 2. \quad (11)$$

Учитывая, что здесь мы рассматривали лишь нормальные случайные процессы и их конечные нормальные разности, в качестве первого инженерного приближения можно принять для соблюдения неравенства (11) условие:

$$d_{кв} = \chi_p \sigma_{\Delta N_\lambda}, \quad (12)$$

т. е. принятый шаг квантования  $d_{кв}$  для рассматриваемого разностного процесса должен представлять собой динамический диапазон изменения этой конечной разности.

Значение коэффициента  $\chi_p$  следует выбирать в зависимости от допустимой доверительной вероятности. Так, например, для доверительных вероятностей  $P = 0.997 \div 0,9999$  можно принять  $\chi_p = 6 \div 8$ . В дальнейших исследованиях будем принимать  $\chi_p = 6$ , что соответствует  $P = 0.997$ . В самом общем случае значение  $P$  (соответственно и значение  $\chi_p$ ) можно назначать исходя из требований к точности представления, например из условия  $P \approx \delta_{кв}^2$ . Как видно из данных (табл. 3),  $\sigma_{\Delta N_\lambda}^2$  зависит от вида исходного процесса, степени используемой разности и коэффициента  $\nu = F_0 / (2F_c)$ . Вполне очевидно, что при заданных  $R_\lambda(\tau)$ ,  $N$  и  $d_{кв}$  параметр  $\nu$  должен быть выбран таким, чтобы выполнялось неравенство (11).

В частности, при дельта-представлении процесса с ограниченным спектром  $[r_\lambda(\tau) = \sin \Omega_c \tau / (\Omega_c \tau)]$ , восстановлении путем интерполяции полиномом нулевого порядка  $N_k = 0$  и использовании конечной разности первого порядка ( $N = 1$ ) на основании данных (табл. 3) и формул (10) и (12) получим  $\delta_{ПР\Delta}^2 + \delta_{кв\Sigma\Delta}^2 = \pi^4 \cdot (36\nu^2)^{-1} + 3\delta_{\Delta\lambda}^2 \approx \pi^2 / \nu^2$ . Соответственно при использовании интерполяции полиномом первого порядка ( $N - 1$ ) и конечной разности второго порядка ( $N - 2$ ):  $\sigma_{ПР\Delta}^2 + \sigma_{кв\Sigma\Delta}^2 = \pi^4 \cdot (600\nu^4)^{-1} + 2\pi^4 \cdot (5\nu^4)^{-1} \approx 2\pi^4 / (5\nu^4)$ .

Используя  $\delta_{ПР}^2 = \sigma_{ПР}^2 / (\sigma_\lambda^2) = 1 - \sum_{i=0}^{N_k} \delta_i^2$  [13] и считая, например, что  $\delta_{ПР}^2 = \delta_{кв\Sigma}^2 = \delta_{ПЕР\Sigma}^2 = (1/3)\delta_\Sigma^2$ , можно вычислить  $\nu$  как функцию  $\delta_\Sigma$ . Полученные таким образом соотношения  $\nu = f(\delta_\Sigma)$  для рассматриваемых видов исходного процесса (сообщений) в предположении, что степень интерполирующего полинома  $N_k$  и порядок используемой конечной разности связаны соотношением  $N_k = N - 1$ , представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Коэффициент избыточности временной дискретизации при разных методах представления

Метод представления	$N_k$	Коэффициент избыточности временной дискретизации $\nu$		
		$r_\lambda(\tau) = e^{(-\Omega_c \tau )}$	$r_\lambda(\tau) = (1 + \Omega_c \tau ) \times \exp(-\Omega_c \tau )$	$r_\lambda(\tau) = \sin(\Omega_c \tau) / (\Omega_c \tau)$
Выборками или конечными разностями	0	$3\pi / (2\delta_\Sigma^2)$	$[\frac{\pi^2}{4\delta_\Sigma^2}]^{1/2}$	$[\frac{\pi^2}{12\delta_\Sigma^2}]^{1/2}$
	1	$\pi / (\delta_\Sigma^2)$	$[\frac{2\pi^3}{15\delta_\Sigma^2}]^{1/3}$	$[\frac{\pi^4}{200\delta_\Sigma^2}]^{1/4}$
Дельта-приращениями	0	$39\pi / (4\delta_\Sigma^2)$	$[\frac{37\pi^2}{8\delta_\Sigma^2}]^{1/2}$	$[\frac{37\pi^2}{24\delta_\Sigma^2}]^{1/2}$
	1	$25\pi / (2\delta_\Sigma^2)$	$[\frac{121\pi^3}{15\delta_\Sigma^2}]^{1/3}$	$[\frac{241\pi^4}{400\delta_\Sigma^2}]^{1/4}$

## 5 Показатель равномерного приближения для погрешности дискретного представления

При синтезе устройств АСНИ и ИИС для обработки текущих реализаций случайного процесса в реальном масштабе времени (например, устройств сжатия данных), а также в тех случаях, когда необходимо оценить предельные отклонения измеряемых параметров от номинальных значений, наиболее удобным является показатель равномерного приближения  $\varepsilon_{\max}$ . Известные оценки [8] величины  $\varepsilon_{\max}$  базируются на оценках максимальных значений производных процесса  $\Lambda(t)$ , априорное получение которых с необходимой точностью обычно весьма затруднительно, особенно, если  $\Lambda(t)$  - случайный процесс.

Ниже предлагается процедура определения  $\varepsilon_{\max}$  с использованием оценок средней квадратической погрешности, полученных в данной работе. Предполагая, что исследуемый процесс  $\Lambda(t)$  имеет нормальное распределение, а поэтому значения восстанавливающего полинома  $\Lambda^*(t)$  распределены также нормально в силу линейности преобразований [13]

$$A\lambda(t) = \int_T V_i(t)\lambda(t)dt = \lambda_i; \quad i = 0, 1, 2, \dots, N_k \quad \text{и} \quad B(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{N_k}) = \sum_{i=0}^{N_k} \lambda_i W_i(t) = \lambda^*(t),$$

погрешность дискретного представления также имеет нормальное распределение для каждого момента времени  $t$ . Тогда при заданной доверительной вероятности  $P$  максимальное по множеству значение  $E(t)$  можно определить как квантиль  $|E(t)|_p$  порядка  $P$  нормального распределения, который в свою очередь, можно связать со средним квадратическим значением погрешности представления  $\delta_{пп}(t)$  через так называемый энтропийный коэффициент  $\chi'_p$ , который нетрудно найти по таблицам нормального распределения (например, для  $P=0,997$ ;  $\chi'_p=3$ ):  $\max_i |\varepsilon_i(t)| = |E(t)|_p = \chi'_p \delta_{пп}(t)$

При этих рассуждениях математическое ожидание процесса  $\Lambda(t)$ , а следовательно, и погрешности  $E(t)$  предполагалась равным нулю. Выражение для  $\varepsilon_{\max}$  теперь принимает вид:

$$\varepsilon_{\max} = \chi'_p \max_{i \in T} \delta_{пп}(t), \tag{13}$$

и, следовательно, определение сводится к нахождению максимального на интервале представления значения дисперсии погрешности представления  $\sigma_{пп}^2$ . Для этого необходимо задать конкретный вид восстанавливающего полинома и класс процесса. Оценим максимальную погрешность представления сообщения выборками при интерполяции полиномами Лагранжа нулевой и первой степеней. В этом случае дисперсия текущей погрешности определяется выражением [13]

$$\sigma_{пп}^2[l, \xi] = \sigma_\lambda^2 - 2 \sum_{i=0}^{N_k} \lambda[i, 0] W_{II}[l-i, \xi] + \sum_{i=0}^{N_k} \sum_{k=0}^{N_k} R_\lambda[i-k, 0] W_{II}[l-i, \xi] W_{II}[l-k, \xi],$$

из которого для  $N_k = 0$  и  $N_k = 1$  соответственно получим выражения:

$$\sigma_{пп}^2(t) = \sigma_{пп}^2(\xi) = 2\sigma_\lambda^2(1 - r_\lambda[\xi]), \tag{14}$$

$$\sigma_{пп}^2(t) = \sigma_{пп}^2(\xi) = 2\sigma_\lambda^2\{1 + \xi^2 - \xi + \xi(1 - \xi)r_\lambda[1] - (1 - \xi)r_\lambda[\xi] = \xi r_\lambda[1 - \xi]\}. \tag{15}$$

При симметричной ступенчатой интерполяции на  $\pm T_0/2$  влево и вправо от каждой выборки дисперсия погрешности достигает максимума, как видно из (13), на краях интервала ( $\xi = \pm 1/2$ ):

$$\max_{i \in T} \sigma_{пп}^2(t) = 2\sigma_\lambda^2(1 - r_\lambda[0,5]). \tag{16}$$

С погрешностью линейной интерполяции дело обстоит сложнее. Дифференцируя выражение (15) по  $\xi$  и приравнивая производную к нулю, получим трансцендентное уравнение, решение которого зависит от класса процесса (вида его корреляционной функции):

$$2(2\xi - 1) + r_\lambda[1](1 - 2\xi) + r_\lambda[\xi] - (1 - \xi)r'_\lambda[\xi] - r_\lambda[1 - \xi] + \xi r'_\lambda[1 - \xi] = 0. \quad (17)$$

Для приближенного решения этого уравнения используем разложение корреляционной функции в ряд Тейлора вблизи  $\xi = 0$ . Тогда в зависимости от класса процесса, а именно, от порядка его дифференцируемости в среднем квадратическом, получим:

- для недифференцируемых процессов:

$$r_\lambda[\xi] = 1 - \xi |r'_\lambda[0]| + \xi^2 / 2 \cdot |r''_\lambda[0]| - \dots; \quad (18)$$

- для однократно и многократно дифференцируемых процессов

$$r_\lambda[\xi] = 1 - \xi^2 / 2 \cdot |r''_\lambda[0]| + \dots. \quad (19)$$

Подставляя поочередно разложения (18) и (19) в уравнение (17), найдем, что приближенное значение  $\xi$ , обеспечивающее максимум выражения (15) как для недифференцируемых процессов, так и для однократно и многократно дифференцируемых процессов, одинаково:  $\xi \approx 0,5$ . Эта оценка тем точнее, чем сильнее неравенство  $T_0 \ll \tau_k$  ( $v \gg 1$ ), т.е. чем меньше допустимая погрешность дискретного представления. Она совпадает с той, которая получена в теории интерполирования функций [21] на основе расчета погрешности интерполяции через остаточный член формулы Лагранжа, куда входят оценки производных процесса  $\Lambda(t)$ .

Однако полученный результат распространяется также на не дифференцируемые процессы. Через оценки производных этот результат не мог быть получен, так как процесс не дифференцируем. Подставляя  $\xi \approx 0,5$  в (14), найдем максимальное значение дисперсии погрешности линейной интерполяции [20], [22]:

$$\max_{i \in T} \sigma_{np}^2(t) = \sigma_\lambda^2(1,5 - 2r_\lambda[0,5] + 0,5r_\lambda[1]). \quad (20)$$

Подставляя далее выражения (16) и (20) в формулу (13) и принимая доверительную вероятность  $P=0,997$ , получим следующие искомые окончательные выражения максимальной по модулю погрешности, приведенной к размаху  $\Lambda/2 + 3\sigma_\lambda$  процесса:

- ступенчатая симметричная интерполяция  $\delta_m = \varepsilon_{\max}(\Lambda/2)^{-1} = \sqrt{2(1 - r_\lambda[0,5])}$ ;

- линейная интерполяция  $\delta_m = \varepsilon_{\max}(\Lambda/2)^{-1} = \sqrt{1,5 - 2r_\lambda[0,5] + 0,5r_\lambda[1]}$  (21).

В качестве примера вычислим максимальную погрешность линейной интерполяции бесконечно дифференцируемого процесса с нормированной корреляционной функцией  $r_\lambda(\tau) = \sin \Omega_c \tau / (\Omega_c \tau)$ ;  $\sigma_\lambda^2 = 1$ .

Разлагая  $r_\lambda(\tau)$  в ряд Тейлора при  $T = T_0$  подставляя его в (21) и ограничиваясь в итоговом выражении первым не равным нулю членом, получим оценку максимальной по модулю погрешности линейной интерполяции рассматриваемого процесса с доверительной вероятностью  $P=0,997$ :  $\delta_m \approx [\pi^4 / (274v^4)]^{0,5}$ .

Оценки максимальной погрешности ступенчатой и линейной интерполяции, полученные аналогичным образом для процессов с различными корреляционными функциями, приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Оценки максимальной погрешности ступенчатой и линейной интерполяции, полученные аналогичным образом для процессов с различными корреляционными функциями

$N_k$	$\delta_m$		
	$r_\lambda(\tau) = \exp(-\Omega_c  \tau )$	$r_\lambda(\tau) = \exp(1 + \Omega_c  \tau ) \exp(-\Omega_c  \tau )$	$r_\lambda(\tau) = \sin(\Omega_c \tau) / (\Omega_c \tau)$
0	$(\pi / \nu)^{1/2}$	$[\pi^2 / (4\nu^2)]^{1/2}$	$[\pi^2 / (12\nu^2)]^{1/2}$
1	$[\pi / (2\nu)]^{1/2}$	$[\pi^3 / (12\nu^3)]^{1/2}$	$[\pi^4 / (274\nu^4)]^{1/2}$

## 6 Погрешности экстраполяции

Продление полинома за пределы интервала представления, на котором этот полином построен (экстраполяция), причем внутри интервала полином может быть как интерполирующим, так и аппроксимирующим. Экстраполяцию вправо от правой границы интервала (т.е. в сторону увеличения аргумента) обычно называют предсказанием (прогнозом), если аргументом является время. Средний (по реализациям) квадрат погрешности экстраполяции  $\delta_s^2(t)$  в точке  $t$  ( $t \in T$ ) ( $T$  - интервал представления) по форме исходной записи не отличается от погрешности представления  $\delta_{пп}^2(t)$  внутри интервала [23].

В частности, для стационарного процесса  $\lambda(t)$  с нулевым: средним при использовании полиномов Лагранжа [13] выражение для  $\sigma_s^2(t)$  удобнее переписать в натуральном времени:

$$\sigma_s^2(t) = \sigma_\lambda^2 - 2 \sum_{i=0}^{N_k} R_\lambda(t-t_i) W_u(t-t_i) + \sum_{i=0}^{N_k} \sum_{j=0}^{N_k} R_\lambda(t_i-t_j) W_u(t-t_i) W_u(t-t_j); t > t_{N_k}. \quad (22)$$

При использовании для экстраполяции полиномов нулевой и первой степеней (ступенчатая или линейная экстраполяция) на основании (22) получим соответственно:

- при  $N_k = 0$ : 
$$\delta_s^2(\theta) = \sigma_s^2(\theta) / \sigma_\lambda^2 = 2[1 - r_\lambda(\theta T_0)]; \quad (23)$$

- при  $N_k = 1$ : 
$$\delta_s^2(\theta) = \theta^2 + (\theta+1)^2 - 2r_\lambda(T_0)\theta(\theta+1) - 2(\theta+1)r_\lambda(\theta T_0) + 2\theta r_\lambda[(\theta+1)T_0], \quad (24)$$

где  $\theta = 0, 1, 2, 3, \dots$  - число шагов экстраполяции вправо от правой (или влево от левой) границы интервала представления, длина которого в данных случаях  $T = T_0$ .

При  $\theta = 1$  (экстраполяция на один шаг) выражения (23) и (24) совпадают, с приведенными дисперсиями конечных разностей соответственно первого и второго порядков (9):

- при  $N_k = 0$ : 
$$\sigma_s^2(1) = 2(1 - r_\lambda(T_0)) = \sigma_{\Delta\lambda}^2;$$

- при  $N_k = 1$ : 
$$\sigma_s^2(1) = 2(3 - 4r_\lambda(T_0) + r_\lambda(2T_0)) = \sigma_{\Delta^2\lambda}^2.$$

Приближенные оценки погрешности экстраполяции, определены на основании формул (21) и (22) для нескольких моделей процессов. Результаты приведены в таблице 6.

Таблица 6. Приближенные оценки погрешности экстраполяции для нескольких моделей процессов

$r_\lambda(\tau)$	$\sigma_s^2(\theta)$	
	$N_k = 0$	$N_k = 1$
$e^{-\Omega_c  \tau }$	$2\pi\theta / \nu$	$2\pi\theta(\theta + 1) / \nu$
$(1 + \Omega_c  \tau )e^{-\Omega_c  \tau }$	$\pi^2\theta^2 / \nu^2$	$4/3 \cdot \theta^2(\theta + 1)\pi^3 / \nu^3$
$\sin \Omega_c  \tau  / (\Omega_c  \tau )$	$\pi^2\theta^2 / (3\nu^2)$	$\theta^2(\theta + 1)^2 \pi^4 / (20\nu^4)$

Погрешность приближения при  $\Omega_c T_0 \theta = \pi\theta / \nu \ll 1$  не превышает 1-3%. Из сравнения с соответствующими значениями средней на интервале погрешности представления  $\delta_{np}^2$  видно, что при фиксированном шаге дискретизации  $\delta_s^2(\theta) > \delta_{np}^2$  для любого  $\theta$ .

## Заключение

Проведен поиск оптимального способа интерполяции. Предложен метод дискретизации с введением предискажений, для рассматриваемого сообщения, обеспечивающий даже несколько меньшее значение дисперсии интерполяционной погрешности, чем при оптимальной интерполяции без предискажений. Проведена оценка различных методов интерполяции. Приведенные данные позволяют сделать следующие выводы:

- использование оптимальных способов интерполяции даже для простейших моделей сообщения из-за сложности реализации и трудоемкости вычислений вряд ли является целесообразным;
- из-за высокой эффективности и сравнительной простоты технической реализации наиболее широко используется интерполяционный полином Лагранжа;
- при интерполяции случайных процессов полиномом Лагранжа погрешность интерполяции убывает с повышением его степени, однако близкой к оптимальной является степень полинома Лагранжа, примерно равная степени полинома, описывающего спектральную плотность мощности восстанавливаемого случайного процесса;
- в большинстве практических случаев достаточно высокой эффективностью обладает полином Лагранжа первой-третьей степеней. При работе в шумах дальнейшее повышение степени полинома нецелесообразно;
- при регулярном представлении непрерывных сообщений выборками с гарантированной погрешностью  $\sigma_{np} = 10^{-1} \div 10^{-3}$  период опроса должен выбираться значительно меньше интервала корреляции сообщения. При этом между отдельными дискретными выборками будут сильные корреляционные связи.

В полученных оценках погрешности восстановления не учитывалась задержка восстановления (интерполяции, аппроксимации). Учет задержки сопровождается увеличением погрешности. Он необходим при рассмотрении восстановления в замкнутых (следающих) системах, в которых, как показывает анализ, из-за быстрого роста составляющей погрешности, вызванной задержкой, с увеличением степени восстанавливаемого полинома следует рекомендовать использование восстанавливающих полиномов нулевого порядка.

Исследованы непрерывные сообщения в виде регулярных выборок при восстановлении методом наименьших квадратов. Установлено, при представлении непрерывных сообщений выборками восстановление методом наименьших квадратов не позволяет снизить частоту регулярного опроса по сравнению с интерполяцией: интерполяция обеспечивает меньшую по сравнению с аппроксимацией (методом наименьших квадратов) частоту опроса (при заданной степени полинома). Обосновано, что коэффициент фильтрации внешних помех при использовании метода уменьшается с ростом числа узлов интерполяции  $(n+1)$  на интервале  $T$  и может быть меньше, чем при представлении коэффициентами ортогонального ряда (17) или при представлении выборками с интерполяцией полиномом Лагранжа.

Исследованы разностные и дельта-дискретные представления. Установлено, что отличительной особенностью дельта-представлений по сравнению с представлением по выборкам является наличие дополнительной составляющей погрешности из-за перегрузки системы квантования по наклону (крутизне). Это происходит в том случае, если скорость изменения сообщения больше, чем скорость аппроксимирующего (прогнозирующего) напряжения. При разностных, и дельта-представлениях имеет место фактически одна и та же структурная схема дискретизации и восстановления. В интересах доведения результатов исследования до инженерных расчетных зависимостей при дельта-представлениях широкого класса стационарных случайных процессов целесообразно параметры дискретизации выбирать так, чтобы вероятность появления перегрузок по наклону была пренебрежимо малой (при этом погрешность перегрузок можно не учитывать).

Сопоставление приведенных в табл. 2 выражений для дельта - представлений, с одной стороны, и представлений по выборкам и разностных, с другой, показывает, что при одинаковых требованиях к точности представления при дельта-представлениях требуется значительно большая частота опроса (параметр  $\nu$ ), что является вполне естественным.

Исследования погрешности дискретного представления по показателю равномерного приближения. Определена максимальная погрешность линейной интерполяции бесконечно дифференцируемого процесса с корреляционной функцией  $r_\lambda(\tau) = \sin \Omega_c \tau / (\Omega_c \tau)$ ,  $\sigma_\lambda^2 = 1$ . Сделана оценка максимальной по модулю погрешности линейной интерполяции рассматриваемого процесса с доверительной вероятностью  $P=0,997$ :  $\delta_m \approx [\pi^4 / (274\nu^4)]^{0,5}$ . Оценки максимальной погрешности ступенчатой и линейной интерполяции, полученные аналогичным образом для процессов с различными корреляционными функциями, приведены в таблице 5.

Приближенные оценки погрешности экстраполяции, определены на основании формул (21) и (22) для нескольких моделей процессов. Результаты приведены в таблице 6. Погрешность приближения при  $\Omega_c T_0 \theta = \pi \theta / \nu \ll 1$  не превышает 1-3%.

## Список литературы

1. Кузнецов, С. В. Модель единой централизованной автоматизированной системы управления техническим состоянием вооружения, военной и специальной техники / С. В. Кузнецов, А. М. Винограденко. *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2018. Т. 10, № 4. С. 48-54. DOI 10.24411/2409-5419-2018-10096. EDN YATSQX.
2. Обеспечение эффективности информационно-измерительных и управляющих систем / О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин, М. Н. Крамм, В. В. Шерстнев. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2020. № 4(34). С. 5-16. DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-1. EDN JXMQIW.

3. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы научных исследований для аэродинамического эксперимента / Е. Д. Пометун, Р. А. Хрипунов, А. В. Васильева. *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2020. № 1. С. 4-8. EDN BAUJKR.
4. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы измерения параметров турбулентности / Е. Д. Пометун, В. Н. Лебедев. *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2025. № 1. С. 20-25. DOI 10.5281/zenodo.15056665. EDN BEWEYW.
5. Полтавский, А. В. Оптимизация информационно-измерительной системы беспилотного воздушного судна / А. В. Полтавский, А. А. Тюгашев, Н. К. Юрков. *Надежность и качество сложных систем*. 2021. № 4(36). С. 44-55. DOI 10.21685/2307-4205-2021-4-6. EDN UOUUMU.
6. Безбородова, О. Е. Интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система контроля состояния территориальной техносферы / О. Е. Безбородова. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2022. № 2(40). С. 21-28 DOI 10.21685/2307-5538-2022-2-3. EDN ZPLXVQ.
7. Валеев, А. Ф. Информационно-программное обеспечение автоматизированной системы научных исследований живучести объектов добычи газа / А. Ф. Валеев. *Программные продукты и системы*. 2023. № 2. С. 263-271. DOI 10.15827/0236-235X.142.263-271. EDN BYTWHK.
8. Теплова, О. В. Принципы распознавания психоэмоционального состояния личности в автоматизированных системах управления / О. В. Теплова, О. А. Криводубский. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. № 4(31). С. 20-28. DOI 10.34757/2413-7383.2023.31.4.003. EDN LEPEBB.
9. Полтавский, А. В. Модель управления состоянием оптико-электронного тракта информационно-измерительных и управляющих систем / А. В. Полтавский, Н. А. Кузин, Н. К. Юрков. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2023. № 3(45). С. 5-15. DOI 10.21685/2307-5538-2023-3-1. EDN ZVTOQU.
10. Анцыферов, С. С. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, К. Е. Русанов. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. № 2(33). С. 37-44. DOI 10.24412/2413-7383-2024-2-37-44. – EDN WLSZIT.
11. Синтез методов цифровой регистрации в системах сбора и обработки измерительной информации для обеспечения достоверности в информационно-управляющих системах / Ж. У. Севинов, Б. М. Темербекова, У. Б. Маманазаров, Б. М. Бекимбетов. *Потомки Аль-Фаргани*. 2024. № 4. С. 91-96. DOI 10.5281/zenodo.14555403.
12. Основы информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, В. В. Данилов, И. А. Третьяков, Е. В. Колесник. *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2024. № 3. С. 64-74. DOI 10.5281/zenodo.14018604. EDN SDSQAP.
13. Оптимальное дискретное представление непрерывных измерительных процессов в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, В. В. Данилов, И. А. Третьяков [и др.] *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2024. № 4. С. 52-62. DOI 10.5281/zenodo.14514529. EDN VEQGYZ.
14. Процедура восстановления непрерывных сообщений в измерительных процессах в АСУ И АСНИ / В. Ю. Подлесный, И. А. Третьяков, В. В. Данилов [и др.]. *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2025. № 1. С. 112-120. DOI 10.5281/zenodo.15056709. EDN MFJTTN.
15. *Цифровые информационно-измерительные системы: Теория и практика* / А. Ф. Фомин, О. Н. Новоселов, К. А. Победоносцев [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1996. 445 с.
16. Волков, В. Л. *Программное обеспечение цифровых вычислительных устройств* / В. Л. Волков. Арзамас: НГТУ, 1999. 98 с.
17. Сурогина, В. А. *Информационно-измерительная техника и электроника* / В. А. Сурогина, В. И. Калашников, Г. Г. Раннев. М.: Высшая школа, 2006. 512 с.
18. Цапенко, М. П. *Измерительные информационные системы* / М. П. Цапенко. М.: Энергоатомиздат, 1985. 440 с.
19. Волков В.Л. *Проектирование цифровых алгоритмов информационно-измерительных систем* / В. Л. Волков. Москва: Изд-во МАИ, 1991. 33 с.
20. Демидович, Б. П., *Основы вычислительной математики* / Б. П. Демидович, И. А. Марон. СПб.: Изд-во Лань, 2011. 672 с.
21. Прохоров, С. А. *Математическое описание и моделирование случайных процессов* / С. А. Прохоров. Самара: Изд-во СамГАУ, 2001. 209 с.

22. Ватутин, В. А. *Вероятностные методы в физических исследованиях* / В. А. Ватутин, Т. М. Телевинова, В. П. Чистяков. М.: Наука, 1985. 207 с.
23. Алгоритмы экстраполяции участков экспериментальных кривых / В. В. Данилов, И. А. Третьяков, Я. И. Рушечников, А. В. Шалаев. *Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2018. № 50. С. 10-15. EDN YTXPZR.

## References

1. Kuznetsov, S. V. Model edinoi tsentralizovannoi avtomatizirovannoi sistemy upravleniia tekhnicheskim sostoianiem vooruzheniia, voennoi i spetsialnoi tekhniki / S. V. Kuznetsov, A. M. Vinogradenko // *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniiah Zemli*. – 2018. – Т. 10, № 4. – С. 48-54. – DOI 10.24411/2409-5419-2018-10096. – EDN YATSQX.
2. Obespechenie effektivnosti informatsionno-izmeritelnykh i upravliaiushchikh sistem / O. E. Bezborodova, O. N. Bodin, M. N. Kramm, V. V. Sherstnev // *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol*. – 2020. – № 4(34). – С. 5-16. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-1. – EDN JXMQIW.
3. Pometun, E. D. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy nauchnykh issledovaniia dlia aerodinamicheskogo eksperimenta / E. D. Pometun, R. A. Khripunov, A. V. Vasileva // *Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki*. – 2020. – № 1. – С. 4-8. – EDN BAUIJKR.
4. Pometun, E. D. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy izmereniia parametrov turbulentnosti / E. D. Pometun, V. N. Lebedev // *Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki*. – 2025. – № 1. – С. 20-25. – DOI 10.5281/zenodo.15056665. – EDN BEWEYW.
5. Poltavskii, A. V. Optimizatsiia informatsionno-izmeritelnoi sistemy bespilotogo vozdušnogo sudna / A. V. Poltavskii, A. A. Tiugashev, N. K. Iurkov // *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem*. – 2021. – № 4(36). – С. 44-55. – DOI 10.21685/2307-4205-2021-4-6. – EDN UOUUMU.
6. Bezborodova, O. E. Intellektualnaia informatsionno-izmeritelnaia i upravliaiushchaia sistema kontroliia sostoiianiia territorialnoi tekhnosfery / O. E. Bezborodova // *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol*. – 2022. – № 2(40). – С. 21-28. – DOI 10.21685/2307-5538-2022-2-3. – EDN ZPLXVQ.
7. Valeev, A. F. Informatsionno-programmnoe obespechenie avtomatizirovannoi sistemy nauchnykh issledovaniia zhivuchesti obiektov dobychi gaza / A. F. Valeev // *Programmnye produkty i sistemy*. – 2023. – № 2. – С. 263-271. – DOI 10.15827/0236-235X.142.263-271. – EDN BYTWHK.
8. Teplova, O. V. Printsipy raspoznavaniia psikhoeotsionalnogo sostoiianiia lichnosti v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniia / O. V. Teplova, O. A. Krivodubskii // *Problemy iskusstvennogo intellekta*. – 2023. – № 4(31). – С. 20-28. – DOI 10.34757/2413-7383.2023.31.4.003. – EDN LEPEBB.
9. Poltavskii, A. V. Model upravleniia sostoianiem optiko-elektronnogo trakta informatsionno-izmeritelnykh i upravliaiushchikh sistem / A. V. Poltavskii, N. A. Kuzin, N. K. Iurkov // *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol*. – 2023. – № 3(45). – С. 5-15. – DOI 10.21685/2307-5538-2023-3-1. – EDN ZBTOQU.
10. Antsyferov, S. S. Intellektualnye sistemy upravleniia tekhnologicheskimi protsessami / S. S. Antsyferov, K. N. Fazilova, K. E. Rusanov // *Problemy iskusstvennogo intellekta*. – 2024. – № 2(33). – С. 37-44. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-2-37-44. – EDN WLSZIT.
11. Sintez metodov tsifrovoi registratsii v sistemakh sbora i obrabotki izmeritelnoi informatsii dlia obespecheniia dostovernosti v informatsionno-upravliaiushchikh sistemakh / Zh. U. Sevinov, B. M. Temerbekova, U. B. Mamanazarov, B. M. Bekimbetov // *Potomki Al-Fargani*. – 2024. – № 4. – С. 91-96. – DOI 10.5281/zenodo.14555403.
12. Osnovy informatsionno-izmeritelnykh tekhnologii v ASU i ASNI / V. Iu. Podlesnyi, V. V. Danilov, I. A. Tretiakov, E. V. Kolesnik // *Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki*. – 2024. – № 3. – С. 64-74. – DOI 10.5281/zenodo.14018604. – EDN SDSQAP.
13. Optimalnoe diskretnoe predstavlenie nepreryvnykh izmeritelnykh protsessov v ASU i ASNI / V. Iu. Podlesnyi, V. V. Danilov, I. A. Tretiakov [i dr.] // *Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki*. – 2024. – № 4. – С. 52-62. – DOI 10.5281/zenodo.14514529. – EDN VEQGYZ.
14. Protsedura vosstanovleniia nepreryvnykh soobshchenii v izmeritelnykh protsessakh v ASU i ASNI / V. Iu. Podlesnyi, I. A. Tretiakov, V. V. Danilov [i dr.] // *Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki*. – 2025. – № 1. – С. 112-120. – DOI 10.5281/zenodo.15056709. – EDN MFJTTH.
15. Tsifrovye informatsionno-izmeritelnye sistemy: Teoriia i praktika / A. F. Fomin, O. N. Novoselov, K. A. Pobedonostsev [i dr.]. – М.: Energoatomizdat, 1996. – 445 s.
16. Volkov, V. L. Programmnoe obespechenie tsifrovnykh vychislitelnykh ustroistv / V. L. Volkov. – Arzamas: NGTU, 1999. – 98 s.

17. Surogina, V. A. Informatsionno-izmeritelnaia tekhnika i elektronika / V. A. Surogina, V. I. Kalashnikov, G. G. Rannev. – M.: Vysshiaia shkola, 2006. – 512 s.
18. Tsapenko, M. P. Izmeritelnye informatsionnye sistemy / M. P. Tsapenko. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 440 s.
19. Volkov V.L. Proektirovanie tsifrovyykh algoritmov informatsionno-izmeritelnykh sistem / V. L. Volkov. – Moskva: Izd-vo MAI, 1991. – 33 s.
20. Demidovich, B. P., Osnovy vychislitelnoi matematiki / B. P. Demidovich, I. A. Maron. –SPb.: Izd-vo Lan, 2011. – 672 s.
21. Prokhorov, S. A. Matematicheskoe opisanie i modelirovanie sluchainykh protsessov / S. A. Prokhorov. – Samara: Izd-vo SamGAU, 2001. – 209 s.
22. Vatutin, V. A. Veroiatnostnye metody v fizicheskikh issledovaniiah / V. A. Vatutin, T. M. Televinova, V. P. Chistiakov. –M.: Nauka, 1985. – 207 s.
23. Algoritmy ekstrapoliatsii uchastkov eksperimentalnykh krivykh / V. V. Danilov, I. A. Tretiakov, Ia. I. Rushechnikov, A. V. Shalaev // Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. – 2018. – № 50. – S. 10-15. – EDN YTXPZR.

## RESUME

*V. IU. Podlesnyi, E. V. Kolesnik, I. A. Tretiakov., V. V. Danilov*

### *Optimal interpolation of continuous measurement processes in ACS and ASRS*

In this paper, the results of the study of the fundamentals of information and measurement technologies in ACS and ASRS are continued. The search for the optimal interpolation method has been carried out. A sampling method with the introduction of pre-distortions is proposed for the message under consideration, which provides even a slightly lower value of the variance of the interpolation error than with optimal interpolation without pre-distortions. Various interpolation methods have been evaluated. Continuous messages in the form of regular samples during least squares reconstruction are investigated. It has been found that when continuous messages are represented by samples, least squares reconstruction does not reduce the frequency of regular polling compared to interpolation: interpolation provides a lower frequency of polling compared to least squares approximation (for a given degree of the polynomial). Difference and delta-discrete representations are investigated. It is established that a distinctive feature of delta representations in comparison with the representation based on samples is the presence of an additional error component due to the overload of the slope (steepness) quantization system. This happens if the rate of change of the message is greater than the rate of the approximating (predictive) voltage.

## РЕЗЮМЕ

*В. Ю. Подлесный, Е. В. Колесник, И. А. Третьяков, В. В. Данилов*

### *Оптимальная интерполяция непрерывных измерительных процессов в АСУ и АСНИ*

В настоящей работе продолжены результаты исследования основ информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ. Проведен поиск оптимального способа интерполяции. Предложен метод дискретизации с введением предсказаний, для рассматриваемого сообщения, обеспечивающий даже несколько меньшее значение дисперсии интерполяционной погрешности, чем при оптимальной интерполяции без предсказаний. Проведена оценка различных методов интерполяции. Исследованы непрерывные сообщения в виде регулярных выборок при восстановлении методом наименьших квадратов. Установлено, при представлении непрерывных сообщений

выборками восстановление методом наименьших квадратов не позволяет снизить частоту регулярного опроса по сравнению с интерполяцией: интерполяция обеспечивает меньшую по сравнению с аппроксимацией (методом наименьших квадратов) частоту опроса (при заданной степени полинома). Исследованы разностные и дельта-дискретные представления. Установлено, что отличительной особенностью дельта-представлений по сравнению с представлением по выборкам является наличие дополнительной составляющей погрешности из-за перегрузки системы квантования по наклону (крутизне). Это происходит в том случае, если скорость изменения сообщения больше, чем скорость аппроксимирующего (прогнозирующего) напряжения.

**Подлесный В. Ю.** – заведующий учебной лабораторией, аспирант кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, [pikaayzek@ya.ru](mailto:pikaayzek@ya.ru).

*Область научных интересов:* автоматизация научных исследований и автоматизированные системы; информационно-измерительные системы.

**Колесник Е. В.** – старший лаборант, аспирант кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, [ketrinkilli@ya.ru](mailto:ketrinkilli@ya.ru).

*Область научных интересов:* автоматизация научных исследований и автоматизированные системы; информационно-измерительные системы; методы и системы защиты информации, информационная безопасность.

**Третьяков И. А.** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, [i.tretiakov@mail.ru](mailto:i.tretiakov@mail.ru).

*Область научных интересов:* автоматизация научных исследований и автоматизированные системы; оптические информационные технологии; методы и системы защиты информации, информационная безопасность.

**Данилов В. В.** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, [ut5iv@mail.ru](mailto:ut5iv@mail.ru).

*Область научных интересов:* оптические информационные технологии; автоматизация научных исследований и автоматизированные системы; информационно-измерительные системы.

Статья поступила в редакцию 13.05.2025.

Э. В. Скодтаев

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы  
Москва, улица Миклухо-Маклая, дом 6

## АППАРАТНАЯ АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРВИЧНОЙ ПАСТЕРИЗАЦИИ МОЛОКА

E. V. Skodtaev

Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia  
6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, Russia

## HARDWARE ARCHITECTURE OF THE INFORMATION AND CONTROL SYSTEM OF A MOBILE PRIMARY MILK PASTEURIZATION UNIT

Актуальность разработки определяется потребностью в технологических решениях, обеспечивающих автоматизацию процессов пастеризации молока в условиях ограниченной инфраструктуры, характерной для горных и отдаленных районов. Ключевая задача разработка устойчивой аппаратной архитектуры, способной функционировать автономно при минимальной зависимости от операторского вмешательства. В качестве решения предложена модульная трехуровневая система, включающая: полевой уровень с комплексом датчиков температуры, давления и расхода, а также приводной арматурой; уровень управления, основанный на использовании протокола Modbus TCP/IP для обмена данными между ПЛК и распределенными устройствами; а также уровень визуализации и удаленного мониторинга, реализованный посредством сенсорного HMI и передачи телеметрии по 4G-каналу. Разработанная архитектура обеспечивает полную цепочку от сбора и первичной фильтрации параметров до их анализа, отображения на интерфейсе оператора и передачи в облачное хранилище. Практическая значимость работы подтверждается возможностью тиражирования данной схемы в составе мобильных установок для молочной отрасли, ориентированных на использование в условиях затрудненного доступа к централизованным энергосетям и промышленной автоматике.

**Ключевые слова:** аппаратная архитектура, пастеризация молока, автоматизация, Modbus TCP/IP, удаленный мониторинг.

The development addresses the practical necessity of automating milk pasteurization processes in geographically isolated mountainous regions where centralized infrastructure is often lacking. The core engineering challenge is the formulation of a fault-tolerant hardware architecture that ensures autonomous operation with minimal dependence on human intervention. The proposed solution adopts a structured three-tier model: at the field level, sensors and actuators handle real-time physical measurements and process control; the control level utilizes a Modbus TCP/IP protocol stack to manage logic operations and facilitate communication between distributed modules; the monitoring level integrates an HMI interface with 4G connectivity to enable remote supervision, data logging, and diagnostics. As a result, the system delivers a cohesive framework for signal acquisition, control execution, data transmission, visualization, and persistent storage. The architecture demonstrates its suitability for deployment in mobile milk processing stations, particularly under conditions of logistical and infrastructural constraints.

**Key words:** hardware architecture, milk pasteurization, automation, Modbus TCP/IP, remote monitoring.

## Введение

Развитие автоматизированных технологических решений в агропромышленном комплексе приобретает особую значимость при обслуживании удаленных территорий с ограниченной инженерной инфраструктурой. В частности, в горных районах, характеризующихся сложным рельефом, нестабильной логистикой и дефицитом энергоресурсов, применение стационарного оборудования становится экономически и технически нецелесообразным. В этой связи возрастает потребность в мобильных, энергоэффективных и устойчивых к внешним воздействиям системах.

Одной из приоритетных задач в таких условиях является обеспечение санитарной безопасности и сохранности молочной продукции на ранних этапах ее обработки, в частности, реализация процесса первичной пастеризации. Учитывая высокую чувствительность молока к температурным колебаниям и микробиологическим рискам, требуется точное соблюдение термического режима и надежная автоматизация управления процессом.

Современные концепции автоматизации ориентированы на построение интегрированных систем управления, объединяющих сенсорные модули, исполнительные устройства и коммуникационные интерфейсы в единую информационно-управляющую архитектуру. Тем не менее, большинство промышленных решений предназначены для стационарного использования и не учитывают специфики автономного функционирования в условиях ограниченного доступа к облачным сервисам и нестабильной связи.

**Цель исследования** проектирование аппаратной архитектуры информационно-управляющей системы мобильной установки первичной пастеризации молока, адаптированной к эксплуатации в изолированных горных районах. Разработка направлена на обеспечение автономности, отказоустойчивости возможности удаленного мониторинга и управления, а также адаптивной настройки технологического режима в зависимости от внешних факторов.

## 1 Постановка задачи

Одной из ключевых задач при автоматизации процессов первичной переработки молока в труднодоступных горных районах является обеспечение надежной и устойчивой работы оборудования в условиях ограниченной инфраструктуры. К числу ограничений относятся нестабильное электроснабжение, резкие климатические колебания и слабое покрытие телекоммуникационных сетей. В таких обстоятельствах использование стационарных технологических линий становится нецелесообразным, что обуславливает необходимость разработки мобильных, энергоэффективных и отказоустойчивых решений.

В настоящей работе предложена аппаратная архитектура информационно-управляющей системы, ориентированная на функционирование в режиме полной автономии с возможностью точного контроля технологических параметров температуры, давления, скорости потока и других критически важных показателей пастеризации. Архитектура построена по трехуровневому принципу:

Нижний уровень включает в себя совокупность аналоговых и дискретных сенсоров, а также приводных устройств, обеспечивающих съем данных и воздействие на объект управления.

Средний (управляющий) уровень реализован на базе программируемого логического контроллера с поддержкой протокола Modbus TCP/IP, обеспечивающего детерминированный обмен данными и масштабируемость системы.

Верхний уровень система визуализации и удаленного мониторинга, реализованная с применением HMI-интерфейса маршрутизатора и модуля сотовой связи стандарта 4G, что позволяет оператору осуществлять контроль и управление процессами в режиме реального времени.

Предложенная архитектура ориентирована на решение задач технологической надежности и информационной доступности в условиях ограниченных ресурсов обеспечивая при этом гибкость и адаптацию к различным режимам эксплуатации.

## 2 Методы исследования

Проектирование аппаратной архитектуры информационно-управляющей системы (ИУС) мобильной установки первичной пастеризации молока осуществлялось с использованием методов системного анализа, функционально-структурного синтеза схемотехнического моделирования и параметрической оценки компонентов на основе совокупности эксплуатационных и технических характеристик.

В основу архитектурного решения положена трехуровневая модель:

1. Полевой уровень обеспечивает сбор данных с аналоговых и дискретных сенсоров, а также управление исполнительными механизмами;

2. Уровень управления реализован на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) с поддержкой протокола Modbus TCP/IP, выполняющего логическую обработку сигналов, реализацию алгоритмов управления и координацию обмена данными;

3. Уровень визуализации и связи представлен операторской панелью (HMI), сопряженной с маршрутизатором и мобильным модемом стандарта 4G для обеспечения дистанционного мониторинга и управления технологическим процессом.

Дополнительно в целях повышения отказоустойчивости и надежности хранения технологических данных, предусмотрена организация резервного архива на сетевом хранилище (NAS). Все аппаратные компоненты и коммуникационные интерфейсы интегрированы в единую логически завершенную структуру, зафиксированную в общей структурной схеме системы.

## 3 Общая структурная схема

Аппаратная архитектура разработанной системы управления мобильной пастеризационной установки построена по принципу иерархической модульности, что обеспечивает ее адаптируемость к изменяющимся условиям эксплуатации, масштабируемость в зависимости от конфигурации производственного процесса, а также отказоустойчивость при воздействии внешних факторов.

Функциональная структура системы реализована в рамках трехуровневой архитектурной модели.

Полевой уровень включает в себя совокупность первичных сенсоров датчики температуры, давления, расхода и др. и исполнительных механизмов насосы, клапаны, приводы, осуществляющих прямое взаимодействие с объектом управления. Основная задача данного уровня непрерывный сбор технологических параметров и реализация управляющих воздействий по командам от вышестоящих уровней.

Уровень управления и визуализации представляет собой промежуточный логический слой, включающий программируемый логический контроллер (ПЛК) и интерфейс оператора (HMI). Он отвечает за первичную обработку поступающих данных, выполнение заданных алгоритмов управления, диагностику состояния системы и отображение информации в реальном времени.

Уровень удаленного доступа и отчетности обеспечивает интеграцию системы с внешними информационными средами. Он включает модули архивирования, удаленного мониторинга через Modbus TCP/IP или аналогичные протоколы формирования отчетной документации и передачи данных в ERP-системы или облачные платформы.

Предложенное архитектурное решение позволяет достичь высокой степени автоматизации технологического процесса и обеспечить его надежную эксплуатацию в условиях полевой мобильности.

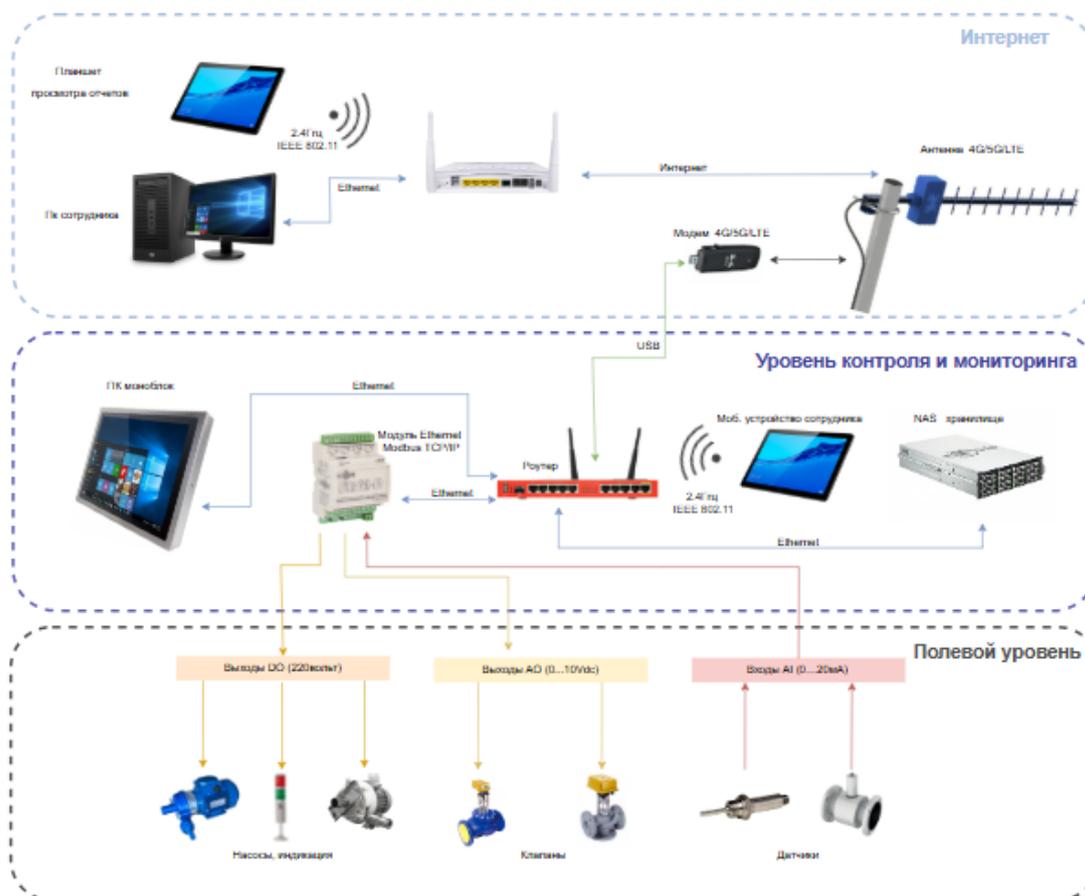


Рисунок 1 - Аппаратная архитектура мобильной установки пастеризации

На рис. 1 представлена структурная схема аппаратной архитектуры информационно-управляющей системы, предназначенной для автоматизации мобильной установки первичной пастеризации молока. Архитектура включает следующие ключевые компоненты:

- датчики аналогового и дискретного типа, отвечающие за измерение температуры, давления и расхода;
- исполнительные механизмы, среди которых насос, электромагнитные клапаны, а также сигнальные устройства индикации;
- программируемый логический контроллер, поддерживающий промышленный коммуникационный протокол Modbus TCP/IP;
- человеко-машинный интерфейс в виде панели оператора, обеспечивающей визуализацию и управление на месте;

- сетевой маршрутизатор и 4G-модем с внешней антенной для обеспечения устойчивой связи;
- сетевое хранилище NAS и устройства удаленного доступа (мобильные платформы, удаленные рабочие станции).

Информационное взаимодействие между уровнями системы организовано с учетом требований к надежности передачи данных и минимальным задержкам. Внутренняя шина данных реализована на основе Modbus TCP/IP, что гарантирует совместимость с широким спектром промышленного оборудования. Для передачи данных в облачную инфраструктуру и реализации удаленного мониторинга используется защищенный канал связи на базе сотовой сети (4G/LTE).

Предложенное решение обеспечивает непрерывный контроль и автоматическую корректировку параметров технологического процесса, а также их архивирование на протяжении всего производственного цикла. Особую значимость такая архитектура приобретает при эксплуатации в труднодоступных или горных районах, где физический доступ к оборудованию ограничен, а требования к автономности и отказоустойчивости возрастают.

#### 4. Полевой уровень

Полевой уровень представляет собой базовую функциональную подсистему аппаратной архитектуры, непосредственно взаимодействующую с технологическим объектом мобильной установкой первичной пастеризации молока. Его назначение заключается в обеспечении непрерывного мониторинга параметров процесса и реализации управляющих воздействий через подключенные исполнительные механизмы.

На данном уровне сосредоточены следующие ключевые компоненты:

- аналоговые датчики температуры и расхода с типовыми выходными сигналами 0–10 В и 4–20 мА, используемые для измерения и контроля критически важных параметров пастеризации в реальном времени;
- дискретные сенсоры, генерирующие сигналы уровня 220 В, предназначенные для фиксации пороговых состояний и технологических событий (например, достижение предельного уровня жидкости);
- электромагнитные клапаны, обеспечивающие перенаправление потоков молока и теплоносителя в соответствии с логикой управления;
- циркуляционный насос, стабилизирующий подачу продукта и поддерживающий постоянство объема в системе;
- сигнальные индикаторы, отображающие текущие рабочие состояния установки (режим работы, аварийные или переходные состояния).

Передача данных от датчиков и команд к исполнительным элементам осуществляется через унифицированные интерфейсы связи с контроллером. Аналоговые сигналы предварительно проходят процедуры нормализации и масштабирования, что позволяет привести их к стандартному диапазону значений. Дискретные сигналы подвергаются логической фильтрации с целью подавления ложных срабатываний, вызванных дрожанием контактов.

Физическая реализация компонентов полевого уровня выполнена с учетом требований к санитарной безопасности, электромагнитной совместимости и надежности функционирования в условиях перепадов температур, характерных для горных регионов. Используемые устройства обладают степенью защиты не ниже IP65, что гарантирует их устойчивость к воздействию пыли, влаги и внешних механических факторов.

Полевой уровень образует первичную информационную платформу для всей управляющей системы, обеспечивая достоверное отображение текущего состояния технологического процесса и оперативное реагирование на его изменения.

## 5. Уровень управления

В структуре информационно-управляющей системы мобильной установки первичной пастеризации молока уровень управления выполняет центральную роль в реализации замкнутого цикла автоматизации технологического процесса. Основными задачами данного уровня являются прием и интерпретация данных от полевых устройств, формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы, а также передача обработанной информации на уровень визуализации и удаленного мониторинга.

Ключевым элементом управления служит промышленный программируемый логический контроллер (ПЛК), поддерживающий протокол Modbus TCP/IP, что обеспечивает совместимость с современными системами диспетчеризации и стандартами промышленного Интернета вещей (IIoT).

Функционально ПЛК реализует:

- циклический опрос аналоговых и дискретных сигналов от датчиков температуры, давления, уровня и расхода;
- выполнение алгоритмов логической обработки и принятия решений согласно заданным условиям;
- генерацию управляющих сигналов на исполнительные устройства (электроприводы, соленоидные клапаны, насосы, сигнальные индикаторы);
- передачу агрегированных данных на HMI-панель и/или SCADA-систему через Ethernet-соединение.

Программная реализация алгоритмов управления осуществляется во встроенной среде разработки контроллера и включает использование таймеров, логических схем, триггеров, релейных структур и блоков аналоговой обработки. Настройки позволяют конфигурировать пороговые значения температур, интервалы включения/отключения оборудования, а также предусматривать аварийные сценарии при нарушении допустимых параметров.

Для обеспечения надежности передачи данных реализована функция буферизации с пакетной отправкой в асинхронном режиме. Это позволяет минимизировать потери информации при нестабильной сетевой связи и снизить нагрузку на сетевую инфраструктуру. Интеграция маршрутизаторов и управляемых коммутаторов с поддержкой QoS (приоритезации трафика) дополнительно повышает устойчивость обмена данными между уровнями системы.

Уровень управления формирует вычислительное ядро автоматизированного комплекса, обеспечивая адаптивное, отказоустойчивое и масштабируемое функционирование системы пастеризации, включая условия эксплуатации в удаленных или полевых хозяйствах.

## 6. Уровень визуализации и удаленного мониторинга

Визуализационный уровень информационно-управляющей системы играет ключевую роль в обеспечении оперативного контроля за состоянием технологического процесса, а также в передаче диагностических и производственных данных на внешние устройства для анализа и принятия управленческих решений. Данный

уровень критически важен в условиях эксплуатации мобильных установок, функционирующих с минимальным участием обслуживающего персонала, в том числе в труднодоступных или изолированных регионах.

К основным аппаратным и программным компонентам данного уровня относятся:

- Панель оператора (HMI), реализующая интерфейс человеко-машинного взаимодействия. Она отображает в реальном времени технологические параметры процесса пастеризации (температура, расход, состояние насосно-клапанных групп) и обеспечивает возможность оперативного вмешательства в процесс;
- Маршрутизатор, осуществляющий сетевую маршрутизацию между программируемым логическим контроллером (ПЛК), HMI-панелью, сетевым хранилищем (NAS) и модемом стандарта 4G;
- NAS-хранилище, предназначенное для долговременной архивации технологических параметров, журналов событий и тревог;
- 4G-модем с внешней антенной, обеспечивающий устойчивую передачу данных на удаленные серверы и мобильные устройства, включая эксплуатацию в условиях нестабильной или слабой сотовой связи (например, в горной местности);
- Удаленные клиентские устройства (смартфоны, планшеты, ноутбуки), принимающие телеметрию и визуализирующие ее посредством веб-интерфейса или специализированного прикладного программного обеспечения.

Программная реализация визуализации базируется на SCADA-модуле, встроенном в HMI, что позволяет обеспечить высокоинформативный графический интерфейс с поддержкой отображения текущих значений, трендовых графиков, статусов оборудования и тревожных сообщений. Через защищенный интерфейс также реализована возможность настройки параметров, запуска/остановки процессов и просмотра архивных данных.

Передача информации на внешние устройства осуществляется с использованием мобильной сети, при этом для повышения информационной безопасности применяются технологии шифрования трафика и авторизации пользователей.

Уровень визуализации выполняет функции удаленного мониторинга, обеспечения человеко-машинного взаимодействия и телеметрического сопровождения процессов, повышая степень автономности установки и прозрачность ее функционирования в реальном времени.

## 7 Система связи

Надежность функционирования информационно-управляющей системы мобильной пастеризационной установки в условиях удаленных и горных районов напрямую зависит от устойчивости каналов связи и стабильности энергоснабжения. При проектировании аппаратной архитектуры были приняты решения, ориентированные на обеспечение отказоустойчивости при ограниченной доступности инфраструктуры.

Система связи реализована с использованием следующих технологических решений:

- Локальная проводная сеть на основе Ethernet-соединений, объединяющая контроллер, операторскую панель (HMI), промышленный маршрутизатор и сетевое хранилище;
- Протокол Modbus TCP/IP используется для обмена данными между уровнями управления и полевыми устройствами;

- Модем 4G с внешней антенной обеспечивает выход в сеть Интернет и передачу телеметрических данных на удаленные диспетчерские терминалы;
- Маршрутизатор с поддержкой NAT и VPN, реализующий безопасный удаленный доступ к системе, а также резервирование IP-адресов для повышения надежности связи.
- Система энергоснабжения включает следующие компоненты:
- Автономный источник питания (инверторный генератор или аккумуляторный блок) для обеспечения бесперебойной работы всех модулей при отсутствии внешнего электроснабжения;
- Импульсные стабилизаторы напряжения, выполняющие функцию защиты от перенапряжения и сетевых колебаний, характерных для нестабильных линий;
- Преобразователи 220 В AC в 24 В DC и 12 В DC, используемые для питания исполнительных механизмов, датчиков и телекоммуникационного оборудования;
- Сигнальные индикаторы питания и аварийных состояний, установленные на лицевой панели шкафа управления.

Для защиты кабельной разводки применяются герметичные кабель-каналы, рассчитанные на эксплуатацию в условиях высоких климатических и механических нагрузок. В случае необходимости возможна интеграция солнечных панелей или гибридных энергетических систем, что позволяет значительно повысить автономность установки.

Разработанная структура энергообеспечения и коммуникаций адаптирована к эксплуатации в условиях ограниченного доступа к централизованным ресурсам, обеспечивая устойчивость и непрерывность технологического процесса даже в изолированных регионах.

В ходе проведенного исследования разработана многоуровневая аппаратная архитектура информационно-управляющей системы, предназначенной для мобильной установки первичной пастеризации молока, адаптированной к условиям эксплуатации в труднодоступной горной местности. Архитектурное решение ориентировано на модульную интеграцию аналоговых и дискретных сенсоров, исполнительных механизмов, контроллеров, устройств хранения данных и средств визуализации в единую автоматизированную среду управления.

Функционально архитектура разделена на три уровня:

- полевой уровень, включающий сенсорные и исполнительные модули;
- управляющий уровень, реализуемый на базе промышленного контроллера с поддержкой протокола Modbus TCP/IP;
- уровень визуализации и хранения, обеспечивающий удаленный доступ, мониторинг и долговременную архивацию данных посредством NAS-хранилища и 4G-связи.

Такое логическое разделение повысило «структурную прозрачность» системы, упростило ее масштабирование и облегчило техническое обслуживание. Применение стандартных коммуникационных протоколов обеспечило совместимость с широким спектром промышленного оборудования, а внедрение резервных источников питания и устойчивых каналов связи позволило достичь высокой степени автономности в условиях нестабильной инфраструктуры.

## Заключение

В рамках проведенного исследования разработана и обоснована аппаратная архитектура информационно-управляющей системы, предназначенной для мобильной установки первичной пастеризации молока, ориентированной на эксплуатацию в условиях ограниченной инфраструктурной доступности, включая горные и отдаленные регионы. Архитектурное решение построено на трехуровневой модели: полевой уровень включает в себя сенсорные модули и исполнительные механизмы; уровень управления реализован на базе программируемого логического контроллера с поддержкой протокола Modbus TCP/IP; верхний уровень обеспечивает визуализацию технологического процесса и удаленный мониторинг посредством HMI-панели, сетевого хранилища NAS и 4G-коммуникационного интерфейса.

Выбор аппаратных и коммуникационных компонентов аргументирован с учетом факторов энергоэффективности, надежности связи, отказоустойчивости и адаптивности к мобильному исполнению. Технические решения обеспечивают возможность модульного масштабирования, оперативного технического обслуживания и гибкой интеграции с различными SCADA-системами.

Проведенное проектирование подтвердило научную новизну предложенной архитектуры, заключающуюся в адаптации современных промышленных протоколов и средств автоматизации под требования автономных агропромышленных объектов. Результаты исследования демонстрируют высокую степень прикладной реализуемости в контексте цифровизации молочной отрасли и могут быть использованы в дальнейшем при разработке мобильных технологических комплексов, функционирующих в условиях низкой доступности энергоресурсов и нестабильной связи.

## Список литературы

1. *Применение технологий искусственного интеллекта, робототехники в сельском хозяйстве*: библиографический список литературы / сост. А.Г. Цырульник, С.В. Кислякова. Москва, 2022. 39 с.
2. Иванова С. Б., Сальников И. С., Сальников Р. И. Роботизированные компьютерно-аппаратные комплексы широкого назначения: необходимость и проблемы создания. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. № 1. С. 89–95.
3. Рылов С. А. IoT аппаратная архитектура распределенных систем управления непрерывными промышленными производствами и агрокомплексами. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70, № 1(50). С. 105–113. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-1-105-113.
4. Анцыферов С. С., Сигов А. С. Технологические основы построения интеллектуальных систем. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2020. № 1. С. 11–18.
5. Рылов С. А. *Промышленный интернет. Современный подход и концепции*. М.: РТУ МИРЭА. 2023. 124 с.
6. Сальников И. С., Сальников Р. И., Терещенко С. В. Принципы функционирования роботизированного компьютера. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2022. № 2. С. 81–87.
7. Силаев А. А. Отечественные промышленные логические контроллеры. *Инновационные научные исследования*. 2023. № 2-2(26). С. 92–98.
8. Павлыш В. Н., Перинская Е. В. Математическое моделирование процессов функционирования специализированных аппаратов конвективного типа. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2021. № 4. С. 59–66.
9. *Интегрированные системы проектирования и управления: SCADA-системы : учебное пособие* / И. А. Елизаров, А. А. Третьяков, А. Н. Пчелинцев и др. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. 160 с. 400 экз. ISBN 978-5-8265-1469-6.
10. Tverskoy, Yu. S., & Gaidina, Yu. A. (2024). Technology of intelligent automation of process control systems based on a hardware-software complex. *Power Technology and Engineering*, 57(3), 922–929.
11. Al-Hilphy A. R., Abdulstar A. R., Gavahian M. Moderate electric field pasteurization of milk in a continuous flow unit: Effects of process parameters, energy consumption, and shelf-life determination. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2021. Vol. 67. P. 102568.

12. Franzoi M., Costa A., Vigolo V., Penasa M., De Marchi M. Effect of pasteurization on coagulation properties of bovine milk and the role of major composition traits and protein fractions. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2022. Vol. 114. P. 104808.
13. Zhu D., Kebede B., Chen G., McComb K., Frew R. Effects of the vat pasteurization process and refrigerated storage on the bovine milk metabolome. *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103, № 3. P. 2077–2088.
14. Иконников Д. В. Разработка шкафа управления и автоматизация технологического процесса канализационной насосной станции. *Молодой ученый*. 2023. № 6(453). С. 92–98.

## References

1. Tsyrunnik, A. G., & Kislyakova, S. V. (Comps.). Application of Artificial Intelligence Technologies and Robotics in Agriculture: Bibliographic Literature List. Moscow, 2022. 39 p.
2. Ivanova, S. B., Salnikov, I. S., & Salnikov, R. I. Robotized Computer-Hardware Complexes of Broad Purpose: Necessity and Problems of Creation // Problems of Artificial Intelligence. 2023. No. 1. P. 89–95.
3. Rylov, S. A. IIoT Hardware Architecture of Distributed Control Systems for Continuous Industrial Production and Agrocomplexes // Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agroindustrial Complex. 2023. Vol. 70, No. 1(50). P. 105–113. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-105-113.
4. Antsyferov, S. S., & Sigov, A. S. Technological Foundations for the Construction of Intelligent Systems // Problems of Artificial Intelligence. 2020. No. 1. P. 11–18.
5. Rylov, S. A. Industrial Internet: Modern Approach and Concepts. Moscow: RTU MIREA, 2023. 124 p.
6. Salnikov, I. S., Salnikov, R. I., & Tereshchenko, S. V. Principles of Operation of a Robotized Computer // Problems of Artificial Intelligence. 2022. No. 2. P. 81–87.
7. Silaev, A. A. Domestic Industrial Logic Controllers // Innovative Scientific Research. 2023. No. 2-2(26). P. 92–98.
8. Pavlysh, V. N., & Perinskaya, E. V. Mathematical Modeling of Operating Processes of Specialized Convective Apparatuses // Problems of Artificial Intelligence. 2021. No. 4. P. 59–66.
9. Yelizarov, I. A., Tretyakov, A. A., Pchelintsev, A. N., et al. Integrated Design and Control Systems: SCADA Systems: Textbook. Tambov: Publishing House of TSTU, 2015. 160 p. 400 copies.
10. Tverskoy, Yu. S., & Gaidina, Yu. A. Technology of Intelligent Automation of Process Control Systems Based on a Hardware-Software Complex // Power Technology and Engineering. 2024. Vol. 57, No. 3. P. 922–929.
11. Al-Hilphy, A. R., Abdulstar, A. R., & Gavahian, M. Moderate Electric Field Pasteurization of Milk in a Continuous Flow Unit: Effects of Process Parameters, Energy Consumption, and Shelf-life Determination // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2021. Vol. 67. P. 102568.
12. Franzoi, M., Costa, A., Vigolo, V., Penasa, M., & De Marchi, M. Effect of Pasteurization on Coagulation Properties of Bovine Milk and the Role of Major Composition Traits and Protein Fractions // Journal of Food Composition and Analysis. 2022. Vol. 114. P. 104808.
13. Zhu, D., Kebede, B., Chen, G., McComb, K., & Frew, R. Effects of the Vat Pasteurization Process and Refrigerated Storage on the Bovine Milk Metabolome // Journal of Dairy Science. 2020. Vol. 103, No. 3. P. 2077–2088.
14. Ikonnikov, D. V. Development of a Control Cabinet and Automation of the Technological Process of a Sewer Pumping Station // Young Scientist. 2023. No. 6(453). P. 92–98.

## РЕЗЮМЕ

**Э.В Скодтаев**

**Аппаратная архитектура информационно-управляющей системы  
мобильной установки первичной пастеризации молока**

В статье рассматривается разработка и реализация аппаратной архитектуры информационно-управляющей системы, предназначенной для эксплуатации в составе мобильной установки первичной пастеризации молока, функционирующей в условиях ограниченной инженерной инфраструктуры, характерной для горных и труднодоступных территорий. Целью проектирования является создание автономной, энергоэффективной и устойчивой к сбоям системы управления, обеспечивающей минимальную зависимость от операторского вмешательства при сохранении полной функциональной управляемости.

Функциональная структура системы организована по трехуровневой модели: на полевом уровне реализована интеграция сенсорных модулей измерения температуры, давления и расхода, а также исполнительных механизмов; уровень управления основан на программируемом логическом контроллере с поддержкой промышленного протокола Modbus TCP/IP для синхронного взаимодействия с периферийными устройствами; верхний уровень включает человеко-машинный интерфейс (HMI), модем связи по каналу 4G и сетевое хранилище (NAS), обеспечивающие визуализацию данных, оперативное управление и архивирование технологической информации.

Предложенное техническое решение охватывает полный контур автоматизации — от первичного сбора и обработки параметров технологического процесса до передачи телеметрии в облачное хранилище и организации удаленного мониторинга. Разработка обладает прикладной значимостью и научной новизной в контексте цифровизации агропромышленного сектора и демонстрирует перспективность масштабируемого внедрения в регионах с низкой доступностью централизованных инженерных сетей.

## RESUME

*E. V Skodtaev*

*Hardware architecture of the information and control system of a mobile primary milk pasteurization unit*

The article discusses the development and implementation of the hardware architecture of an information and control system designed for use as part of a mobile unit for primary milk pasteurization, operating under conditions of limited engineering infrastructure typical of mountainous and remote areas. The objective of the design is to create an autonomous, energy-efficient, and fault-tolerant control system that minimizes dependence on operator intervention while maintaining full functional controllability.

The system's functional structure is organized according to a three-level model: at the field level, it integrates sensor modules for temperature, pressure, and flow measurement, as well as actuators; the control level is based on a programmable logic controller (PLC) supporting the industrial Modbus TCP/IP protocol for synchronous interaction with peripheral devices; the upper level includes a human-machine interface (HMI), a 4G communication modem, and a network-attached storage (NAS) system, providing data visualization, operational control, and archiving of technological information.

The proposed technical solution encompasses the full automation loop—from the initial acquisition and processing of process parameters to telemetry transmission to cloud storage and the organization of remote monitoring. The development holds practical significance and scientific novelty in the context of digital transformation in the agro-industrial sector and demonstrates promising scalability for deployment in regions with limited access to centralized engineering networks.

**Скодтаев Э.В.** – Магистр Российского университета дружбы народов, 117198, город Москва, Миклуха-макляя 6, тел. + 7 (499) 936-87-87,

[Alania.su@mail.ru](mailto:Alania.su@mail.ru)

*Область научных интересов:* искусственный интеллект, моделирование систем автоматизации, машинное обучение, промышленный интернет вещей, системы автоматизации.

Статья поступила в редакцию 20.05.2025.

УДК 004.891+007.52+004.896+681.518+65.011.56 DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-159-172

К. С. Смирнов <sup>1</sup>, О. О. Варламов <sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт искусственного интеллекта Российского технологического университета МИРЭА  
119454, Проспект Вернадского, д. 78, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана  
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, Москва, Россия

<sup>3</sup>АО НИИ Вычислительных комплексов им. М. А. Карцева,  
117437, ул. Профсоюзная, д. 108, Москва, Россия

## МЭС ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПЕРСОНАЛА ГАЗОПОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕХА ПРИ ДОБЫЧЕ ЖИДКОЙ СЕРЫ

K. S. Smirnov <sup>1</sup>, O. O. Varlamov <sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Artificial Intelligence of the Russian Technological University MIREA  
119454, Vernadsky ave., bld. 78, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University  
105005, 2-ya Baumanskaya st., bld. 5, building 1, Moscow, Russia

<sup>3</sup>JSC M. A. Kartsev Research Institute of Computing Systems,  
117437, Profsoyuznaya st., bld. 108, Moscow, Russia

## MES FOR SUPPORTING DECISION-MAKING OF GAS PROCESSING SHOP STAFF IN LIQUID SULFUR MINING

В данной статье представлена разработка миварной экспертной системы поддержки принятия решений для персонала газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы. Система реализована с использованием миварных технологий логического искусственного интеллекта и платформы «КЭСМИ». Проведен анализ технологических факторов, влияющих на эффективность добычи жидкой серы, выявлены ключевые параметры, определяющие производственные риски и нарушения, а также разработана модель прогнозирования для поддержки оперативных и стратегических решений персонала. Предложенный подход позволяет минимизировать риски, повысить производительность и обеспечить стабильность технологического процесса.

**Ключевые слова:** мивар, миварные сети, миварные экспертные системы, машинное обучение, технологический процесс, производство, процесс Клауса, КЭСМИ Wi!Mi РАЗУМАТОР, миварные технологии

This article presents the development of a mivar expert decision support system for the personnel of a gas processing shop during liquid sulfur extraction. The system is implemented using mivar technologies of logical artificial intelligence and the KESMI platform. An analysis of technological factors affecting the efficiency of liquid sulfur extraction was conducted, key parameters determining production risks and violations were identified, and a forecasting model was developed to support operational and strategic decisions of personnel. The proposed approach allows minimizing risks, increasing productivity and ensuring the stability of the technological process.

**Keywords:** mivar, mivar networks, mivar expert systems, machine learning, technological process, production, Claus process, KESMI Wi!Mi RAZUMATOR, mivar technologies

## Введение

Процесс добычи жидкой серы методом Клауса представляет собой сложную совокупность взаимосвязанных технологических операций, где любые сбои могут оказывать значительное влияние на эффективность и стабильность производственного цикла. Метод Клауса основан на химической переработке серосодержащих газов, требующей точного соблюдения технологических параметров и согласованной работы всех производственных элементов, включая оборудование, персонал и материалы. В этом процессе каждая стадия, от термической до каталитической, играет важную роль, и любое отклонение от нормы может привести к снижению качества продукции, увеличению энергозатрат и дополнительным потерям ресурсов.

Основной вызов в управлении процессом Клауса заключается в необходимости постоянного мониторинга большого количества параметров и своевременного выявления отклонений, которые могут быть вызваны различными факторами: техническими неисправностями, ошибками персонала, изменением характеристик сырья или нарушением технологических режимов. Учитывая высокую сложность и динамику производственного процесса, традиционные методы управления и контроля зачастую не позволяют эффективно реагировать на возникающие помехи и прогнозировать их последствия.

Ключевая идея разработки миварной экспертной системы заключается в создании интеллектуального инструмента, который способен анализировать текущие данные технологического процесса, прогнозировать возможные сбои и предоставлять рекомендации по их предотвращению. Такая система на базе миварных технологий логического искусственного интеллекта может работать с большими объемами информации, включая многопараметрические данные и сложные производственные правила. Это обеспечивает не только автоматизацию анализа, но и качественное улучшение управления процессом, позволяя учитывать множество взаимосвязанных факторов и принимать обоснованные решения в реальном времени.

Миварные технологии [1] логического искусственного интеллекта [2] продолжают активно развиваться и расширять области применения [3], например, в робототехнике предложено создавать системы принятия решений [4] для планирования маршрутов [5] и сложных действий [6] на основе миварных баз знаний [7]. Миварные экспертные системы (МЭС) применяются для подбора лекарственных форм в медицине [8], для создания комплексных систем с распознаванием образов [9] и в других задачах интеллектуальной деятельности [10].

Миварный подход [11] искусственного интеллекта отличается линейной вычислительной сложностью [12] относительно правил «если-то», что позволяет создавать АСУ технологическими процессами [13], распознавать образы [14], применять его в робототехнике [15] для создания автономных групп роботов [16] с миварными системами принятия решений [17], в интеллектуальных системах обеспечения безопасности информации [18], а также для обучающих систем [19] и понимания текста, написанного на естественном языке [20].

Миварный подход отличается возможностью эволюционного развития, что делает его особенно гибким и удобным для применения. В миварных экспертных системах (МЭС) правила можно легко добавлять или изменять, что позволяет адаптировать систему под новые задачи или изменяющиеся условия. Для разработки таких систем используется программное обеспечение «КЭСМИ», которое помогает работать с базами знаний, опираясь на факты и правила.

Миварная технология накопления информации основывается на трех базовых понятиях: «вещь», «свойство» и «отношение». Благодаря этому подходу можно создавать базы данных и правила с динамической структурой, которые легко изменяются и дополняются. Кроме того, миварная технология обработки информации позволяет строить логические выводы с использованием специальной миварной сети, что делает процессы анализа и прогнозирования более точными и быстрыми.

Целью данной работы является создание миварной экспертной системы для поддержки принятия решений персоналом газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы. Система предназначена для анализа текущего состояния оборудования и технологических параметров, прогнозирования возможных отклонений и генерации рекомендаций по управлению процессом на основе миварных правил.

Научная новизна заключается в формализации технологического процесса Клауса с применением миварной модели в виде двудольных ориентированных графов, отражающих логические зависимости в форме продукционных правил «Если, То». Это позволяет реализовать интеллектуальную поддержку в реальном времени, повысить устойчивость технологического процесса и минимизировать риски производственных нарушений. Таким образом, предлагаемое решение является актуальным и практически значимым для задач автоматизации и интеллектуализации технологического управления.

**Постановка задачи.** Создание миварной экспертной системы (МЭС) для поддержки принятия решений персоналом газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы требует формализации предметной области на основе анализа технологического процесса Клауса, идентификации ключевых производственных режимов (нормального, откачки серы и аварийного) и соответствующих им параметров, фиксируемых с помощью датчиков. Для каждого режима необходимо описать цепочки причинно-следственных зависимостей, на основе которых система должна осуществлять логический вывод и предлагать управляющие воздействия. Центральным элементом решения является построение миварной модели предметной области в виде двудольного ориентированного графа, отражающего структуру знаний и правил.

Для реализации МЭС необходимо: разработать миварную базу знаний (МБЗ), содержащую правила типа «если–то»; внедрить модель в программную среду «КЭСМИ», обеспечивающую логический вывод в режиме реального времени; провести настройку и тестирование системы на типовых сценариях функционирования оборудования; предусмотреть возможность расширения и адаптации МЭС под изменяющиеся технологические и организационные условия. Эффективная реализация поставленной задачи требует междисциплинарного подхода, включающего знания в области логического искусственного интеллекта, технологических процессов переработки газа и инженерных систем управления.

## Формализованное описание предметной области

Технологический процесс Клауса по получению серы представляет собой многоступенчатый процесс, состоящий из нескольких подсистем, обеспечивающих эффективное преобразование сероводорода из кислого газа в элементарную серу. В процессе используются термические и каталитические реакции, а также системы охлаждения и конденсации для выделения конечного продукта. Диаграмма процесса приведена на рисунке 1.

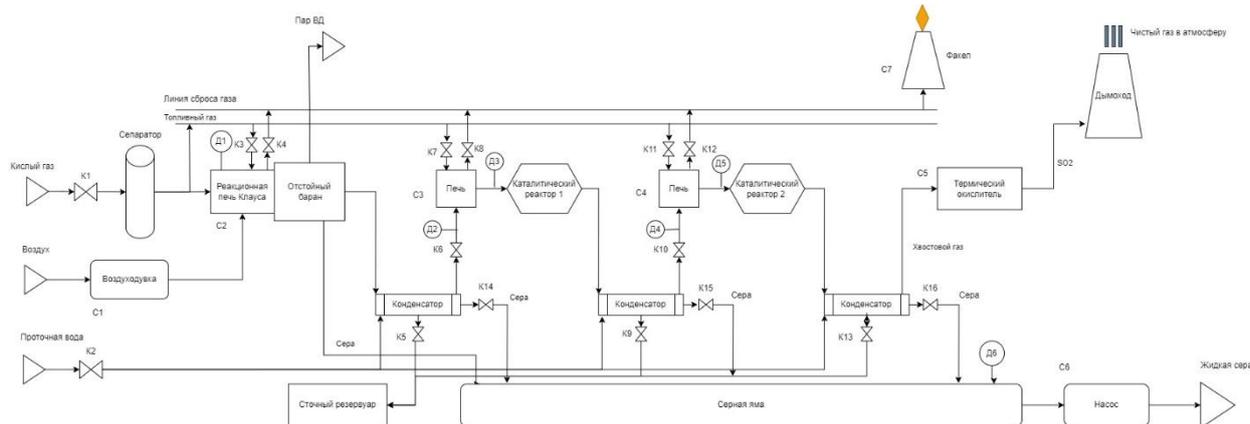


Рисунок 1 – Технологический процесс Клауса

В технологическом процессе установки Клауса экспертная система обеспечивает управление оборудованием на основе анализа входных данных, поступающих от датчиков, и выработки решений по изменению состояния выходных переменных. Работа системы организована с учетом трёх основных режимов: нормальная работа, откачка серы и аварийная ситуация. Каждый из режимов характеризуется специфическими условиями работы оборудования и алгоритмами принятия решений.

Входные данные и их роль:

- Основными источниками информации для экспертной системы являются датчики, такие как Д1, Д2, Д3, Д4 и Д5, которые фиксируют ключевые параметры процесса.
- Д1 измеряет температуру реакционной печи, когда она активна ( $C2=1$ ), и передаёт значение температуры в систему.
- Д2 контролирует давление в газовой линии, если клапан К6 открыт ( $K6=1$ ). Например, при нормальных условиях давления ( $PR < 820$  кПа) система не принимает корректирующих действий, но при превышении порогового значения ( $PR \geq 820$  кПа) данные датчика становятся основанием для принятия решений.
- Д3 и Д5 фиксируют температуры в нагревательных печах С3 и С4 соответственно, тогда как Д4 отслеживает давление, если клапан К10 открыт ( $K10=1$ ).

Эти данные поступают в экспертную систему, где анализируются в реальном времени для оценки текущего состояния технологического процесса.

**Нормальный режим работы.** При нормальной работе установки кислород поступает через клапан К1 ( $K1=1$ ) при давлении 820 кПа и температуре 40°C. Реакционная печь ( $C2=1$ ) поддерживает температуру 1000–1400°C. Газовая смесь проходит через катализаторы, а насосы и клапаны, такие как С6, К14, и К15, остаются в неактивном состоянии до возникновения необходимости их использования.

Для обеспечения нормального процесса печи подогрева ( $C3=1$ ,  $C4=1$ ) функционируют в штатном режиме, поддерживая температурные значения ниже 300°C ( $T1 < 300^\circ\text{C}$ ) и 150°C ( $T2 < 150^\circ\text{C}$ ). Датчики фиксируют стабильные значения параметров, такие как давление и температура, что позволяет системе поддерживать стандартные технологические режимы.

**Режим откачки серы.** Когда уровень серы, фиксируемый датчиком Д6, достигает заданного значения ( $L=1$ ), система переходит в режим откачки серы. Насос С6 включается ( $C6=1$ ), обеспечивая транспортировку жидкой серы из отстойного барана и конденсаторов в ёмкость для хранения. Одновременно открываются клапаны К14,

K15 и K16 (K14=1, K15=1, K16=1), чтобы обеспечить эффективный отвод серы из системы.

При этом экспертная система продолжает мониторинг остальных параметров, таких как температура в печах и давление в системе. Например, если температура в реакционной печи превышает 1200°C ( $TK \geq 1200^\circ\text{C}$ ), система временно отключает её ( $C2=0$ ) до стабилизации условий. Режим откачки серы позволяет предотвратить её затвердевание, поддерживая температуру жидкой серы на уровне 120–140°C в ёмкостях для хранения.

**Аварийная ситуация.** В случае аварийных условий, таких как превышение давления ( $PR \geq 820$  кПа) или температуры ( $T1 \geq 300^\circ\text{C}$ ), система переходит в аварийный режим. В этом режиме включается факел ( $C7=1$ ) для безопасного сжигания сбрасываемого газа. Печи подогрева ( $C3, C4$ ) и реакционная печь ( $C2$ ) отключаются ( $C3=0, C4=0, C2=0$ ) для предотвращения повреждений оборудования.

Например, если датчики Д3 и Д5 фиксируют температуру выше 300°C и 150°C соответственно, клапаны K8 и K12 открываются ( $K8=1, K12=1$ ) для сброса нагретого газа. Одновременно закрываются клапаны подачи газа, такие как K6 и K10 ( $K6=0, K10=0$ ), чтобы предотвратить избыточное давление в системе. Насос С6 автоматически отключается ( $C6=0$ ), предотвращая возможные перегрузки.

**Формализованное описание предметной области в виде правил «Если, То».** В рамках разработки миварной экспертной системы для поддержки принятия решений персонала газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы была сформирована формализованная модель предметной области в виде миварной базы знаний (МБЗ). Основу МБЗ составляют объекты управления (агрегаты установки: печи, насосы, воздуходувки, факельная система и др.), входные параметры (температура, давление, уровень серы, режимы работы), а также логические зависимости между ними.

Покажем пример разработанных правил принятия решений по этапам.

- C1. Управление нагнетателем воздуха
  1. ЕСЛИ давление в системе достигает или превышает 820 кПа ( $PR \geq 820$ ), ТО отключить нагнетатель воздуха для предотвращения повреждений трубопроводов и компрессоров ( $C1 = 0$ ).
  2. ЕСЛИ зафиксирована аварийная ситуация ( $A = 1$ ), ТО отключить нагнетатель воздуха для предотвращения нагнетания в нестабильную реакционную зону ( $C1 = 0$ ).
  3. ЕСЛИ инициирован регламентный ремонт ( $R = 1$ ), ТО перевести нагнетатель воздуха в нерабочее состояние ( $C1 = 0$ ).
  4. ЕСЛИ датчик температуры в реакторе отключён ( $D1$  отсутствует), ТО отключить нагнетатель как источник неконтролируемой подачи ( $C1 = 0$ ).
  5. ЕСЛИ реакционная печь отключена ( $C2 = 0$ ), ТО отключить нагнетатель воздуха из-за отсутствия необходимости в подаче ( $C1 = 0$ ).
  6. ВО ВСЕХ иных условиях поддерживать активное состояние нагнетателя воздуха ( $C1 = 1$ ).
- C2. Управление реакционной печью Клауса
  1. ЕСЛИ температура в печи превышает 1200°C ( $TK \geq 1200$ ), ТО отключить печь для предотвращения разрушения теплоизоляции ( $C2 = 0$ ).
  2. ЕСЛИ зафиксирована авария ( $A = 1$ ), ТО отключить реактор немедленно ( $C2 = 0$ ).
  3. ЕСЛИ система переведена в режим ремонта ( $R = 1$ ), ТО перевести печь в нерабочее состояние ( $C2 = 0$ ).

4. ЕСЛИ давление на выходе реактора нестабильно более 5 секунд ( $\Delta P$  нестабильно), ТО отключить реактор ( $C2 = 0$ ).
  5. ЕСЛИ насос серы отключен ( $C6 = 0$ ) и уровень серы достиг критического уровня ( $L = 1$ ), ТО отключить печь для предотвращения переполнения ( $C2 = 0$ ).
  6. ВО ВСЕХ остальных случаях поддерживать рабочее состояние ( $C2 = 1$ ).
- С3. Управление печью подогрева №1
    1. ЕСЛИ температура в печи подогрева превышает  $300^{\circ}\text{C}$  ( $T1 \geq 300$ ), ТО отключить печь во избежание перегрева трубопроводов ( $C3 = 0$ ).
    2. ЕСЛИ авария на предприятии ( $A = 1$ ), ТО отключить печь согласно промышленному протоколу безопасности ( $C3 = 0$ ).
    3. ЕСЛИ идёт регламентное техническое обслуживание ( $R = 1$ ), ТО вывести печь из работы ( $C3 = 0$ ).
    4. ЕСЛИ температура воды на входе в печь ниже технологического минимума ( $T_w < T_{\min}$ ), ТО отключить печь ( $C3 = 0$ ).
    5. В остальных режимах поддерживать нагрев в активном состоянии ( $C3 = 1$ ).
  - С4. Управление печью подогрева №2
    1. ЕСЛИ температура выше  $150^{\circ}\text{C}$  ( $T2 \geq 150$ ), ТО отключить печь для предотвращения перегрева реакционной смеси ( $C4 = 0$ ).
    2. ЕСЛИ аварийный режим ( $A = 1$ ), ТО отключить печь ( $C4 = 0$ ).
    3. ЕСЛИ начат ремонт оборудования ( $R = 1$ ), ТО отключить печь ( $C4 = 0$ ).
    4. ЕСЛИ давление в системе меньше допустимого минимума ( $PR < 650$  кПа), ТО отключить печь ( $C4 = 0$ ).
    5. В остальных режимах эксплуатация осуществляется в активном состоянии ( $C4 = 1$ ).
  - С5. Управление термическим окислителем
    1. ЕСЛИ зафиксирована аварийная ситуация ( $A = 1$ ), ТО отключить окислитель для предотвращения неконтролируемого сгорания ( $C5 = 0$ ).
    2. ЕСЛИ начат плановый ремонт ( $R = 1$ ), ТО отключить окислитель ( $C5 = 0$ ).
    3. ЕСЛИ концентрация сероводорода ниже технологического минимума ( $\text{H}_2\text{S} < 5\%$ ), ТО отключить окислитель как неиспользуемый ( $C5 = 0$ ).
    4. В других условиях поддерживать активное состояние оборудования ( $C5 = 1$ ).
  - С6. Управление серным насосом
    1. ЕСЛИ уровень серы достигает заданного порога ( $L = 1$ ), ТО включить насос ( $C6 = 1$ ).
    2. ЕСЛИ аварийная ситуация ( $A = 1$ ), ТО отключить насос для предотвращения неконтролируемого потока серы ( $C6 = 0$ ).
    3. ЕСЛИ уровень серы ниже минимального ( $L = 0$ ) и давление в резервуаре выше нормы ( $P \geq 880$  кПа), ТО отключить насос ( $C6 = 0$ ).
    4. ЕСЛИ одновременно отключены клапаны K14–K16, ТО отключить насос ( $C6 = 0$ ).
    5. В иных условиях насос остаётся неактивным ( $C6 = 0$ ).
  - С7. Управление факельной системой (С7)
    1. ЕСЛИ активирован аварийный режим ( $A = 1$ ), ТО включить факел для утилизации избыточных газов ( $C7 = 1$ ).
    2. ЕСЛИ давление в системе превышает допустимое значение ( $PR \geq 850$  кПа), ТО включить факел ( $C7 = 1$ ).

3. ЕСЛИ отключены ключевые узлы системы (С2, С3, С4 одновременно = 0), ТО включить факел (С7 = 1).
4. В обычном технологическом цикле удерживать факел в неактивном состоянии (С7 = 0).

**Тестирование системы.** После определения всех правил и состояний система была протестирована в среде «КЭСМИ». На этапе настройки были внесены все заданные правила, где входными параметрами выступали текущие состояния оборудования и датчиков (например, Состояние цеха, значения температуры и давления), а выходными параметрами — состояния клапанов, насосов и других элементов. Для каждого выходного параметра были поставлены галочки, чтобы система могла определить его значение на основе заданных правил.

В режиме нормальной работы (рисунок 2) включается цех, и все системы функционируют в штатном режиме. Датчики Д1, Д3 и Д5 фиксируют нормальные значения температуры и давления, клапаны К1, К3, К7 и К11 находятся в открытом состоянии, а воздуходувка С1 включена (С1=1), обеспечивая подачу воздуха для реакции. Давление в системе контролируется датчиками Д2 и Д4, которые фиксируют его соответствие норме. В это время клапаны К14, К15 и К16 остаются закрытыми (К14=0, К15=0, К16=0), так как уровень серы, регистрируемый датчиком Д6, низкий (L=0). Насос С6 отключен (С6=0), поскольку перекачка жидкой серы не требуется. Газы проходят очистку в системе и выводятся через дымоход без отклонений.

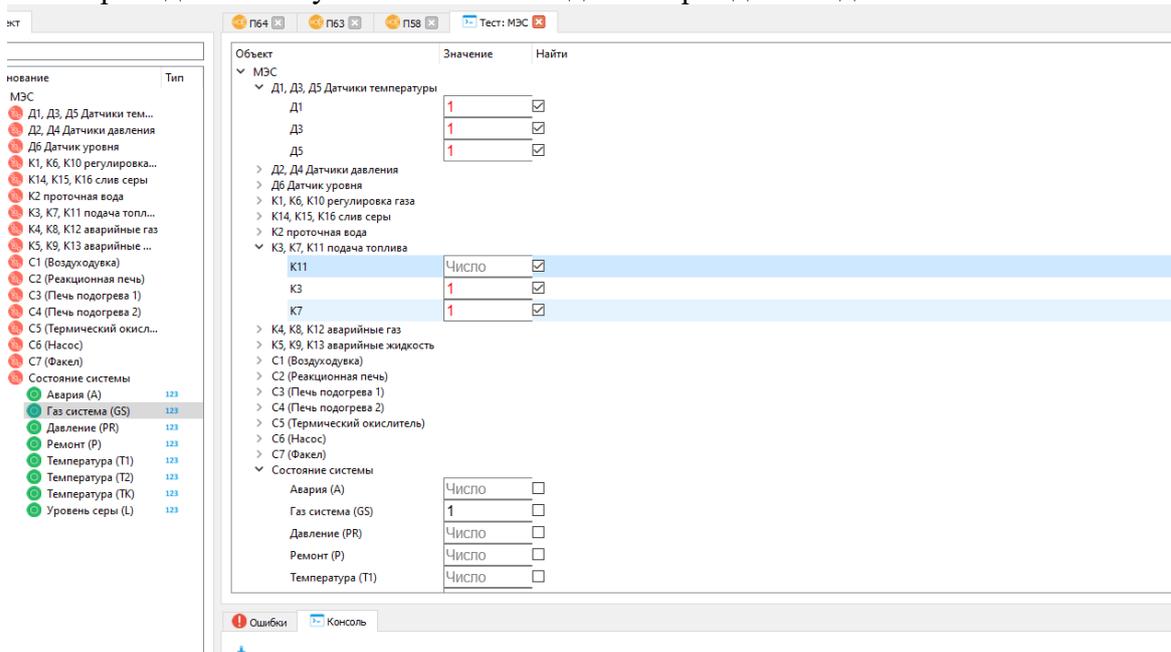


Рисунок 2 – Режим «Нормальной работы»

Граф решения (логического вывода) показан на рисунке 3. В результате получается, что можно увидеть не только требуемый результат, но и ход решения как в текстовом, так и графическом виде с помощью графа решения.

Если цех работает и происходит аварийная ситуация, датчики Д2 и Д4 зафиксировали отклонение давления, Д3 и Д5 показали отклонение температуры, а Д1 остается в норме. Клапаны К1, К2, К14, К15 и К16 закрыты для предотвращения утечек газа и серного конденсата, в то время как клапаны К4, К8 и К12 открыты для аварийного сброса газа. С1 отключена, а факел С7 включен для безопасного сжигания сбрасываемого газа. Эксперимент показан на рисунке 4.

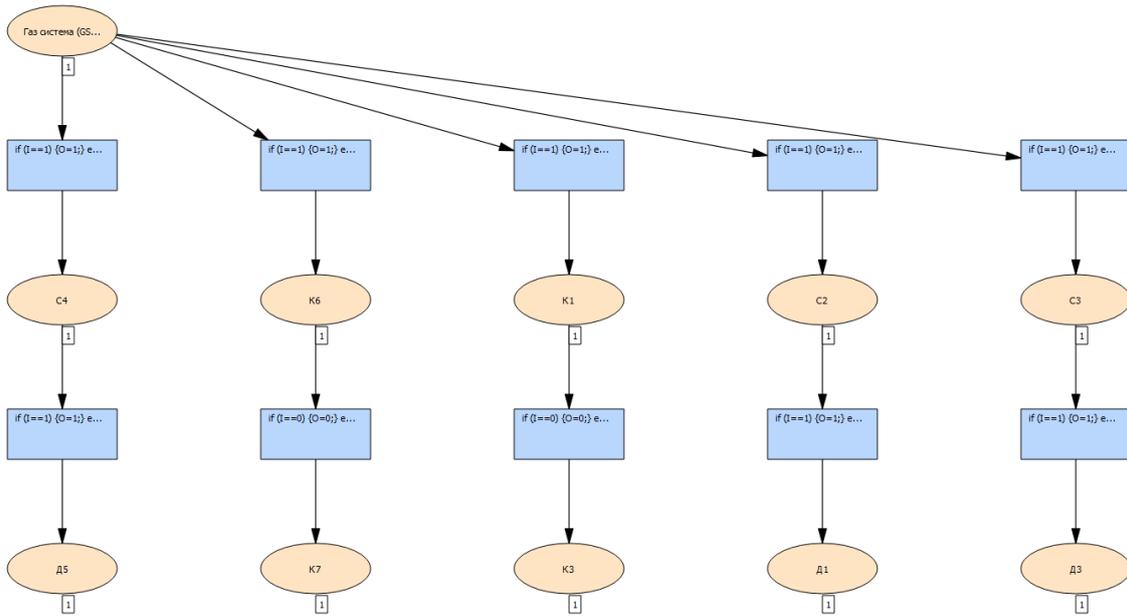


Рисунок 3 - Граф решения для режима «Нормальной работы»

Объект	Значение	Найти
K13	1	<input checked="" type="checkbox"/>
K5	1	<input checked="" type="checkbox"/>
K9	1	<input checked="" type="checkbox"/>
▼ C1 (Воздуходувка)		
C1	0	<input checked="" type="checkbox"/>
▼ C2 (Реакционная печь)		
C2	0	<input checked="" type="checkbox"/>
▼ C3 (Печь подогрева 1)		
C3	0	<input checked="" type="checkbox"/>
▼ C4 (Печь подогрева 2)		
C4	0	<input checked="" type="checkbox"/>
▼ C5 (Термический окислитель)		
C5	0	<input checked="" type="checkbox"/>
▼ C6 (Насос)		
C6	0	<input checked="" type="checkbox"/>
▼ C7 (Факел)		
C7	1	<input checked="" type="checkbox"/>
▼ Состояние системы		
Авария (A)	1	<input type="checkbox"/>
Газ система (GS)	Число	<input type="checkbox"/>
Давление (PR)	Число	<input type="checkbox"/>
Ремонт (P)	Число	<input type="checkbox"/>
Температура (T1)	Число	<input type="checkbox"/>
Температура (T2)	Число	<input type="checkbox"/>
Температура (TK)	Число	<input type="checkbox"/>
Уровень серы (L)	Число	<input type="checkbox"/>

Рисунок 4 – Тестирование аварийной ситуации

Во время сбора конденсата К2 открыт, обеспечивая подачу проточной воды для системы. Д6 контролирует уровень серного конденсата, показывая достижение необходимого уровня. К5, К9, К14, К15 и К16 открыты, позволяя сливать конденсат из конденсаторов в серную яму. Эксперимент показан на рисунке 5.

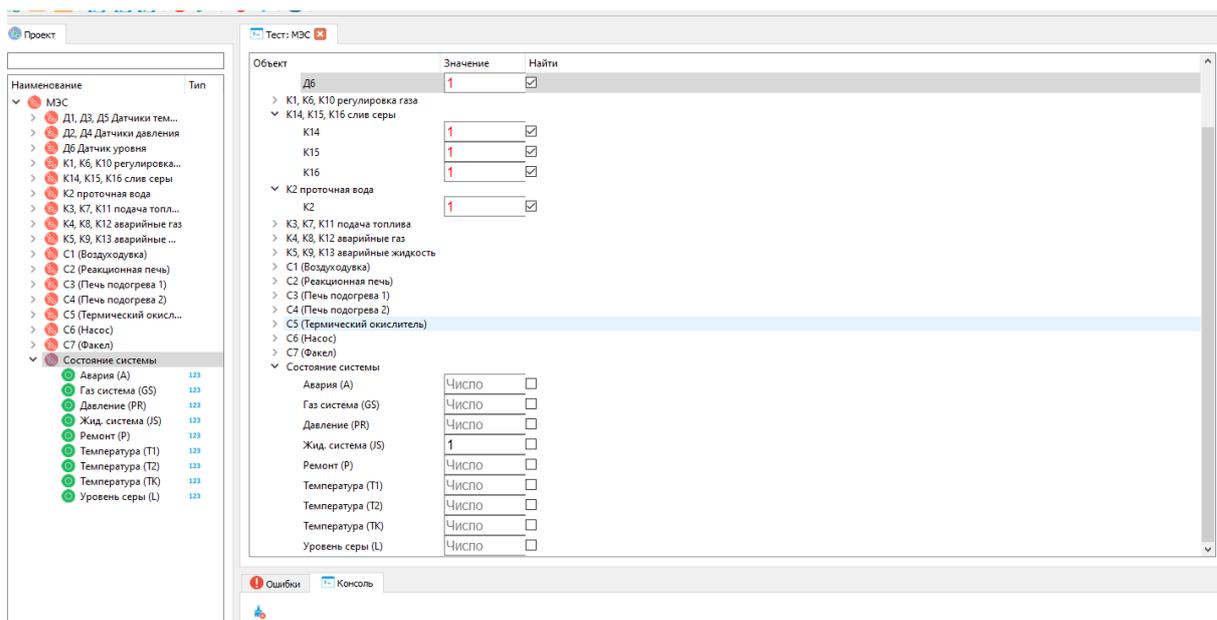


Рисунок 5 – Сбор конденсата

## Заключение

Проведённое исследование подтвердило возможность и обоснованность создания миварной экспертной системы (МЭС) для поддержки принятия решений персоналом газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы. Использование миварных технологий логического искусственного интеллекта позволило формализовать технологический процесс Клауса в виде системы продукционных правил и реализовать его в программной среде КЭСМИ Wi!Mi Разуматор версии 2.1. Это обеспечило автоматизацию обработки информации, прогнозирование нарушений и выдачу рекомендаций в реальном времени.

Миварная модель, построенная в формате двудольного ориентированного графа, охватывает ключевые параметры технологического процесса и отражает взаимосвязи между состояниями оборудования, датчиков и исполнительных механизмов. Тестирование системы в различных производственных режимах — от нормального функционирования до аварийных ситуаций — показало высокую точность логического вывода и гибкость миварной архитектуры.

Особенностью предложенного решения является гибкость структуры знаний: правила системы могут дополняться и редактироваться без потери целостности модели. Это делает её пригодной для эволюционного развития и масштабирования. Перспективными направлениями дальнейшей работы являются расширение модуля прогнозирования, интеграция с другими подсистемами управления и наращивание базы знаний на основе реальных производственных данных. Созданная система может стать основой для внедрения интеллектуальных помощников в критически важных объектах промышленной инфраструктуры.

## Список литературы

1. Варламов О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. *Миварное информационное пространство*. М.: «Радио и связь», 2002. 286 с. EDN RWTCOP.

2. Коценко А.А., Горячкин Б.С., Базанова А.Г. и др. Модель описания миварных сетей в формате двудольных и трехдольных ориентированных графов для принятия решений и обработки информации в машиностроительном ИИ. *Динамика сложных систем - XXI век*. 2024. Т. 18, № 1. С. 5-17. DOI 10.18127/j19997493-202401-01. EDN XWYTYP.
3. Варламов О.О. Большие знания: расширение областей применения миварных технологий логического ИИ. *МИВАР'23. Сборник статей*. Москва, 2023. С. 591-597. EDN: DDTLFO.
4. *Миварные системы принятия решений роботов*. Роборазум : монография / О.О. Варламов, А.А. Коценко, Д.В. Аладин, А.А. Желтова, А.В. Марущенко. М.: ИНФРА-М, 2024. 549 с. ISBN 978-5-16-020037-8.
5. Коценко А.А., Козырев С.А., Тодуа Д.Г. и др. Исследование применения миварных технологий для планирования маршрутов робототехнических комплексов в трехмерном логическом пространстве. *Естественные и технические науки*. 2024. № 2(189). С. 190-196. DOI 10.25633/ETN.2024.02.12. EDN JAFWVA.
6. Varlamov O., Aladin D. A New Generation of Rules-based Approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and Brains for Autonomous Robots. *Mach. Intell. Res.* 2024. DOI: 10.1007/s11633-023-1473-1 EDN: TSPUOP.
7. Варламов О.О. Подготовка исходных данных для миварных БЗ СПР роботов. *МИВАР'23. Сборник статей*. Москва, 2023. С. 545-551. EDN: FHLZBJ.
8. Честнова Е.А., Федосеева Е.Ю., Ваганов Д.Д. и др. Разработка базы знаний МЭС по подбору лекарственных форм для антибиотиков и антимикотиков. *Естественные и технические науки*. 2023. № 5(180). С. 29-33. DOI 10.25633/ETN.2023.05.01. EDN WOZCUJ.
9. Желтова А.А. Комплексный ИИ: анализ распознавания знаков на фотографиях. *МИВАР'23. Сборник статей*. Москва, 2023. С. 412-417. EDN: YUHADL.
10. Максимов Н.В. Большие знания: модели и средства представления, поиска и обработки знаний в задачах интеллектуальной деятельности. *МИВАР'23. Сборник статей*. Москва, 2023. С. 579-590. EDN: HAWGBH.
11. Варламов О.О. Обзор 25 лет развития миварного подхода к разработке интеллектуальных систем и созданию искусственного интеллекта. *Труды Научно-исследовательского института радио*. 2011. № 1. С. 34-44. EDN: NTMNXF.
12. Варламов О.О. О создании информационных технологий для математического моделирования на основе «многомерной открытой гносеологической активной сети» MOGAN. *Информация и образование: границы коммуникаций INFO'20. сборник научных трудов № 12 (20)*. Горно-Алтайск, 2020. С. 134-135. EDN: FOCICJ.
13. Санду Р.А. и др. Миварные автоматизированные системы управления технологическими процессами для нефтяной промышленности России. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2011. № 11. С.37-40. EDN: OJOUVV.
14. Максимова А.Ю. Миварная экспертная система для распознавания образов на основе нечеткой классификации и моделирования различных предметных областей с автоматизированным расширением контекста. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011. № 12 (125). С. 77-87. EDN: OKIPCF.
15. Давыдова Т.Л., Варламов О.О., Остроух А.В., Краснянский М.Н. Анализ возможностей миварного подхода для систем искусственного интеллекта и современной робототехники. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2011. Т. 17. № 3. С. 687-694. EDN: OEYUOD.
16. Чувилов Д.А. и др. О создании автономных групп роботов на основе миварной системы принятия решений. *Информация и образование: границы коммуникаций*. 2022. № 14 (22). С. 217-220. EDN: XZQSGF.
17. Чувилов Д.А., Аладин Д.В. Автономные группы роботов с миварными системами принятия решений. *МИВАР'22*. Москва, 2022. С. 356-362. EDN: VLNVDE.
18. Варламов О.О. О системном подходе к созданию модели компьютерных угроз и ее роли в обеспечении безопасности информации в ключевых системах информационной инфраструктуры. *Известия ТРТУ*. 2006. № 7 (62). С. 216-223. EDN: KVHUEH.
19. Подкосова Я.Г., Васюгова С.А. Использование технологий виртуальной реальности для трехмерной визуализации результатов моделирования и для миварных обучающих систем. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2011. № 1-1 (39). С. 226-232. EDN: NECGTZ.

20. Протопопова Д.А. Использование миварного подхода для понимания текста, написанного на естественном языке. *Автоматизация и управление в технических системах*. 2015. № 4-1 (16). С. 10. EDN: YUTKEQ.
21. Терехов В.И., Горячкин Б.С. Развитие актуальных научных направлений как продолжение научных школ кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Динамика сложных систем – XXI век*. 2023. Т. 17, № 3. С. 25-33. DOI 10.18127/j19997493-202303-04. EDN CLLMCH.
22. Горячкин Б.С., Байбарин Р.Г., Тюлькина Н.В., Запруднов М.С. Эргономический анализ представлений миварной модели. *Естественные и технические науки*. 2022. № 4(167). С. 162-174. EDN MYQLZN.
23. Андреев А.В., Крайчиков О.Д., Карпов Д.К. и др. БЗ МЭС по подбору фильмов. *Мивар'22: Сборник научных статей*. Москва: Инфра-М, 2022. С. 115-122. EDN MLVVUM.
24. Бондаренко И.Г., Гришин С.В., Стрихар П.А. и др. МЭС подбора оптимального персонажа в игровом проекте DOTA 2. *Мивар'23*. Москва: Инфра-М, 2023. С. 27-32. EDN VIUHEB.
25. Богомолов Д.Н., Умряев Д.Т., Кротов Ю.Н. и др. МЭС для автоматизации решения заявок в службе технической поддержки. *Мивар'22*. Москва: Инфра-М, 2022. С. 20-28. EDN VEFYUJ.
26. Коценко А.А. Разработка методики автоматической генерации миварных баз знаний трехмерного логического пространства. *Информация и образование: границы коммуникаций*. 2023. № 15(23). С. 304-308. DOI 10.59131/2411-9814\_2023\_15(23)\_304. EDN MLGYNM.
27. Гаврилюк А.Г., Хотин П.Ю., Черната Н.С. и др. БЗ МЭС подбора ноутбуков. *Мивар'22: Сборник научных статей*. Москва: Инфра-М, 2022. С. 129-136. EDN FZKYHL.
28. Воронцова А.В., Вережкина Д.В., Ванина П.В. и др. МЭС для распределения рабочих задач между сотрудниками. *Мивар'23*. Москва: ИНФРА-М, 2023. С. 63-73. EDN ZOOLHR.
29. Шевцова Ю.Б., Замула А.И., Мышенков К.С. и др. ГИИС оценки человека по фотографии и выдачи рекомендаций по питанию. *Мивар'22*. Москва: Инфра-М, 2022. С. 309-314. EDN JGWRP.
30. Дятленко Е.А., Евдокимов А.А., Никольский Д.Р. и др. МЭС для распознавания объектов интерьера. *Мивар'23*. Москва: ИНФРА-М, 2023. С. 87-95. EDN SJMPZG.

## References

1. 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.
2. Kotsenko A. A., Goryachkin B. S., Bazanova A. G., et al. A model for describing mivar networks in the format of bipartite and tripartite directed graphs for decision-making and information processing in mechanical engineering AI // *Dynamics of complex systems - the XXI century*. 2024. Vol. 18, No. 1. Pp. 5-17. DOI 10.18127/j19997493-202401-01. EDN XWYUYP.
3. Varlamov O. O. Big knowledge: expanding the areas of application of mivar technologies of logical AI // *MIVAR'23. Collection of articles*. Moscow, 2023. Pp. 591-597. EDN: DDTLFQ.
4. Mivar decision-making systems for robots. *Roborazme: monograph* / O. O. Varlamov, A. A. Kotsenko, D. V. Aladin, A. A. Zheltova, A. V. Marushchenko. Moscow: INFRA-M, 2024. 549 p. ISBN 978-5-16-020037-8.
5. Kotsenko A. A., Kozyrev S. A., Todua D. G. et al. Study of the application of mivar technologies for route planning of robotic complexes in three-dimensional logical space // *Natural and technical sciences*. 2024. No. 2 (189). Pp. DOI 10.25633/ETN.2024.02.12. EDN JAFWVA.
6. Varlamov O., Aladin D. A New Generation of Rules-based Approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and Brains for Autonomous Robots. *Mach. Intell. Res.* 2024. DOI: 10.1007/s11633-023-1473-1 EDN: TSPUOP.
7. Varlamov O.O. Preparation of initial data for mivar KB of robotic control systems // *MIVAR'23. Collection of articles*. Moscow, 2023. P. 545-551. EDN: FHLZBJ.
8. Chestnova E.A., Fedoseeva E.Yu., Vaganov D.D. and others. Development of a knowledge base of the MES for the selection of dosage forms for antibiotics and antimycotics // *Natural and technical sciences*. 2023. No. 5 (180). P. 29-33. DOI 10.25633 / ETN.2023.05.01. EDN WOZCUJ.
9. Zheltova A.A. Complex AI: analysis of sign recognition in photographs // *MIVAR'23. Collection of articles*. Moscow, 2023. P. 412-417. EDN: YUHADL.
10. Maksimov N.V. Big knowledge: models and means of representation, search and processing of knowledge in problems of intellectual activity // *MIVAR'23. Collection of articles*. Moscow, 2023. P. 579-590. EDN: HAWGBH.

11. Varlamov O.O. A Review of 25 Years of the Development of the Mivar Approach to the Development of Intelligent Systems and the Creation of Artificial Intelligence // Proceedings of the Radio Research Institute. 2011. No. 1. Pp. 34-44. EDN: NTMHXF.
12. Varlamov O.O. On the Creation of Information Technologies for Mathematical Modeling Based on the "Multidimensional Open Epistemological Active Network" MOGAN // Information and Education: The Boundaries of Communications INFO'20. Collection of Scientific Papers No. 12 (20). Gorno-Altaysk, 2020. Pp. 134-135. EDN: FOCICJ.
13. Sandu R.A. et al. Mivar Automated Process Control Systems for the Russian Oil Industry // Automation, Telemechanization and Communication in the Oil Industry. 2011. No. 11. Pp. 37-40. EDN: OJOUVV.
14. Maksimova A.Yu. Mivar expert system for pattern recognition based on fuzzy classification and modeling of various subject areas with automated context expansion // Bulletin of SFedU. Technical sciences. 2011. No. 12 (125). P. 77-87. EDN: OKIPCF.
15. Davydova T.L., Varlamov O.O., Ostroukh A.V., Krasnyansky M.N. Analysis of the capabilities of the mivar approach for artificial intelligence systems and modern robotics // Bulletin of Tambov State Technical University. 2011. Vol. 17. No. 3. P. 687-694. EDN: OEYUOD.
16. Chuvikov D.A. et al. On the creation of autonomous groups of robots based on a mivar decision-making system // Information and education: boundaries of communications. 2022. No. 14 (22). P. 217-220. EDN: XZQSGF.
17. Chuvikov D.A., Aladin D.V. Autonomous groups of robots with mivar decision-making systems // In the collection: MIVAR'22. Moscow, 2022. P. 356-362. EDN: VLNVDE.
18. Varlamov O.O. On a systems approach to creating a computer threat model and its role in ensuring information security in key information infrastructure systems // Bulletin of TRTU. 2006. No. 7 (62). P. 216-223. EDN: KVHUEH.
19. Podkosova Ya.G., Vasyugova S.A. Using virtual reality technologies for three-dimensional visualization of modeling results and for mivar training systems // Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011. No. 1-1 (39). P. 226-232. EDN: NECGTZ. 20. Protopopova D.A. Using the mivar approach to understand text written in natural language // Automation and control in technical systems. 2015. No. 4-1 (16). P. 10. EDN: YUTKEQ.
20. Protopopova D.A. Using the mivar approach to understand text written in natural language // Automation and control in technical systems. 2015. No. 4-1 (16). P. 10. EDN: YUTKEQ.
21. Terekhov V.I., Goryachkin B.S. Development of relevant scientific directions as a continuation of scientific schools of the Department of Information Processing and Control Systems of Bauman Moscow State Technical University // Dynamics of complex systems - XXI century. 2023. Vol. 17, No. 3. P. 25-33. DOI 10.18127/j19997493-202303-04. EDN CLLMCH.
22. Goryachkin B.S., Baibarin R.G., Tyulkina N.V., Zaprudnov M.S. Ergonomic analysis of the representations of the mivar model // Natural and technical sciences. 2022. No. 4(167). pp. 162-174. EDN MYQLZN.
23. Andreev A.V., Kraichikov O.D., Karpov D.K. and others. MES knowledge base on film selection // Mivar'22: Collection of scientific articles. Moscow: Infra-M, 2022. pp. 115-122. EDN MLVVUM.
24. Bondarenko I.G., Grishin S.V., Strikhar P.A. and others. MES for selecting the optimal character in the DOTA 2 game project // Mivar'23. Moscow: Infra-M, 2023. pp. 27-32. EDN VIUHEB.
25. Bogomolov D.N., Umryaev D.T., Krotov Yu.N., et al. MES for automation of request resolution in technical support service // Mivar'22. Moscow: Infra-M, 2022. Pp. 20-28. EDN VEFYTI.
26. Kotsenko A.A. Development of methodology for automatic generation of mivar knowledge bases of three-dimensional logical space // Information and education: boundaries of communications. 2023. No. 15(23). Pp. 304-308. DOI 10.59131/2411-9814\_2023\_15(23)\_304. EDN MLGYNM.
27. Gavriilyuk A.G., Khotin P.Yu., Chernata N.S., et al. MES knowledge base for laptop selection // Mivar'22: Collection of scientific articles. Moscow: Infra-M, 2022. pp. 129-136. EDN FZKYHL.
28. Vorontsova AV, Verevkina DV, Vanina PV, et al. MES for distributing work tasks among employees // Mivar'23. Moscow: INFRA-M, 2023. pp. 63-73. EDN ZOOLHR.
29. Shevtsova YuB, Zamula AI, Myshenkov KS, et al. GIIS for assessing a person from a photograph and issuing nutrition recommendations // Mivar'22. Moscow: Infra-M, 2022. pp. 309-314. EDN JJGWRP.
30. Dyatlenko EA, Evdokimov AA, Nikolsky DR, et al. MES for recognizing interior objects // Mivar'23. Moscow: INFRA-M, 2023. P. 87-95. EDN SJMPZG.

## RESUME

*Smirnov K.S., Varlamov O.O.*

*MES for decision support of gas processing plant personnel during liquid sulfur extraction*

In recent years, approaches to creating intelligent control systems for complex production processes have been actively studied. In this paper, the possibility of using mivar technologies of logical artificial intelligence to support decision-making at a critically important chemical industry facility — a liquid sulfur production unit using the Claus method — is substantiated for the first time. The main result of the study was the creation of a mivar expert system (MES) implementing a formalized mechanism for analyzing process parameters, identifying anomalies, and generating recommendations for controlling the unit in various operating modes.

The study showed that the use of mivar models to support operational and emergency control of process systems based on logical rules of the "if-then" type is an appropriate and promising direction. This allows increasing the stability and safety of processes, minimizing the risks of accidents, and improving the operating efficiency of process equipment.

As part of the project, a system analysis of the subject area of sulfur-containing gas processing was carried out, a formalized description of thermal and catalytic processing processes was developed in the form of a mivar knowledge base, including more than 50 logical rules. The model is implemented in the KESMI Wi!Mi Razumator version 2.1 environment, which ensures automatic logical inference in real time. Particular attention is paid to processing signals from sensors, controlling actuators and selecting control actions depending on the current state of the system.

Testing on typical scenarios - including normal, emergency and sulfur pumping mode - confirmed the correctness of the model, the stability of the logical inference and its readiness for practical application. The flexibility of the mivar architecture allows for the development of the system: new rules can be added without violating the existing logic, which makes the MES suitable for evolutionary growth and integration into broader intelligent automation platforms.

Thus, the developed mivar expert system demonstrates the practical applicability of mivar technologies in the tasks of intelligent control of hazardous production facilities and can serve as a basis for creating new generations of smart production systems in the chemical industry.

## РЕЗЮМЕ

*Смирнов К.С., Варламов О.О.*

*МЭС для поддержки принятия решений персонала газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы*

В последние годы активно исследуются подходы к созданию интеллектуальных систем управления сложными производственными процессами. В настоящей работе впервые обоснована возможность применения миварных технологий логического искусственного интеллекта для поддержки принятия решений на критически важном объекте химической промышленности — установке получения жидкой серы методом Клауса. Основным результатом исследования стало создание миварной экспертной системы (МЭС), реализующей формализованный механизм анализа параметров технологического процесса, выявления аномалий и генерации рекомендаций по управлению установкой в различных режимах работы.

Выполненное исследование показало, что применение миварных моделей для поддержки оперативного и аварийного управления технологическими системами на основе логических правил типа «если–то» является целесообразным и перспективным направлением. Это позволяет повысить устойчивость и безопасность процессов, минимизировать риски аварий и улучшить эффективность эксплуатации технологического оборудования.

В рамках проекта был проведён системный анализ предметной области переработки серосодержащих газов, разработано формализованное описание процессов термической и каталитической переработки в виде миварной базы знаний, включающей более 50 логических правил. Модель реализована в среде КЭСМИ Wi!Mi Разуматор версии 2.1, что позволило обеспечить автоматический логический вывод в реальном времени. Особое внимание уделено обработке сигналов от датчиков, управлению исполнительными механизмами и выбору управляющих воздействий в зависимости от текущего состояния системы.

Проведённое тестирование на типовых сценариях — включая нормальный, аварийный и режим откачки серы — подтвердило корректность модели, устойчивость логического вывода и её готовность к практическому применению. Гибкость миварной архитектуры позволяет развивать систему: новые правила могут добавляться без нарушения уже существующей логики, что делает МЭС пригодной для эволюционного роста и интеграции в более широкие интеллектуальные платформы автоматизации.

Таким образом, разработанная миварная экспертная система демонстрирует практическую применимость миварных технологий в задачах интеллектуального управления опасными производственными объектами и может служить основой для создания новых поколений умных производственных систем в химической промышленности.

**Смирнов Кирилл Сергеевич**, магистр, Институт искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, [kk\\_smirnov@mail.ru](mailto:kk_smirnov@mail.ru)

*Область научных интересов:* искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, умные производственные системы, обработка информации, кибернетика

**Варламов Олег Олегович**, доктор технических наук, профессор, [ovar@narod.ru](mailto:ovar@narod.ru),  
1) главный научный сотрудник АО «НИИ «Вычислительных комплексов»»,  
2) профессор базовой кафедры № 254 Вычислительных комплексов Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия

3) профессор кафедры Систем обработки информации и управления МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

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

Статья поступила в редакцию 16.05.2025.

Авторы номера

Акопян Г. В.	ФГБУ «Институт неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака» Минздрава РФ, г. Донецк, <a href="mailto:gulnara.akopyan.79@mail.ru">gulnara.akopyan.79@mail.ru</a>
Анцыферов С.С., д.т.н., профессор	ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, <a href="mailto:antsyferov@mirea.ru">antsyferov@mirea.ru</a>
Бажутин Д. В.	ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, РФ, <a href="mailto:dv.bazhutin@yandex.ru">dv.bazhutin@yandex.ru</a>
Боровиков А. И.	ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, РФ, <a href="mailto:aleksey.borovikov.00@mail.ru">aleksey.borovikov.00@mail.ru</a>
Варламов О. О., д.т.н., профессор	АО НИИ Вычислительных комплексов; Институт искусственного интеллекта РТУ МИРЭА; МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, РФ, <a href="mailto:ovar@narod.ru">ovar@narod.ru</a>
Водолазская Н. В., к.т.н., доцент	ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», г. Москва, <a href="mailto:vnv26@bk.ru">vnv26@bk.ru</a> .
Выскуб В.Г., д.т.н., профессор	АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева», г. Москва, РФ, <a href="mailto:Vyskub08@mail.ru">Vyskub08@mail.ru</a>
Данилов В. В., д.т.н., проф.	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ, <a href="mailto:ut5iv@mail.ru">ut5iv@mail.ru</a>
Звягинцева А. В., д.т.н., доцент	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ, <a href="mailto:zviagintsevaav@gmail.com">zviagintsevaav@gmail.com</a> .
Кавелина А. С., к.мед.н.	ФГБУ ««Институт неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака» Минздрава РФ, г. Донецк, <a href="mailto:annakavelina@mail.ru">annakavelina@mail.ru</a>
Карповский А. Ю.	ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», г. Донецк, РФ, <a href="mailto:oagm308@mail.ru">oagm308@mail.ru</a>
Ковалев И. Ю.	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ, <a href="mailto:ilyakovalev2023@mail.ru">ilyakovalev2023@mail.ru</a>
Колесник Е. В.	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ, <a href="mailto:ketrinkilli@ya.ru">ketrinkilli@ya.ru</a> .
Копытова Е. В.	ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», г. Москва, <a href="mailto:kopytova@mirea.ru">kopytova@mirea.ru</a> .
Криводубский О. А., д.т.н., профессор	ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк, РФ, <a href="mailto:oleg.krivodybski.dn@gmail.ru">oleg.krivodybski.dn@gmail.ru</a>
Курнасов Е. В., к.т.н., доцент	Институт искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, РФ, <a href="mailto:kurnasv@mirea.ru">kurnasv@mirea.ru</a>
Лаврентьева К. В.	ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», г. Москва, <a href="mailto:lavrentyeva@mirea.ru">lavrentyeva@mirea.ru</a> .
Муравьев Д. С.	ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, <a href="mailto:muravev@mirea.ru">muravev@mirea.ru</a>
Мутин Д. И., д.т.н.	АО «НИИ «Вычислительных комплексов», г. Москва, РФ, <a href="mailto:mutin@niivk.ru">mutin@niivk.ru</a>
Наумов М. А.	ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», г. Донецк, РФ
Никитенко К. А.	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ, <a href="mailto:n1kitenkok@yandex.ru">n1kitenkok@yandex.ru</a>
Ниценко А. В., к.т.н.	ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк, РФ, <a href="mailto:nav_box@mail.ru">nav_box@mail.ru</a>

Павлыш В. Н., д.т.н., профессор	ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, РФ, pavlyshvn@mail.ru
Подлесный В. Ю.	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ, pikaayzek@ya.ru.
Попандопуло А. Г., д.мед.н, профессор	ФГБУ «Институт неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака» Минздрава РФ, pag.lctc@mail.ru
Скодтаев Э. В.	Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, РФ
Смирнов К. С.	Институт искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, РФ, kk smirnov@mail.ru
Смирягин В. А.	Институт искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, РФ, wertu1505@yandex.ru
Солод В. С., к.т.н.	ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк, РФ, vs.solod@mail.ru
Солопов М. В.	ФГБУ «Институт неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака» Минздрава РФ, г. Донецк mxsolopov@yandex.ru
Тимакова А. А.	Институт искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, РФ, nastya.1227@yandex.ru
Третьяков И. А., к.т.н., доцент	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ, i.tretiakov@mail.ru.
Турчин В. В.	ФГБУ «Институт неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака» Минздрава РФ, г. Донецк, turchin.dn@mail.ru
Фазилова К. Н., к.т.н.	ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, fazilova@mirea.ru
Черненко В. Д.	ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, mr_skeleton_1000@mail.ru
Чечехина Е. С.	ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», voynovaes.pharm@gmail.com
Шелепов В. Ю., д.ф.-м.н., профессор	ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк, РФ vladislav.shelepov2012@yandex.ru

## Рецензенты номера

Анцыферов С. С., д.т.н., профессор  
 Балдин А.В. д.т.н., профессор  
 Беловодский В. Н., к.т.н., доцент  
 Болбаков Р. Г., к.т.н., доцент  
 Варламов О. О., д.т.н., профессор  
 Зори С.А., д.т.н., профессор  
 Зуев В.М., н.с., зав.отд.ИРТС  
 Кузнецов Д. Н., к.т.н., доцент  
 Павлыш В. Н., д.т.н.,  
 Сальников И. С., к.т.н.  
 Шелепов В. Ю., д.ф.-м.н., профессор

## Авторский указатель

### А

Акопян Г. В., 21  
Анцыферов С. С., 60

### Б

Бажутин Д. В., 106  
Боровиков А. И., 31

### В

Варламов О. О., 159  
Водолазская Н. В., 116  
Выскуб В.Г., 91

### Д

Данилов В. В., 129

### З

Звягинцева А. В., 66, 79

### К

Кавелина А. С., 21  
Карповский А. Ю., 4  
Ковалев И. Ю., 66  
Колесник Е. В., 129  
Копытова Е. В., 116  
Криводубский О. А., 31  
Курнасов Е. В., 91

### Л

Лаврентьева К. В., 116

### М

Муравьев Д. С., 60  
Мутин Д. И., 91

### Н

Наумов М. А., 4  
Никитенко К. А., 79  
Ниценко А. В., 13

### П

Павлыш В. Н., 106  
Подлесный В. Ю., 129  
Попандопуло А. Г., 21

### С

Скодтаев Э. В., 148  
Смирнов К. С., 159  
Смирягин В. А., 91  
Солод В. С., 44  
Солопов М. В., 21

### Т

Тимакова А. А., 91  
Третьяков И. А., 129  
Турчин В. В., 21

### Ф

Фазилова К. Н., 60

### Ч

Черненко В. Д., 116  
Чечехина Е. С., 21

### Ш

Шелепов В. Ю., 13

СОДЕРЖАНИЕ	CONTENTS
Раздел 1 ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ	Section 1 ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING
<b>Наумов М.А., Карповский А.Ю.</b> Методы повышения точности классификации объектов при построении системы зрения для исследования ограниченных пространств 4	<b>Naumov M. A., Karpovsky A. Y.</b> Methods for improving the accuracy of object classification when building a vision system for exploring confined spaces .....4
<b>Ниценко А. В., Шелепов В. Ю.</b> Метод снятия неоднозначности винительного и творительного падежа для ряда существительных русского языка ..... 13	<b>Nicenko A. V., Shelepov V. Ju.</b> A method of Accusative and Instrumental Cases Disambiguation for a Number of Russian Nouns ..... 13
<b>Солопов М. В., Чечехина Е. С., Попандопуло А. Г., Кавелина А. С., Акопян Г. В., Турчин В. В.</b> Исследование применения моделей MASK R-CNN и SEGMENT ANYTHING MODEL (SAM) для инстанс-сегментации мезенхимных стволовых клеток на микрофотографиях.....21	<b>Solopov M. V., Chechekhina E. S., Popandopulo A. G., Kavelina A. S., Akopian G. V., Turchin V. V.</b> Study of Application of MASK R-CNN and SEGMENT ANYTHING MODEL (SAM) for Instance Segmentation of Mesenchymal Stem Cells in Microphotographs .....21
Раздел 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ	Section 2 MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND SOFTWARE PACKAGES
<b>Боровиков А. И., Криводубский О. А.</b> Математическое моделирование и формализация потоков для анализа оптимизации и выявления аномалий в логистике, финансах и закупках..... 31	<b>Borovikov A. I., Krivodubsky O. A.</b> Mathematical Modeling and Flow Formalization for Analysis, Optimization and Anomaly Detection in logistics, Finance and Procurement.....31
<b>Солод В. С.</b> Физико-математическая модель для разработки экспертной системы ускоренного охлаждения арматурного проката..... 44	<b>Solod V. S.</b> Physical and Mathematical Model for Developing an Expert System for Accelerated Cooling of Reinforcement Products .....44
Раздел 3 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА	Section 3 SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND INFORMATION PROCESSING, STATISTICS
<b>Анцыферов С. С., Фазилова К. Н., Муравьев Д. С.</b> Интеллектуальные системы управления качеством технологических процессов и оборудования наукоёмкого производства ( <i>англ.</i> )..... 60	<b>Antsyferov S. S., Fazilova K. N., Muravyov D. S.</b> Intelligent Quality Control Systems for High-Tech Manufacturing Processes and Equipment ..... 60
<b>Звягинцева А. В., Ковалев И. Ю.</b> Анализ моделей классификации для распознавания прецедентных событий в технологических процессах добычи нефти и газа..... 66	<b>Zviagintseva A. V., Kovalev I. Y.</b> Analysis of Classification Models for Recognizing Precedent Events in Oil and Gas Production Processes .....66

<b>Никитенко К. А., Звягинцева А. В.</b> Интерпретируемость нейросемантических моделей при их применении в прикладных областях..... 79	<b>Nikitenko K. A., Zviagintseva A. V.</b> Interpretability of Neurosemantic Models in Their Application in Applied Fields .....79
<b>Тимакова А. А., Смирягин В. А., Курнасов Е. В., Выскуб В. Г., Мутин Д. И.</b> Создание миварной экспертной системы для автоматизации выбора частотного преобразователя ..... 91	<b>Timakova A. A., Smiryagin V. A., Kurnasov E. V., Vyskub V. G., Mutin D. I.</b> Creation of a MIVAR Expert System for Automation of Frequency Converter Selection.....91
<b>Раздел 4 АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ</b>	<b>Section 4 AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTION</b>
<b>Бажутин Д. В., Павлыш В. Н.</b> Оценка амплитуды остаточных колебаний груза в автоматизированных крановых установках в условиях неточного определения длины подвеса..... 106	<b>Bazhutin D. V., Pavlysh V. N.</b> Estimation of Residual Payload Swing Amplitude for Automated Crane Units Subjected to Inaccurate Cable Length Value .....106
<b>Водолазская Н. В., Копытова Е. В., Лаврентьева К.В., Черненко В.Д.</b> Информационная система контроля доступа и отслеживания этапов производственного процесса..... 116	<b>Vodolazskaya N. V., Kopytova E. V., Lavrentieva K. V., Chernenko V. D.</b> Information System for Access Control and Tracking of Production Process Stages.116
<b>Подлесный В. Ю., Колесник Е. В., Третьяков И. А., Данилов В. В.</b> Оптимальная интерполяция непрерывных измерительных процессов в АСУ и АСНИ .. 129	<b>Podlesnyi V. Iu., Kolesnik E. V., Tretiakov I. A., Danilov V. V.</b> Optimal Interpolation of Continuous Measurement Processes in ACS and ASRS 129
<b>Скодтаев Э. В.</b> Аппаратная архитектура информационно-управляющей системы мобильной установки первичной пастеризации молока ..... 148	<b>Skodtaev E. V.</b> Hardware Architecture of the Information and Control System of a Mobile Primary Milk Pasteurization Unit .....148
<b>Смирнов К. С., Варламов О. О.</b> МЭС для поддержки принятия решений персонала газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы ..... 159	<b>Smirnov K. S., Varlamov O. O.</b> MES for supporting decision-making of gas processing shop staff in liquid sulfur mining .159
АВТОРЫ НОМЕРА..... 173	AUTHORS OF THE ISSUE ..... 173
РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА ..... 174	REVIEWERS OF THE ISSUE ..... 174
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ..... 175	AUTHOR INDEX ..... 158
ПОРЯДОК НАПРАВЛЕНИЯ В РЕДАКЦИЮ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ СТАТЕЙ..... 178	THE PROCEDURE FOR SENDING TO THE EDITORIAL, REVIEWING AND PUBLISHING ARTICLES..... 178

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

Международный рецензируемый  
научно-теоретический журнал  
«Проблемы искусственного интеллекта» /  
«Problems of Artificial Intelligence»  
**ISSN 2413-7383**  
*выходит 4 раза в год*

International peer-reviewed  
scientific journal  
«Problemy iskusstvennogo intellekta» /  
«Problems of Artificial Intelligence»  
**ISSN 2413-7383**  
is published four times a year

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Институт проблем искусственного интеллекта»

283048, г. Донецк, ул. Артема, 118-б  
тел. +38 (062) 311-72-01  
e-mail: [iai\\_sb\\_ivanova@mail.ru](mailto:iai_sb_ivanova@mail.ru)  
[maxpvn77@gmail.com](mailto:maxpvn77@gmail.com)  
[redakcija\\_intellekt@mail.ru](mailto:redakcija_intellekt@mail.ru)  
Адрес сайта журнала : <http://paijournal.guide.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

Сдан в набор 30.01.2025.  
Подписан к печати 19.06.2025  
Выход в свет 28.06.2025  
Формат 70×108/16  
Уч.-изд. л. 17,5. Тираж 100 экз.  
Зак. № 08/2025 от 30.01.2025.  
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: [iai\\_sb\\_ivanova@mail.ru](mailto:iai_sb_ivanova@mail.ru)  
[pvn\\_redakcija\\_intellekt@mail.ru](mailto:pvn_redakcija_intellekt@mail.ru)  
[redakcija\\_intellekt@mail.ru](mailto:redakcija_intellekt@mail.ru)

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](mailto:iai_sb_ivanova@mail.ru)  
[maxpvn77@gmail.com](mailto:maxpvn77@gmail.com)  
[redakcija\\_intellekt@mail.ru](mailto:redakcija_intellekt@mail.ru)  
Journal site address: <http://paijournal.guide.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

Submitted for publication 30.01.2025.  
Passed for printing 19.06.2025.  
Publication 29.03.2025  
Format 70×108/16.  
Publisher's signature 17,5. Circulation 100 copies.  
Order 08/2025 30.01.2025.  
*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: [iai\\_sb\\_ivanova@mail.ru](mailto:iai_sb_ivanova@mail.ru)  
[redakcija\\_intellekt@mail.ru](mailto:redakcija_intellekt@mail.ru)  
[pvn\\_redakcija\\_intellekt@mail.ru](mailto:pvn_redakcija_intellekt@mail.ru)

