

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»

Робототехника и искусственный интеллект

Материалы XVII Всероссийской
научно-технической конференции
с международным участием

г. Железногорск, 13 декабря 2025 г.

Электронное издание

Под научной редакцией В.А. Углева

Железногорск 2025

УДК 004.896(08)
ББК 32.816я43
Р584

Р584 Робототехника и искусственный интеллект: материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Железногорск, 13 декабря 2025 г.) / под науч. ред. В.А. Углева. – Электрон. дан. (14,1 Мб). – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2025. – 400 с.

ISBN 978-5-907878-75-4

Сборник включает тексты докладов участников конференции по различным вопросам робототехники и искусственного интеллекта. В этом году конференция посвящается памяти выдающегося учёного Александра Николаевича Горбаня (1952-2025 гг.), внесшего заметный вклад в развитие отечественной и мировой нейроинформатики.

Основными темами конференции стали мехатроника, системы искусственного интеллекта при управлении роботами, формирование баз знаний и разработка интеллектуальных алгоритмов, экстремальная робототехника, интеллектуальный анализ данных и обучающие системы.

Представляет интерес для научных работников, аспирантов, преподавателей вузов, магистрантов, студентов, курсантов и школьников.

Конференция прошла в Сибирском федеральном университете при поддержке Российской ассоциации искусственного интеллекта (РАИИ), ФГАОУ ВО «Российский государственный гуманитарный университет» (РГГУ), ФГКУ ВО «Московский университет МВД России им. В.Я. Кикотя».

УДК 004.896(08)
ББК 32.816я43

ISBN 978-5-907878-75-4

© Коллектив авторов, 2025

Электронное научное издание

ISBN 978-5-907878-75-4



СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

Секция 1

Робототехнические системы и комплексы, мехатроника 4

Секция 2

Специальная робототехника 42

Секция 3

Инженерия знаний и базы знаний 89

Секция 4

**Модели и методы анализа данных в интеллектуальных системах
..... 136**

Секция 5

Алгоритмы и системы искусственного интеллекта 195

Секция 6

Управление роботами и интеллектуальная автоматизация 259

Секция 7

**Правовые и социогуманитарные аспекты применения искусственного
интеллекта и робототехники 321**

Секция 8

**Образовательные и философские аспекты применения искусствен-
ного интеллекта и робототехники 353**

Содержание 394

Секция 1

**РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ,
МЕХАТРОНИКА**

А.С. Горобцов, д.т.н., профессор, vm@vstu.ru
В.М. Данилевич, аспирант, vlad-danilevich.90@inbox.ru
ВолГТУ, г. Волгоград, Россия
К.В. Климов, ведущий инженер, kklimov@imec.msu.ru
В.А. Данилов, научный сотрудник, vldanilov90@gmail.ru
НИИ механики МГУ, г. Москва, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ КОММЕРЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ РОБОТОВ - СОБАК

Аннотация: Рассматриваются перспективы создания коммерческих малоразмерных роботов - собак. Представлены теоретические и экспериментальные результаты тестирования алгоритмов управления движением таких роботов на основе адаптивных кинематических планировщиков походки. Анализируются преимущества и недостатки методов управления различных классов. Демонстрируется достижимость различных режимов движения роботов собак на основе предлагаемого подхода.

Ключевые слова: машинное обучение, оптимальное управление, робототехника, шагающие роботы, робот – собака, малоразмерные роботы.

A.S. Gorobtsov, Ph.D., professor, vm@vstu.ru
V.M. Danilevich, postgraduate student, vlad-danilevich.90@inbox.ru
VSTU, Volgograd, Russia
K.V. Klimov, Lead Engineer, kklimov@imec.msu.ru
V.A. Danilov, research fellow, vldanilov90@gmail.ru
Research Institute of Mechanics, Moscow State University, Moscow, Russia

PROSPECTS FOR THE CREATION OF COMMERCIAL ROBOTIC DOGS

Abstract: This article examines the prospects for developing commercial small-sized robotic dogs. Theoretical and experimental results from testing motion control algorithms for these robots based on adaptive kinematic gait planners are presented. The advantages and disadvantages of various control methods are analyzed. The feasibility of various motion modes for robotic dogs using the proposed approach is demonstrated.

Keywords: machine learning, optimal control, robotics, walking robots, robot dog, small robots.

Интенсивность внедрения малоразмерных роботов в современные сферы специального применения очень высока. К малоразмерным роботам, в качестве примера, можно отнести роботов-собак или квадрокоптеры. Применение подобных машин возможно в различных сферах деятельности таких как – космическая промышленность, исследовательская деятельность, сфера обеспечения государственной безопасности, сфера деятельности в области чрезвычайных ситуаций, коммерческая промышленность. Ведутся активные исследования в области антропоморфных и зооморфных роботов. В первую очередь разработки в этом направлении связаны с управлением локомоцией и носят масштабный характер, что делает данное направление научной деятельности актуальной.

К синтезу управления роботами со сложной локомоцией (шагающими машинами) существует два подхода. Первый подход подразумевает решение обратной задачи со связями в форме упрощенных уравнений устойчивости, описывающих траекторию точки нулевого момента реакций связей. Второй подход – это методы машинного обучения, т.н. обучение с подкреплением [1].

Метод машинного обучения имеет преимущества и недостатки. Преимущества метода машинного обучения следующие:

1. Интерполяция управления рекуррентной нейронной сетью 500 – 1000 нейронов;
2. Реализация «слепой» походки при возмущении от неровностей ниже заданного порога.

Недостатки метода машинного обучения следующие:

1. Высокие вычислительные затраты – время расчета варианта целевой функции порядка суток на мощных вычислительных кластерах;
2. Управление синтезируется только для одних условий движения.

На данный момент самым объективным индикатором эффективности существующих методов управления локомоцией роботов – это компьютерная анимация, однако её реалистичность невысока [2-3].

Рассматривается управление роботом собакой (рис. 1).



Рис.1. Управление физической моделью робота-собаки

Управление роботом собакой синтезировалось на цифровой модели, показанной на рисунке 2.

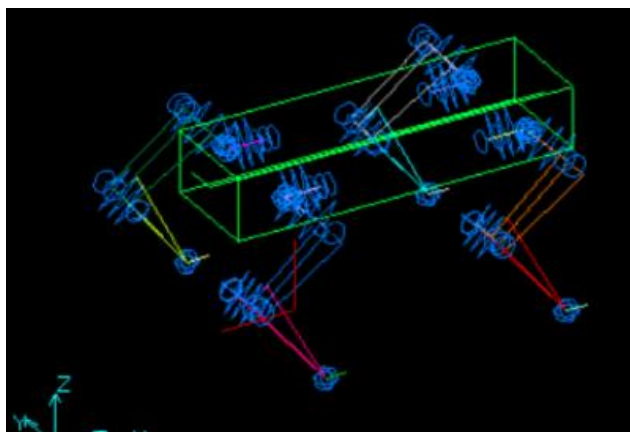


Рис.2. Цифровая модель робота-собаки

С помощью цифровой модели были получены значения программного и управляемого перемещения и скорости. Физическая модель использовалась для получения параметров перемещения робота в реальных условиях [4]. В ходе сравнительного анализа программных, управляемых и экспериментальных данных были получены результаты, показанные на рисунках 3 и 4.

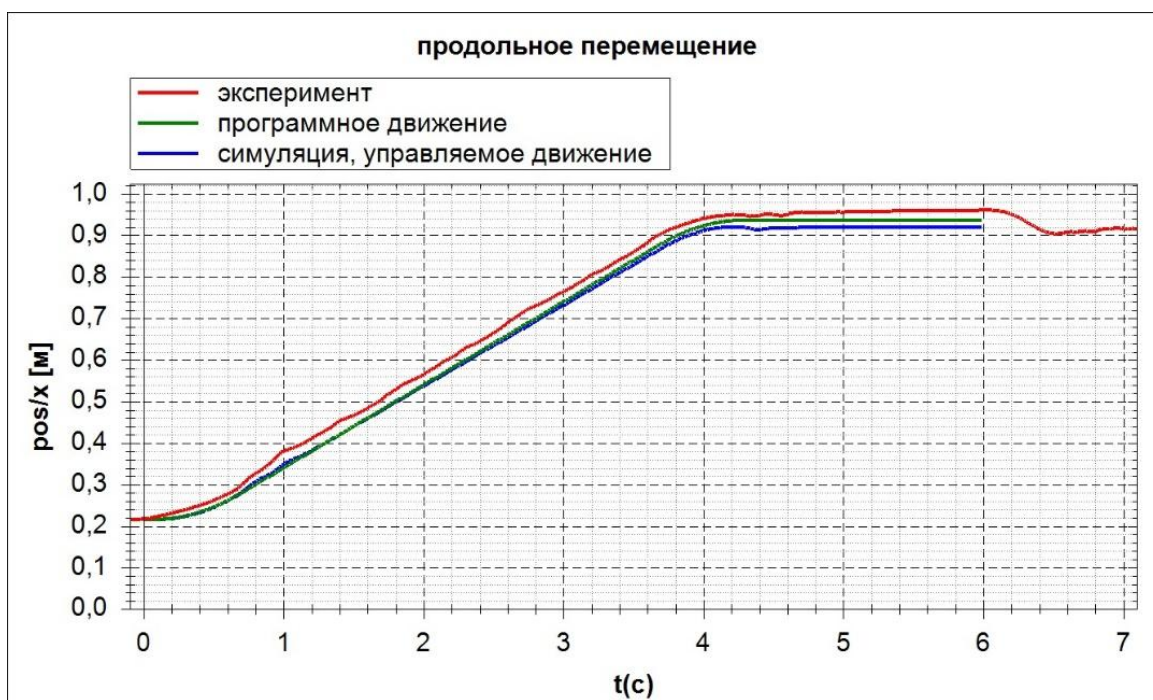


Рис. 3. Сравнительный анализ продольных перемещений робота-собаки



Рис. 4. Сравнительный анализ продольных скоростей робота-собаки

По результатам экспериментальной и теоритической работы можно сделать выводы. Современные электроприводы не позволяют реализовать шагающие наземные дроны с приемлемыми характеристиками по скорости и дальности из – за низкого КПД приводов. Существенное повышение технических характеристик, шагающих наземных дронов может быть достигнуто за счет использования гибридного движителя с моноколесом, обеспечивающего движение по микро и макро неровностям (рис. 5). Движение по микро-неровностям выполняется на моноколесе с маневрированием за счет балансирования и подруливания шагающими движителями. Движение по макро-неровностям выполняется на шагающих движителях. Управление локомоцией робота с гибридным движителем может быть реализовано на несложной существующей аппаратной базе. На основе гибридного движителя могут быть созданы расходуемые роботы со сложной локомоцией и реализована групповая работа роботов.



Рис. 5. Перспективное бюджетное решение для робота собаки классической кинематической схемы – гибридный движитель

Список литературы

1. Gorobtsov A., Sychev O., Orlova Y., Smirnov E., Grigoreva O., Bochkin A., Andreeva M. Optimal Greedy Control in Reinforcement Learning. Sensors, 2022, vol. 22, issue 22 (November-2). - Article 8920. - 14 p. - DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228920>
2. Горобцов А.С. Обобщенная задача динамического уравнивания и перспективные направления ее применения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2023. - № 3 (756). - 14-24. - DOI: 10.18698/0536-1044-2023-3-14-24.
3. Горобцов А.С., Рыжов Е.Н., Чигиринская Н.В., Чесноков О.К. Управление движением робота-собаки методом обратной задачи / // Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - 2024. - № 4 (287). - С. 49-54. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-4-287-49-54.
4. Горобцов А.С., Рыжов Е.Н., Тарасов П.С. Управление локомоцией робота-андроида методом обобщенной задачи динамического уравнивания в невырожденном случае // Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, ме-хатроника и робототехнические системы. - 2024. - № 4 (287). - С. 44-49. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-4-287-44-49.

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Аннотация: В статье рассматривается подход к контролю качества изделий с использованием робота-манипулятора, оснащённого камерой. Показано, что такой метод позволяет обследовать объект с разных ракурсов, обеспечивая высокую детализацию изображения без необходимости применения специализированных стендов. Проведён эксперимент на прототипе стенда контроля качества, включающий автоматическое позиционирование, съёмку и последующее сравнение изображений с применением метрик SSIM, MAD и ORB. Результаты подтвердили возможность надёжного выявления дефектов, несмотря на неточности позиционирования и изменения освещения. Отмечены преимущества универсальности метода и ограничения, связанные со временем обследования и вариативностью позиционирования.

Ключевые слова: робот-манипулятор, контроль качества, машинное зрение, сравнение изображений, выявление дефектов, SSIM.

A.V. Gorodilov, Ph.D., kaverina@mail.ru
A.I. Kononova, D. Sc., associate professor, illinc@bk.ru
National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia

APPLICATION OF A ROBOTIC MANIPULATOR FOR PRODUCT QUALITY INSPECTION

Abstract: Approach to product quality inspection using a robotic manipulator equipped with a camera is presented. The method enables detailed examination of objects from multiple viewpoints without the need for specialized inspection fixtures. An experimental study was conducted involving automated robot motion, image acquisition, and comparison using SSIM, MAD, and ORB metrics. The results demonstrated reliable defect detection despite positioning inaccuracies and variations in ambient lighting. The advantages of flexibility and applicability to products of different shapes are highlighted, along with limitations related to inspection duration and positioning repeatability..

Key words: robotic manipulator, quality inspection, machine vision, image comparison, defect detection, SSIM

Процесс контроля качества изделий часто включает в себя визуальный осмотр изделия [1] на предмет выявления дефектов, таких как сколы и царапины. Выполнение такой операции человеком сопряжено с высокими трудозатратами, и может быть утомительно и давать непостоянные результаты, зависящие от усталости контролера и добросовестности его работы. Использование машинного зрения [2] является предпочтительным, но может быть проблемным при сложной форме изделий, так как камера может не видеть части изделия, скрытые другими элементами сверху или с одной из сторон. Кроме того, качество изображения с фиксированной камеры не позволит различить детали, которые может увидеть человек. Распространенным подходом является создание специализированных стендов под каждое изделие [3], но это затратно и подходит только для предприятий, выпускающих большие объемы однотипной продукции.

Одной из возможных решений этой проблемы является использование робота-манипулятора, на котором установлена камера с макрообъективом. Робот может обследовать изделие с разных сторон, поддерживая оптимальное расстояние от поверхности изделия до камеры. Изображения с камеры могут захватываться в заранее определенные моменты, производя набор изображений предсказуемого объема, который можно обработать с небольшими вычислительными затратами, так как в задачи алгоритмов машинного зрения в данном случае будет входить только выявление отличий от изображений бездефектного изделия, или сравнение с изображениями известных дефектов. Для проверки этой концепции и определения границ применимости подобной системы был построен прототип (рис. 1-а), за основу которого был взят шестикоординатный робот-манипулятор HiWonder xArm 1S.

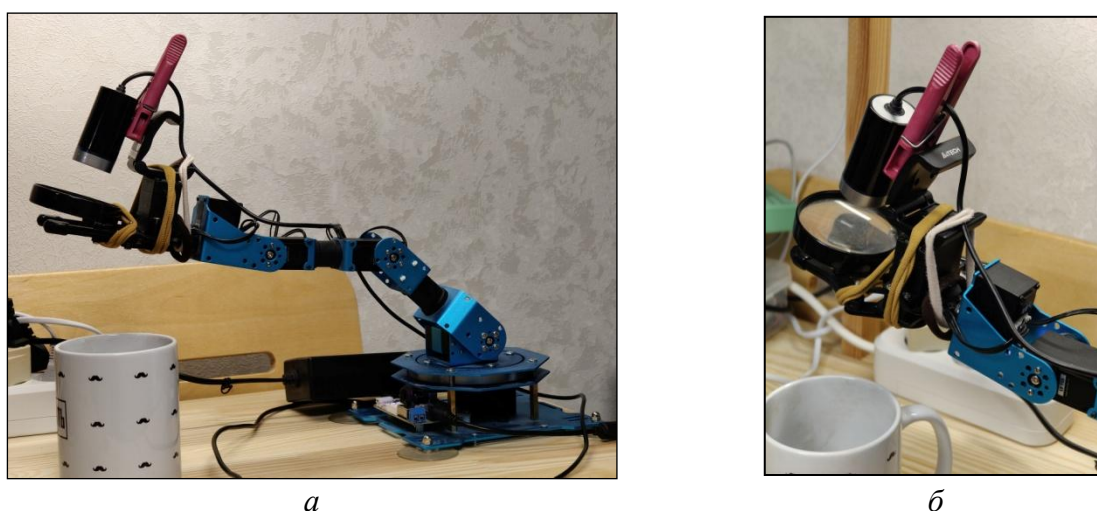


Рис.2. Прототип автоматизированного стенда контроля качества

В данном случае сервопривод захвата не используется, поэтому фактически манипулятор используется как пятикоординатный. На месте захвата установлена лупа с линзой диаметром 60 мм с фокусным расстоянием 42 мм,

а на расстоянии 30 мм от лупы находится камера A4Tech PK-910H с разрешением 1920x1080. Отметим, что штатное крепление этой камеры не позволяет надёжно зафиксировать её на движущем манипуляторе, что потребовало введения в конструкцию дополнительных элементов. Вместе такая система имитирует макрообъектив с оптимальным расстоянием до объекта 42 мм (рис. 1-б). Для создания постоянных условий освещения над роботом закреплены два линейных светильника, а сам робот жестко закреплен на стенде. Несмотря на наличие светильников, стенд не изолирован от внешнего освещения. Это облегчает замену объектов и работу со стендом, но может повлиять на результаты.

Очевидными преимуществами такого метода контроля качества являются универсальность установки, так как она может быть использована для изделий разных форм и видов без аппаратных изменений, и возможность очень детального обследования изделия. Недостатками такого метода могут быть: длительное время обследования, зависящее от детализации; неидентичность изображений из-за неточности позиционирования робота. Влияние этих недостатков сложно оценить с помощью расчетов или имитационного моделирования, поэтому было решено провести натурный эксперимент с реальным роботом, изделием и специально разработанным программным обеспечением. Целью эксперимента является установление возможности или невозможности применения подобного метода контроля качества к определенному виду изделий, а также определение параметров алгоритмов управления роботом и машинного зрения для реализации метода.

Предварительно объект был снят с трех точек, и все действия робота записывались. Для управления роботом использовался алгоритм из [1], реализованный в виде скрипта на языке Python. Затем записанные действия были повторены автоматически несколько раз, каждый раз были сохранены изображения с камеры в том же количестве. Затем к изображениям (рис. 2) применялся алгоритм сравнения.

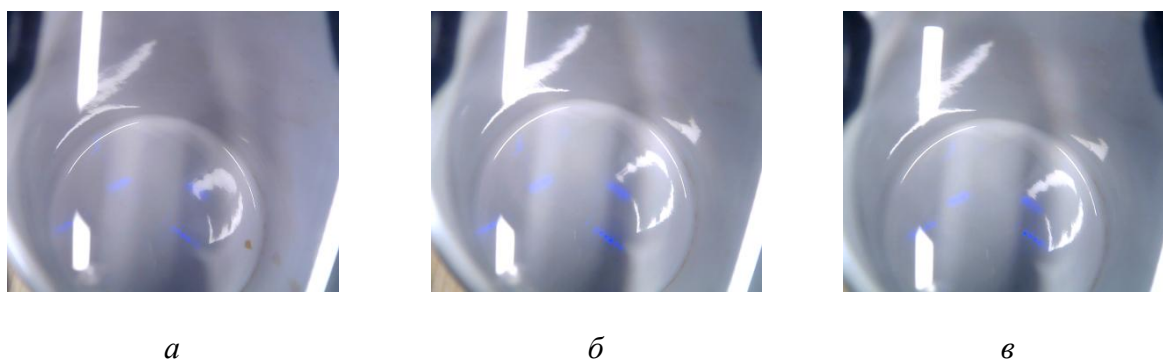


Рис.2. Изображения с камеры робота. А-с дефектом; б, в — без дефекта

Так как позиционирование робота может быть не точным, перед сравнением выполняется приведение к единому размеру и выравнивание. Для

выравнивания используется метод ECC (Enhanced Correlation Coefficient) — это итеративный алгоритм, который ищет аффинное преобразование, максимизирующее корреляцию между эталонным изображением и сравниваемым. После выравнивания различия, связанные со смещением камеры, заметно уменьшаются.

Для каждой пары изображений вычисляются четыре показателя:

1. SSIM (Structural Similarity Index[4]) — оценивает схожесть локальной структуры, контраста и яркости.

2. MAD (Mean Absolute Difference) — измеряет среднюю разницу яркости пикселей после выравнивания.

3. ORB (Oriented FAST + Rotated BRIEF[5]) находит ключевые точки и бинарные дескрипторы, которые устойчивы к повороту и небольшим смещениям.

Каждая из метрик нормализуется в диапазон [0,1] и формируется итоговый взвешенный показатель:

$$S=0.15 \cdot SSIMd+0.35 \cdot MADd+0.50 \cdot ORBd.$$

Если максимальный S превышает порог 0.8, изображение помечается как содержащее дефекты, иначе — считается, что отклонений нет. Стоит отметить, что данные алгоритмы не являются алгоритмами с глубоким обучением, используют только одно эталонное изображение для сравнения (а не большой датасет, необходимый для глубокого обучения) и создают относительно небольшую вычислительную нагрузку.

Для изображений на рис. 2-а и 2-б показатель S составляет 0.84, для рис. 2-а и 2-в — 0.85, а для рис. 2-б и 2-в — 0.64. Таким образом 2-а явно помечается как содержащий дефект, что соответствует действительности — на поверхность была нанесена метка, изображающая скол. Таким образом, дефект был надежно выявлен, несмотря на неточности позиционирования. Также отличия в освещении и блики, хотя и повлияли на результат, но их влияние оказалось ниже порога. В частности, изображение на рис. 2-в было получено через несколько часов после изображений рис. 2-а и 2-б, при этом естественное освещение было другим, однако сочетание освещения стенда и алгоритмов коррекции позволило не проявиться ложным дефектам.

В ходе эксперимента была подтверждена возможность выявления дефектов изделия с помощью камеры, закрепленной на роботе-манипуляторе. К преимуществам данного подхода следует отнести возможность использования для изделий разных видов и формы, в том числе попеременно. Это позволяет использовать один стенд для нескольких изделий, что важно для небольших предприятий, выпускающих широкую номенклатуру продукции.

К недостаткам данного подхода следует отнести неполное соответствие изображений с одной позиции робота для разных проходов из-за неточности позиционирования, характерной для манипуляторов. Однако в ходе экспери-

мента было выявлено, что влияние этого незначительно, и легко компенсируется методами обработки изображений для машинного зрения, не использующими глубокое обучение.

Список литературы

1. Колесов, Д. Визуальный контроль качества пайки с помощью видеомикроскопа / Д. Колесов // Технологии в электронной промышленности. – 2012. – № 3(55). – С. 74-77. – EDN OWYLFX.
2. Спиридонов, В. В. Средства и методы повышения качества визуального контроля изделий в приборостроении / В. В. Спиридонов // Век качества. – 2013. – № 3. – С. 33-35. – EDN SDHADN.
3. Городилов, А. В. Обработка данных в управлении роботизированной рукой с шестью степенями свободы / А. В. Городилов, А. И. Кононова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2025. – № 8. – С. 57-64. – DOI 10.25791/pribor.8.2025.1609. – EDN QGQBYO.
4. Statistical estimation of the structural similarity index for image quality assessment / F. Osorio, R. Vallejos, W. Barraza [et al.] // Signal, Image and Video Processing. – 2022. – Vol. 16, No. 4. – P. 1035-1042. – DOI 10.1007/s11760-021-02051-9. – EDN VCEEYS.
5. Adhinata, F. D. Object Searching on Real-Time Video Using Oriented FAST and Rotated BRIEF Algorithm / F. D. Adhinata, A. Harjoko, Wahyono // International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. – 2021. – Vol. 11, No. 6. – P. 2518. – DOI 10.18517/ijaseit.11.6.12043. – EDN EWLURK.

ПОДХОД К СКАНИРОВАНИЮ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

Аннотация: В работе рассматриваются принципы построения системы технического зрения для шагающего четырехногого робота. Предлагаемая система основана на использовании недорогого 2D лидара. Приведена модель сканирования поверхности для определения опорных областей. Проанализировано влияние параметров сканирования на точность построения карты высот. Проверка на симуляторе подтвердила качественную картину сканирования ближней зоны робота.

Ключевые слова: сканирование поверхности, шагающий робот, лазерный сканер, адаптация к поверхности

D.A. Dobrynin, Ph.D., rabota51@mail.ru
Federal Research Center "Computer Science and Control"
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

AN APPROACH TO NEAR-FIELD SCANNING A WALKING ROBOT

Abstract: The paper discusses the principles of building a vision system for a walking quadruped robot. The proposed system is based on the use of inexpensive 2D lidar. A surface scanning model for determining reference areas is presented. The influence of the scanning parameters on the accuracy of the elevation map is analyzed. A check on the simulator confirmed a high-quality picture of the robot's near-field scanning.

Key words: scanning surface, walking robot, lidar, terrain adapting

Введение

Шагающие роботы обладают высокой мобильностью и способны двигаться по сложной местности с препятствиями различной высоты. Для того, чтобы преодолевать препятствия и ходить по лестницам шагающий робот должен видеть поверхность, на которую можно опереться ногами при ходьбе.

Для этого необходимо измерить расстояния от корпуса робота до различных точек поверхности, построить карту высот и идентифицировать препятствия. В настоящее время для измерения расстояний до объектов используются различные системы: стереокамеры, 3D камеры, 2D лазерные сканеры, 3D лидары, ультразвуковые и инфракрасные дальномеры [1].

Одними из первых систем для определения расстояний были стереокамеры. Они использовались для получения карты глубин и построения карты высот местности [2]. Невысокая точность и сложность обработки стереоизображений является недостатком, ограничивающим их применение.

В настоящее время 3D камеры широко используются в качестве систем технического зрения различных роботов [3]. Недостатком 3D камер является высокая стоимость, низкая разрешающая способность и невысокая точность определения расстояний по глубине (20-40 мм).

Современные лазерные сканеры (лидары) обладают большой дальностью и широко используются для построения карт местности [4], [5]. Отметим, что лазерные сканеры проектировались для обзора больших пространств вокруг робота. Для сканирования небольшой зоны перед роботом требуются лазерные сканеры, обладающие высокой точностью измерений на небольших (до 1 метра) расстояниях.

Перспективным направлением является построение системы технического зрения домашнего шагающего робота с использованием недорогих 2D лидаров. Основной задачей домашнего робота является перемещение по плоским поверхностям, в том числе по ступенькам лестниц. Для этого робот должен видеть участки поверхности, на которые можно поставить ногу. Для уверенного перемещения по поверхностям разной высоты система технического зрения должна обладать требуемой точностью.

Модель сканирования ближней зоны

Для сканирования поверхности перед роботом используется лазерный сканер, который установлен на вращающемся основании, как показано на рис. 1а. Основная плоскость сканирования обеспечивает развертку вдоль движения робота (ось X). Поворот сканера вокруг дополнительной оси обеспечивает развертку в поперечном направлении (ось Y).

Размер сканируемой области определяется геометрическими параметрами шагающего робота. Высота области сканирования H определяется высотой датчика сканирования над опорной поверхностью. Длина области обычно не превышает 1,5..2 значения высоты сканирующего датчика над опорной поверхностью H (рис. 1б). Ширина области сканирования должна несколько превышать расстояния между ногами робота.

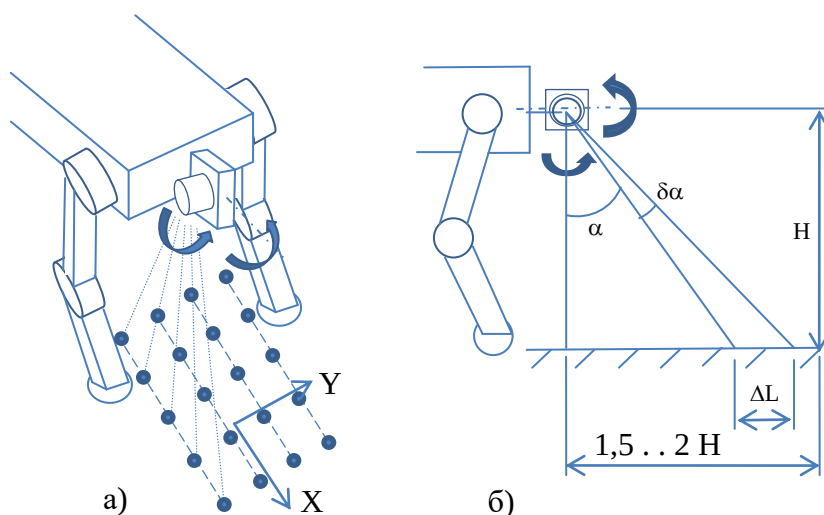


Рис. 1. а) модель сканирования; б) размер зоны сканирования

Параметры лазерных сканеров

Современные лазерные сканеры, широко используемые в робототехнике, построены по двум принципам действия: измерение угла отраженного сигнала и измерение времени пролета TOF (Time Of Flight).

Таблица 1. Параметры лазерных сканеров

Параметр	RPLIDAR A2M8	RPLIDAR A2M12	RPLIDAR C1	LDROBOT D500	ORBEC MS200
Дистанция, м	0,2-12	0,2-12	0,05-12	0,03-12	0,03-12
Угол обзора, градусы	360	360	360	360	360
Разрешение по дальности, мм	<0,5	<0,5	15	10	4
Угловое разрешение, градусы	0,45 (10Hz)	0,225 (10Hz)	0,72 (10Hz)	0,72 (10Hz)	0,8 (10Hz)
Частота сэмпирования, Гц	8000	16000	5000	5000	4500
Частота сканирования, Гц	5-15	5-15	8-12	6-13	7-15
Размеры, мм	d76x41	d76x41	55x55x41	54x46x35	37x37x33
Вес, г	190	190	110	45	40

Характеристики некоторых лазерных сканеров представлены в таблице 1. Лазерные лидары с измерением угла отраженного сигнала имеют большое минимальное расстояние обнаружения (200мм). К этому классу относятся лидары RPLIDAR A2M8 and A2M12 [6]. Они имеют самую высокую точность (0,5 мм) в ближней зоне и высокое угловое разрешение (0,45° and 0,225° соответственно) среди представленных лидаров. Эти лидары имеют также высокую частоту сэмпирования (8 и 16 кГц). Недостатками этих двух

лидаров являются большие габариты и вес. Это затрудняет их использование при построении систем с поворотом плоскости сканирования (рис. 1а).

Лидары с измерением времени пролета (TOF) представлены тремя типами [6], [7], [8]. Такие лидары обладают невысокой стоимостью, что позволяет широко их использовать в различных областях робототехники. Эти лидары имеют небольшое минимальное расстояние (30-50 мм) и меньшее угловое разрешение ($0,72^\circ$ и $0,8^\circ$). Из-за особенностей технологии определения расстояния у них также меньшая точность (15мм, 10 мм и 4мм соответственно). Миниатюрные габариты и вес делают их перспективными для использования в системах с поворотом плоскости сканирования.

Особенности параметров сканирования

Лазерный сканер не является идеальным измерителем. Измерения расстояния производятся с некоторым шагом сканирования, при этом измеренное расстояние имеет определенную погрешность. На точность измерений также влияет положение корпуса робота относительно поверхности и перемещение робота во время сканирования.

Рассмотрим влияние угла падения луча сканера на шаг сетки.

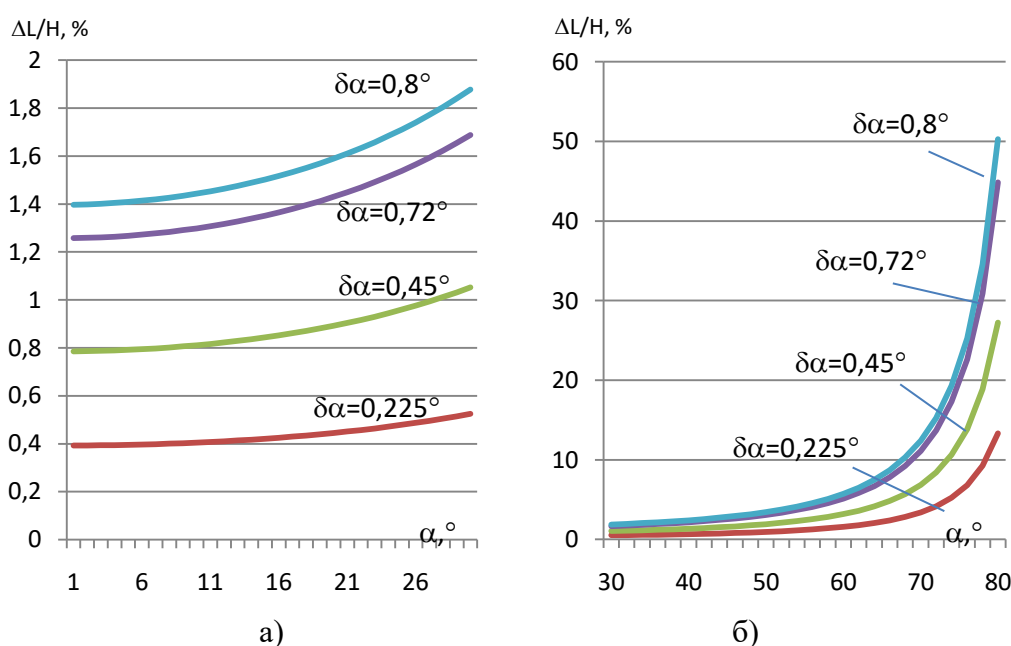


Рис. 2 Шаг сетки сканирования для горизонтальной поверхности

Шаг сетки сканирования определяет угловым разрешением лидара и углом падения луча (рис. 1б) [9]. Угловое разрешение лидара определяется частотой измерения и частотой вращения измерительной системы. Типовые значения угловых разрешений составляют $0,225 - 0,8$ градуса для типовой частоты вращения 10 Гц (таблица 1). Для малых углов $0-30$ градусов (рис. 2а) шаг сетки для горизонтальной поверхности имеет небольшую величину и

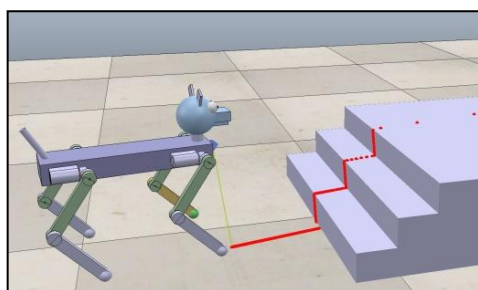
слабо растет при увеличении угла падения. Это область расположена непосредственно под лидаром (рис. 1а).

Для больших углов падения более 60 градусов (рис. 2б) наблюдается резкий рост величины шага. Это соответствует большому расстоянию между точками измерения и грубому определению параметров горизонтальной поверхности. При небольшой высоте H (большой высоте препятствия) зона больших углов расположена недалеко от лидара.

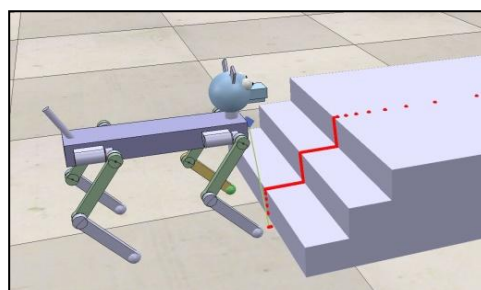
Для вертикальных поверхностей наблюдается обратная картина. Непосредственно под лидаром для вертикальных поверхностей наблюдается большая величина шага сканирования. Поэтому под лидаром, в области малых углов падения, вертикальные поверхности определяются довольно грубо. На большом расстоянии от лидара, где угол падения велик, шаг сетки для вертикальной поверхности имеет небольшую величину.

Эксперименты

Эксперименты проводились на симуляторе роботов (рис. 3). Отметим, что на симуляторе можно проверить только качественные зависимости. На передней части робота (рис. 3) установлена модель лазерного сканера, который сканирует дорожку перед роботом. Красные точки на картинках обозначают пятно лазера. Перед роботом находится лестница из трех ступенек. Высота ступеньки 150 мм, ширина 200 мм. Высота расположения сканера робота над поверхностью составляет 500 мм. Верхняя поверхность лестницы расположена на высоте 450 мм.



а)



б)

Рис. 3 Эксперименты по сканированию ближней зоны

На рис. 3а робот находится перед лестницей на расстоянии примерно 400 мм. На этом расстоянии поверхность перед роботом до лестницы определяется с высокой точностью (точки сливаются в линию). Верхняя часть третьей ступени сканируется с большим шагом (200 мм и больше). Луч лазера скользит вдоль поверхности, поэтому расстояние между точками сканирования велико. На рис. 3б робот находится непосредственно перед лестницей. Вертикальная часть первой ступени определяется с шагом около 40 мм. Горизонтальная часть первой ступени и вся вторая ступень определяется хорошо. Эксперименты подтвердили качественную картину сканирования ближ-

ней зоны шагающего робота. Наиболее точно определяются горизонтальные поверхности с небольшой высотой перед роботом и вертикальные поверхности с большой высотой вдали от робота. Точность сканирования падает для горизонтальных поверхностей вдали от робота и для вертикальных поверхностей перед роботом.

Заключение

В работе показано, что использование недорогих лазерных 2D лидаров позволяет точно определить положение горизонтальных поверхностей небольшой высоты перед роботом. Вертикальные поверхности наиболее точно определяются в дальней зоне сканирования. Точность сканирования падает для горизонтальных поверхностей большой высоты вдали от робота и для вертикальных поверхностей перед роботом. Сделанные выводы позволяют выбрать наиболее подходящий лазерный сканер из широкого спектра лидаров, доступных на рынке.

Следует отметить, что такая система сканирования ближней зоны может иметь более высокую точность и меньшую стоимость, чем использование 3D лидаров. Построение измерительной системы, обладающей высокой точностью, является достаточно сложной задачей.

Список литературы

1. Walas K. Terrain Classification and Negotiation with a Walking Robot. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. (2014) <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0067-0>
2. Shao X., Yang Y., Wang W. Obstacle crossing with stereo vision for a quadruped robot, in: *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2012, pp. 1738–1743. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2012.6284399>
3. Čížek P., Masri D., Faigl J. Foothold placement planning with a hexapod crawling robot. 4096-4101. (2017) <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206267>
4. Roriz R., Cabral J., Gomes T. Automotive LiDAR technology: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2021)
5. Sock J., Kim J., Min J., Kwak K. Probabilistic traversability map generation using 3d-lidar and camera. 2016 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 5631–5637 (2016)
6. Официальный сайт Slamtec [Электронный ресурс]: режим доступа <https://www.slamtec.com>
7. Официальный сайт LDROBOT [Электронный ресурс]: режим доступа <https://www.ldrobot.com>
8. Официальный сайт ORBBEC [Электронный ресурс]: режим доступа <https://www.orbbec.com>
9. Dobrynin D. About One Way to Scan a Surface for a Home Walking Robot. In: Ronzhin A., Savage J., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2024. Lecture Notes in Computer Science*, vol 14898. Springer, Cham. (2024) https://doi.org/10.1007/978-3-031-71360-6_31

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТРЕХЗВЕННОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ЗАДАННОГО УРАВНЕНИЯМИ ЛАГРАНЖА 2-ГО РОДА

Аннотация: В статье приведены результаты математического моделирования трехзвеного робота манипулятора. Динамика робота описывается уравнениями Лагранжа 2-го рода. Математическая модель динамики представлена системой обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка. Математическая модель разрешается численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Разработана программа на Python по визуализации динамики робота-манипулятора.

Ключевые слова: робот-манипулятор, уравнение динамики, уравнение Лагранжа 2-го рода, численный метод, моделирование динамики.

A.R. Iskhakov, Ph.D., associate professor, intellab2021@yandex.ru
R.F. Malikov, professor, rfmalikov@mail.ru
M. Akmullah named after BSPU, Ufa, Russia

MODELING OF THE DYNAMICS OF A THREE-LINK ROBOT ARM USING LAGRANGE EQUATIONS OF THE SECOND ORDER

Abstract: The paper presents mathematical modeling results for a three-link manipulator. The dynamics, described by Lagrange equations of the second kind, are formulated as a system of second-order ordinary differential equations and solved numerically via the fourth-order Runge-Kutta method. A Python-based visualization program for the robot dynamics has been developed.

Key words: robot arm, dynamics equation, Lagrange equation of the second order, numerical method, dynamics modeling.

Введение

Математическое моделирование роботов-манипуляторов требуют высокого уровня компетентности и подготовки от специалистов по робототехнике. К числу близких к данной статье по тематике и содержанию относятся работы [1-5]. В работе [1] рассмотрены кинематическая и динамическая мо-

дели манипулятора робота-манипулятора с четырьмя шарнирами. В работе [2] рассмотрена обратная задача кинематики на примере 6-ти осевого робота с Г-образным предплечьем модели ER30-1880. В работе [3] описывает динамику и управление роботом KUKA, состоящего из меканум-платформы и закрепленного на ней пятиосевого манипулятора. В работе [4] представлен алгоритм решения обратной задачи кинематики манипуляционного робота с использованием геометрического и алгебраического методов. В работе [5] описано решение прямой задачи кинематики, ориентированной на шести-звенного робота-манипулятора FANUC Robot M-20iA/35M. В статьях [1-5] представлены результаты математического моделирования роботов-манипуляторов, а именно прямые и обратные задачи. Полный цикл научных исследований роботов-манипуляторов не ограничивается перечисленными задачами. Разработка уравнений динамики роботов-манипуляторов считаются наиболее сложными в составлении и их разрешении.

Кинематическая модель и прямая позиционная задача

В статье описывается разработка уравнения динамики трехзвенного робота-манипулятора в форме Лагранжа 2-го рода [6]. На рис. 1. приведена кинематическая схема трехзвенного робота-манипулятора в форме компоновки сочленений «ВПП». Допустим, что звенья представляют тонкие однородные металлические стержни одинаковой длины $l = l_1 = l_2 = l_3$ с массами $m = m_1 = m_2 = m_3$ соответственно. Тогда однородные матрицы переходов A_i из системы координат $O_i x_i y_i z_i$ i -го звена в систему координат $O_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ $(i-1)$ -го звена можно записать в виде (1):

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $c_i = \cos q_i(t)$ и $s_i = \sin q_i(t)$ для обобщенных координат $q_i = q_i(t)$.

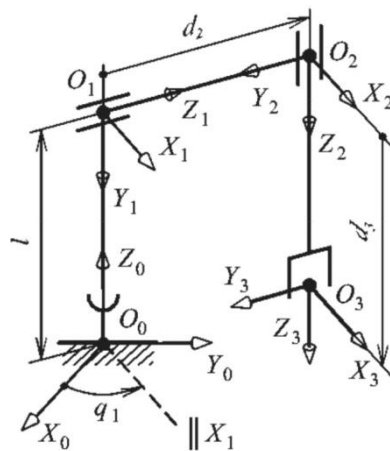


Рис. 1. Кинематическая схема трехзвенного робота-манипулятора [6]

Для описываемого робота-манипулятора получаем следующие матрицы переходов (2) с использованием однородных матриц переходов (1) [6-8].

$$T_1 = A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_2 = T_1 A_2 = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & -d_2 s_1 \\ s_1 & -c_1 & 0 & d_2 c_1 \\ 0 & 0 & -1 & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_3 = T_2 A_3 = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & -d_2 s_1 \\ s_1 & -c_1 & 0 & d_2 c_1 \\ 0 & 0 & -1 & l - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Уравнение движения робота в форме Лагранжа второго рода

Для описания динамики робота-манипулятора необходимо составить уравнения движения, например, в форме Лагранжа. Уравнения Лагранжа 2-го рода для робота-манипулятора с $N = 3$ степенями подвижности имеет вид (3) [6-8].

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_1} = \mu_1 + \bar{g}^T \cdot (m_1 t_{1i} \rho_1 + m_2 t_{2i} \rho_2 + m_3 t_{3i} \rho_3) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_2} = \mu_2 + \bar{g}^T \cdot (m_2 t_{2i} \rho_2 + m_3 t_{3i} \rho_3) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_3} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_3} = \mu_3 + \bar{g}^T \cdot m_3 t_{3i} \rho_3 \end{cases}, \quad (3)$$

где $K = \frac{1}{2} tr(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i t_{ij} H_i t_{ik}^T \dot{q}_j \dot{q}_k)$ - кинетическая энергия робота-манипулятора, как механической системы из 3-х звеньев.

Первые производные для матриц переходов (2) $\dot{T}_1$, $\dot{T}_2$ и $\dot{T}_3$ имеют вид (4) - (6) [6-8].

$$\dot{T}_1 = \frac{\partial T_1}{\partial q_1} \dot{q}_1 = \begin{bmatrix} -s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{q}_1. \quad (6)$$

$$\dot{T}_2 = \frac{\partial T_2}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial T_2}{\partial q_2} \dot{q}_2 = \begin{bmatrix} -s_1 & c_1 & 0 & -d_2 c_1 \\ c_1 & s_1 & 0 & -d_2 s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{q}_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -s_1 \\ 0 & 0 & 0 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{q}_2. \quad (5)$$

$$\dot{T}_3 = \frac{\partial T_3}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial T_3}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \frac{\partial T_3}{\partial q_3} \dot{q}_3 = \begin{bmatrix} -s_1 & c_1 & 0 & -d_2 c_1 \\ c_1 & s_1 & 0 & -d_2 s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{q}_1 + \times$$

$$\times + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -s_1 \\ 0 & 0 & 0 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{q}_2 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{q}_3. \quad (6)$$

Тогда элементы симметрической матрицы $A(q) = \|a_{jk}\|$ будут (7) – (9).

$$a_{11} = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\sum_{i=1}^3 t_{i1} H_i t_{i1}^T \right) = \frac{1}{2} \text{tr} (t_{11} H_1 t_{11}^T + t_{21} H_2 t_{21}^T + t_{31} H_3 t_{31}^T) = \times$$

$$\times = \frac{1}{2} \left(\frac{m_2 l^2}{3} - m_2 d_2 l + m_2 d_2^2 + m_3 d_2^2 \right) \quad (7)$$

$$a_{12} = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\sum_{i=1}^3 t_{i1} H_i t_{i2}^T \right) = \frac{1}{2} \text{tr} (t_{11} H_1 t_{12}^T + t_{21} H_2 t_{22}^T + t_{31} H_3 t_{32}^T) = 0$$

$$a_{13} = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\sum_{i=1}^3 t_{i1} H_i t_{i3}^T \right) = \frac{1}{2} \text{tr} (t_{11} H_1 t_{13}^T + t_{21} H_2 t_{23}^T + t_{31} H_3 t_{33}^T) = 0$$

$$a_{21} = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\sum_{i=1}^3 t_{i2} H_i t_{i1}^T \right) = \frac{1}{2} \text{tr} (t_{12} H_1 t_{11}^T + t_{22} H_2 t_{21}^T + t_{32} H_3 t_{31}^T) = 0$$

$$a_{22} = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\sum_{i=1}^3 t_{i2} H_i t_{i2}^T \right) = \frac{1}{2} \text{tr} (t_{12} H_1 t_{12}^T + t_{22} H_2 t_{22}^T + t_{32} H_3 t_{32}^T) = \frac{1}{2} (m_2 + m_3). \quad (8)$$

$$a_{23} = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\sum_{i=1}^3 t_{i2} H_i t_{i3}^T \right) = \frac{1}{2} \text{tr} (t_{12} H_1 t_{13}^T + t_{22} H_2 t_{23}^T + t_{32} H_3 t_{33}^T) = 0$$

$$a_{31} = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\sum_{i=1}^3 t_{i3} H_i t_{i1}^T \right) = \frac{1}{2} \text{tr} (t_{13} H_1 t_{11}^T + t_{23} H_2 t_{21}^T + t_{33} H_3 t_{31}^T) = 0$$

$$a_{32} = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\sum_{i=1}^3 t_{i3} H_i t_{i2}^T \right) = \frac{1}{2} \text{tr} (t_{13} H_1 t_{12}^T + t_{23} H_2 t_{22}^T + t_{33} H_3 t_{32}^T) = 0. \quad (9)$$

$$a_{33} = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\sum_{i=1}^3 t_{i3} H_i t_{i3}^T \right) = \frac{1}{2} \text{tr} (t_{13} H_1 t_{13}^T + t_{23} H_2 t_{23}^T + t_{33} H_3 t_{33}^T) = m_3$$

Симметрическая матрица, определяющая инерционные свойства робота-манипулятора, $A(q) = \|a_{jk}\|$, $a_{jk} = \sum_{i=\max(j,k)}^3 \text{tr}(t_{ij} H_i t_{ik}^T)$ с учетом результатов (7) – (9) запишется в форме (10) [6].

$$A(q) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{m_2 l^2}{3} - m_2 d_2 l + m_2 d_2^2 + m_3 d_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Вторые производные t_{ijk} матриц переходов T_i (2) приведены в выражениях (11) - (15) [6]:

$$t_{111} = \frac{\partial t_{11}}{\partial q_1} = \begin{bmatrix} -c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ -s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad t_{211} = \frac{\partial t_{21}}{\partial q_1} = \begin{bmatrix} -c_1 & -s_1 & 0 & d_2 s_1 \\ -s_1 & c_1 & 0 & -d_2 c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$t_{212} = t_{221} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -c_1 \\ 0 & 0 & 0 & -s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad t_{222} = 0, \quad (12)$$

$$t_{311} = \begin{bmatrix} -c_1 & -s_1 & 0 & d_2 s_1 \\ -s_1 & c_1 & 0 & -d_2 c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = t_{211}, \quad t_{312} = t_{212} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -c_1 \\ 0 & 0 & 0 & -s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$t_{313} = 0, \quad t_{321} = t_{312} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -c_1 \\ 0 & 0 & 0 & -s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$t_{322} = t_{323} = 0, \quad t_{331} = t_{332} = t_{333} = 0. \quad (15)$$

Вектор $\bar{b}(q, \dot{q}) = (b_s)$, $b_s = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \sum_{i=\max\{s,j,k\}}^3 tr(t_{ijk} H_i t_{is}^T) \dot{q}_j \dot{q}_k$, представляющий кориолисовые и центробежные силы, действующие на звенья робота-манипулятора с учетом (11) – (15) будет записан в виде (18)

$$\bar{b}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} (-m_2 l + 2d_2(m_2 + m_3)) \dot{q}_1 \dot{d}_2 \\ \left(\frac{1}{2} m_2 l - d_2(m_2 + m_3)\right) \dot{q}_1^2 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Вектор внешних сил (17) $d_s = -\bar{g}^T \cdot (m_1 t_{1s} \rho_1 + m_2 t_{2s} \rho_2 + m_3 t_{3s} \rho_3)$ и вектор моментов $\bar{\mu} = (\mu_s)$, $s = \overline{1,3}$ образуют остальные члены уравнения динамики (18) робота-манипулятора:

$$\bar{d}(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_3 g \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$A(q) \cdot \ddot{q} + \bar{b}(q, \dot{q}) + \bar{d}(q) = \bar{\mu}. \quad (18)$$

Подставляя (10), (16), (17) в (18) после несложных преобразований получаем в общем виде уравнения движения (19) для трехзвенного робота-манипулятора из рис. 1 в форме Лагранжа 2-го рода [6].

$$\begin{cases} \left(\left(\frac{1}{3} l - d_2 \right) m_2 l + (m_2 + m_3) d_2^2 \right) \ddot{q}_1 + (-m_2 l + 2d_2(m_2 + m_3)) \dot{q}_1 \dot{d}_2 = \mu_1 \\ (m_2 + m_3) \ddot{d}_2 + \left(\frac{1}{2} m_2 l - d_2(m_2 + m_3) \right) \dot{q}_1^2 = F_1 \\ m_3 \ddot{d}_3 - m_3 g = F_2 \end{cases}. \quad (19)$$

Пусть для робота-манипулятора выбраны следующие значения ключевых параметров математической модели: $l_1 = l_2 = l_3 = 0.5$ м, $m_1 = 3.0$ кг, $m_2 = 2.0$ кг, $m_3 = 1.5$ кг, $F_1 = 0$ Н, $F_2 = -14.715$ Н, $\mu_1 = 1$ Н·м

Для численного решения системы (19) был использован метод Рунге-Кутты 4-го порядка при начальных условиях (20) [9]:

$$q_1(0) = 0, \dot{q}_1(0) = 0, d_2(0) = 0.1, \dot{d}_2(0) = 0, d_3(0) = 0.2, \dot{d}_3(0) = 0. \quad (20)$$

На рис. 2 приведены графики обобщенных координат, полученные в результате решения системы (19).

Заключение

Для исследований был выбран трехзвенный робот-манипулятор в формате компоновки сочленений ВПП. Цель исследований заключалась в математическом моделировании робота-манипулятора в среде Google Colab для сбора датасета интеллектуальной системы управления роботом. В математическом моделировании для описания применялась форма Лагранжа 2-го рода. Была вычислена симметрическая матрица инерционных свойств робота, осевые моменты инерции и статические моменты, а также обобщенные силы, действующие на каждое из звеньев по отдельности. Данные результаты расчетов позволили записать уравнения динамики робота-манипулятора, численное разрешение которых проводилось методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

Результаты численного решения задачи представлены в виде графиков обобщенных координат. В перспективе планируется разработка интеллектуальных систем управления имитационной моделью робота-манипулятора на основе нейронных сетей или машинных моделей.

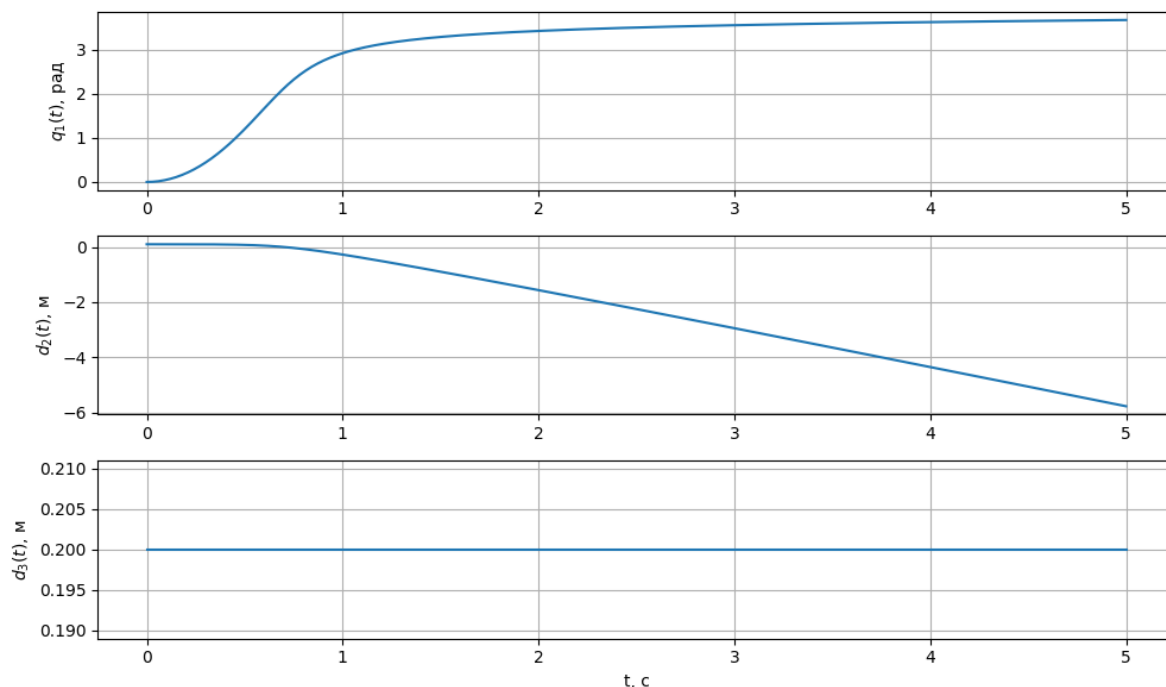


Рис. 2. Графики обобщенных координат робота-манипулятора

Список литературы

1. Зейтун А. М. Анализ и формулировка динамической модели манипулятора // Автоматизация. Современные технологии. – Т. 78. – № 1. – 2024. – С. 6-16. DOI 10.36652/0869-4931-2024-78-1-6-16.
2. Агарков Г. И. Решение обратной задачи кинематики для 6-ти осевых роботов-манипуляторов Estun // Материалы IV Международного Косыгинского Форума. – Москва: Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, 2024. – С. 36-38.
3. Сайпулаев Г. Р. Исследование влияния конструкции механум-колес и контактных сил на точность управления роботом-манипулятором KUKA // Мехатроника, автоматизация, управление. – Т. 25. – № 3. – 2024. – С. 158-164. DOI 10.17587/mau.25.158-164.
4. Алфарви И. Решение обратной кинематической задачи для манипулятора с шестью степенями подвижности // Вестник МГТУ "Станкин". – № 1(68). – 2024. – С. 17-26.
5. Гусев О. В. Решение прямой задачи кинематики для шестизвенового робота-манипулятора // Вестник кибернетики. – Т. 23. – № 2. – 2024. – С. 39-48. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-5.

6. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.

7. Лесков А.Г., Бажинова К.В., Селиверстова Е.В. Кинематика и динамика исполнительных механизмов манипуляционных роботов: учебное издание. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 102 с.

8. Захаров Д.Н., Куровский Д.М., Ракшин Е.А., Борисов О.И., Громов В.С., Колубин С.А. Моделирование и управление движением роботов: учебно-методическое пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2023. – 84 с.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617070 Российская Федерация. «Программный модуль математического моделирования «Эйлер. Обыкновенные дифференциальные уравнения»: № 2024615449 9: заявл. 18.03.2024 : опубл. 28.03.2024 / А. Р. Исхаков, Р. Ф. Маликов ; заявитель ФГБОУ ВО «БГПУ им. М. Акмуллы».

И.Е. Найданова, аспирант, м.н.с., naidanova.ie@yandex.ru
Дальневосточный федеральный университет, Институт проблем морских технологий
им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, Институт автоматизации и процессов управления
ДВО РАН, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия
А.С. Губанков, к.т.н., доцент, с.н.с., заведующий лабораторией, ubankov@iacp.dvo.ru
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДА СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ МАЛОГО АВТОНОМНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

Аннотация: В докладе рассматривается метод стабилизации положения малого автономного надводного судна, выполняющего морские технологические операции, с учетом возмущений, действующих на судно со стороны окружающей среды. Представлены результаты моделирования работы предложенного метода стабилизации, подтверждающие его работоспособность и эффективность.

Ключевые слова: автономное надводное судно, стабилизация, возмущающие воздействия

I.E. Naidanova, Postgraduate, Junior Researcher, naidanova.ie@yandex.ru
Far Eastern Federal University, M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems
FEB RAS, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Admiral Nevelskoy Maritime
State University, Vladivostok, Russia
A.S. Gubankov, Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher, Head of Laboratory, gubankov@iacp.dvo.ru
Institute of Automation and Control Processes FEB RAS,
Admiral Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, Russia

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR STABILIZING THE POSITION OF A SMALL UNMANNED SURFACE VESSEL

Abstract: The paper describes a method for stabilizing the position of a small unmanned surface vessel performing marine operations, taking into account environmental disturbances affecting the vessel. The results of simulation of the proposed stabilization method are presented, confirming its performance and efficiency.

Key words: unmanned surface vessel, stabilization, disturbing influences

Применение малых автономных надводных судов (МАНС) способно обеспечить оперативное выполнение задач в море, в отличие от применения научно-исследовательских судов, и в настоящее время получает все большее распространение. МАНС может применяться как самостоятельно, так и совместно с различными полезными нагрузками, в частности необитаемыми подводными аппаратами (НПА), беспилотными воздушными судами (БВС), буксируемыми средствами, измерителями и т.д. При совместном применении МАНС и НПА, когда НПА выполняет различного рода подводные задачи, такие как мониторинг морских биоресурсов, выполнение картографирования морского дна, инспекция подводных коммуникаций, МАНС может использоваться для обеспечения навигации НПА, обмена данными, поддержки в процессе выполнения подводных задач и т.д.

При этом для обеспечения навигации НПА целесообразно применение гидроакустических навигационных систем с ультракороткой базой (ГАНС УКБ), гидроакустическая антенна которого может быть закреплена на МАНС, а маяк-ответчик на НПА. Недостатком ГАНС УКБ является ограниченная зона и дальность действия [1]. В связи с этим, для исключения потери сигнала необходимо удерживать НПА в зоне действия ГАНС УКБ с помощью МАНС. При движении НПА в процессе выполнения работ необходимо обеспечить движение МАНС за НПА, а при стабилизации НПА под водой в процессе проведения работ соответственно необходимо обеспечить стабилизацию положения МАНС в некоторой точке на поверхности воды вблизи НПА. Чаще всего в рамках решения задачи стабилизации надводного судна предлагаются системы динамического позиционирования, позволяющие стабилизировать положение и курсовой угол судна и, тем самым, обеспечить движение судна по заданным маршрутам [2]. В [3] представлено решение задачи управления траекторией МАНС с учетом воздействия морских волн, а также выделяются три основные проблемы движения МАНС, а именно стабилизация в точке с желаемой ориентацией, отслеживание траектории, точное следование по желаемой траектории. В [4-5] предложены системы стабилизации судна, имеющего ограниченную маневренность, в которых для введения вспомогательных регуляторов динамика надводного судна описывается каскадной нелинейной системой. Основными недостатками этих работ является полное или частичное игнорирование различных возмущений, что может являться критичным для корректной работы систем стабилизации.

В настоящей работе решается задача обеспечения стабилизации положения МАНС в желаемой точке, в частности в точке над НПА при выполнении им подводных работ, учитывающая возмущения, действующие на МАНС со стороны окружающей среды.

Описание метода стабилизации положения

В работе предлагается метод стабилизации МАНС в некоторой желаемой точке (x^*, y^*) абсолютной системы координат $x_A y_A z_A$ (АСК) на поверхности воды, в частности в точке $(x_{НПА}, y_{НПА})$, являющейся проекцией положения подводного аппарата на плоскость $x_A y_A$ (рис. 1), с постоянной ориентацией по курсу и с учетом возмущающих воздействий, действующих на МАНС со стороны окружающей среды.

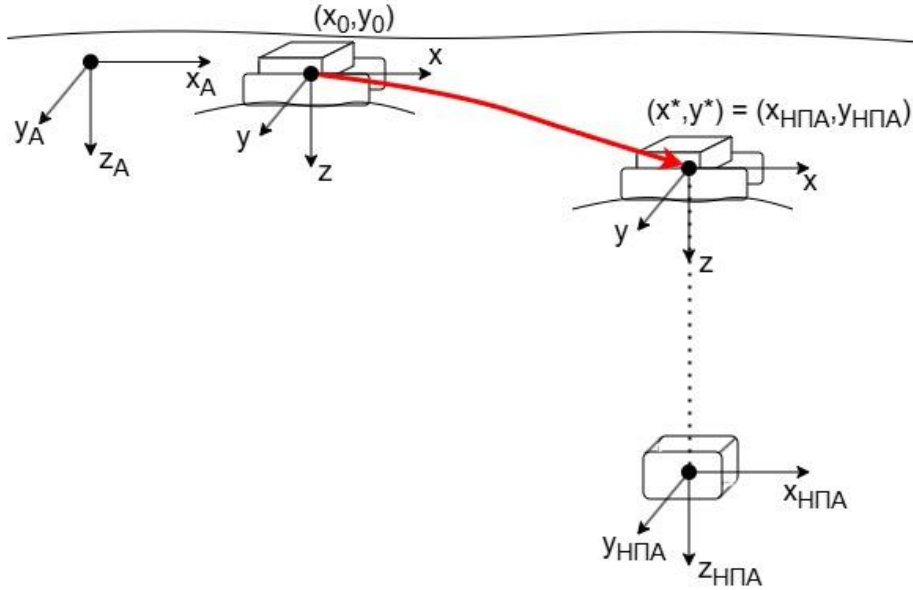


Рис. 1. Описание метода стабилизации

Модель движения МАНС описывается следующей системой уравнений [6]:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{wind} + \boldsymbol{\tau}_{wave}, \quad (1)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v},$$

где $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$; $\mathbf{M}_{RB} \in R^{6 \times 6}$ – матрица инерции МАНС; $\mathbf{M}_A \in R^{6 \times 6}$ – матрица инерции присоединенных масс и моментов инерции жидкости; $\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB} + \mathbf{C}_A \in R^{6 \times 6}$ – матрица кориолисовых и центробежных сил и моментов; $\mathbf{D}(\mathbf{v}) \in R^{6 \times 6}$ – матрица гидродинамических сил и моментов; $\mathbf{g}(\mathbf{v}) \in R^{6 \times 6}$ – вектор гидростатических сил и моментов; $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$ – вектор координат положения и углов ориентации МАНС в АСК; $\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c$ – вектор скорости МАНС относительно течения в связанной системе координат (ССК); $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ v_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ – вектор линейных и угловых скоростей МАНС в ССК; $\mathbf{v}_c = [v_{cx} \ v_{cy} \ v_{cz} \ \omega_{cx} \ \omega_{cy} \ \omega_{cz}]$ – вектор скоростей океанского течения в ССК; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_x \ \tau_y \ \tau_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T$ – вектор сил и моментов, развиваемых движительным комплексом МАНС в ССК; $\boldsymbol{\tau}_{wind} \in R^6$ – вектор сил и моментов, вызванных ветром, в ССК; $\boldsymbol{\tau}_{wave} \in R^6$ – вектор сил и моментов, вызванных волнами, в ССК; $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \in R^{6 \times 6}$ – матрица перехода из связанной в абсолютную систему координат.

Рассматривается стабилизация положения МАНС, обладающего ограниченной маневренностью, в частности имеющего два двигателя в его кормовой части, вследствие чего возможно управление перемещением МАНС вдоль его продольной оси x и изменением угла курса ψ . В отличие от МАНС, обладающего большей маневренностью, имеющего кроме двух двигателей в кормовой части, например, дополнительные поворотные движители, за счет которых возможно управление МАНС также вдоль поперечной оси y , при выполнении стабилизации положения МАНС с двумя двигателями возникают сложности. После достижения целевой точки (x^*, y^*) (кривая 1 на рис. 2а) при смещении такого МАНС из этого положения под действием внешних возмущений $\tau_{вн}$ невозможно обеспечить точный и быстрый повторный выход МАНС в желаемое положение ввиду его ограниченной маневренности. Таким образом, целесообразно осуществлять стабилизацию МАНС, обладающего ограниченной маневренностью, не в целевой точке (x^*, y^*) , а в точке $(\hat{x}^*, \hat{y}^*)$ на границе окрестности целевой точки, заданной некоторым радиусом R , с ориентацией на целевую точку (x^*, y^*) (кривая 2 на рис. 2а).

Для обеспечения стабилизации МАНС на границе окрестности целевой точки с ориентацией на целевую точку (рис. 2б) необходимо формировать желаемые координаты МАНС с использованием следующих выражений:

$$\begin{aligned}\hat{x}^* &= x^* - R \cos \psi^*, \\ \hat{y}^* &= y^* - R \sin \psi^*,\end{aligned}\quad (2)$$

где x^*, y^* – координаты целевой точки; ψ^* – ориентация по курсу на целевую точку; R – радиус окрестности целевой точки. При этом желаемые координаты положения МАНС $(\hat{x}^*, \hat{y}^*)$ представляют собой координаты ближайшей к МАНС точке, лежащей на границе окрестности целевой точки.

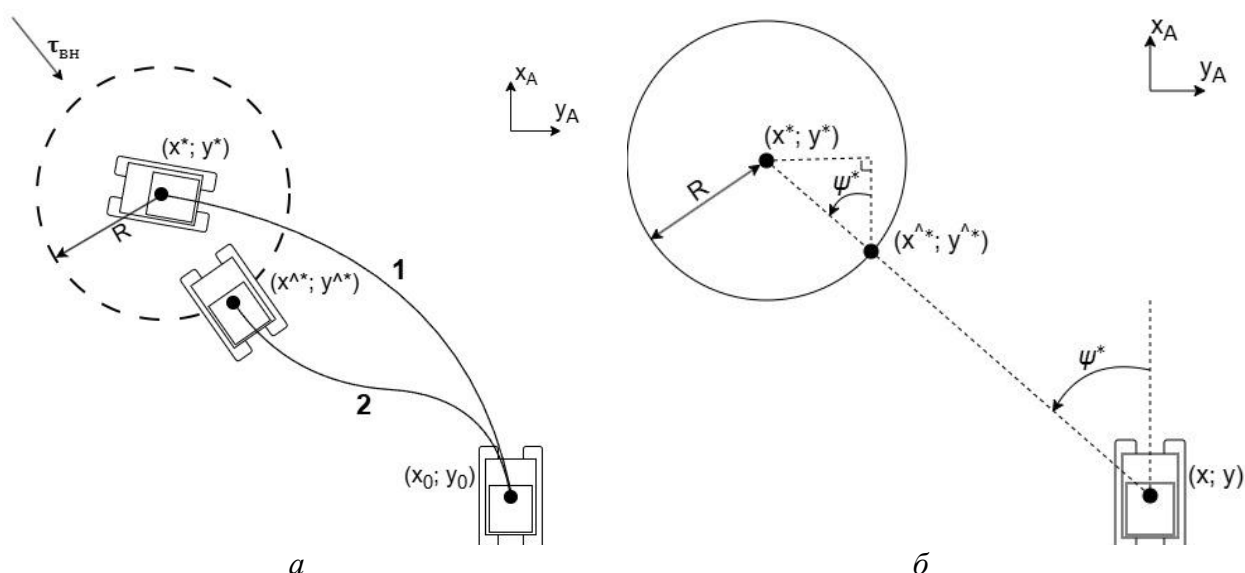


Рис. 2. Метод стабилизации МАНС

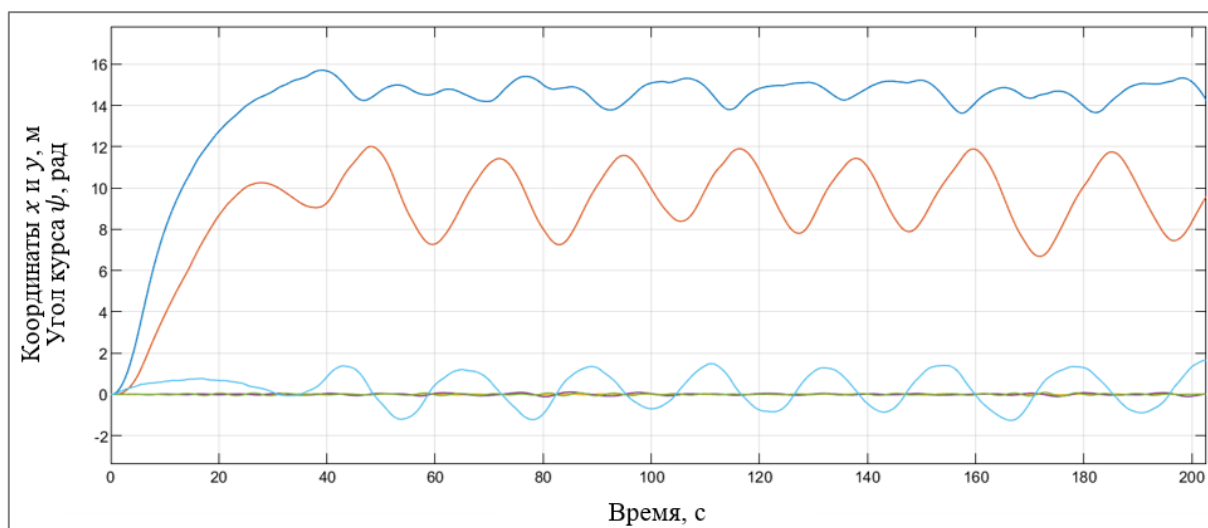
Результаты моделирования

Для исследования работоспособности разработанного метода стабилизации МАНС было проведено компьютерное моделирование. Для описания динамики МАНС с учетом внешних возмущений использовалась модель динамики (1). Внешние воздействия задавались следующие. Вектор скорости океанского течения равен $v_c^a = [-0.5 \quad -0.2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$. Скорость и направление ветра равны соответственно $v_w = 2.6$ м/с и $\beta_w = 20^\circ$. Для моделирования волн была задана частота спектра $\omega_0 = 0.8$ рад/с, коэффициент затухания $\lambda = 0.1$ и значимая высота волны $H_s = 1.2$ м. Начальное положение МАНС в АСК – (0,0), целевая точка в АСК – (15,10), радиус окрестности целевой точки $R = 5$ метров.

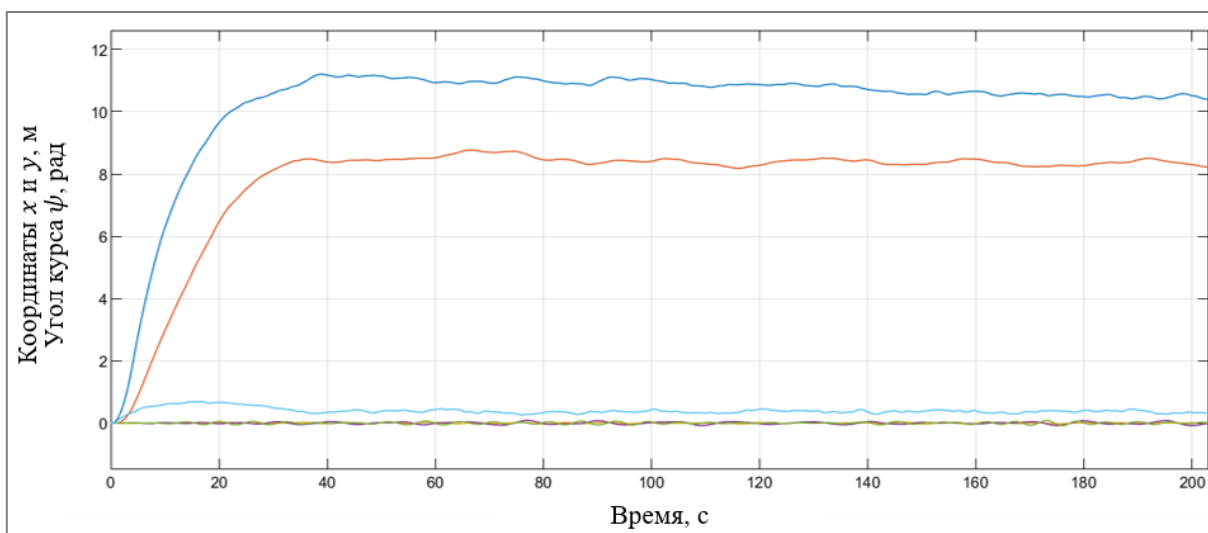
При моделировании рассматривался МАНС с двумя двигателями в кормовой части, обладающий ограниченной маневренностью (управление перемещением МАНС вдоль его продольной оси и изменением угла курса). Для сравнения была рассмотрена стабилизация такого МАНС непосредственно в целевой точке, а также на границе окрестности целевой точки с ориентацией на целевую точку. На рисунках 3а-б соответственно приводятся графики изменения координат МАНС и углов его ориентации для указанных случаев, на которых темно-синяя кривая показывает изменение координаты x в метрах, красная – координаты y в метрах, голубая – угла курса ψ в радианах.

Как видно на рисунке 3а, при стабилизации МАНС в целевой точке, после достижения целевой точки присутствуют колебательные движения вокруг целевой точки. Это происходит из-за смещения судна от целевой точки под действием внешних сил и связано с его ограниченной маневренностью, из-за чего невозможно обеспечить точный и быстрый выход судна в целевую точку повторно и стабилизацию в ней.

Как видно на рисунке 3б, предложенный метод стабилизации позволяет осуществлять стабилизацию МАНС на границе окрестности целевой точки с ориентацией на целевую точку и избежать колебательных движений вокруг целевой точки. При этом МАНС автоматически стабилизируется с ориентацией по курсу против суммарной внешней силы, действующей на него со стороны окружающей среды, то есть суммарная внешняя сила действует вдоль продольной оси МАНС. Это позволяет стабилизировать МАНС в желаемой точке, компенсируя внешние возмущения. Расстояние до целевой точки поддерживается постоянным и равно радиусу окрестности (5 метров). При этом стоит отметить, что ориентация МАНС по курсу может изменяться при изменении направления действия суммарной внешней силы, при этом МАНС будет перемещаться по границе окрестности.



а)



б)

Рис.3. Результат стабилизации МАНС

Таким образом, результаты моделирования подтвердили работоспособность и эффективность предложенного метода. Предложенный метод стабилизации позволяет выполнять стабилизацию МАНС на границе окрестности целевой точки с ориентацией на целевую точку, компенсируя воздействие внешних возмущений со стороны окружающей среды.

Работа выполнена за счет средств госзадания ИАПУ ДВО РАН (тема FWW-2021-0003).

Список литературы

1. Немиро И.Е., Губанков А.С. Сравнительное исследование методов оценки вектора состояния движущихся объектов // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 4 часть 3. – С. 32-41. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.063.

2. Борисов О.И., Громов В.С., Глаголев С.О. Разработка системы динамического позиционирования и ее апробация на робототехнической установке моделирования движения надводного судна // Сборник трудов IV Всероссийского конгресса молодых ученых. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 68-72.

3. Braginsky B., Guterman H. Trajectory controller for Autonomous Surface Vehicle under sea waves // OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington. – Washington, DC, USA, 2015. – Pp. 1-5. DOI: 10.23919/OCEANS.2015.7401960.

4. Ghommam J., Mnif F., Benali A., Derbel N. Asymptotic Backstepping Stabilization of an Underactuated Surface Vessel // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – Nov. 2006. – Vol. 14, no. 6. – Pp. 1150-1157. DOI: 10.1109/TCST.2006.880220.

5. Weilin L., Tieshan L. Stabilization of an Underactuated Surface Vessel with Disturbances // 2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). – Edinburgh, UK, 2019. – Pp. 693-696. DOI: 10.1109/ICCA.2019.8899925.

6. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. – John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011. – 582 p.

В.В. Чернышёв, д.т.н., профессор, vad.chernyshev@mail.ru

Д.С. Петров, аспирант, Dmitry.rogue@yandex.ru

С. Д. Оборин, аспирант, oborin.d.s@mail.ru

Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, Россия

КОЛЁСНО-ШАГАЮЩИЙ ДВИЖИТЕЛЬ АВТОМОБИЛЯ ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ

Аннотация: В статье рассматривается конструкция и принцип работы колёсно-шагающего движителя транспортного средства, выполненного по шарнирно-рычажной схеме. Представлен механизм, обеспечивающий регулируемый подъём передней части транспортного средства при преодолении препятствий. Приведено описание кинематической структуры. Достигается возможность адаптивного изменения высоты и угла подъёма опорной стопы, что обеспечивает повышение проходимости на пересечённой местности при сохранении эффективности колёсного режима.

Ключевые слова: колёсно-шагающий движитель, шарнирно-рычажный механизм, преодоление препятствий, проходимость, кинематика.

V. V. Chernyshev, D.Sc., Professor, vad.chernyshev@mail.ru

D. S. Petrov, postgraduate student, Dmitry.rogue@yandex.ru

S. D. Oborin, postgraduate student, oborin.d.s@mail.ru

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

WHEELED WALKING PROPULSION UNIT FOR AN ALL-TERRAIN VEHICLE

Abstract: This article examines the design and operating principle of a wheeled walking vehicle propulsion system, which utilizes an articulated-lever design. A mechanism is presented that provides adjustable lift of the vehicle's front end when overcoming obstacles. The ability to adaptively change the height and angle of the support foot is achieved, which ensures increased cross-country ability on rough terrain while maintaining the efficiency of the wheel mode.

Key words: wheeled walking propulsior, articulated-lever mechanism, overcoming obstacles, cross-country ability, kinematics.

Современные задачи робототехники требуют создания мобильных платформ, способных эффективно перемещаться в условиях сложного, неструктурированного рельефа, где традиционные колёсные и гусеничные системы демонстрируют ограниченные возможности. Повышение автономности и мобильности таких систем невозможно без внедрения гибридных способов передвижения, сочетающих преимущества колёсного и шагающего движителя [1, 2].

Колёсные системы характеризуются высокой скоростью и энергоэффективностью при движении по твёрдым поверхностям, но теряют эффективность при преодолении вертикальных препятствий и мягких грунтов [3, 4]. В то же время, шагающие конструкции обеспечивают превосходную проходимость, однако обладают низкой скоростью и сложной системой управления.

Использование адаптивных приводов и шарнирно-рычажных схем обеспечивает не только повышение проходимости, но и снижение динамических нагрузок на конструкцию, что особенно важно для робототехнических комплексов, действующих в непредсказуемых условиях.

Одним из эффективных направлений развития транспортной техники является создание гибридных колёсно-шагающих движителей, сочетающих преимущества колёсных и шагающих систем. Такие конструкции позволяют использовать колёсный режим на ровной дороге и активировать шагающий механизм только при необходимости преодоления препятствий.

Колёсные роботы обладают потенциалом для высокоманёвренного и универсального передвижения [5]. Авторы рассматривают гибридную платформу с колёсно-шагающим типом передвижения – четвероногий робот с неуправляемыми колёсами, прикрепленными к ногам (рис. 1.). Робот выполняет гибридное передвижение с большим разнообразием последовательностей походки по пересечённой местности.



Рис. 1. Четвероногий робот с неуправляемыми колёсами

Изобретение [6] «Колёсно-шагающий движитель транспортного средства» сочетает в себе колёсный и шагающий режим в направлении практической применимости в транспортных средствах повышенной проходимости (рис. 2). Данное устройство предусматривает возможность комбинированного передвижения транспортного средства за счёт использования составных

колесных ободов и многозвенных приводных систем, обеспечивающих переход из колесного режима в шагающий. Однако конструкция отличается высокой механической сложностью, большим числом подвижных сочленений и приводов, что увеличивает массу, энергоёмкость и требования к точности синхронизации. Кроме того, применение гидравлических и многomotorных систем усложняет обслуживание и снижает надёжность при эксплуатации в полевых условиях.

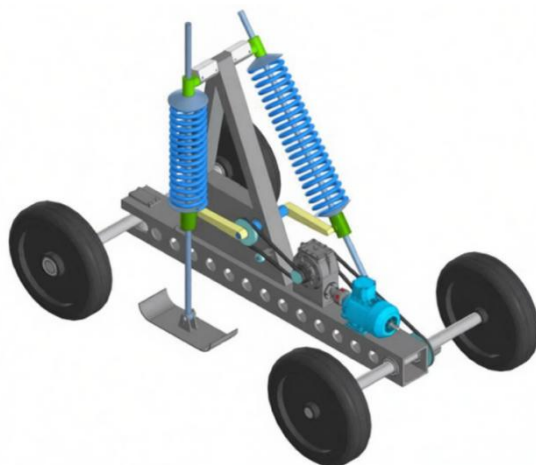


Рис. 2. Колёсно-шагающий движитель транспортного средства

Настоящая работа посвящена разработке и анализу колёсно-шагающего движителя транспортного средства (рис. 3), выполненного в виде шарнирно-рычажной системы с электрическим линейным приводом, обеспечивающим регулируемую высоту подъёма передней части транспортного средства.

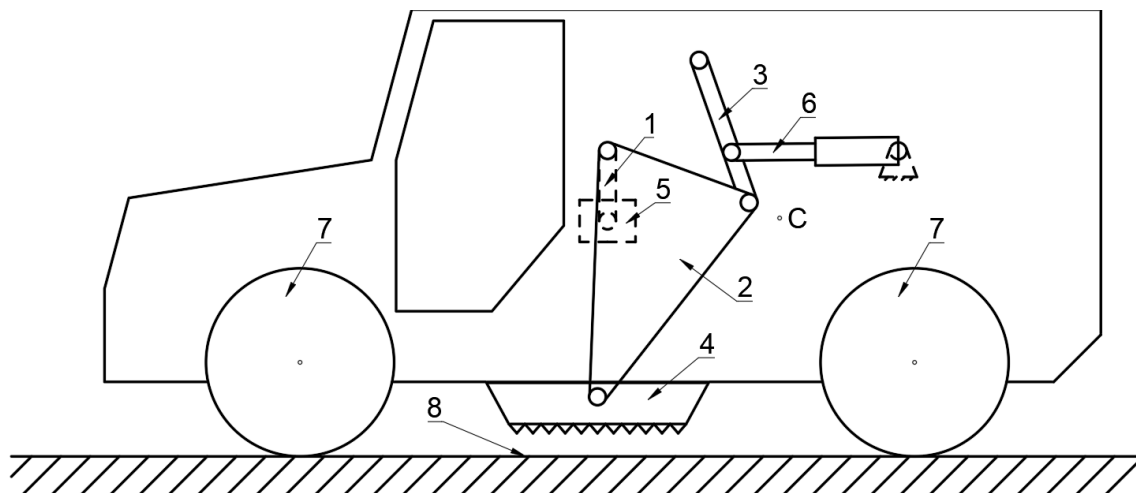


Рис.3. Колёсно-шагающий движитель

- 1 – кривошип; 2 – треугольное звено; 3 – поворотный рычаг; 4 – стопа с грунтозацепом;
5 – редуктор; 6 – электрический линейный привод; 7 – полноприводные колёса;
8 – грунт с нулевой несущей способностью; С – центр масс

Предлагаемый движитель содержит колёсно-транспортное средство, на раме которого установлен вспомогательный шагающий механизм. Конструк-

ция включает последовательно соединённые кривошип 1, треугольное звено 2 и поворотный рычаг 3, образующие шарнирно-рычажную систему. Один конец треугольного звена соединён с опорной стопойс грунтозацепом 4, установленной на цилиндрическом шарнире; второй – с кривошипом, который соединён с корпусом понижающего редуктора 5; третий – с поворотным рычагом, соединённым с электрическим линейным приводом 6.

Редуктор получает вращение от электродвигателя и передает движение на кривошип. Линейный привод обеспечивает изменение угла поворота рычага и тем самым регулирует высоту подъёма шагающего элемента. Управление осуществляется дистанционно из кабины водителя.

В колёсном режиме система находится в нерабочем положении: стопа с грунтозацепом прижата к днищу, кривошип и рычаг зафиксированы. При активации шагающего режима электропривод изменяет угол рычага, кривошип начинает вращение, а опорная стопа описывает сложную пространственную траекторию, обеспечивая подъём и тем самым передвижение машины на грунте с низкой несущей способностью. После преодоления «проблемного участка» механизм возвращается в исходное состояние. Весь процесс преодоления участка с грунтом с низкой несущей способностью можно поэтапно наблюдать на рисунке 4.

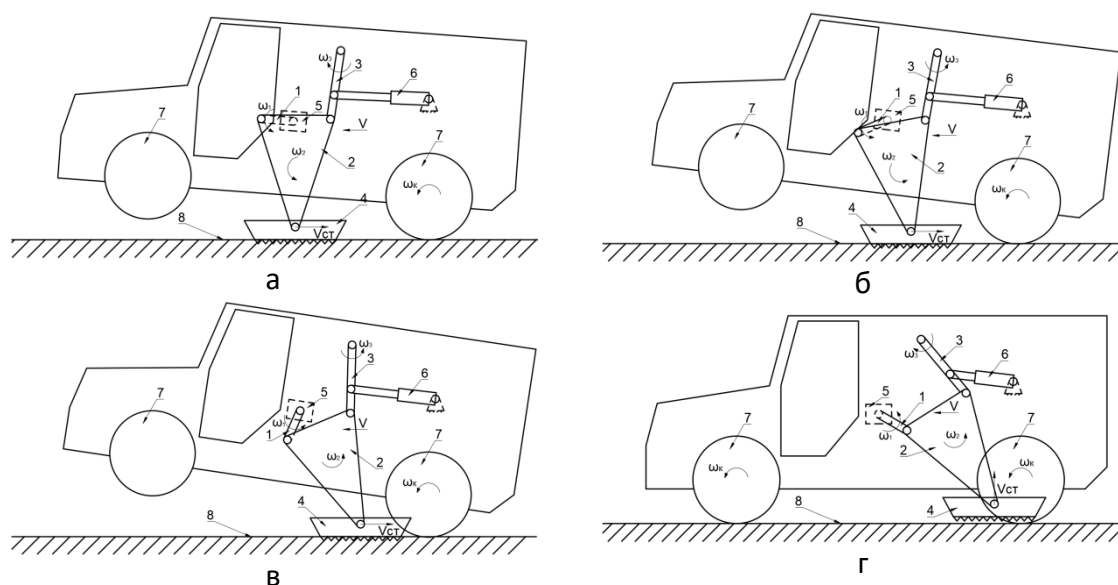


Рис.4. Один полный цикл механизма

ω_1 – угловая скорость кривошипа; ω_2 – угловая скорость треугольного звена; ω_3 – угловая скорость поворотного рычага; ω_k – угловая скорость колеса;
 V – линейная скорость автомобиля; $V_{ст}$ – линейная скорость стопы

$$x_c = OA \cdot \cos \varphi_1 + AC \cdot \cos(\varphi_2 - \beta) \quad (1)$$

$$y_c = OA \cdot \sin \varphi_1 + AC \cdot \sin(\varphi_2 - \beta) \quad (2)$$

На основе данных выражений была построена траектория опорной стопы, чтобы показать движение опорной точки стопы.

На рис. 5 изображена траектория движения стопы. Траектория показывает длину шага и высоту подъёма стопы, которые способен обеспечить данный механизм. Закрашенными точками обозначена опорная фаза. На рис. 6 изображены вертикальная и горизонтальная (рис. 7) составляющие траектории движения опорной стопы.

Рассмотренная конструкция колёсно-шагающего движителя транспортного средства показала, что применение шарнирно-рычажного механизма с треугольным звеном и электрическим линейным приводом обеспечивает эффективное сочетание простоты конструкции и функциональной адаптивности.

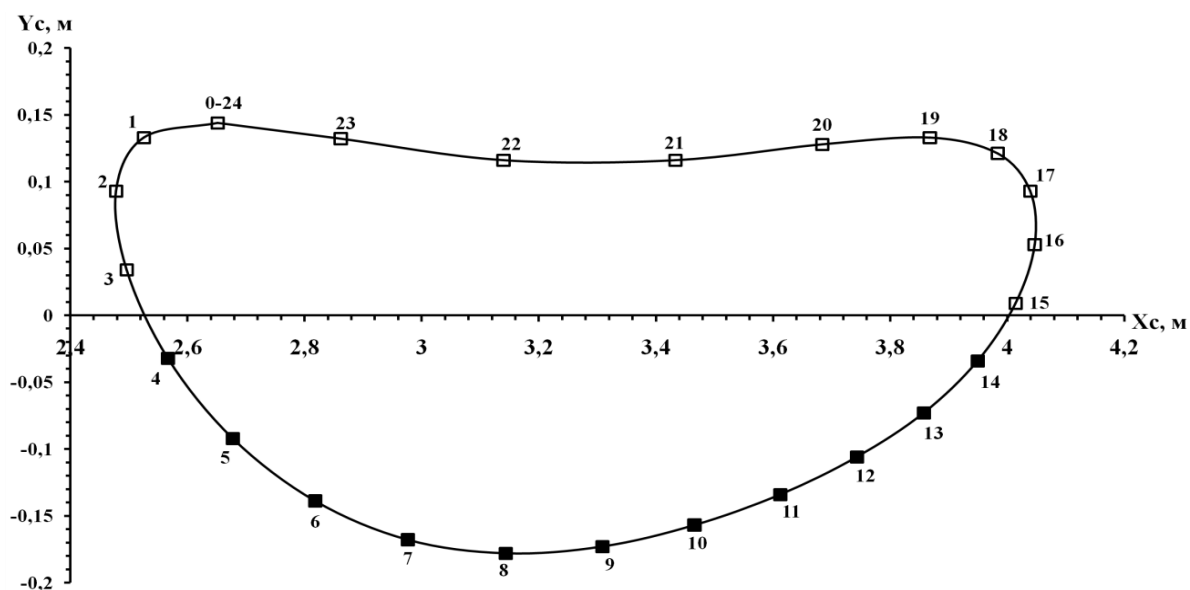


Рис. 5. Траектория движения опорной стопы

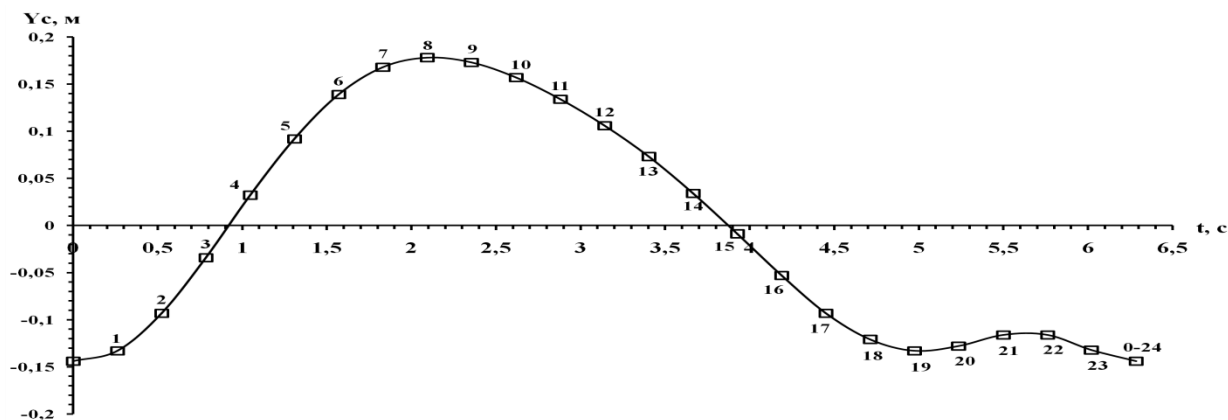


Рис. 6. Вертикальная и составляющая траектории движения опорной стопы

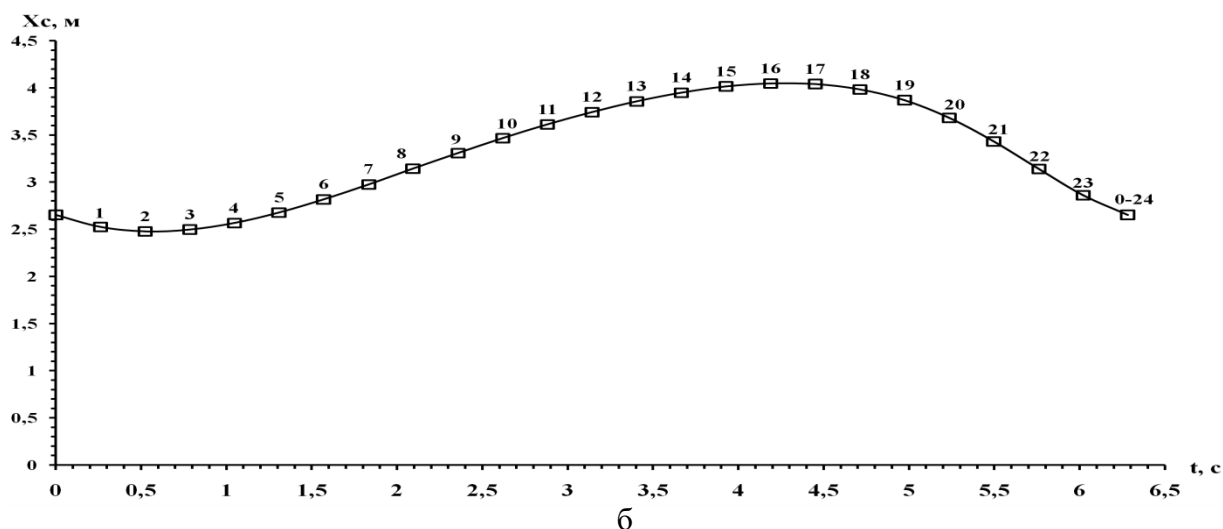


Рис. 7. Горизонтальная составляющая траектории движения опорной стопы

В ходе рассмотрения схемы движения (рис. 4) установлено, что шагающий механизм обеспечивает последовательное выполнение фаз подъёма, переноса и опоры стопы. Это гарантирует плавность движения и устойчивость транспортного средства при переходе с ровной поверхности на участок с грунтом с низкой несущей способностью без необходимости изменения основной колесной базы.

Особенностью предложенного решения является возможность двухрежимной работы:

1. в колёсном режиме движение осуществляется за счёт традиционных колёс с минимальным энергопотреблением,
2. в шагающем режиме активируется линейный привод, изменяющий положение рычага и траекторию опорной стопы для преодоления препятствий.

Таким образом, колёсно-шагающий движитель является перспективным направлением для совершенствования мобильных транспортных и робототехнических платформ, предназначенных для эксплуатации в условиях пересечённой местности.

Список литературы

1. Silva B. et al. Hybrid Wheel-Leg Locomotion in Rough Terrain. Experimental Robotics. ISER 2020. Springer Proceedings in Advanced Robotics, 2021. vol 19. Springer, Cham. pp. 95–104. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71151-1_9.
2. Tadakuma K., et al. Mechanical design of the wheel-leg hybrid mobile robot to realize a large wheel diameter. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, 2010. pp. 3358–3365.
3. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
4. Лапшин В.В. Механика и управление движением шагающих машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 199 с.

5. Арыканцев В.В., Чернышев В.В. Подводные исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающего аппарата МАК-1 // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10. С. 169–1783.

6. Патент № 2824228 С1 Российская Федерация, МПК В62D 57/032, В62D 57/028. Колесно-шагающий движитель транспортного средства: заявл. 05.02.2024; опубл. 06.08.2024 / В. В. Новиков, Р. С. Калиев, А. Е. Гаврилов, С. С. Сапрыкин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет". – EDN NXWNYE.

7. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Цикловой механизм шагания с трансформируемой траекторией опорной точки // Теория механизмов и машин. – 2017. – Т. 15, № 2(34). – С. 71-79. – DOI 10.5862/TMM.34.4.

8. Чернышев В.В. Поворот шагающих машин с движителями на базе цикловых механизмов // Теория механизмов и машин. – 2007. – Т. 5, № 2(10). – С. 72-84. – EDN KZHJP.

Секция 2

СПЕЦИАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

В.В. Варга, студент, varga-04@mail.ru
СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

А.Е. Архипов, м.н.с., a.arkhipov@rtc.ru
ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург, Россия

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ТРЕХМЕРНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОДСВЕТКИ

Аннотация: В статье рассмотрена задача трехмерной реконструкции подстилающей поверхности лунохода с использованием системы технического зрения. Для этого разработана среда моделирования, позволяющая имитировать движение лунохода в условиях приближенным к Лунным. Проведен анализ существующих методов систем технического зрения для трехмерной реконструкции подстилающей поверхности. Разработан алгоритм трехмерной реконструкции на основе лазерной структурированной подсветки. В среде моделирования проведено тестирование разработанного алгоритма.

Ключевые слова: Лунная поверхность, среда моделирования, лазерная структурированная подсветка, стереозрение, система технического зрения, подстилающая поверхность.

V.V. Varga, student, varga-04@mail.ru
SPbPU, Saint Petersburg, Russia

A.E. Arkhipov, junior researcher, a.arkhipov@rtc.ru
RTC, Saint Petersburg, Russia

DEVELOPMENT OF A 3D RECONSTRUCTION ALGORITHM BASED ON LASER STRUCTURED ILLUMINATION

Abstract: The article discusses the task of three-dimensional reconstruction of the underlying surface of a lunar rover using a technical vision system. To achieve this, a simulation environment has been developed that allows for the imitation of the rover's movement in conditions similar to those on the Moon. An analysis of existing methods of technical vision systems for three-dimensional reconstruction of the underlying surface has been conducted. An algorithm for three-dimensional reconstruction based on laser structured illumination has been developed. The developed algorithm has been tested in the simulation environment.

Key words: Lunar surface, modeling environment, laser structured illumination, stereo vision, technical vision system, digital terrain model.

В связи с большими задержками в канале связи при передаче информации между луноходом и оператором необходимо обеспечить его автономное движение. Для планирования безопасного маршрута необходимо получить трехмерную реконструкцию подстилающей поверхности. Сегодня существует множество различных недорогих методов наземного применения. Однако с учетом специфики лунных условий предъявляется масса требований к средствам информационно-измерительного комплекса, включая редакционную стойкость, виброустойчивость и т.п. Далее рассмотрим существующие методы трехмерной реконструкции подстилающей поверхности.

Флэш-лидар является наиболее перспективной технологией дистанционного зондирования, которая использует лазерные импульсы для создания 3D-карт местности с высоким разрешением. В отличие от традиционных лидарных систем, использующих механизмы сканирования, флэш-лидар захватывает всю сцену одновременно с помощью одной лазерной вспышки, предоставляя полную пространственную информацию с высокой скоростью в режиме реального времени и при этом не имеет подвижных частей. Однако, серьезным недостатком такого метода является его высокая стоимость реализации и малый опыт работы с такими системами в нашей стране.

В свою очередь, стереозрение являлся одной из наиболее проработанных на сегодняшний день технологий трехмерной реконструкции. Она не требует специализированных электронных компонентов, которые достаточно сложно и дорого разрабатывать для космических задач. Алгоритм основан на извлечении и сопоставлении карт диспаратности (глубины) из двух кадров, сделанных двумя камерами расположенных на известном расстоянии друг от друга, как показано на рисунке 1.

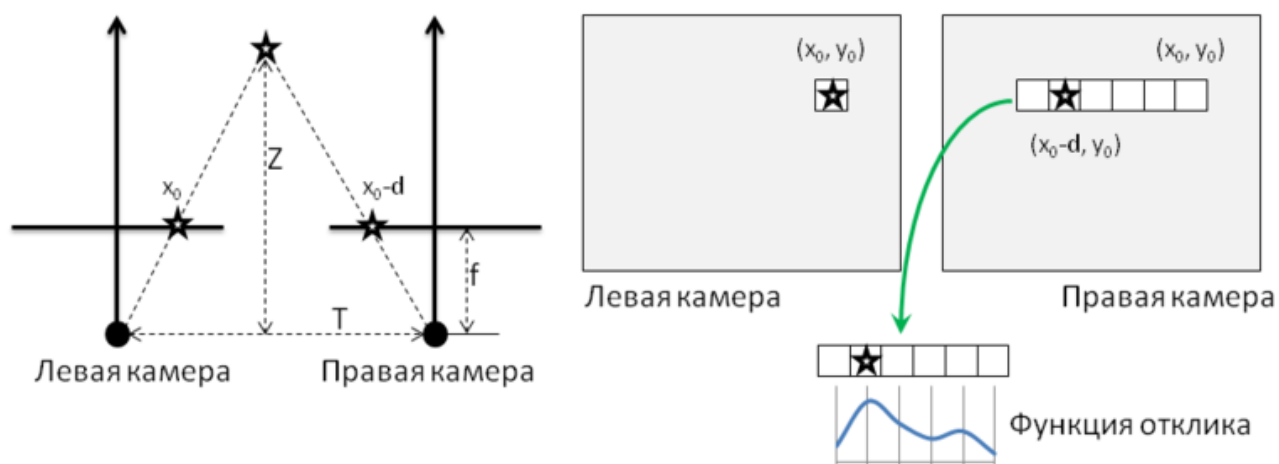


Рис. 1. Принцип работы стереозрения

Высокая степень проработанности стереоскопической системы также обуславливается её активным использованием в проектах NASA [1]. Однако основной недостаток связан с высокой вычислительной нагрузкой, высокой погрешностью измерений и чувствительностью к светотеневой обстановке.

Есть работы NASA посвящённые оптимизации стереоскопической системы за счет использования нейронных сетей [1], что значительно повышает работоспособность метода в том числе при солнечном засвете, но как было упомянуто ранее, существующие бортовые вычислители космического применения крайне ограничены.

Метод структурированной лазерной подсветки представляет собой активный подход к трёхмерному сканированию, основанный на проецировании лазерных паттернов на исследуемую поверхность. В отличие от пассивных методов, система использует заранее известный источник света – лазерный излучатель способный проецировать линии или сетку, которые деформируются в соответствии с геометрией объекта. Камера фиксирует искажения паттерна, позволяя через триангуляцию восстановить трёхмерную информацию о рельефе [2].

На рисунке 2 приведена схема для расчета одной точки P . Основой разработанной структурированной лазерной подсветки является предварительная калибровка, из которой точно вычисляется расстояние между лазером и камерой (база OL) и угол проецирования линии γ .

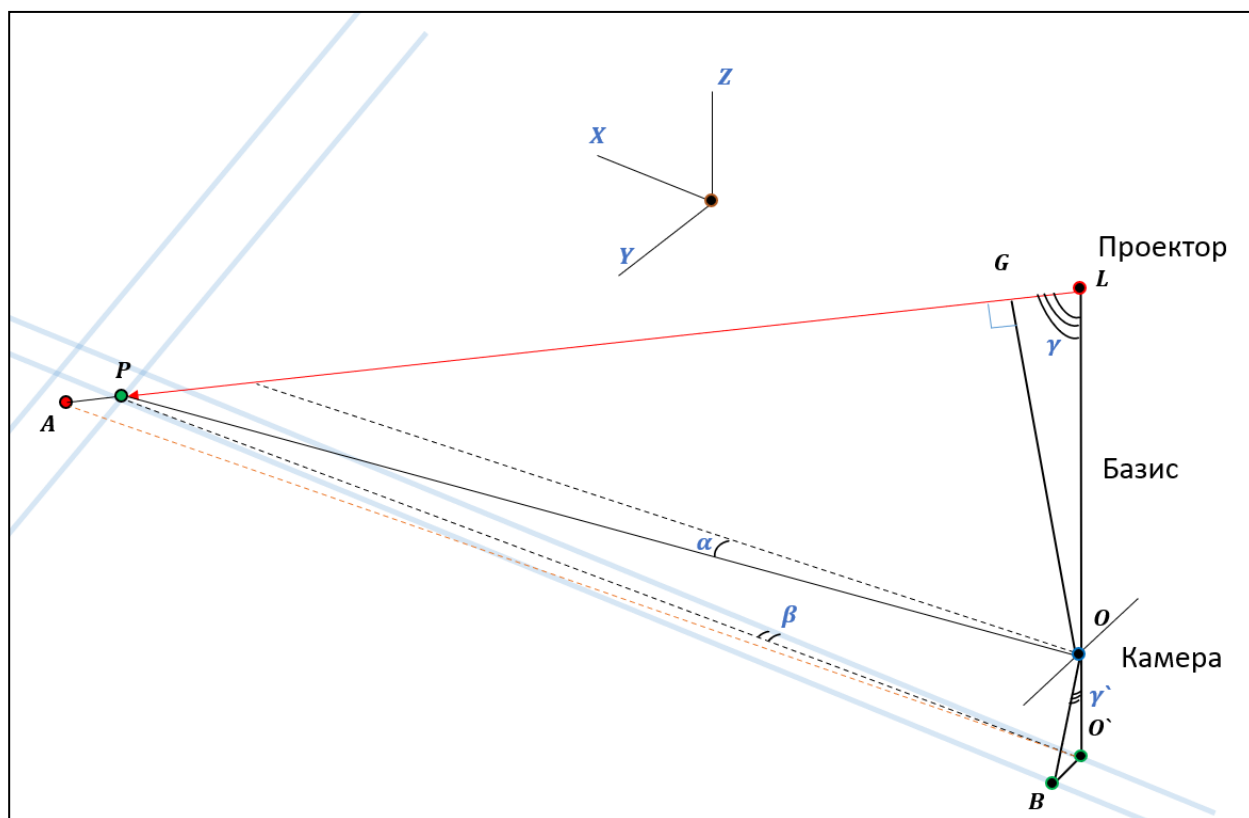


Рис. 2. Схема для расчета положения точки

Для получения реальных координат точек мы используем углы α и β с изображения, затем как показано в формуле (1) находим OG в треугольнике GOL .

$$OG=OL \cdot \cos(\gamma). \quad (1)$$

Угол POG в треугольнике POG найдем по формуле (2).

$$POG= \alpha + 90^\circ - (90^\circ - \gamma) = \alpha + \gamma, \quad (2)$$

где, α – угол получаемый из расположения точки по оси y и фокусного расстояния камеры.

Затем по формуле (3) сможем найти OP – расстояние от объектива камеры до реальной точки.

$$OP=OG/\cos(\alpha + \gamma). \quad (3)$$

Далее отрезок OP проецируется на оси X , Y и Z для вычисления трехмерных координат точки P согласно формуле (4).

$$\begin{aligned} X &= OP \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \\ Y &= OP \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \\ Z &= OO' - OP \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) \end{aligned} \quad (4)$$

Преимуществом лазерной структурированной подсветки является отсутствие сложных элементов и алгоритмов, которые по сути используют базовые геометрические операции, что снижает стоимость реализации и вычислительную нагрузку системы для применения в космосе. В последних исследованиях NASA используется в том числе лазерная подсветка для обнаружения препятствий в ближней зоне на поверхности Луны [3].

В настоящей работе для разработки и отладки алгоритмов используется компостерная модель. В качестве среды моделирования выбран Unity – это современный кроссплатформенный симулятор, который используется для создания 2D и 3D приложений. С помощью него возможно синтезировать фотореалистичные изображения в различной светотеневой обстановке на поверхности Луны [4].

Далее рассмотрим схему работы алгоритма с точки зрения технического зрения на примере получения трехмерной реконструкции прямоугольной стены как показано на рисунке 4. В виду того, что метод Хафа хорошо работает только для ровной плоскости, в дальнейшем он будет заменен на более эффективный метод Харриса, с использованием лазерной подсветки состоящей из красного и зеленого лазеров, это позволит более точно находить пересечения лазерных линий и в последствии применять нумерацию линий по столбцам и строчкам для задания номера каждой точки. От солнечного заосветления и шумов предусмотрена линза для объектива камеры пропускающая только диапазон длины волны в который попадает лазерная подсветка.

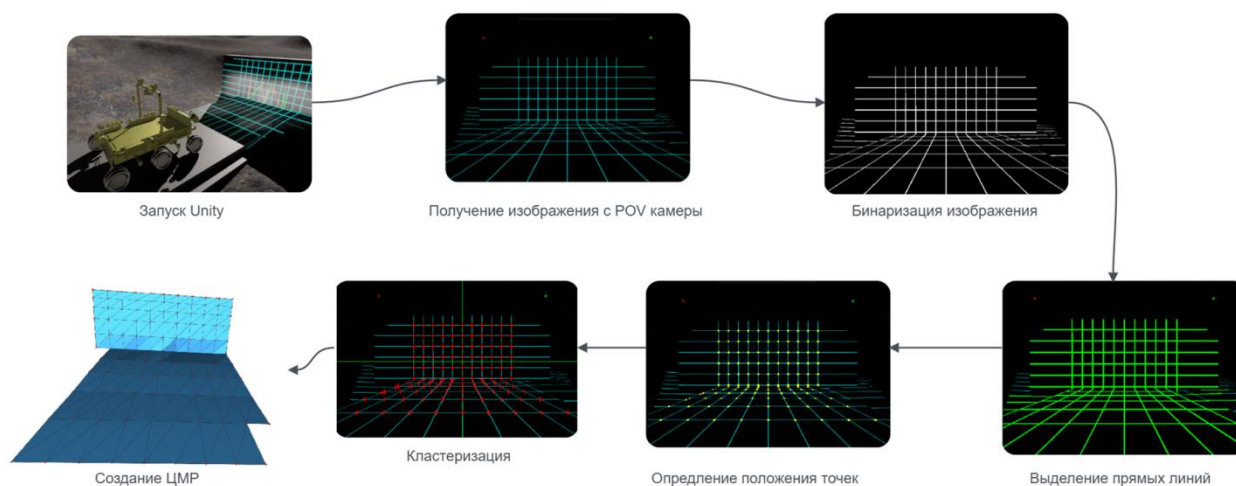


Рис. 4. Схема работы структурированной лазерной подсветки

В дальнейшем предстоит исследование по проведению реальных экспериментов с целью сравнения стереоскопической системы и структурированной лазерной подсветки по точности и оказываемой нагрузки на вычислитель, чтобы выявить наиболее эффективный алгоритм или создать гибрид из этих методов.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России «Исследование методов анализа слабоструктурированных данных, обработки знаний и создания когнитивных агентов на базе комбинированных глубоких нейронных сетей» (FNRG-2025-0008 1024050200009-5-1.2.1;2.2.2).

Список литературы

1. Grethen C. et al. Adapting Stereo Vision From Objects To 3D Lunar Surface Reconstruction with the StereoLunar Dataset //Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2025. – С. 3751-3760.
2. Rodrigues M. Fast 3D reconstruction using structured light methods. – 2011.
3. Nefian A. et al. Structured light-based hazard detection for planetary surface navigation //2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2017. – С. 2665-2671.
4. Van Velson C. et al. Sim Series 2: Rover Teleoperations to Support EVA Test Report // NASA. – 2023.

Р.П. Василенко, м.н.с., vrp261200@mail.ru

А.Ю. Коноплин, в.н.с., kayur-prim@mail.ru

Н.С. Даць, стажер-исследователь, datc.ns@dvfu.ru

Институт проблем морских технологий
им. академика М. Д. Агеева ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

ПОДХОД К ПРИМЕНЕНИЮ АНПА, ОСНАЩЕННЫХ МНОГОЗВЕННЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ, ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ РАБОТ

Аннотация: В работе представлен подход к применению типовых автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащенных многозвенными манипуляторами (ММ), для выполнения операций по подъему и перемещению подводных объектов. Как правило, в таких АНПА возможности движительно-рулевых комплексов (ДРК) не позволяют формировать тягу в вертикальной плоскости, достаточную для поднятия тяжелых объектов. В связи с этим предлагается использовать вес перемещаемого схватом ММ объекта для формирования ненулевого угла дифферента у АНПА при изменении конфигурации манипулятора. В таком положении АНПА может использовать возможности более мощного маршевого ДРК для заглубления, всплытия, поднятия и перемещения объектов работ, зафиксированных в схвате ММ.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, многозвенный манипулятор, спускоподъемные подводные работы.

R.P. Vasilenko, junior researcher, vrp261200@mail.ru

A.Yu. Konoplin, senior researcher, kayur-prim@mail.ru

N.S. Dats, intern researcher, datc.ns@dvfu.ru

Academician M. D. Ageev Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, Russia

APPROACH TO USING AUVs EQUIPPED WITH MULTILINK MANIPULATORS FOR LIFTING OPERATIONS

Abstract: The paper presents an approach to the use of typical autonomous underwater vehicles (AUVs) equipped with multi-link manipulators (MMs) for lifting and transporting underwater objects. The capabilities of the propulsion and steering complex (PSC) in such AUVs do not allow for generating sufficient vertical thrust to lift heavy objects. To address this, the paper proposes using the weight of the transported object to create a non-zero AUV's trim angle by changing the configuration of the MM. With a non-zero trim angle, the underwater vehicle can use the capabilities of a more powerful marching PSC for diving, surfacing, lifting, and transporting the work objects secured in the MM's grip.

Key words: autonomous underwater vehicles, multi-link manipulator, underwater lifting operations.

Введение

АНПА являются одними из наиболее перспективных средств изучения и освоения Мирового океана. Перспективным является оснащение таких аппаратов многозвенными манипуляторами (ММ) [1].

Грузоподъемные подводные работы с объектами, обнаруженными заранее при использовании поисковых АНПА, как правило, выполняют с помощью телеуправляемых подводных аппаратов рабочего класса [2] или судов с установленными подъёмными механизмами [3]. Применение АНПА с ММ для осуществления таких работ в перспективе позволит обнаруживать и поднимать/перемещать целевые объекты одним аппаратом, что ускорит и удешевит выполнение подобных операций. При этом главный недостаток применения АНПА для таких работ – низкая тяга, формируемая двигателями в вертикальной плоскости, ввиду особенностей компоновки ДРК [4]. Поэтому при взаимодействии с тяжелыми объектами целесообразно задавать АНПА ненулевой углом дифферента, чтобы основное тяговое усилие в вертикальном направлении формировалось маршевыми двигателями.

Существуют следующие системы и способы управления дифферентом АНПА: за счет тяг ДРК; с помощью жидкостных или газовых систем регулирования плавучести [5]; балластные системы [6]. Представленные решения характеризуются высоким энергопотреблением, уменьшением полезного внутреннего объема аппарата и увеличением общего веса соответственно.

В данной работе предлагается для регулирования дифферента использовать вес объекта работ, закрепленного в схвате ММ. Предлагаемый подход позволит применять уже имеющиеся АНПА и ММ, а также в отличие от существующих решений не будет требовать установки дополнительного оборудования для изменения дифферента подводного аппарата.

Влияние груза в схвате ММ на АНПА

Для увеличения плеча действия силы тяжести и создания ненулевого угла дифферента у АНПА за счет веса груза, закрепленного в схвате, целесообразно устанавливать манипулятор ближе к носовой части аппарата (рис. 1а). Это позволит увеличить угол наклона по дифференту и эффективнее использовать маршевый ДРК.

В ходе взаимодействия ММ с подводными объектами на АНПА неизбежно будут воздействовать сила $\bar{F}_M = [F_M^{CX}, F_M^{CY}, F_M^{CZ}]$ и момент $\bar{M}_M = [M_M^{CX}, M_M^{CY}, M_M^{CZ}]$, обусловленные перемещением звеньев ММ, влиянием вязкой среды на звенья и силой тяжести объекта работ. Эти силу и

момент можно вычислить с помощью рекуррентного алгоритма [7], который состоит из нескольких этапов, включающих в себя: определение моментов M_i^{dz} , действующих в сочленениях ММ, с помощью датчиков; определение моментов M_i^{wz} , обусловленных эффектами взаимовлияний звеньев ММ и влиянием внешней среды, с помощью алгоритма решения обратной задачи динамики ММ; определение моментов $M_i^{gz} = M_i^{dz} - M_i^{wz}$, обусловленных силой тяжести груза в схвате ММ; определение силы тяжести ${}^G\bar{F}_L$ [8].

В ходе обратной рекурсии упомянутого алгоритма определяются сила $\bar{F}_i$ и момент $\bar{M}_i$, действующие на i -е звено ММ [7]:

$$\bar{F}_i = A_i^{i+1}\bar{F}_{i+1} + \bar{r}_{mi}(m_i + \lambda_i) + \bar{F}_{RLi} + \bar{F}_{RPi}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_i = & A_i^{i+1}\bar{M}_{i+1} + p_i^* \times (A_i^{i+1}\bar{F}_{i+1}) + \bar{r}_i^* \times (m_i\bar{r}_{mi}) + \\ & + \bar{r}_{pi} \times (\lambda_i\bar{r}_{mi}) + (\tau_i + T_i)\bar{\omega}_i\bar{r}_{mi} + \\ & + \bar{\omega}_i \times ((\tau_i + T_i)\bar{\omega}_i) + \bar{M}_{RLi} + \bar{M}_{RPi}, \end{aligned} \quad (2)$$

где: A_i^{i+1} – матрица перехода от СК звена $i+1$ к СК i -го звена; $\bar{F}_{i+1}$ – сила, действующая на $i+1$ звено; $\bar{r}_{mi}$ – линейное ускорение центра масс i -го звена; m_i – масса i -го звена; λ_i – присоединенная масса жидкости i -го звена; $\bar{F}_{RLi}$, $\bar{F}_{RPi}$, $\bar{M}_{RLi}$, $\bar{M}_{RPi}$ – соответственно продольные и поперечные составляющие силы и момента вязкого трения действующей на i -е звено; $\bar{M}_{i+1}$ – момент, действующий на $i+1$ -е звено; p_i^* – вектор, задающий положение СК $i+1$ -го звена относительно i -го; $\bar{r}_i^*$ – вектор, задающий положение центра масс i -го звена относительно i -го сочленения; $\bar{r}_{pi}$ – вектор, задающий положение центра масс присоединенной жидкости относительно i -го сочленения; τ_i – тензор инерции i -го звена; T_i – тензор инерции присоединенных масс жидкости i -го звена; $\bar{\omega}_i$ – угловая скорость i -го звена. Расчет величин $\bar{r}_{mi}$, λ_i , $\bar{F}_{RLi}$, $\bar{F}_{RPi}$, $\bar{\omega}_i$, $\bar{M}_{RPi}$ и $\bar{M}_{RLi}$ приведен в работе [7]. Для звена n первое слагаемое в выражении (1) будет иметь вид $A_m^n A_a^m A_G^a {}^G\bar{F}_L$, где: A_G^a – матрица поворота из инерциальной СК в СК АНПА; A_a^m – матрица поворота из СК АНПА в СК основания ММ; A_m^n – матрица поворота из СК основания ММ в СК n -го звена. Для звена $n-1$: $\bar{F}_{n+1} = {}^n\bar{F}_L$ (т.е. сила тяжести груза, заданная в СК звена n).

На основе величин $\bar{F}_1$ и $\bar{M}_1$, определяются сила и момент $\bar{F}_0$ и $\bar{M}_0$, действующие на основание ММ, а затем, исходя из положения ММ в СК АНПА определяются сила $\bar{F}_M$ и момент $\bar{M}_M$, с которыми ММ и закрепленный в его схвате груз воздействуют на АНПА. Для компенсации отрицательной плавучести системы АНПА-ММ-объект работ на основе $\bar{F}_M$ и $\bar{M}_M$ можно задать целевой вектор силового воздействия ДРК:

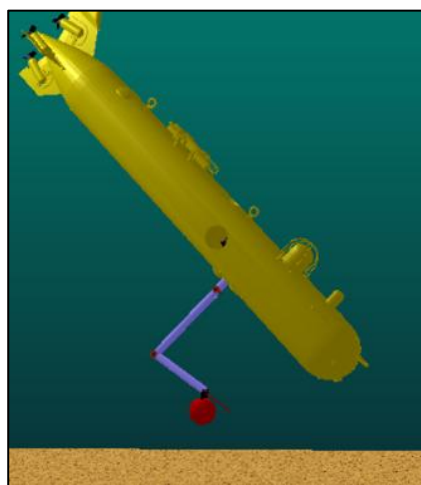
$$\bar{F}^* = [-F_M^{CX}, -F_M^{CY}, -F_M^{CZ}, -M_M^{CX}, 0, -M_M^{CZ}] \quad (3)$$

Учитывая (3) с помощью системы управления ДРК [8] могут быть сформированы тяги двигателей АНПА.

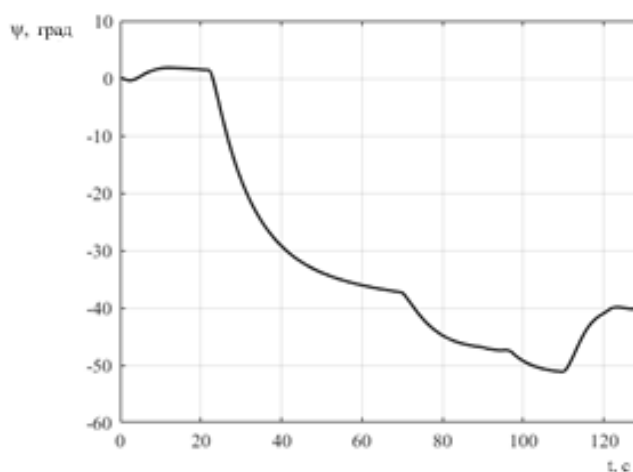
Моделирование работы АНПА с ММ

Для проведения моделирования была использована хорошо апробированная модель АНПА с 6-ти степенным ММ типа PUMA, реализованная в Matlab/Simulink [8]. Первая, четвертая и шестая степени подвижности ММ в процессе работы оставались неподвижны.

Выполнено моделирование операции по подъему и преносу подводного объекта весом 25 кг. В ходе выполнения миссии АНПА с ММ в «домашней» конфигурации подходит к объекту работ, затем происходит изменение конфигурации ММ для захвата объекта. Далее АНПА отходит от объекта, а на систему управления ДРК подаётся сигнал управления по дифференту (рис. 1б $t \in [22,70]$ с). Затем конфигурация манипулятора фиксируется и АНПА поднимает объект с поверхности морского дна (рис. 1б $t \in [71,90]$ с). Отойдя от поверхности на необходимое расстояние, на ДРК прекращается подача сигнала управления по углу дифферента, и ориентация АНПА теперь поддерживается силой тяжести объекта работ (рис. 1б $t \in [91,110]$ с). В этом положении АНПА удерживая глубину с помощью маршевых двигателей, движется в горизонтальной плоскости (рис. 1б $t \in [110,130]$ с).



а)



б)

Рис. 1. Выполнение операции: а) АНПА с ММ; б) Изменение угла дифферента АНПА

Заключение

В данной работе предложен подход к применению АНПА, оснащенных ММ, для выполнения операций по подъему объектов с поверхности морского дна. Эффективность и работоспособность предлагаемого решения подтверждены результатами численного моделирования. В реальных условиях возможность выполнения подобных грузоподъемных операций будет зависеть

от характеристик приводов манипулятора, прочности конструкции АНПА и ММ, а также от условий окружающей среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>.

Список литературы

1. Marani G., Choi S. K., Yuh J. Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs // Ocean Engineering. 2009. Vol. 36. № 1. С. 15–23.
2. Коноплин А.Ю., Денисов В.А., Даутова Т.Н., Кузнецов А.Л. Технология использования ТНПА для комплексного исследования глубоководных экосистем // Подводные исследования и робототехника. 2019 №4(30) С. 4-12.
3. Eyles D.J., Bruce G.J. Cargo lifting arrangements // Ship Construction. 2012. pp. 293-295.
4. Киселев Л. В, Костенко В.В., Медведев А.В. К оценке динамических характеристик АНПА ММТ-3500 на основе модельных и экспериментальных данных // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3(41). С. 33–44.
5. Tangirala S., Dzielski J.A. Variable Buoyancy Control System for a Large AUV // IEEE Journal of oceanic engineering. 2007. N 32(4). pp. 762–771.
6. Пат. № RU 164 034 U1, Российская Федерация. Автономный подводный необитаемый аппарат планирующего типа:/ Гафуров С. А.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева" (СГАУ) - № 2015152180, заявл. 04.12.2015; опубл. 20.08.2016.
7. Konoplin A. The system of automatic stabilization of an underwater vehicle in hover mode with a multi-link manipulator operating. 2015. pp. 30-38.
8. Konoplin A., Krasavin N., Vasilenko R. AUV With Additional Thruster Stabilization System to Perform Contact Manipulation Operations //2023 International Conference on Ocean Studies (ICOS). – IEEE, 2023. – pp. 085-089.

А.Ю. Коноплин, к.т.н., kayur-prim@mail.ru
А.П. Юрманов, магистр, yurmanov_a@mail.ru
А.Ю. Фомина, стажер-исследователь, af3823776@gmail.com
Д.В. Копылов, м.н.с., аспирант, kopylov.dvl@yandex.ru
Институт проблем морских технологий
им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения
Российской академии наук, г. Владивосток

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТЫКОВКИ НПА К ОБЪЕКТУ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ ОПОР

Аннотация: В докладе представлен метод автоматической стыковки необитаемого подводного аппарата (НПА) с объектом проведения манипуляционной операции на сложном рельефе дна. Ключевым элементом НПА являются телескопические опоры, которые автоматически выдвигаются на необходимую длину после анализа рельефа дна и соприкосновения с ним. Такая конструкция обеспечивает устойчивость платформы, стабилизацию положения НПА и высокую точность позиционирования рабочего инструмента манипулятора. Метод позволяет в автоматическом режиме определять форму поверхности в зоне контакта, рассчитывать необходимую длину каждой опоры, а также результирующий вектор тяги движителей НПА для плотного прижатия к объекту. В результате обеспечивается точное позиционирование и жесткая фиксация НПА, что критически важно для работы бортового манипулятора. Работоспособность метода подтверждена численным моделированием в Matlab/Simulink с визуализацией в симуляторе CoppeliaSim.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, телескопические опоры, автоматическая стыковка, триангуляционная поверхность.

A.Y. Konoplin, Ph.D., kayur-prim@mail.ru
A.P. Yurmanov, yurmanov_a@mail.ru
A.Y. Fomina, af3823776@gmail.com
D.V. Kopylov, kopylov.dvl@yandex.ru
Academician M.D. Ageev Institute
of Marine Technology Problems
Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR AUTOMATIC DOCKING OF AN UUV TO A WORK OBJECT USING TELESCOPIC SUPPORTS

Abstract: Accurate positioning of underwater vehicles on irregular seabed surfaces is essential for performing inspection and maintenance tasks on underwater infrastruc-

ture. Existing approaches, including static landing platforms, manipulator-based docking, and dynamic hovering, often fail to provide sufficient rigidity and stability under complex terrain and high reactive forces. This work proposes a new stabilization method based on four automatically deployable telescopic legs mounted around the vehicle's hull. Each leg can be adjusted independently, allowing the vehicle to adapt to uneven seabed topography and maintain a precise orientation. The proposed method offers a reliable solution for rigid fixation of underwater vehicles during operations requiring high stability.

Key words: unmanned underwater vehicle, telescopic supports, automatic docking, triangulated surface.

Обзор литературы

Задачи точного позиционирования необитаемых подводных аппаратов (НПА) в условиях сложного рельефа морского дна и значительных возмущающих гидродинамических воздействий представляют собой одну из ключевых проблем современных подводных робототехнических систем. Особая актуальность этих задач проявляется при выполнении ремонтных и диагностических операций на трубопроводах и других объектах подводной инфраструктуры, где взаимодействие с объектом осуществляется с помощью многозвенных манипуляторов (ММ).

Эффективность манипуляторов, особенно при выполнении силовых контактных операций, напрямую зависит от устойчивости и точности позиционирования самого аппарата вблизи объекта. Традиционные методы стабилизации [1] являются энергозатратными, недостаточно точными и не способны обеспечить жёсткую фиксацию НПА с ММ вблизи объекта.

В работе [2] был предложен альтернативный подход, основанный на стыковке НПА с использованием бортовых ММ с подводными платформами, имеющими произвольную пространственную ориентацию. При этом один манипулятор выполняет технологические операции, в то время как второй обеспечивает удержание аппарата в рабочей зоне. Данное решение эффективно на объектах инфраструктуры, где есть специальные платформы (например, добычные комплексы), но неприменимо для работы с объектами, лишенными стыковочных узлов.

В работе [3] предложен подход к позиционно-силовому управлению НПА с ММ. Для обеспечения устойчивости аппарата рассматривается использование статичных опор, обеспечивающих жесткую фиксацию НПА с объектом работ. Однако данный подход обеспечивает надежную жесткую фиксацию только на ровной поверхности и при нестрогих требованиях к ориентации НПА.

Для решения этой проблемы целесообразно заменить статичные опора на телескопические, которые позволят компенсировать неровности и стабилизировать аппарат в заданном пространственном положении в непосредственной близости к объекту работ. В данной работе предлагается метод автоматической стыковки, использующий телескопические опоры. При этом на основе данных, поступающих от бортовой системы технического зрения (СТЗ), предлагается определять рельеф поверхности в месте контакта. После чего необходимо рассчитывать длину каждой опоры для посадки аппарата, а также вектор тяги, обеспечивающий дополнительное прижатие к объекту для надежной фиксации.

Метод автоматической стыковки НПА с использованием телескопических опор

Перед посадкой НПА необходимо определить форму поверхности в месте контакта с объектом проведения технологической операции. Для этого используется СТЗ, позволяющая получить облака точек поверхности. Эти облака задаются в прямоугольной системе координат (СК) $Oxyz$, жестко связанной с корпусом НПА, где x, y, z – оси связанной СК, начало которой O расположено в центре величины (водоизмещения) АНПА, ось x совпадает с горизонтальной - продольной осью НПА, ось z - с его вертикальной осью и направлена вниз, а ось y составляет с ними правую тройку. На основе облаков точек формируется триангуляционная поверхность [4] (рис. 1), представляющая собой множество треугольных пластин, сшитых между собой. Каждый k -й треугольник в триангуляции задается в СК $Oxyz$ координатами трех вершин $V_{k0}, V_{k1}, V_{k2} \in R^3$, где $k = \overline{1, g}$, g - количество треугольников.

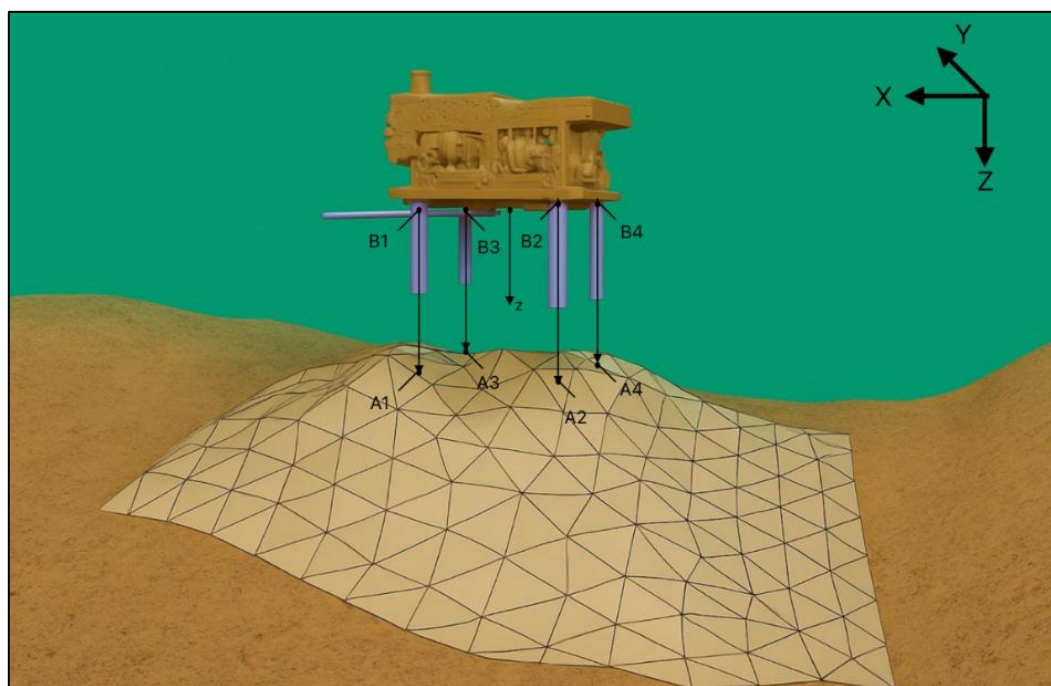


Рис. 1. НПА с телескопическими опорами и триангуляционная модель поверхности дна

Для определения необходимой длины выдвижения каждой опоры требуется рассчитать точки контакта с поверхностью. Для этого из точек крепления опор B_i , где $k = \overline{1, 4}$ проецируются лучи в направлении единичного вектора $\vec{z}$. Точка пересечения каждого луча с триангуляционной поверхностью определяется с помощью алгоритма Моллера-Трумбора [5]:

$$A_i = B_i - \frac{((B_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{((- \vec{z}) \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{z}.$$

Сначала рассчитываются модули векторов d_i , чтобы определить, на какую длину нужно выдвинуть каждую опору.

$$d_i = \sqrt{A_{i_x} B_{i_x}^2 + A_{i_y} B_{i_y}^2 + A_{i_z} B_{i_z}^2}.$$

Среди всех найденных модулей определяется максимальный $d_{l_{\max}}$ и для опоры, соответствующей данному вектору, принимается максимально допустимая длина $l_{\max}$. Для нахождения остальных значений длин, на которые необходимо выдвинуть телескопические опоры, необходимо найти разницу δ между максимальным расстоянием от основания опоры до точки контакта $d_{l_{\max}}$ и ограничением по выдвигаемой длине $l_{\max}$:

$$\delta = d_{l_{\max}} - l_{\max}.$$

Значения остальных длин находятся путем вычитания из них величины δ :

$$l_i = d_i - \delta.$$

Таким образом рассчитываются длины всех опор для посадки на неровную поверхность. Расчёт направлен на обеспечение максимального зазора между днищем НПА и донной поверхностью, что исключает риск контакта ММ с объектом или рельефом.

Для плотного прижатия НПА к поверхности необходимо определить направление результирующего вектора тяги $\vec{n}_{mid}$ движителей НПА с целью достижения максимального значения силы трения покоя в точке контакта каждой опоры с поверхностью контакта. Определение этого вектора производится с использованием взвешенного среднего вектора нормали, вычисляемого по нормальям всех четырёх поверхностей, с которыми контактируют опоры:

$$\bar{n}_{mid} = \frac{\sum_{i=1}^4 n_i}{\|\sum_{i=1}^4 n_i\|},$$

где n_i – нормаль поверхности под -ой опорой.

Таким образом, рассчитанные значения длин каждой из телескопических опор и результирующий вектор тяг двигателей НПА позволяют выполнять манипуляционные операции в рабочей зоне, сохраняя при этом устойчивость робототехнического комплекса и обеспечивая высокую точность выполнения этих операций.

Численное моделирование

Для подтверждения работоспособности и оценки эффективности предложенного метода было проведено численное моделирование в среде Matlab/Simulink с последующей визуализацией в симуляторе CoppeliaSim (рис. 2). В качестве динамической модели использовалась апробированная модель НПА с ММ [6], дополнительно оснащенная четырьмя телескопическими опорами. В ходе экспериментов моделировались различные типы рельефа дна, а также отрабатывались технологические операции, выполняемые манипулятором. Результаты подтвердили, что реализованный подход позволяет осуществлять технологические манипуляционные операции даже в условиях сложного рельефа дна.

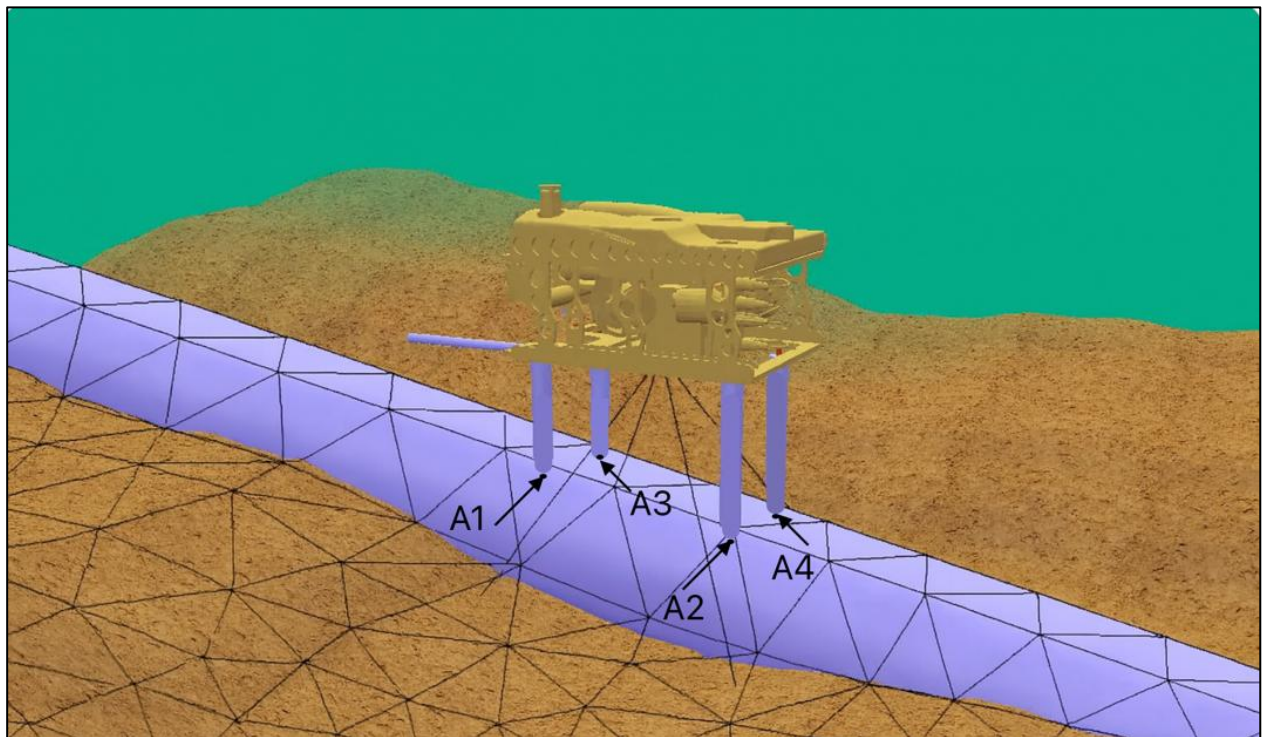


Рис. 2. Результат визуализации предложенного метода

Список литературы

1. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем манипуляторе. Часть 1// Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №6. – С. 53-56.
2. Коноплин А. Ю., Пятавин П. А. Метод автоматической стыковки необитаемых подводных аппаратов с подводными платформами с использованием бортовых многозвенных манипуляторов // *Подводные исследования и робототехника*. – 2024. – № 2 (48). – С. 38–47.3.
3. Патент РФ № 2827123С2, Бюл. № 19 от 04.07.2023. Способ позиционно-силового управления автономным необитаемым подводным аппаратом с многостепенным манипулятором / Зуев А. В., Филаретов В. Ф., Тимошенко А. А.
4. Fast triangulation of unordered point clouds [Электронный ресурс] // Point Cloud Library. — б.г., режим доступа - <https://pointclouds.org>
5. Möller T., Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection // *Journal of Graphics Tools*. – 1997. – Vol 2, Is. 1. – pp. 21–28.
6. Konoplin A., Krasavin N., Yurmanov A., Piatavin P., Vasilenko R., Panchuk M. Development of a Control System for Underwater Vehicles with Multilink Manipulators Performing Contact Manipulation Operations // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12, No. 7. – Article 1126.

Н.А. Красавин, науч. сотр., аспирант, NAKrasavin@yandex.ru

А.Ю. Коноплин, к.т.н., konoplin@marine.febras.ru

Д.В. Копылов, м.н.с., аспирант, kopylov.dvl@yandex.ru

Е.Е. Калентьева, стажер-исследователь, магистрант, kkalentevaa@yandex.ru

Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного
отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Россия

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ПОДВОДНОГО МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

Аннотация: В докладе рассматривается модификация рекуррентного алгоритма решения обратной задачи динамики для подводных многозвенных манипуляторов, установленных на необитаемых подводных аппаратах. Разработанная модификация учитывает зависимость сил вязкого трения от реальной скорости набегающего потока жидкости, обусловленной попаданием одних звеньев в спутный след других. Для этого с помощью предварительной виртуальной продувки отдельного звена в среде SOLIDWORKS Flow Simulation были получены экспериментальные данные, которые были использованы для вычисления фактических скоростей набегающего потока на сегменты звена. Было выполнено численное моделирование работы алгоритма в среде Matlab/Simulink. Результаты проведенного моделирования показали эффективность использования разработанной модификации алгоритма для повышения точности вычислений.

Ключевые слова: подводный многозвенный манипулятор, обратная задача динамики, спутный след, набегающий поток, необитаемый подводный аппарат.

N.A. Krasavin, NAKrasavin@yandex.ru

A.Yu. Konoplin, Ph.D., konoplin@marine.febras.ru

D.V. Kopylov, kopylov.dvl@yandex.ru

E.E. Kalenteva, kkalentevaa@yandex.ru

Institute of Marine Technology Problems, named after Academician M.D. Ageev, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

APPROACH TO SOLVING THE INVERSE DYNAMICS PROBLEM OF AN UNDERWATER MULTILINK MANIPULATOR

Abstract: The paper considers a modification of the recurrent algorithm for solving the reverse dynamics problem for underwater multi-link manipulators. The developed modification takes into account the dependence of viscous friction forces on the actual velocity of the incident flow due to the relative position of the manipulator links. By means of preliminary virtual purging of a separate link in the SOLIDWORKS Flow Simulation environment, experimental data was obtained, which were used to calculate the

actual velocities of the incident flow to the segments of the link. A numerical simulation of the operation of the developed algorithm was performed in the MATLAB/Simulink. The results of the simulation showed the effectiveness of using the developed modification of the algorithm to increase the accuracy of the calculations.

Key words: underwater multilink manipulator, inverse dynamics, wake, incident flow, unmanned underwater vehicle.

Введение

В последнее время усилия многих научных коллективов нацелены на повышение степени автономности необитаемых подводных аппаратов (НПА), оснащаемых многозвенными манипуляторами (ММ) [1, 2]. При этом точность работы этих комплексов во многом зависит от корректного определения силовых и моментных воздействий окружающей жидкости на работающий ММ и его аппарат-носитель. Для их вычисления обычно используют различные алгоритмы решения обратной задачи динамики (ОЗД). При этом уже известно множество методов определения параметров взаимодействия жидкости со звеном [3, 4], а также различных модификаций существующих алгоритмов ОЗД [5, 6]. Однако известные подходы не учитывают, что в процессе движения ММ его звенья могут попадать в спутный след друг друга, что может привести к значительному снижению скорости набегающего потока на звено, лежащее в спутном следе. В результате снижается точность определения сил вязкого трения, действующих на звенья ММ, а, следовательно, точность работы ММ. Поэтому для повышения точности управления многозвенником в работе ставится задача модификации существующего алгоритма решения ОЗД подводного ММ [5], в котором для звеньев, попадающих в спутный след соседних звеньев, будут учитываться фактические скорости набегающего потока жидкости.

Модификация алгоритма решения ОЗД ММ с учетом особенностей взаимного расположения звеньев

При решении указанной задачи в первую очередь в SOLIDWORKS Flow Simulation была проведена серия виртуальных экспериментов, в ходе которых цилиндрическое звено ММ диаметром 0,2 м обтекалось под прямым углом невозмущенным потоком жидкости (рис. 1-а) со скоростями от 0,01 до 0,5 м/с. В результате были получены эпюры скоростей потока жидкости в спутном следе за звеном (рис. 1-б), которые в дальнейшем будут использоваться при расчете уточненных значений скоростей набегающего потока на звенья, попадающие в спутный след.

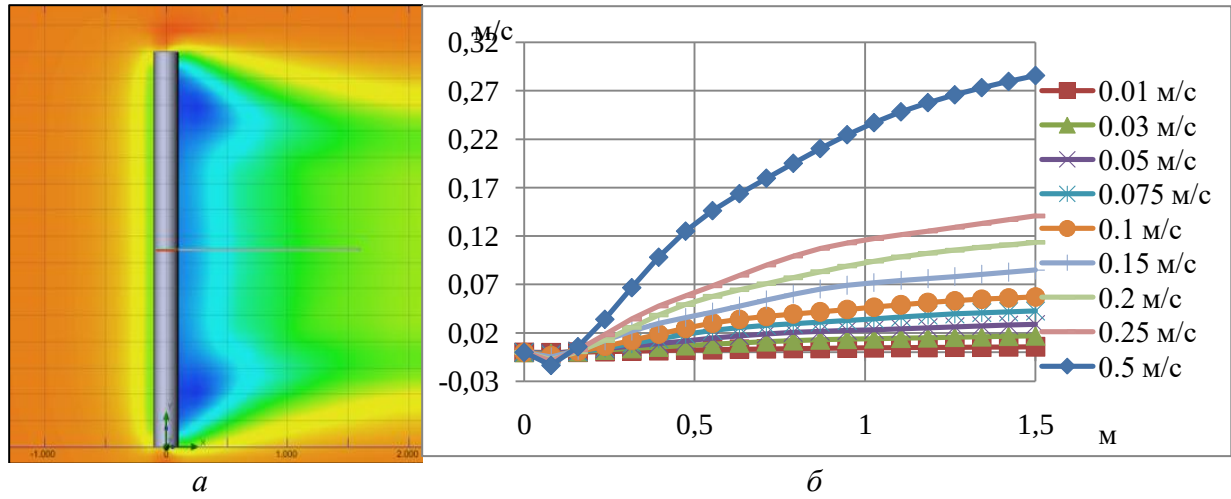


Рис. 1. а – сечение спутного следа за звеном ММ; б – кривые профилей скорости потока жидкости в следе за звеном

На втором этапе с использованием полученных экспериментальных данных (рис. 1-б) по предложенным соотношениям рассчитывались фактические скорости набегающего потока жидкости для тех сегментов звеньев ММ, которые попадают в спутный след соседних звеньев. На рисунке 2 приведён пример расположения звена i в спутном следе соседнего звена k .

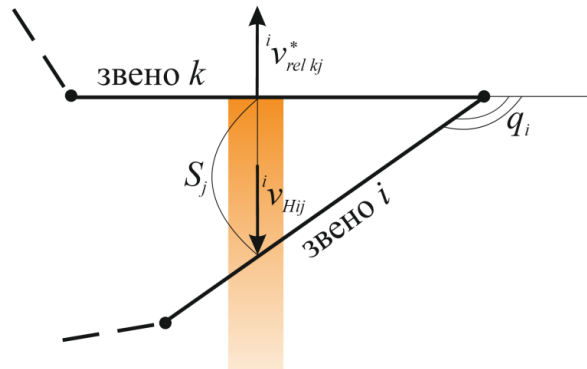


Рис. 2. Звено i в спутном следе соседнего звена k

Фактическая скорость потока $v_{Hij}^i \in R^3$, набегающего на попавший в спутный след сегмент j звена i , рассчитывается следующим образом:

$$v_{Hij}^i = v_{ij}^i - f(S_j, v_{rel kj}^*), j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где $v_{ij}^i \in R^3$ – собственная скорость движения сегмента j звена i ; N – число сегментов, на которые разбивается звено i ; $f(S_j, v_{rel kj}^*) \in R^3$ – скорость жидкости в спутном следе непосредственно перед сегментом j звена i . $f(S_j, v_{rel kj}^*)$ рассчитывается с учётом полученных на первом этапе зависимостей (рис. 1) на основе расстояния S_j между сегментом j звена i и сегментом j соседнего звена

k , создающего спутный след, а также скорости ${}^i v_{rel\ kj}^* \in R^3$ движения сегмента j звена k относительно жидкости (рис. 2).

Полученные уточнённые значения скоростей набегающего потока (1) для сегментов звеньев, попавших в спутный след, в дальнейшем подставляются в известный алгоритм [5], что позволяет более точно рассчитать величины результирующих сил и моментов вязкого трения, действующих на указанные степени подвижности, а также на точку крепления ММ к НПА.

Исследование качества работы разработанной модификации алгоритма решения ОЗД

Для оценки эффективности предложенной модификации алгоритма она была интегрирована в верифицированную модель установленного на НПА подводного ММ с шестью степенями подвижности, описанную в работе [2] и реализованную в среде Matlab/Simulink. Модель включает подсистемы, отвечающие за управление электроприводами, генерацию заданной траектории, решение прямой и обратной задач кинематики, а также ОЗД для рассматриваемого ММ. При численном моделировании предполагалось, что НПА прочно удерживается вторым ММ или совершил посадку на грунт, и основание ММ неподвижно. Полный перечень параметров модели приведён в [2], а ее основные характеристики представлены далее: диаметр звеньев – 0.2 м, длина и масса звена 1 – 0.1 м, 0.8 кг; длина и масса звеньев 2 и 3 – 1 м, 8 кг; длина и масса звена 4 – 0.3 м, 1 кг.

Для верификации предложенного алгоритма были заданы условия, при которых второе звено на определённом участке траектории оказывалось в спутном следе, формирующемся за третьим звеном. Для этого приводы второго и третьего звеньев вращались с одинаковой угловой скоростью $-0,5$ рад/с.

Анализ результатов моделирования показывает, что начиная с момента времени около 3,3 секунд угол поворота третьего звена q_3 становится меньше $-\frac{\pi}{2}$ (рис. 2, q_3), и второе звено начинает входить в спутный след третьего звена. В этот момент наблюдается заметное снижение момента силы вязкого трения, действующего на привод второго звена, и к концу моделирования его фактическое значение (рис. 3, ${}^2M_{Rp2z}$) оказывается примерно втрое меньше по сравнению моментом (рис. 3, ${}^2M_{Rp2z}^*$), рассчитанным с использованием исходного алгоритма [5].

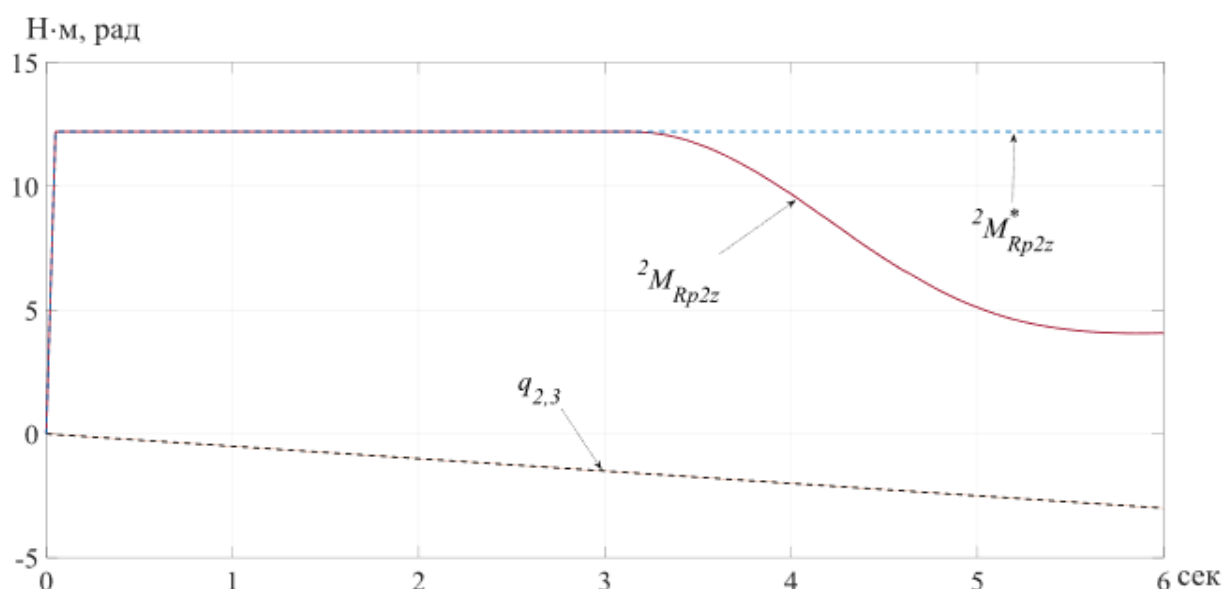


Рис. 3. Результаты тестового движения ММ

Заключение

В работе предложена модификация рекуррентного алгоритма решения ОЗД для подводного ММ, в которой учитывалось влияние спутного следа, формирующегося за звеном, на скорость потока, набегающего на смежные звенья ММ. Для уточнения скоростей в спутном следе использованы данные численного моделирования обтекания отдельного звена в SOLIDWORKS Flow Simulation. Полученные зависимости позволили скорректировать расчёт скорости набегающего потока на звенья, попадающие в спутный след. Результаты моделирования в Matlab/Simulink продемонстрировали работоспособность и эффективность предложенного подхода. Разработанная методика может быть адаптирована и для других алгоритмов решения ОЗД подводных ММ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>

Список литературы

1. Antonelli G. Underwater Robots (3rd ed.) – Springer Tracts in Advanced Robotics, 2014. – 294 p.
2. Konoplin A., Krasavin N., Yurmanov A., Piatavin P., Vasilenko R., Panchuk M. Development of a control system for underwater vehicles with multilink manipulators performing contact manipulation operations. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 7. 1126.

3. Koval E. V. Automatic stabilization system of underwater manipulation robot. OCEANS '94, Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation, 1994, 1, pp. 807-812.

4. McLain T. W., Rock S. M., Lee M. J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system. Autonomous Robots, 1996, 2-3, pp. 213-232.

5. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. – № 6. – 2014. – С. 53-56.

6. Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Тимошенко А. А. Идентификация параметров взаимодействия звеньев подводных манипуляторов с вязкой средой для точного автоматического выполнения манипуляционных операций. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. – № 2. – 2025. – С. 98–108.

Б.И. Крючков, д.т.н., начальник лаборатории, b.kryuchkov@gctc.ru
В.М. Усов, д.м.н., проф., главный научный сотрудник, v.usov@gctc.ru
ФГБУ НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина, Звездный городок Моск. обл., Россия
Ю.А. Бубеев, д.м.н., проф., заместитель директора по научной работе, bubeev@imbr.ru
А.В. Иванов, к.м.н., заведующий лабораторией, avivanov@imbr.ru
ГНЦ РФ – ИМБП РАН, Москва, Россия

ВОЗМОЖНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОСМОНАВТОВ ПО РЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ ДО- И ПОСЛЕПОЛЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Аннотация: Опыт пилотируемых полетов на МКС показал, что под действием комплекса неблагоприятных факторов орбитального полета происходит снижение резервов адаптации и работоспособности космонавтов. На завершающих этапах полета это сопряжено с повышенным риском снижения результативности полетных операций. В этой связи актуальна разработка методик мониторинга резервов работоспособности при моделировании деятельности экипажа в комплексных наземных экспериментах, примером которых могут служить до- и послеполетные эксперименты в ЦПК имени Ю.А. Гагарина и длительные изоляционные эксперименты в ИМБП РАН (МАРС-500, серия SIRIUS и др.).

Составной частью программ этих экспериментов является мониторинг работоспособности космонавтов на наиболее сложных этапах полета. В ходе проведенных изоляционных экспериментов отработаны различные подходы к оценке состояния космонавта по речи (экспертные оценки специалистов медицинской психологии, количественные оценки акустических характеристик речи, контент-анализ речевой коммуникации в группах). На практике выявляется потребность в дальнейшем совершенствовании методов детектирования нарушений состояния человека, в числе которых рассматриваются нейросетевые технологии, показывающие высокий процент точного распознавания контролируемых состояний по речи. В докладе рассматривается возможность расширения методического оснащения до- и послеполетных экспериментов бесконтактными методами на базе нейросетевых технологий детектирования состояния человека по речи, исходя из применяемых в изоляционных экспериментах способов акустического анализа речевой информации.

Ключевые слова: деятельность космонавтов, наземное моделирование программ полетов, мониторинг работоспособности, бесконтактные технологии, акустический анализ речевой информации, нейросетевые модели, детектирование состояния по речи.

THE ABILITY TO RECOGNITION OF COSMONAUTS' PERFORMANCE CAPABILITIES BY SPEECH USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN PRE- AND POST-FLIGHT EXPERIMENTS

B.I. Kryuchkov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory, b.kryuchkov@gctc.ru

V.M. Usov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Senior Researcher, v.usov@gctc.ru

Federal State Organization Yu.A.Gagarin Research&Test Cosmonaut Center,
Star City, Moscow Region, Russia

Yu.A. Bubeev, Doctor of Medical Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific Work, bu-beev@imbp.ru

A.V. Ivanov, Candidate of Medical Sciences, Head of the Laboratory, avivanov@imbp.ru
SSC RF – IMBP RAS, Moscow, Russia

Abstract: The experience of manned flights on the ISS has shown that under the influence of a complex of unfavorable factors of orbital flight, the reserves of adaptation and performance capabilities of cosmonauts decrease. In the final flight stages, this is associated with an increased risk of reducing the effectiveness of flight operations. In this regard, it is relevant to develop methods for monitoring performance reserves when modeling crew activities in complex ground-based experiments, an example of which is the pre- and post-flight experiments at the Yu.A.Gagarin Research&Test Cosmonaut Center and long-term isolation experiments at the IMBP RAS (MARS-500, SIRIUS series, et al.).

An integral part of the programs of these experiments is the monitoring of the cosmonauts' performance capabilities at certain stages of the flight, which are the most difficult in terms of safety criteria. For this purpose, realistic models of operator activity are used, implemented on semi-natural stands and in the form of computer models. An integral part of the programs of these experiments is the monitoring of the cosmonauts' working capacity at certain stages of the flight, which are the most difficult in terms of safety criteria. During the isolation experiments, various approaches to assessing the condition of a cosmonaut by speech were developed (expert assessments by medical psychology specialists, objective assessments of acoustic characteristics of speech, content analysis of speech communication in groups). These methods are applicable to the conditions of pre- and post-flight experiments. In practice, there is a need for further improvement on a contactless basis of methods for detecting human disorders by speech, among which are considered promising neural network technologies showing a high percentage of accurate recognition of controlled conditions. The report examines the possibility of expanding the methodological equipment of pre- and post-flight experiments with contactless methods based on neural network technologies for detecting the human condition by speech, focusing on the acoustic analysis methods of speech information, used in isolation experiments.

Keywords: cosmonaut activities, ground-based flight program modeling, performance monitoring, contactless technologies, acoustic analysis of speech information, neural network models, speech detection.

Вопросы надежности деятельности космонавтов в длительных космических полетах традиционно занимают одно из первых мест в экспериментальных работах ряда ведущих научных организаций страны. Одно из актуальных направлений представлено разработкой методик мониторинга резервов работоспособности при моделировании деятельности экипажа в комплексных наземных экспериментах, примером которых могут служить до- и послеполетные эксперименты в ЦПК имени Ю.А. Гагарина и длительные изоляционные эксперименты в ИМБП РАН (МАРС-500, серия SIRIUS). Под действием невесомости и других экстремальных факторов космического полета работоспособность космонавта снижается, о чем свидетельствует большое число научных исследований и экспериментов, проведенных на МКС и в ходе длительных изоляционных экспериментов на базе ИМБП РАН [1].

Снижение физической и умственной работоспособности закономерно ведет и к снижению надежности операторской деятельности.

Напряжённая работа космонавтов в планируемых перспективных миссиях ставит перед исследователями человеческого звена вопрос, каким образом контролировать риски снижения работоспособности в свете приоритетных целей сохранения высокой надёжности при управлении ПКА.

Для получения данных о влиянии факторов длительных орбитальных полетов на динамику работоспособности космонавтов на заключительных этапах миссии в ЦПК имени Ю.А. Гагарина проводится серия экспериментов с участием космонавтов до и после полетов на МКС на модельных аналогах перспективных ПКА [2]. Для моделирования предложена трехмодульная структурная схема (рис. 1), которая включает: модуль предполетных (фоновых) наземных экспериментов; модуль полетных экспериментов, определяющих особенности деятельности космонавтов на МКС; модуль послеполетных наземных экспериментов [3].

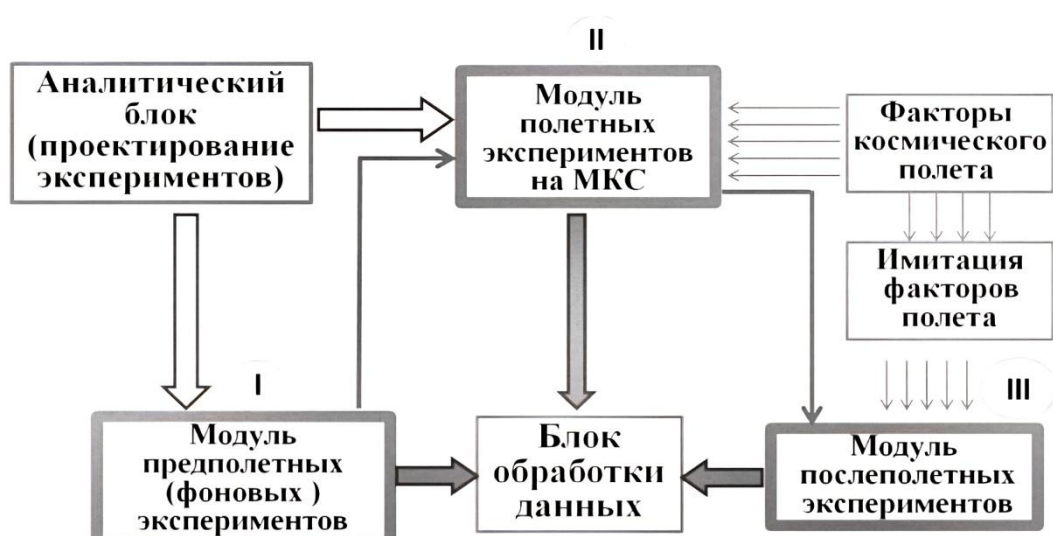


Рис. 1. Структурная схема трехмодульной модели исследований.

Применение такой схемы позволяет выявлять эффекты изменения состояния, непосредственно связанные с выполнением текущих операций, сопоставляя их с теми изменениями состояния работоспособности, которые определяются комплексом факторов длительного полета на МКС. Фактически, этот подход может служить основой для разметки данных для обучения нейросетей распознаванию текущего состояния.

В ходе экспериментов при выполнении ручных операций управления ПКА осуществлялись медицинское наблюдение, мониторинг и регистрация физиологических параметров. Возможности получения объективных данных мониторинга динамики работоспособности в данной постановке экспериментальной модели, на наш взгляд, далеко не исчерпаны в полной мере, так как перечисленные методы медицинского и физиологического контроля имеют известные практические ограничения (по критериям трудоемкости, оперативности оценок, контактного характера съема данных).

К перспективным составным элементам системы мониторинга состояния работоспособности относят методы, основанные на неинвазивных методиках регистрации и дистанционно обработки показателей, и при этом не затрудняющих выполнение основных видов рабочих операций. Современные бесконтактные способы позволяют в более широком диапазоне условий вести мониторинг состояния работника производственной среды, а активно разрабатываемые нейросетевые методы контроля состояния работоспособности, в частности, детектирования утомления по речи, показывают высокий процент точного распознавания [4].

Во многих работах по применению нейросетевых технологий продемонстрировано использование для распознавания состояний таких источников данных, как звуковой поток и разговорная речь. Для акустического анализа аудиозаписей речи может использоваться компьютерная программа Praat, которая позволяет оценивать основные акустические характеристики речевого аудиосигнала: частота основного тона (ЧОТ), форманты, интенсивность сигнала (громкость), число голосовых импульсов, число нуль-пересечений, вариативность (дребезг) речевого сигнала по амплитуде и частоте, продолжительность пауз и др. Выходные численные характеристики приложения Praat позволяют осуществлять контроль изменения функционального состояния человека и оценить степень психофизиологической напряженности говорящего, что нашло практическое воплощение в работах [5,6]. Эти выходные характеристики можно использовать как исходные при построении специализированных баз данных – датасетов для обучения нейросетей.

При разработке методов детектирования нарушений состояния человека по речи на бесконтактной основе необходимо принимать во внимание хорошо отработанные в длительных изоляционных экспериментах методы анализа акустических характеристик речевого сигнала, поскольку применение нейросетевых технологий означает необходимость проведения полного цик-

ла работ, разработку аппаратуры и методик, позволяющих осуществить сбор речевой продукции в контексте профессиональной деятельности, верифицировать речевые данные по показателям результативности выполнения задач и по результатам дополнительного обследования участников экспериментов с помощью методов физиологии труда. В этой связи представляется целесообразным ориентироваться на решения, описанные в исследованиях [4,5,6], и рассматривать их как прототипы для планируемых собственных разработок.

Литературный анализ состояния вопроса показывает, что основной проблемой для исследователей конкретных видов трудовой деятельности, особенно на начальных этапах освоения искусственных нейросетей, является наличие качественных наборов речевых данных или корпусов речевых данных (далее – датасетов), составляющих основу машинного обучения. Сложность этой проблемы состоит том, что на сегодня российские датасеты еще не разработаны для универсального применения, и для каждого вида профессионального обусловленного снижения работоспособности исследователям необходимо самостоятельно разрабатывать датасеты собственной конструкции и полностью проходить весь цикл обучения и настройки модели [7].

В этой связи в числе первоочередных задач рассматривается задача формирования корпусов данных – датасетов для обучения нейросетей с учетом особенностей контингента участников экспериментов моделирования условий деятельности космонавтов заключительных этапах полета и состава верифицирующих методов оценки нарушений состояния работоспособности.

Для разметки данных для последующего обучения искусственной нейросети распознаванию снижения работоспособности будут использоваться методики и аппаратно-программные комплексы, позволяющие синхронно регистрировать психофизиологические параметры, результаты операторской деятельности, видеозаписи поведенческих реакций и аудиозапись речи и голосовых команд оператора.

Исследование выполнено в рамках базовой тематики РАН FMFR 2024-0034 и FMFR 2024-0039

Список литературы

1. Гушин В.И., Виноходова А.Г., Комиссарова Д.В., Белаковский М.С., Орлов О.И. Эксперименты с изоляцией: прошлое, настоящее, будущее // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2018. – Т. 52. – № 4. – С. 5-16. DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-4-5-16.
2. Крючков Б.И., Кондратьев А.С. Статистическое описание экспериментов по моделированию профессиональной деятельности космонавтов до и после полетов на МКС // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 2(39). – С.60-77. – DOI 10.34131/MSF.21.2.60-77.

3. Kharlamov, M.M., Kryuchkov B.I., Usov V.M., Dolgov P.P. Tasks of professional activities of cosmonauts on the Moon and in deep space: working out methods and technologies. GLEX 2021 conference proceedings, IAF Global Space Exploration Conference 2021, St. Petersburg, Russian Federation. 2021. GLEX-2021,7,4,3,x62705.brief.pdf. 2021-02-23. URL: <https://iafastro.directory/iaf/paper/id/62705/> (date of access 2025/10/27)
4. Кашевник А.М., Карпов А.А., Бубеев Ю.А., Усов В.М., Иванов А.В. Системы детектирования утомления при моделировании операторской деятельности космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – №4(49). – С.106-121.
5. Лебедева С.А., Швед Д.М., Гушин В.И. Возможности компьютерного анализа акустических характеристик речи человека-оператора условиях космического полета // Пилотируемые полеты в космос. – 2020. – № 3(36).– С.109-124. DOI 10.34131/MSF.20.3.109-124.
6. Лебедева С.А. Акустический анализ речи как метод мониторинга функционального состояния оператора в условиях моделируемых факторов космического полёта // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова.– В 3-х тт. – Том. 2. . Красноярск. (850 с.) – 2020. – С. 534-536.
7. Яковлев А.В., Матыцин В.О., Велюга В.А., Найденова К.А., Пархоменко В.А. Распознавание утомления человека на основе анализа его речи с помощью нейросетевых технологий // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2023. – Т. 12, – № 1. – С. 46–60. DOI: 10.14529/cmse230103.

Н.А. Леонтьев, аспирант, инженер, kol_leon@mail.ru
С.И. Меркулов, аспирант, инженер, Stephensonmusic@yandex.ru
Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия
АО «РЕШЕТНЁВ», г. Железногорск, Россия
И.И. Зимин, главный конструктор, ziminii@iss-reshetnev.ru
АО «РЕШЕТНЁВ», г. Железногорск, Россия

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ СЕРИЙНЫХ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Аннотация: в статье рассматриваются принципы организации роботизированной сборки повышенной точности для серийного производства малых космических аппаратов. Представлен комплексный подход, сочетающий модернизацию конструктивно-компоновочной схемы аппарата, внедрение последовательно - параллельной технологии сборки, адаптацию компонентов для захвата универсальным инструментом и интеграцию систем машинного зрения на базе ArUco-маркеров. Показано, что реализация этих решений позволяет преодолеть противоречие между высокой надёжностью и массовостью производства, обеспечивая необходимую точность, гибкость и основу для перехода к матричному изготовлению аппаратов.

Ключевые слова: роботизированная сборка, малые космические аппараты, технологичность конструкции, стапельная сборка, машинное зрение, ArUco-маркеры.

N.A. Leontev, graduate student, engineer kol_leon@mail.ru
S.I. Merkulov, graduate student, engineer Stephensonmusic@yandex.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems",
Zheleznogorsk, Russia
I.I. Zimin, main constructor, ziminii@iss-reshetnev.ru
Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems",
Zheleznogorsk, Russia

ANALYSIS OF THE PRINCIPLES OF ROBOTIC HIGH-PRECISION ASSEMBLY AND METHODS FOR IMPROVING THE MANUFACTURA- BILITY OF SMALL MASS-PRODUCED SPACECRAFT

Abstract: The article examines the principles of organizing "delicate" robotic assembly for the serial production of small spacecraft. A comprehensive approach is presented, combining the modernization of the spacecraft's structural-layout scheme, implementation of serial parallel assembly technology, the adaptation of components for universal tool gripping, and the integration of machine vision systems based on ArUco markers. It is shown that the implementation of these solutions resolves the contradiction between high reliability and mass production, ensuring the required accuracy, flexibility, and a foundation for the transition to matrix-based manufacturing of spacecraft.

Key words: robotic assembly, small spacecraft, design for manufacturability, fixture-based assembly, machine vision, ArUco markers.

Современная космическая отрасль характеризуется переходом от штучного производства к серийному изготовлению космических аппаратов (КА), что обуславливает необходимость трансформации традиционных методов сборки. Исторически сложившаяся зависимость от высококвалифицированного ручного труда становится ограничивающим фактором в условиях требований повышенной производительности и гарантированного качества.

Актуальность проблемы определяется противоречием между необходимостью сохранить высочайшую надежность сборки и одновременно многократно увеличить её эффективность. Ключевым решением выступает внедрение высокотехнологического роботизированного комплекса. Основная сложность заключается в необходимости обеспечения «деликатной» сборки, сочетающей следующие принципы:

- высокий уровень технологичности изделия;
- разделение технологических переходов на роботизированные и человеко-исполняемые;
- многократная верификация действий роботизированного процесса сборки;
- применение универсальных исполнительных устройств с обратной связью;
- использование адаптивных управляющих программ роботов на основе цифрового двойника;
- полуавтоматическое оффлайн-программирование промышленных роботов;
- роботизация сборочного участка по принципам матричного производства.

Реализация указанных принципов позволяет создать гибридные человеко-машинные производственные системы, обеспечивающие синергетический эффект за счет комбинации когнитивных способностей оператора и прецизионных характеристик робототехнических комплексов.

Внедрение высокотехнологичного комплекса «деликатной» роботизированной сборки преследует выполнение ряда взаимосвязанных целей, направленных на трансформацию производства в высокотехнологичную, управляемую и самооптимизирующуюся систему. Основной целью оптимизации компоновки и составных частей КА является создание интегрированной модульной архитектуры, обеспечивающей синергетический эффект между конструктивными, тепловыми, энергетическими и массогабаритными характеристиками аппарата. Ключевой задачей выступает разработка унифицированных стыковочных интерфейсов и стандартизированных посадочных мест, позволяющих реализовать принципы роботизированной сборки и обеспечить точность установки и подключения модулей. Особое внимание уделяется оптимизации массового распределения и положения центра масс, что напрямую влияет на динамические характеристики аппарата и эффективность системы ориентации и стабилизации. Не менее важной целью является создание предсказуемых тепловых режимов работы оборудования через рациональное размещение тепловыделяющих элементов и организацию эффективных путей теплоотвода. Стратегической задачей представляется разработка адаптивных компоновочных схем, сохраняющих функциональность при возможных модернизациях и различных конфигурациях полезной нагрузки. Достижение этих целей позволит перейти к созданию КА с повышенной технологичностью сборки, улучшенными эксплуатационными характеристиками и сниженной стоимостью жизненного цикла.

Анализ исходной конструктивно-компоновочной схемы малого космического аппарата (МКА), проведенный авторами работы [1], выявил необходимость её модернизации для обеспечения условий выполнения роботизированной сборки в части:

- разделения систем бортовой аппаратуры попанельно;
- адаптации блоков бортовой аппаратуры с целью стандартизации электрических и механических соединительных элементов (разъёмов);
- сокращения объёма и сложности кабельной сети благодаря применению базовых плат с интегрированными шинами передачи данных и питания [2].

Не менее важным аспектом технологичности сборки является адаптация конструкции устанавливаемых на борт изделий для обеспечения надёжного захвата универсальным инструментом (УИ). Для этого проектируемые модули и агрегаты должны быть оснащены стандартизированными интерфейсами захвата – технологическими элементами, рассчитанными на передачу монтажных усилий. Выбор конкретного принципа взаимодействия для КА является критически важным инженерным решением. Существует два основных подхода: удержание силой трения (рис. 1-а), при котором фиксация обеспечивается за счёт создаваемого нормального давления, и удержание за счёт формы (рис. 1-б), где надёжность позиционирования и удержания достигается путём геометрического зацепления инструмента со специальными

пазами, отверстиями или выступами на корпусе изделия. Для КА, работающих в условиях невесомости и вибрационных нагрузок при выведении, приоритет часто отдаётся принципу удержания за счёт формы, как обеспечивающему более высокую надёжность и однозначность позиционирования без необходимости поддержания постоянного силового замыкания. Однако выбор окончательного решения – фрикционного, форм-факторного или их комбинации – определяется комплексным анализом массогабаритных характеристик изделия, требуемой точности установки, величины эксплуатационных нагрузок и необходимостью минимизировать массу технологических элементов.

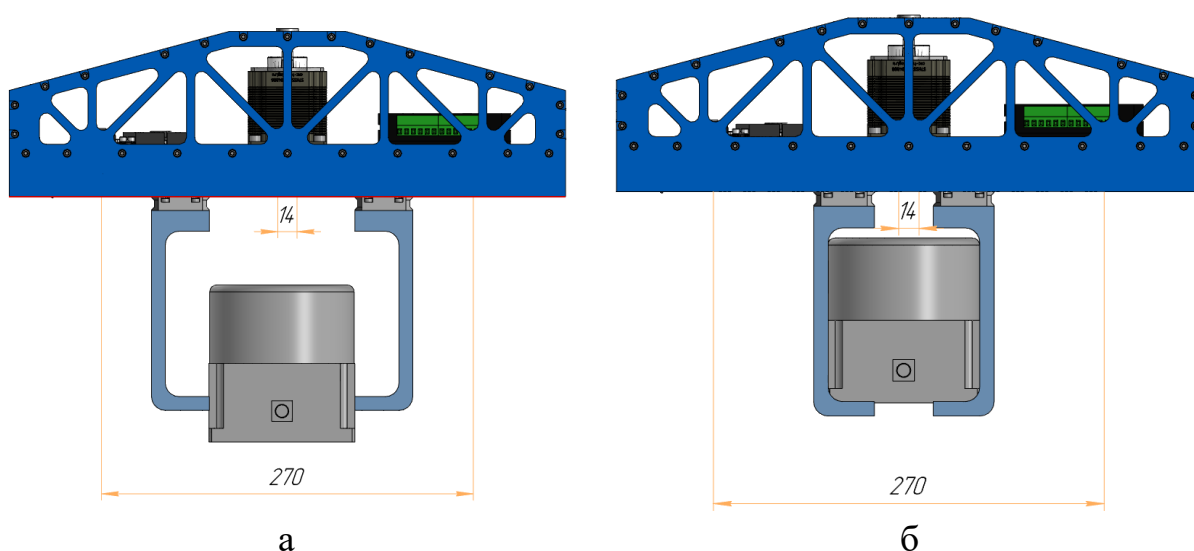


Рис. 1. Принципы силового взаимодействия инструмента с деталью: а) удержание силой трения; б) удержание за счёт формы

Для реализации роботизированной сборки МКА класса CubeSat был предложен и детально проработан принцип ступенчатой механической сборки [3]. Его ключевая особенность заключается в использовании специализированной технологической оснастки – ступеней, которые выполняют функцию точного пространственного базирования всех монтируемых компонентов на несущей панели аппарата. Данный подход позволяет декомпозировать сложный процесс сборки: компоненты предварительно позиционируются в заданные ячейки ступени (вручную или роботизированно из кассет), после чего робот, оснащённый инструментом, последовательно выполняет операции крепления. Основным критерием выбора этой технологии стала способность обеспечить высокую точность совмещения осей крепёжных винтов и резьбовых отверстий (погрешность несоосности до 0,1 мм), что критически важно для исключения технологических отказов, таких как заклинивание резьбы.

Для дальнейшего повышения точности, гибкости и автономности «деликатной» роботизированной сборки современный подход предусматривает интеграцию систем технического (машинного) зрения непосредственно в

конструкцию оснастки. Это трансформирует пассивные стапелы и ложементы в активные интеллектуальные системы. Путём нанесения на рабочие поверхности и компоненты оптических меток, таких как специализированные ArUco-маркеры (рис. 2), обеспечивается автоматическое определение пространственного положения, ориентации и идентификации изделий в реальном времени. Система зрения, считывая эти уникальные коды, позволяет роботизированному комплексу не только компенсировать возможные погрешности базирования, но и верифицировать тип детали, контролировать отсутствие перекоса и корректность её установки. Таким образом, симбиоз стапельной технологии с машинным зрением минимизирует влияние погрешностей роботов-манипуляторов и создаёт технологический фундамент для перехода к серийному матричному производству высокой точности.



Рис. 2. Технологическая оснастка для ложементов с ArUco-маркерами

Переход к серийному производству МКА требует трансформации устоявшихся методов сборки. Представленная концепция «деликатной» роботизированной сборки предлагает системный подход, основанный на синтезе адаптированной конструктивно-компоновочной схемы, специализированной технологической оснастки и интеллектуальных систем управления. Фундаментом является повышение технологичности конструкции аппарата, включающее панелирование, унификацию стыковочных интерфейсов и внедрение базовых плат, что создаёт предпосылки для автоматизации. Ключевым технологическим решением выступает стапельная сборка, обеспечивающая требуемую точность позиционирования компонентов и минимизацию технологических рисков, таких как заклинивание резьбовых соединений.

Дальнейшее развитие точности и автономности процесса достигается за счёт интеграции систем машинного зрения на базе оптических ArUco-маркеров. Данное решение трансформирует пассивную оснастку в активную измерительную систему, обеспечивающую в реальном времени верификацию, идентификацию и коррекцию пространственного положения монтируемых модулей. Реализация указанных принципов формирует основу для создания гибридных человеко-машинных производственных систем, где роботизированная сборка интегрирована с человеческим контролем.

зированный комплекс выполняет прецизионные сборочные операции, а оператор сосредоточен на задачах контроля и управления. Таким образом, предложенный комплекс мер создаёт технологический базис для перехода к серийному матричному производству МКА с гарантированными тактико-техническими характеристиками и сниженной стоимостью жизненного цикла.

Список литературы

1. Ткаченко И. С. Методические подходы к созданию и функционированию серийного роботизированного производства малых космических аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2024. – Т. 23, №3. – С. 178-194. – DOI 10.18287/2541-7533-2024-23-3-178-194. – EDN DNJSIJ.
2. Устюгов Е. В., Шафран С. В., Соболев А. А. Новая архитектура наноспутника стандарта CubeSat без использования бортовой кабельной сети // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 423-429. – DOI 10.17586/0021-3454-2018-61-5-423-429. – EDN UQDKAK.
3. Антипов Д. В., Звягинцев В. А., Михеев М. А. и др. Разработка технологической схемы роботизированной сборки малых космических аппаратов типа cubesat // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 347-356. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-1-347-348. – EDN QPEYIX.

С.И. Меркулов, аспирант, инженер, Stephensonmusic@yandex.ru
Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия
АО «РЕШЕТНЁВ», г. Железногорск, Россия

И.И. Зимин, Главный конструктор, ziminii@iss-reshetnev.ru
АО «РЕШЕТНЁВ», г. Железногорск, Россия

Р.С. Курепин, магистрант, инженер-технолог, kurepinrs@iss-reshetnev.ru
Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия
АО «РЕШЕТНЁВ», г. Железногорск, Россия

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СЕРИЙНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ

Аннотация: Рассмотрен опыт создания конструкций малых космических аппаратов серийного производства. Выделены ключевые особенности конструкции МКА для их роботизированной серийной сборки. Оценена эффективность применения роботизированной сборки при производстве МКА. Даны рекомендации по внедрению принципов серийной роботизированной сборки для перспективных МКА.

Ключевые слова: Малый космический аппарат, роботизированная сборка, серийное производство.

S.I. Merkulov, graduate student, engineer Stephensonmusic@yandex.ru
Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems",
Zheleznogorsk, Russia

I.I. Zimin, main constructor, ziminii@iss-reshetnev.ru
Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems",
Zheleznogorsk, Russia

R.S. Kurepin, master's student, process engineer, kurepinrs@iss-reshetnev.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems",
Zheleznogorsk, Russia

PRINCIPLES OF DESIGNING SMALL SPACECRAFT FOR SERIAL ROBOTIC ASSEMBLY

Abstract: The article discusses foreign experience in designing small spacecraft for mass production. The key features of small spacecraft design for their robotic mass production have been highlighted. The effectiveness of robotic assembly has been evaluated.

Recommendations are given on implementing the principles of robotic assembly for advanced small spacecrafts.

Key words: Small spacecraft, robotic assembly, serial production

За последние пять лет мировая космонавтика окончательно перешла от штучного и мелкосерийного производства в 1-10 спутников в год на одного производителя к крупносерийному и формату разработки многоспутниковых группировок. По состоянию на ноябрь 2025 года на орбите находится уже более 8 000 спутников Starlink второго поколения и более 11 000 всех поколений суммарно, 648 спутников OneWeb, при этом готовится их второе поколение. Началось развёртывание 3 236 КА Amazon Project Kuiper. Китай анонсировал развёртывание группировки GuoWang с 12 992 КА и уже запускает сотни спутников в год. Россия в этом плане является догоняющим игроком: на сегодня планируется к реализации национальный проект с развёртыванием многоспутниковых группировок.

При таких масштабах традиционная модель «ручной» сборки и интеграции космических аппаратов стала главным ограничивающим фактором. Средняя трудоёмкость одного классического геостационарного КА или даже современного телекоммуникационного спутника составляет 3 000-15 000 человеко-часов, а полный цикл от начала сборки до отгрузки на космодром — от 12 до 36 месяцев. Даже у самых продвинутых российских предприятий АО «РЕШЕТНЁВ», НПО им С.А. Лавочкина, РКК «Энергия» реальная производительность в 2025 году редко превышает 12-15 крупных КА в год.

В то же время «SpaceX» в Редмонде (штат Вашингтон) уже в 2024-2025 гг. вышла на темп более 50 спутников «Starlink» в сутки с полностью роботизированной линией финальной сборки. Это не просто автоматизация отдельных операций, это радикальное переосмысление самой конструкции космического аппарата под возможности современных промышленных роботов и систем машинного зрения.

Главный вывод, который уже сделали все лидеры рынка: дальнейшее снижение стоимости выведения и эксплуатации возможно только при условии, что конструкция КА изначально спроектирована под серийную роботизированную сборку (Design for Robotic Assembly). Если спутник требует сотен мелких винтов, ручной прокладки жгутов, индивидуальной подгонки и десятков «золотых рук» высококвалифицированных сборщиков — он заведомо неконкурентоспособен в эпоху многоспутниковых группировок.

В статье рассмотрены вопросы применения принципов в конструкции космического аппарата, делающих его пригодным для роботизированной серийной сборки с тактом от нескольких единиц до десятков спутников в сутки и как внедрение этих принципов влияет на трудоёмкость, длительность цикла, стоимость и надёжность конечного изделия [1-2].

Рассмотрены современные мировые практики «SpaceX», «Airbus», АО «РЕШЕТНЁВ», «Blue Origin» и сформулированы практические рекомендации для российских разработчиков платформ и полезных нагрузок нового поколения.

Под пригодностью конструкции космического аппарата для серийной роботизированной сборки понимается системное применение принципов Design for Manufacture and Assembly (DfMA), адаптированное под возможности и ограничения современных промышленных роботов, систем машинного зрения и космических условий эксплуатации, для этого спутник должен быть спроектирован так, чтобы его можно было собрать на полностью автоматизированной линии с минимальным или нулевым участием человека, с тактом от нескольких единиц до десятков спутников в сутки и с выходом годных не менее 98 %.

На практике это достигается выполнением целого комплекса конструкторских решений, каждое из которых решает конкретную проблему, с которой роботы до сих пор плохо справляются.

Прежде всего, конструкция должна быть глубоко модульной и иерархической. Космический аппарат делится на ограниченное число крупных заменяемых модулей, каждый из которых собирается и тестируется независимо. Оптимальное количество таких модулей — 6-10 на один спутник. Классический пример — «Starlink» второго поколения: плоский корпус-шасси, два развёртываемых крыла фотоэлектрических батарей, два антенных блока «Phased Array» и несколько мелких модулей (двигатели-маховики, звёздные датчики, батарея). Всё остальное интегрируется на уровне этих модулей ещё до финальной сборки [3].

Второй и один из самых важных критериев — радикальное сокращение количества крепёжных элементов. Целевой ориентир лидеров отрасли — минимизация крепёжных изделий на весь спутник, КА «Starlink v2 Mini» реализован с около 60 крепежными элементами. Полностью исключаются или сводятся к минимуму мелкие винты М2–М4, которые робот не может надёжно захватить и закрутить без специальной оснастки и частой перенастройки. Винты допускаются только крупные $\geq$ М6 с шестигранной головкой под стандартный роботизированный инструмент и только в силовых стыках.

На смену традиционному крепежу приходят соединения, которые робот выполняет быстро, точно и с одного подхода. В порядке убывания предпочтительности:

- защёлкивающиеся соединения;
- быстросъёмные байонетные и четвертьоборотные замки;
- клиновые, эксцентрикковые и пружинные зажимы;
- автоматические самоцентрирующиеся электроразъёмы;
- клеевые соединения с роботизированной дозировкой и УФ/термическим отверждением;
- винты.

Все соединения должны обеспечивать свободный доступ инструмента: угол подхода не менее 120–140°, отсутствие глубоких карманов и скрытых зон. Там, где это возможно, реализуется принцип односторонней сборки («one-side assembly»): робот работает только с одной стороны модуля, что резко упрощает конструкцию оснастки и сокращает количество переверотов изделия.

Ключевое значение имеет самоцентрирование и защита от ошибок. Все стыкуемые модули оснащаются конусами, фасками, направляющими штырями и втулками. Асимметрия интерфейсов делает физически невозможной неправильную установку модуля. Это особенно важно при полностью автономной работе линии, когда оператор появляется только в случае сбоя.

Стандартизация и унификация становятся обязательными. На всём спутнике используется один тип разъёмов питания и данных, один тип механического крепежа для некритичных соединений, единые механические и электрические интерфейсы между платформой и полезной нагрузкой. Именно благодаря этому «SpaceX» может собирать спутники разных модификаций «v2», «v2 Mini», «v3» на одной и той же линии без перенастройки [4].

Конструкция сознательно исключает операции, которые роботы пока выполняют плохо или слишком дорого: ручная прокладка и бандажирование жгутов полностью заменяется на печатные кабели, гибкие шлейфы, встроенные в композитные панели проводники или беспроводные оптические интерфейсы; ручная пайка уходит в прошлое — применяются только прессовые контакты, пресс-фит разъёмы и пайка в печи на уровне печатных плат; ручная укладка многослойной теплоизоляции (MLI) заменяется предварительной наклейкой на модули ещё на этапе их изготовления.

Наконец, каждый модуль и каждая стыковочная поверхность получают встроенные метки машинного зрения «fiducial markers», «DataMatrix», «AprilTag», QR-подобные коды и сопровождаются сверхточными 3D-моделями. Это позволяет программировать роботов офлайн в средах и минимизировать время обучения и отладки линии.

Только при одновременном выполнении всех перечисленных принципов конструкция космического аппарата становится пригодной для серийной роботизированной сборки. Именно такой подход уже сейчас позволяет «SpaceX», «Airbus», «Rocket Lab» и «Blue Origin» достигать циклов сборки в несколько дней и даже часов вместо месяцев и лет, которые остаются нормой для традиционных платформ.

Количественные эффекты от перехода на конструкцию, пригодную для роботизированной сборки представлены в таблице (см. табл. 1).

Таким образом, принципы серийной роботизированной сборки должны внедряться уже на стадии эскизного проекта новой платформы, что актуально для отечественных производителей КА, таких как АО «РЕШЕТНЁВ». Переделывать готовую конструкцию КА под роботизированную сборку почти невозможно и экономически бессмысленно.

Таблица 1. Эффективность перехода от стапельной к роботизированной сборке космических аппаратов

Параметр	Традиционный КА (2020–2024)	Спутник с роботизированной сборкой («Starlink v2», «Kuiper», «OneWeb Gen2»)	Улучшение, раз
Трудоёмкость	3000–15 000 чел-ч	80–300 чел-ч	10–50
Продолжительность цикла	6–24 месяца	1–7 дней (чаще 4–48 часов)	50–200
Доля стоимости трудоёмкости в общей стоимости КА	40–65 %	5–15 %	4–8
Производительность одной линии	8–20 КА в год	5000–25 000 КА в год	100+
Выход годных КА	До 100 %	98,5–99,8 %	+15–25 %
Стоимость одного КА (при серии >1000)	15–80 млн \$	0,3–1,5 млн \$	20–50
Время от идеи до запуска (новая модификация)	4–7 лет	9–18 месяцев	4–8

В тактико-технические задания на новые КА и платформы начиная с 2026 года необходимо жёстко прописывать количественные требования:

- минимизация механических крепёжных изделий на спутник;
- 100 % электрических соединений с самоцентрированием;
- отсутствие жгутов, только печатные/встроенные проводники или оптика;
- все операции сборки — с одной стороны модуля;
- обязательное наличие меток и 3D-моделей повышенной точности.

Параллельно с конструкторской документацией создавать цифровой двойник процесса сборки. Это позволяет ещё на стадии проектирования выявить 90 % «неудобных» мест.

Список литературы

1. Чеботарев В.Е., Косенко В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учебное пособие. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. – 488 с.
2. Смирнов М.А., Меркулов С.И., Зимин И.И. Малые космические аппараты и многоспутниковые орбитальные группировки АО "РЕШЕТНЁВ" // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: Сборник тезисов V Научно-практической конференции. – Железногорск: 2024. – С. 43–46.

3. Меркулов С.И., Сиротинин Д.О., Зимин И.И. Адаптация конструкции малого космического аппарата "Марафон" под серийное производство // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: Сборник тезисов V Научно-практической конференции. – Железногорск. – 2024. – С. 33-35.

4. Зимин И.И., Меркулов С.И., Смирнов М.А. Особенности разработки малого космического аппарата для обеспечения серийного производства // Решетневские чтения: материалы XXVII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. В 2 томах. Т. 1. – Красноярск: СибГУ, 2023. – С. 78-80.

А.В. Чубарь, к.т.н., доцент, AChubar@sfu-kras.ru
А.Д. Потемкин, магистрант, sahapotemkin@mail.ru
Е.А. Голубев, магистрант, evgeniy_golubev@internet.ru
Г.Л. Редкоус, магистрант, redkous_gleb@mail.ru
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА «ДИРИЖАБЛЬ»

Аннотация: В статье рассматривается актуальность применения современных дирижаблей в различных сферах деятельности, а также представлена математическая модель для описания его движения. Основное внимание уделяется составлению системы дифференциальных уравнений, учитывающих силы, действующие на дирижабль, и механизм расчёта его координат в пространстве. Модель включает в себя воздействие управляющих сил, аэродинамического сопротивления, ветра, а также использование ПИД-регуляторов для управления двигателями. Результаты моделирования иллюстрируются графиками, демонстрирующими динамику движения системы.

Ключевые слова: дирижабль, управление, ориентация в пространстве, моделирование.

A.V. Chubar, Cand.Sc., associate professor, AChubar@sfu-kras.ru
A.D. Potemkin, magister, sahapotemkin@mail.ru
E.A. Golubev, magister, evgeniy_golubev@internet.ru
G.L. Redkous, magister, redkous_gleb@mail.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

SIMULATION OF THE MOVEMENT OF AN UNMANNED AERIAL OBJECT "AIRSHIP"

Abstract: The article examines the relevance of the use of modern airships in various fields of activity, and also presents a mathematical model for describing his movement. The main attention is paid to the compilation of a system of differential equations that take into account the forces acting on the airship and the mechanism for calculating its coordinates in space. The model includes the effects of control forces, aerodynamic drag, wind, as well as the use of PID controllers to control the engines. The simulation results are illustrated by graphs demonstrating the dynamics of the system movement.

Key words: airship, control, spatial orientation, modeling.

Дирижабли, как летательные аппараты, переживают новый этап развития после длительного периода забвения, вызванного катастрофой «Гинденбурга» в 1937 году и стремительным прогрессом авиации. Современные технологии позволяют вернуть их в эксплуатацию, но уже на качественно новом уровне. В отличие от самолетов, дирижабли обладают рядом уникальных преимуществ, включая высокую грузоподъемность, экономичность и возможность длительного нахождения в воздухе, что делает их перспективными для ряда специализированных задач [1].

Области применения дирижаблей сегодня разнообразны. В грузоперевозках они могут доставлять оборудование в удаленные районы, такие как Арктика или джунгли, где традиционный транспорт нерентабелен. В туризме они предлагают уникальные возможности для панорамных путешествий без шума и вибраций, характерных для вертолетов. В военной сфере их можно использовать для разведки, наблюдения и даже в качестве мобильных платформ ПВО. Кроме того, дирижабли рассматриваются как альтернатива спутникам связи, поскольку могут длительное время находиться в стратосфере, обеспечивая покрытие связью отдаленных регионов [2].

Для создания математической модели движения беспилотного дирижабля нам необходимо учесть несколько факторов: поступательное движение, вращение, аэродинамическое сопротивление, силы тяжести и подъемную силу. Таким образом, модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, которые описывают динамику движения дирижабля (рис. 1).

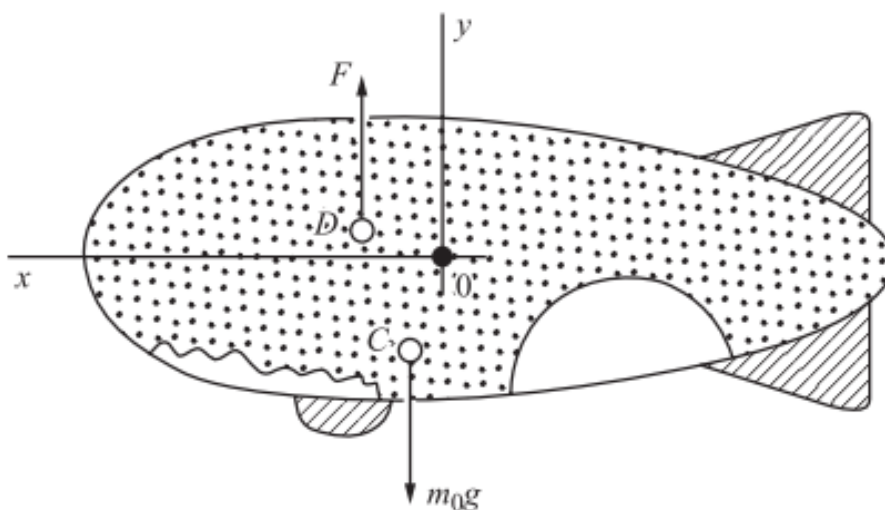


Рис.1. Основные силы, действующие на дирижабль

Уравнение движения можно составить при помощи второго закона Ньютона:

$$m \frac{dv(t)}{dt} = F_{\text{поступ}} + F_g + F_b + F_a + F_w, \quad (1)$$

где $F_{\text{поступ}}$ – силы, связанные с управлением (тяга двигателей, рулевые силы); F_g – сила тяжести (Н); F_b – сила, поддерживающая дирижабль в воздухе (обусловлена свойствами газа в оболочке); F_a – сила, противоположная движению (аэродинамическое сопротивление); F_w – внешнее воздействие, например, сила ветра.

Необходимо рассчитать силы действующие на дирижабль

а) Подъёмная сила F_b .

Эта сила зависит от объема дирижабля и плотности окружающей среды (воздуха) и направлена вверх. Математически она выражается как:

$$F_b = \rho \cdot V \cdot g \quad (2)$$

где ρ – плотность воздуха (кг/м³); V – объем дирижабля (м³); g – ускорение свободного падения (м/с²).

б) Сила тяжести F_g .

$$F_g = m \cdot g \quad (3)$$

где m – масса дирижабля (кг).

в) Сила аэродинамического сопротивления F_a .

Аэродинамическое сопротивление зависит от скорости, плотности воздуха и характеристик формы дирижабля. Математически она описывается как:

$$F_a = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v(t)^2 \quad (4)$$

где C_d – коэффициент сопротивления (зависит от формы и размера дирижабля); A – площадь сечения дирижабля; $v(t)$ – скорость дирижабля.

г) Сила ветра F_w .

Ветер является внешним возмущением, которое влияет на движение дирижабля. Сила ветра может быть моделирована как:

$$F_w = \rho_w \cdot A_w \cdot (v_w - v) \quad (5)$$

где ρ_w – плотность ветра; A_w – площадь поперечного сечения, подверженная воздействию ветра; v_w – скорость ветра; v – скорость дирижабля.

Расчёт координат беспилотного дирижабля в пространстве реализуется на основе получаемых скоростей от двух двигателей, каждый из которых управляется через ПИД-регулятор (рисунок 2). Конечные выходы моделей двигателей (модули «Редуктор») представляют собой линейные скорости движения с каждой стороны корпуса дирижабля. Эти значения используются для определения текущего положения объекта в двухмерной плоскости [3].



Рис. 2. – Структурная схема двигателя

Поскольку каждый двигатель может создавать различную скорость, то возникает разница в тяге, которая приводит к повороту корпуса. Таким образом, для расчёта координат необходимо учитывать как суммарную поступательную скорость, так и угол курса дирижабля.

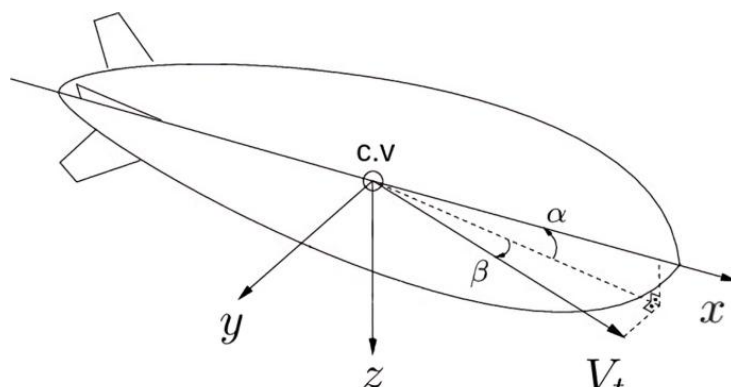


Рис.3. Аэродинамические оси дирижабля

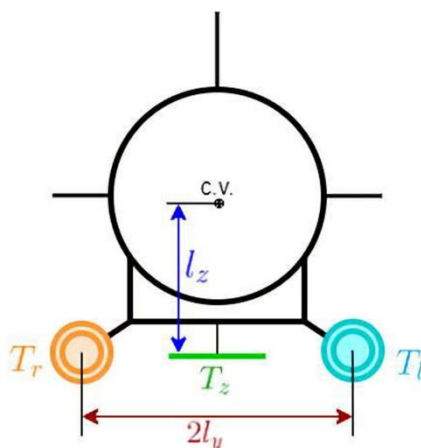


Рис. 4. Двигатель дирижабля (вид спереди)

Разность между скоростями двигателей приводит к вращению дирижабля. Угловая скорость рассчитывается по формуле:

$$\omega(t) = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{L}, \quad (6)$$

где $V_1(t), V_2(t)$ – текущие скорости от двигателя №1 и №2; L – расстояние между двигателями.

Угол поворота (курс) вычисляется как интеграл от угловой скорости:

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt, \quad (7)$$

Скорость поступательного движения (вдоль направления корпуса) определяется как среднее значение скоростей двух двигателей:

$$V_{\text{сум}} = \frac{V_1 + V_2}{2}, \quad (8)$$

Математическая модель движения описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} V_x(t) = V_{\text{сум}}(t) \cdot \cos \theta(t), \\ V_y(t) = V_{\text{сум}}(t) \cdot \sin \theta(t), \end{cases} \quad (9)$$

где V_x – движение по оси x ; V_y – движение по оси y .

Координаты дирижабля во времени определяются интегрированием полученных скоростей по осям:

$$\begin{aligned} X(t) &= \int V_x(t) dt, \\ Y(t) &= \int V_y(t) dt, \end{aligned} \quad (10)$$

Получаемые на выходе модели скорости $V_1(t)$, $V_2(t)$ формируются не напрямую, а через динамическую систему с ПИД-регулятором, инерционным звеном и учётом массы дирижабля.

На основании полученных формул расчета движения дирижабля, составим в среде SimInTech модель для расчёта траектории движения. Общая схема модели представлена на рисунке 5. Временные диаграммы, полученные в ходе моделирования, представлены на рисунке 6, 3D-визуализация – на рисунке 7.

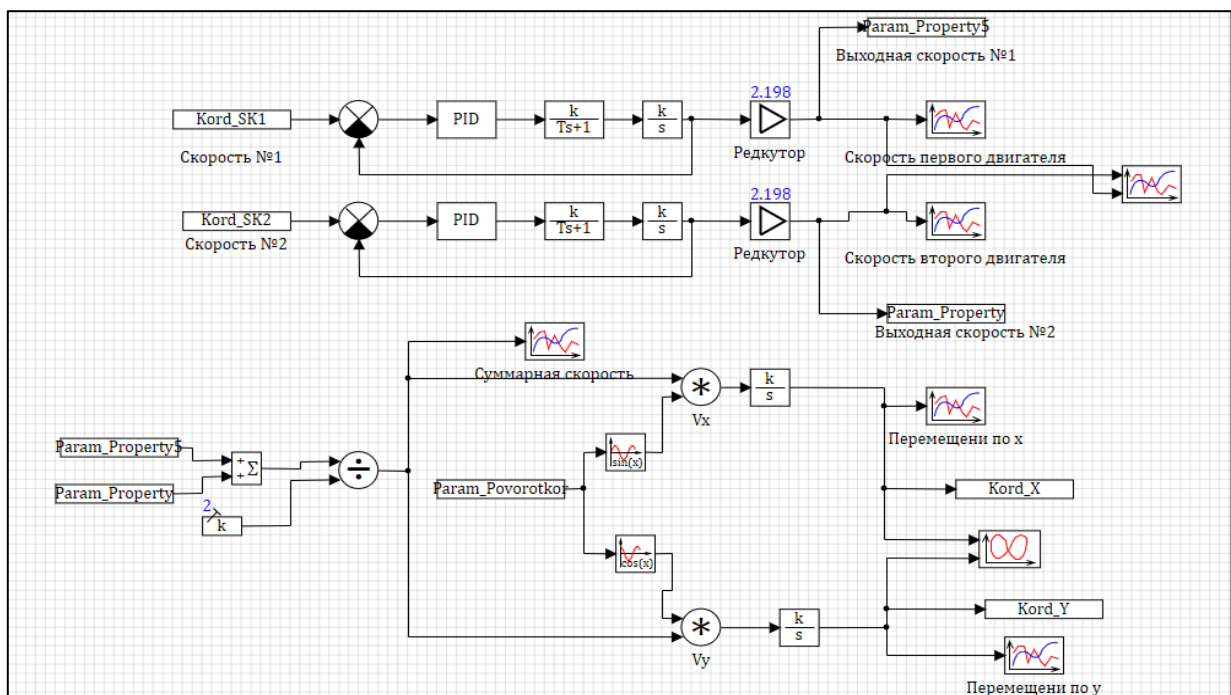


Рис. 5. Модель для расчёта траектории движения дирижабля

Таким образом, разработана математическая модель пространственного движения беспилотного дирижабля, учитывающая ключевые физические силы. Результаты моделирования демонстрируют её работоспособность для анализа и проектирования траекторий полета.

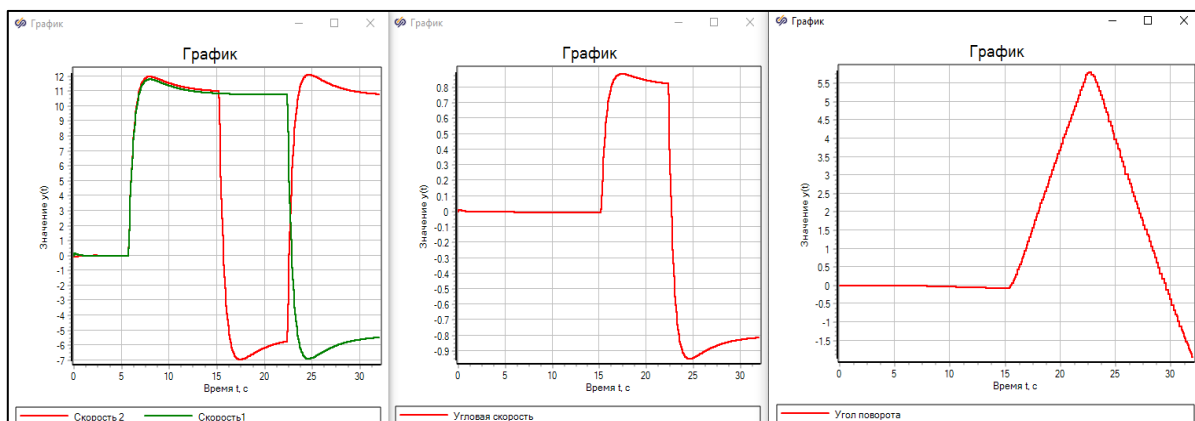


Рис. 6. Временные диаграммы, полученные при моделировании системы

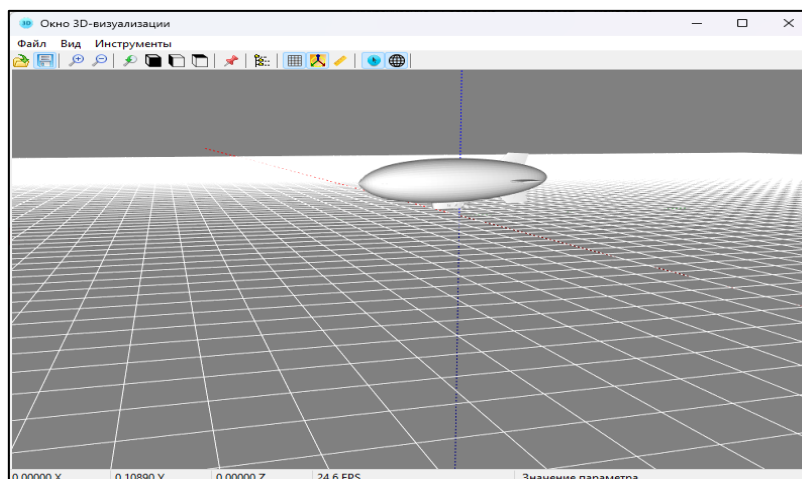


Рис. 7. 3D-визуализация процесса полёта

Список литературы

1. Воронин А.В. Теория автоматического управления. Основы построения и анализа систем автоматического регулирования: учебно–методическое пособие// Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. – 51 с.
2. Atyya M., ElBayoumi G, Lotfy M. Optimal tracking control for underactuated airship // Journal of Engineering and Applied Science. – 2024. – № 71. – С.24-30.
3. Шевченко А.Ю. Практика моделирования в SimInTech: руководство пользователя. — Красноярск: СФУ, 2022.
4. Хилов А.А., Воронцов А.А. Аэродинамика дирижаблей: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 2019.

Секция 3

ИНЖЕНЕРИЯ ЗНАНИЙ И БАЗЫ ЗНАНИЙ

Е.В. Боржигон, магистрант, katrinerussia@gmail.com
В.А. Углев, к.т.н, доцент, uglev-v@yandex.ru
Сибирский федеральный университет, г. Железногорск, Россия

РАЗРАБОТКА БАЗ ЗНАНИЙ ДЛЯ СЕРВИСА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ

Аннотация: Настоящая статья посвящена созданию баз знаний для сервиса оценки результативности научно-педагогических работников. Описан метод унифицированного графического воплощения активности, его преимущества и недостатки. Подчеркнута необходимость дополнения метода механизмом экспертных систем, позволяющим учесть многообразие параметров деятельности преподавателей. Приведен пример архитектуры экспертной системы для оценки дисциплины.

Ключевые слова: экспертная система, метод унифицированного графического воплощения активности, метод UGVA, когнитивная визуализация, база знаний.

E.V. Borzhigon, student, katrinerussia@gmail.com
V.A. Uglev, Ph.D, docent, uglev-v@yandex.ru
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

DEVELOPMENT OF KNOWLEDGE BASES FOR THE PERFORMANCE ASSESSMENT SERVICE OF RESEARCH AND TEACHING STAFF

Abstract: This article focuses on creating knowledge bases for the performance assessment service for researchers and educators. The of Unified Graphic Visualization of Activity method, its advantages and disadvantages, is described. The need to supplement the method with an expert system mechanism that allows taking into account the diversity of parameters of teachers' activities is emphasized. An example of the architecture of an expert system for evaluating discipline is given.

Key words: expert system, Unified Graphic Visualization of Activity method, UGVA method, cognitive visualization, knowledge base.

Современное образование предъявляет повышенные требования к высококвалифицированным кадрам, что обусловлено необходимостью подготовки выпускников, обладающих необходимыми профессиональными компетенциями. Оценка продуктивности преподавателей играет ключевую роль

в повышении качества образовательного процесса. Настоящая статья посвящена совершенствованию работы автоматизированной системы оценки результативности труда научно-педагогических работников с использованием механизмов экспертных систем.

Одной из реализаций оценки научной и педагогического потенциала является система, основанная на методе унифицированного графического воплощения активности (UGVA). Метод позволяет наглядно представить сложную информацию, что облегчает восприятие и анализ обширных массивов данных специалистам, аналитикам и руководителям [1].

Выделим основные преимущества метода UGVA [2]:

- упрощенное восприятие больших объемов данных благодаря образному антропоморфному представлению;
- возможность визуальной дифференциации параметров путем сравнения пропорций частей образа относительно осей симметрии;
- удобство использования для быстрого сравнения профилей различных сотрудников.

Образы в нотации UGVA опираются на специально проработанные модели. Для визуализации профилей научно педагогических работников в работе [3] была предложена параметрическая модель. Оценка компетентностного профиля сотрудника научно-педагогических работников формируется на основе внесенных данных в систему о профессиональной, научной и образовательной деятельности. Согласно предложенной модели, в составе образа были выделены страты профессиональной деятельности, научной и педагогической (личной и со студентами, а также в динамике за поселений год и предыдущие 3 года). Профессиональная деятельность включает данные о таких активностях, как: место работы, научный статус (ученая степень), веденных дисциплинах, уровень образования, повышение квалификации. Образовательная деятельность включает: количество дипломников, количество учебно-методических изданий, количество аспирантов. Научная деятельность включает: количество статей, количество патентов, количество грантов.

Реализация программной системы (системы поддержки принятия решений) позволило автоматически формировать наборы профилей в нотации UGVA и выводить их на экран в виде единой карты (подробнее см. в [4]). Тем не менее, текущая реализация недостаточно гибко учитывает разнообразие значений параметров деятельности сотрудников, чрезмерно упрощая их оценку. Можно выделить некоторые ключевые проблемы:

1. оценивая публикации научных статей, система не принимает во внимание уровень изданий, где они были изданы, и включение в индексирующие базы;
2. повышение квалификации сотрудников оценивается без учёта соответствия профиля курсов профессии и научным интересам человека;

3. преподаваемые дисциплины рассматриваются без разделения на профильные и непрофильные курсы, что снижает точность оценки;

4. участие в мероприятиях фиксируется формально, без детализации роли сотрудника.

Для создания гибкой и обоснованной системы оценки деятельности сотрудников, с учетом неоднородности значений приведенных параметров, можно использовать различные механизмы (например, см. [5]). Мы в своих работах опираемся на механизм экспертных систем на продукционных правилах, с элементами нечёткой логики [6].

Экспертные системы (ЭС) представляют собой компьютерные программы, накапливающие опыт и знания профессионалов в определенных сферах и применяющие их для предоставления обоснованных рекомендаций и решений, а также для консультирования менее опытных пользователей [7]. Использование таких систем оправдано тогда, когда необходимо обеспечить высокое качество и эффективность решений сложных задач, сопоставимое с уровнем компетентного специалиста-человека [8]. Ключевое преимущество экспертных систем заключается в прозрачности процесса принятия решений, выражающейся в способности ясно объяснить ход рассуждений и обоснование выводов понятным языком при взаимодействии с пользователями. Центральным элементом экспертной системы является база знаний, содержащая знания и правила предметной области.

Для каждого из элементов образа научно-педагогического работника, имеющего сложную логику оценки вклада отдельных достижений, формируется свой фрагмент базы знаний. Ниже перечислены основные виды активности, для которых разработаны специальные механизмы экспертных оценок:

1. оценка преподаваемой дисциплины – позволяет анализировать деятельность на основе типа принадлежности дисциплины к конкретному разделу учебного плана, объему часов, согласованность с профилем личных и производственных научных интересов и пр.;

2. оценка прохождения повышения квалификации – включает принадлежность к профессиональному профилю, роль (слушатель, организатор, исполнитель), согласованность с научными достижениями (личными и воспитанников);

3. оценка дипломника – основывается на данных о результатах защиты, о соответствии профилю руководителя, о специальности дипломника;

4. оценка публикации – основывается на уровне издания журнала / материалов конференции, включенности в базы для индексации, уровне конференции, количестве и позиции авторов внутри авторского коллектива, аффилиации относительно учебного заведения, наличии во внутривузовской системе учёта научных публикаций (корпоративный сервис «Прометей» [9]), а также на роли соавторов-студентов;

5. оценка патента – основывается на типе патента, количестве соавторов, аффилиации, наличии в Прометее, роли студентов;

6. оценка учебно-методического издания – основывается на индексации и уровне издания (кафедра, ВУЗ, внешняя организация), соответствии профилю работника и преподаваемым дисциплинам;

7. оценка монографий основывается на соответствии профилю работника и преподаваемым дисциплинам, индексации, наличии в Прометее;

8. оценка грантов основывается на принадлежности запроса (внутренний, отраслевой, внешний, инициативный), наличии в Прометее, роли (исполнитель, заказчик, руководитель), аффилиации, соответствии профилю работника.

В качестве примера приведем архитектуру ЭС (граф решений), обеспечивающей оценку вклада дисциплины в элемент образа, которую преподаёт научно-педагогический работник (см. рис. 1). Зеленым обозначены входные данные количественной или качественной природы, фиолетовым – промежуточные логические выводы, а красным – результирующий коэффициент вклада оцениваемой дисциплины в элемент образа в нотации UGVA. Модель подготовлена в конструкторе экспертных систем FLM_Builder [10], используя технологию drag&drop при формировании графа решений.

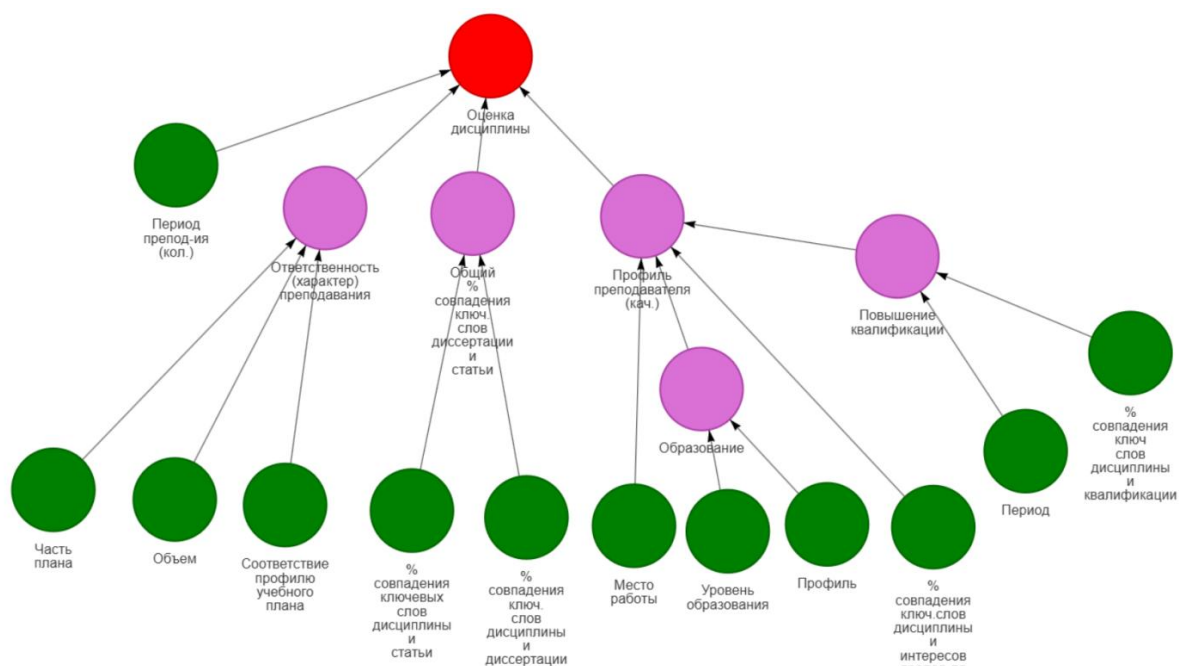


Рис.1. Граф решений для экспертной системы «Оценка дисциплины»

Например, гипотеза «Общий процент совпадения ключевых слов дисциплины с ключевыми словами дипломов/диссертаций и статей» опирается на процент совпадения ключевых слов дисциплины относительно объединённого множества ключевых слов статей и выпускных квалификационных работ дипломников за рассматриваемый период. Значение количественного

показателя преобразуется в качественное (варианты «нет» / «мало» / «средне» / «много» / «полное совпадение»). Данный процесс (фазификация) производится с помощью характеристических функций. Ответы ЭС также подвергаются переводу в количественные значения (коэффициенты масштабирования) для использования в формулах вычисления размеров элементов образа в нотации UGVA.

Подавая на вход ЭС по оценке вклада дисциплины в элемент образа с рис. 1 будет сформирован вектор параметров, произведена фазификация отдельных элементов и, затем, произведен просчёт по дереву решений. Анализироваться будут, в первую очередь те показатели, которые демонстрируют особенности личной заинтересованности работника в тех элементах учебного плана, которые он проявляет как в учебной, так и в научной работе. Результатом отработки ЭС будет коэффициент масштабирования в интервале от 0 до 1.

Рассмотрим параметры оценки дисциплин для нескольких работников межинститутской базовой кафедры «Прикладная физика и космические технологии» Сибирского федерального университета. Все эти дисциплины относятся к образовательной программе 09.04.01.03 «Информационные системы космических аппаратов и центров управления полетами». В таблице 1 приведены примеры того, как для различных дисциплин были получены разные оценки (см. столбец 4), что разительным образом отличается от результата, ранее использующегося для оценки «вклада» дисциплин (столбец 3) в элемент «плечи» и «грудь» образа по [6].

Таблица 1. Примеры оценки масштабирующих коэффициентов

Наименование дисциплины	ID преподавателя	Коэффициент влияния без ЭС	Вырабатываемый ЭС коэффициент
Интеллектуальный анализ данных	1	1	1
Методология научной деятельности	1	1	0.8
Программная реализация математических моделей	1	1	0.7
Управление проектами	2	1	0.4
Технология разработки программного обеспечения	2	1	0.7
Общие принципы построения и функционирования космических систем	3	1	0.6
Основы устройства космических аппаратов	3	1	0.9

Полученные коэффициенты включаются в функцию расчёта влияния всех дисциплин для конкретного работника: рассчитывается средняя взвешенная сумма значений, затем она умножается на нормативный показатель размера соответствующего элемента антропоморфной фигуры (в пикселях) и

затем фигура-элемент отрисовывается в рамках целостного образа. Как можно заметить из сравнения столбцов 3 и 4, с внедрением ЭС показатели стали не такими высокими: реалистичная оценка достижений (активности) научно-педагогических работников кафедры теперь более применима для обоснования принятия управленческих решений и оценки потенциала подразделения.

Подведем итоги. Внедрение механизма экспертной системы на основе продукционных правил обеспечит новый подход к оценке результативности научно-педагогического работника, устраняя ее упрощенность и субъективность обычного кумулятивного подхода, позволяя планировать дальнейшие управленческие решения и отслеживать профессиональный рост научно-педагогических работников. Простота восприятия и прозрачность предоставляемых оценок делают визуальные образы в нотации UGVA более доступными для интерпретации со стороны лиц, принимающих решения.

Ближайшими перспективами развития этой работы является детальная проработка каждой базы знаний из упомянутых моделей экспертных систем, а также формирование обновленного механизма формирования групповой карты научно педагогических работников (на примере экспериментального подразделения в Сибирском федеральном университете [6]).

Список литературы

1. Uglev V., Meshkov S., Kuznetsov M. Methodology of Complex Visual Representation of Human Activity Using Cognitive Visualization // Journal of Integrated Design and Process Science, 2024. vol. 27(3-4). pp. 184-199. <https://doi.org/10.1177/10920617241289768>

2. Углев. В. А. Поддержка процесса принятия решений с использованием нотации унифицированного графического воплощения активности (UGVA) // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». №3. – 2023. – С.125-140. DOI: 10.18698/0236-3933-2023-3-125-140

3. Кузнецов М.В., Углев В.А. Интерактивный сервис визуализации образов сложных объектов методом унифицированного графического воплощения активности // XXII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2025). В 3 ч. Ч. 2. – СПб.: ФИЦ ИУ РАН, 2025. - С. 164-173.

4. Гаврилова Т.А., Шванкин В., Кубельский М.В., Иваникова Н.В., Луцков В. Картография и семантика научного знания: пилотный проект // XXII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2025). В 3 ч. Ч. 1. – СПб.: ФИЦ ИУ РАН, 2025. - С. 38-46.

5. Zadeh L.A., Aliev R.A. Fuzzy logic theory and applications: part I and part II. World Scientific Publishing, New Jersey, USA. 2018.

6. Кузнецов М.В., Боржигон Е.В., Углев В.А. Групповая карта работников научно-образовательного подразделения на примере межинститутской базовой ка-

федры // Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании: Материалы IX Международной научной конференции. В 4 ч. Ч.1. - Красноярск: КГПУ, 2025. - С. 245-248.

7. Информатика: Учебник / Н.В. Макарова, Л.А. Матвеев, В.Л. Бройдо и др.; под редакцией Н.В. Макарова. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 384 с.

8. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 382 с.

9. Система учёта научных достижений «Прометей» Сибирского федерального университета [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://prometheus.sfu-kras.ru/Identity/Account/Login>.

10. Болсуновский Н.А., Пронин А.Д., Углев В.А. Конструктор производственных экспертных систем с элементами нечёткой логики FLM_Builder и интеграция его моделей в пользовательские проекты // Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных: XXX Всероссийский семинар. – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2022. – С. 24-33.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К СЕМИОТИЧЕСКОМУ ПРЕДСТАВЛЕНИЮ И АНАЛИЗУ УЧЕБНЫХ ПЛАНОВ НА ПРИМЕРЕ СПЕЦИАЛЬНОСТИ “ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ”

Аннотация: В настоящей статье осуществляется обзор современных методологических подходов к семиотическому представлению и анализу учебных планов в контексте специальности “Информационная безопасность”. На основании анализа существующих методов, включая унифицированную графическую визуализацию активности (UGVA), семантические графы, семиотические сети и когнитивные карты диагностики знаний, предлагается развитие семиотического метода для оценки баланса и структуры образовательных программ. Актуальность исследования определяется необходимостью интеграции семиотических моделей в цифровые образовательные системы с целью повышения эффективности анализа и принятия решений.

Ключевые слова: семиотика, учебные планы, визуализация, информационная безопасность, UGVA, семантические модели.

Y.V. Dyachenko, student, dolche.fight@mail.ru
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE SEMIOTIC REPRESENTATION AND ANALYSIS OF CURRICULA ON THE EXAMPLE OF THE SPECIALTY “INFORMATION SECURITY”

Abstract: This article provides an overview of modern methodological approaches to the semiotic representation and analysis of curricula in the context of the specialty “Information Security”. Based on the analysis of existing methods, including unified graphical activity visualization (UGVA), semantic graphs, semiotic networks and cognitive knowledge diagnostic maps, the development of a semiotic method for assessing the balance and structure of educational programs is proposed. The relevance of the research is determined by the need to integrate semiotic models into digital educational systems in order to increase the effectiveness of analysis and decision-making.

Keywords: semiotics, curricula, visualization, information security, UGVA, semantic models.

Введение и актуальность проблемы

В условиях цифровизации образовательного процесса анализ учебных планов приобретает статус ключевой задачи по обеспечению качества подготовки специалистов, в особенности в областях, таких как “Информационная безопасность”. Учебные планы представляют собой сложные многопараметрические структуры, охватывающие распределение учебной нагрузки по дисциплинам, компетенциям и временным интервалам, что обуславливает необходимость применения эффективных методов представления и анализа. Традиционные подходы, опирающиеся на табличные формы данных или статистические оценки, зачастую не учитывают семантическую глубину и динамику образовательного процесса, приводя к утрате информации о взаимосвязях между компонентами плана [1]. Более того, такие методы не позволяют в полной мере раскрыть семиотический потенциал образовательных документов, где каждый элемент плана – дисциплина, модуль или компетенция – может рассматриваться как знак, несущий определенное значение в контексте общей структуры обучения.

Актуальность проблемы обусловлена повышением требований к специалистам в сфере информационной безопасности, где баланс между фундаментальными знаниями и прикладными навыками имеет критическое значение для адаптации к стремительным технологическим изменениям. Как демонстрируют исследования, существующие методы анализа планов часто игнорируют семиотические аспекты – знаковые системы, позволяющие интерпретировать образовательный контент как сеть значений и отношений [2]. Это влечет за собой неэффективное распределение ресурсов и несоответствие формируемых компетенций рыночным потребностям. В контексте трансформации образования под воздействием искусственного интеллекта и больших данных семиотическое представление позволяет моделировать планы как динамические знаковые системы, интегрируя материальные и смысловые аспекты [3].

Например, в специальности “Информационная безопасность” ключевыми вызовами являются не только технические аспекты, такие как разработка систем защиты от угроз информационной безопасности, но и этические, правовые и социальные компоненты, которые требуют междисциплинарного подхода. Аналитические инструменты, фокусирующиеся на количественных метриках, не учитывают семантические связи этические нормы. Семиотический анализ, в свою очередь, позволяет рассматривать учебный план как семиозис – процесс порождения смысла через знаки, где дисциплины выступают в роли символов или индексов [4].

Сравнительный анализ методологических подходов к семиотическому представлению и анализу учебных планов, а также последующая разработка метода семиотического представления и анализа учебных планов на примере специальности “Информационная безопасность” направлены на решение за-

дачи создания инструментария для визуализации и оптимизации, учитывающего специфику данной области. Подобный подход способствует переходу от статических описаний к динамическим моделям, в которых учебный план интерпретируется как семиотическая сеть, отражающая социальные и когнитивные аспекты процесса обучения [5].

Описание методологических решений

Среди конкурирующих методологических решений для анализа учебных планов выделяются подходы, интегрирующие визуализацию и семиотику. Первым является *метод унифицированной графической визуализации активности* (UGVA), предназначенный для оценки баланса планов в IT-специальностях. Метод представляет планы в форме антропоморфных образов, основанных на методе “Лица Чернова”, с учетом динамики и афферентного синтеза. Данный метод позволяет визуализировать многопараметрические объекты, такие как распределение нагрузки по дисциплинам [6]. В расширенном варианте метод UGVA используется для поддержки принятия решений, с декомпозицией информации и симметрированием образов, что делает его особенно полезным для выявления несбалансированности в программах [7].

Вторым решением выступают *семантические графы*, разработанные для представления семантических структур. Графы моделируют планы как узлы и связи, обеспечивая формальное описание образовательных структур, где центральный узел соответствует процессу, с направленными связями для иерархии дисциплин [8]. Этот подход позволяет анализировать семантические отношения между компонентами плана, где графы могут выявлять логические пробелы в последовательности курсов.

Третьим подходом являются *семиотические сети*, применяемые в управлении интеллектуальными агентами и многокомпонентными объектами. Семиотические сети описывают знания агента как знаковые системы с треугольником Фреге, типологией знаков и матрицей взаимодействия. Они позволяют моделировать коммуникацию между дисциплинами как семиозис, с оптимизацией поведения и адаптацией к внешним требованиям [9]. В расширенном варианте сети интегрируются с обработкой естественного языка для субъективных моделей ситуаций, что полезно для интерпретации планов как динамических систем, где знаки представляют компетенции, а связи – их взаимозависимости [10].

Четвертым решением служат *когнитивные карты диагностики знаний*, с помощью которых можно визуализировать динамику учебного процесса в интеллектуальных обучающих системах. Эти карты отображают образовательный цифровой след, наложенный на графическую свертку данных о структуре учебного плана (сводная карта [11]).

Существует ещё метод *семиотики информационного поля*, где знаки приобретают свойство функций. Это позволяет применять их для анализа планов как информационных единиц, где каждый модуль выступает как знак с определенной ролью в общей структуре [12].

Когнитивная семиотика рассматривает расширенное описание объектов через визуализацию опыта и осмысление, позволяя моделировать планы как когнитивные структуры, интегрирующие фундаментальные и прикладные аспекты [13].

Переосмысление знаков подчеркивает контекстуальную интерпретацию, предлагая видеть знаки не как фиксированные типы, а как объекты отношений, зависящие от точки зрения интерпретатора [14].

Сравнительный анализ подходов

Для проведения сравнительного анализа методов был составлен перечень критериев, выбранных на основе ключевых характеристик семиотического подхода к образовательным структурам. Эти критерии включают:

1. Семантическая глубина – степень учета знаковых отношений, интерпретации и смысловых уровней в моделировании планов;
2. Визуализация динамики – способность отображать изменения во времени (например, при адаптации к новым требованиям);
3. Применимость к направлению “Информационная безопасность” – эффективность в балансировке фундаментальных и прикладных дисциплин, с учетом специфики этических и технических аспектов;
4. Интеграция с искусственным интеллектом – возможность использования в автоматизированных системах, включая агенты и обучающие платформы;
5. Масштабируемость – способность обрабатывать большие объемы данных, такие как сравнение множественных планов из разных вузов.

Выбор данных критериев обусловлен необходимостью охватить как теоретические, так и практические аспекты, чтобы оценить методы в контексте реальных образовательных задач.

Для наглядного сравнения методологических подходов их характеристики были сведены в таблицу 1. Оценки: высокая; средняя; низкая – основаны на анализе литературы. Таблица структурирована по критериям.

Результаты анализа

Из таблицы следует, что методы распределяются неравномерно по критериям: некоторые, как UGVA, сильны в визуализации и применимости, но не лидируют в семантике, в то время как другие, вроде глубокой семиотики, предлагают богатую теоретическую базу, но ограничены в практике.

Таблица 1. Сравнительная таблица решений

	Семанти- ческая глубина	Визуали- зация дина- мики	Примени- мость в ИБ	Интеграция с ИИ	Масштаби- руемость
Метод UGVA	Средняя	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая
Семантические графы	Высокая	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая
Семиотические сети	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя
Когнитивные карты	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Семиотика ин- формационного поля	Высокая	Низкая	Средняя	Средняя	Низкая
Когнитивная се- миотика	Высокая	Средняя	Средняя	Высокая	Средняя
Переосмысление знаков	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая

Например, метод UGVA показывает высокую визуализацию динамики: человек, анализируя план, может сразу обнаружить несбалансированность, но у этого метода семантическая глубина средняя, поскольку образы не раскрывают сложные знаковые отношения. Семантические графы выделяются высокой семантикой и масштабируемостью, в данном случае план моделируется как сеть узлов, что помогает выявить логические пробелы, но отображение динамики является средней: графы статичны, и изменения во времени требуют перестройки. Семиотические сети кажутся наиболее сбалансированными – высокая семантика через треугольник Фреге позволяет интерпретировать дисциплины как знаки, а динамика и интеграция с ИИ поддерживают адаптацию, но масштабируемость – средняя: сети становятся громоздкими при анализе сотен планов. Когнитивные карты сильны в динамике – они позволяют отслеживать прогресс по цифровому следу, но семантика ограничена диагностикой, без глубокого знакового анализа. Семиотика информационного поля предлагает интересные функции знаков, но низкая способность отразить динамику делает ее менее полезной для изменяющихся планов. Когнитивная семиотика добавляет онтологии для дизайна планов, но применимость к конкретной специальности оценивается как средняя, поскольку фокус делается на общих онтологиях, а не на специфике образовательной специальности. Переосмысление знаков являются чисто теоретическим подходом: высокий показатель семантики, но низкие оценки по остальным критериям сравнения, что делает их вспомогательными, а не основными инструментами.

В целом, таблица подчеркивает отсутствие универсального метода: сильные стороны одних компенсируют слабости других, но для ИБ нужен синтез – сети для семантики, графы для масштаба, UGVA для визуализации.

Это наводит на мысль о гибридном подходе, где пробелы в функциях «заполняются» за счёт интеграции.

Общие выводы

Подводя итог сравнительному анализу, можно отметить, что рассмотренные методологические подходы демонстрируют разнообразие в семиотическом представлении учебных планов, но ни один из них не обеспечивает полного охвата выделенным критериям, отражающим, среди прочего, и специфику специальности «Информационная безопасность». Метод UGVA и когнитивные карты выделяются практическим уклоном в визуализацию динамики, что полезно для оперативной оценки баланса, в то время как семиотические сети и семантические графы предлагают более глубокий семантический слой, необходимый для интерпретации знаковых отношений в контексте угроз и компетенций.

Анализ таблицы выявил ключевой пробел: отсутствие метода, сочетающего высокую семантику с динамикой и масштабируемостью, что особенно актуально для ИБ, где планы должны адаптироваться к изменяющимся технологиям, порождающим угрозы в сфере информационной безопасности. Гибридный семиотический подход мог бы интегрировать сильные стороны, например, когнитивных карт диагностики знаний [15] с образами в нотации UGVA [16] для визуализации и повышая эффективность анализа. В перспективе, такой подход позволит решить задачу оптимизации планов, обеспечивая баланс фундаментальных и прикладных аспектов обучения.

Дальнейшие исследования должны быть ориентированы на эмпирическую верификацию в реальных учебных планах специальности «Информационная безопасность», включая тестирование на данных из различных вузов, и разработку программного обеспечения для автоматизированного семиотического анализа.

Работа подготовлена с использованием средств генеративного ИИ.

Список литературы

1. Фещенко В. В. Художественная коммуникация: от семиотических моделей к лингвоэстетической теории // Слово.ру: балтийский акцент. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 7–31.
2. Louis Hébert. An introduction to applied semiotics // Taylor and Francis, 2020 pp. 40–49.
3. Kay L O'Halloran. Matter, meaning and semiotics // Visual Communication – vol. 22. № 1. – pp. 174–201.
4. Углев В.А. Оценка баланса учебных планов при подготовке специалистов в области информационных технологий с применением метода UGVA // Современ-

ные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 684–696.

5. Воейкова А.А., Долгова Е.Г., Данилина Е.А., Федорова А.В. Инновационные исследования в области семантики и семиотики / А.А. Воейкова, // СПО – 2023. № 2 – С. 230–234.

6. Валькман Ю.Р., Тарасов В.Б. От онтологий проектирования к когнитивной семиотике // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8, №1(27). – С.8–34.

7. Бирюков О.Н., Хасанов Н.А. О методике решения задач на интервальное оценивание и проверку параметрических гипотез в математической статистике // Modern European Researches. – 2021. – Т. 1, № 3. – С. 38 – 44.

8. Тульчинский Г. Л. К проблеме смысла в социальной семиотике: глубокая семиотика как концептуальное расширение социальной семиотики // Слово.ру: балтийский акцент. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 15–26.

9. Eric Dane Walker, Erich H. Reck Frege's Begriffsschrift: On the Visual Basis of Logical Articulation and Understanding // History and philosophy of logic (2024) – vol. 45. N. 4. – pp. 476–497.

10. Ровбо М.А., Сорокоумов П.С. Архитектура системы управления интеллектуальным агентом на основе семиотической сети // Открытое образование: Проблемы информатизации экономики и управления – 2018. Т. 22, № 5 – С. 84–93.

11. Углев В.А. Поддержка процесса принятия решений с использованием нотации унифицированного графического воплощения активности (UGVA) // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2023. – № 3 (144). – С. 125–140.

12. Меняйло Д. В., Баранюк В.В., Крылова О.С. Представление информации для обеспечения коммуникационных процессов многокомпонентного объекта // International Journal of Open Information Technologies. 2019. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/predstavlenie-informatsii-dlya-obespecheniya-kommunikatsionnyh-protsessov-mnogokomponentnogo-obekta> (дата обращения: 05.01.2026). – С. 1–6.

13. Катречко С. Л. Природа явления в трансцендентализме Канта: семантико-когнитивный анализ // Кантовский сборник. – 2018. – Т. 37, № 3. – С. 31 – 55.

14. Marina G. Shilina, Mohsen Zarifian. Re-thinking Semiotics: a New Categorization of a Sign? // RUDN Journal of Language Studies, Semiotics and Semantics (2023) – V. 14. N. 2. – pp. 305–313.

15. Uglev V.A. Cognitive Maps of Knowledge Diagnosis (CMKD): the essence of the method, classification, characteristics and synthesis principles // Novel & Intelligent Digital Systems: Proceedings of the 4th International Conference. LNNS, vol 1170. Springer, Cham. 2023. pp. 594–605. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73344-4_51.

16. Uglev V., Meshkov S., Kuznetsov M. Methodology of Complex Visual Representation of Human Activity Using Cognitive Visualization // Journal of Integrated Design and Process Science, 2024. vol. 27(3-4). pp. 184–199. <https://doi.org/10.1177/10920617241289768>.

А.Е. Воронков, аспирант, voron-1998-va@mail.ru
Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

А.В. Зуев, д.т.н., доцент, zuev@dvo.ru
Институт автоматизации и управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ КАЛИБРОВКИ МАГНИТОМЕТРА, УСТАНОВЛЕННОГО НА БЕСПИЛОТНОМ ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ, ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ВРАЩЕНИЯ ДАТЧИКА

Аннотация: В работе исследовано, как различные сценарии вращения магнитометра на беспилотном летательном аппарате влияют на точность его калибровки методом аппроксимации эллипсоида. Были сформированы наборы данных с разной полнотой охвата пространственных положений датчика, для которых вычислены калибровочные матрицы магнитомягких и магнитотвёрдых искажений и проведена их оценка на независимом контрольном наборе. Показано, что качество калибровки магнитометра определяется равномерностью и полнотой охвата его пространственных положений: минимально достаточная точность достигается при вращении датчика по трём взаимно перпендикулярным осям, а дальнейшее произвольное заполнение пространства даёт лишь незначительное улучшение.

Ключевые слова: калибровка магнитометра, магнитотвердые и магнитомягкие искажения, аппроксимация эллипсоида, магнитное поле

Alexander Voronkov, PhD student, voron-1998-va@mail.ru
Amur State University, Blagoveshchensk, Russia
Alexandr Zuev, Doctor of Science, zuev@dvo.ru
Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia

ANALYSIS OF THE CALIBRATION ACCURACY OF A MAGNETOMETER INSTALLED ON AN UNMANNED AERIAL VEHICLE UNDER VARIOUS SENSOR ROTATION SCENARIOS

Abstract: The study examines how different magnetometer rotation scenarios on an unmanned aerial vehicle affect the accuracy of its calibration using ellipsoid fitting. Several datasets with varying degrees of orientation coverage were collected, for which calibration matrices of soft-iron and hard-iron distortions were computed and evaluated on an independent validation set. It is shown that the calibration quality is determined by the uniformity and completeness of the sensor's orientation coverage: a minimally sufficient accuracy is achieved when the magnetometer is rotated around three mutually perpendicular axes, while additional arbitrary motion provides only a slight improvement.

Key words: magnetometer calibration, soft-iron and hard-iron distortion, ellipsoid fitting, magnetic field

Введение

Для получения углового положения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) требуется точное комплексирование данных с его бортовых датчиков. Наибольший вклад в ошибку ориентации даёт магнитометр, поскольку его показания сильно зависят от искажений внешнего магнитного поля и конструктивных элементов БПЛА [1]. Поэтому калибровка магнитометра является критически важным этапом.

На сегодняшний день наиболее распространённые программные комплексы для управления БПЛА – Betaflight, iNav, ArduPilot и PX4 реализуют разные методы калибровки магнитометра, адаптированные под специфику применения. Так, в Betaflight применяется рекурсивный алгоритм наименьших квадратов, поскольку для FPV-дронов приоритетом является простота калибровки и скорость вычислений в условиях ограниченных ресурсов. В ArduPilot же используется более точный алгоритм калибровки магнитометра методом аппроксимации эллипсоида, позволяющий компенсировать как магнитомягкие, так и магнитотвердые искажения магнитного поля. Выбор этого алгоритма обусловлен специализацией ArduPilot на автономные БПЛА, выполняющие навигационные задачи, где точность ориентации критична, а вычислительные ресурсы и время калибровки, как правило, не являются ограничивающими факторами.

Однако, несмотря на всю важность калибровки автономного БПЛА, для калибровки магнитометра методом аппроксимации эллипсоида отсутствуют формализованные рекомендации по процедуре физического вращения датчика. Так, например, в работах [2-10], посвящённых разработке алгоритмов калибровки магнитометра на основе аппроксимации эллипсоида, процедура сбора данных ограничивается общими указаниями на необходимость произвольных пространственных вращений магнитометра, охватывающих как можно больший набор его положений в трёхмерном пространстве. При этом не рассматривается вопрос о том, как степень и равномерность заполнения всего пространства возможных положений влияет на качество калибровки. Исходя из математической точки зрения данного оптимизационного алгоритма, именно это является ключевым фактором получения устойчивых и точных калибровочных матриц, что непосредственно определяет качество работы алгоритмов ориентации и, как следствие, точность и надёжность автономного полёта БПЛА.

С учётом вышеизложенных ограничений в настоящей работе поставлена и решена задача анализа влияния степени охвата и равномерности распределения исходных измерений на эффективность алгоритма калибровки маг-

нитометра методом аппроксимации эллипсоида. Сам анализ включает в себя три основных этапа: 1) формирование наборов данных с различной полнотой охвата пространства всех возможных положений магнитометра; 2) применение алгоритма аппроксимации эллипсоида к полученным наборам данных для получения калибровочных матриц; 3) оценка эффективности калибровки путём математического сравнения результатов на независимом наборе измерений, охватывающем максимально широкий диапазон пространственных положений.

Формирование наборов данных с различным охватом ориентаций

Для анализа были сформированы наборы данных, различающихся степенью охвата пространства всех возможных положений магнитометра. Такой подход обусловлен необходимостью оценить влияние неполноты и неоднородности полученных измерений на качество калибровки магнитометра методом аппроксимации эллипсоида. Поскольку в реальных условиях оператор БПЛА не всегда обеспечивает равномерное вращение устройства по всем осям, важно моделировать различные типичные и нетипичные сценарии сбора данных. В связи с этим были сформированы наборы, отражающие различные возможные сценарии проведения калибровки: вращения только вокруг одной, двух или трёх осей; а также набор охватывающий максимально широкий диапазон пространственных положений. Такие наборы вращательных траекторий позволяют оценить, какие минимальные требования к вращению магнитометра в трехмерном пространстве являются достаточными для получения корректных калибровочных матриц.

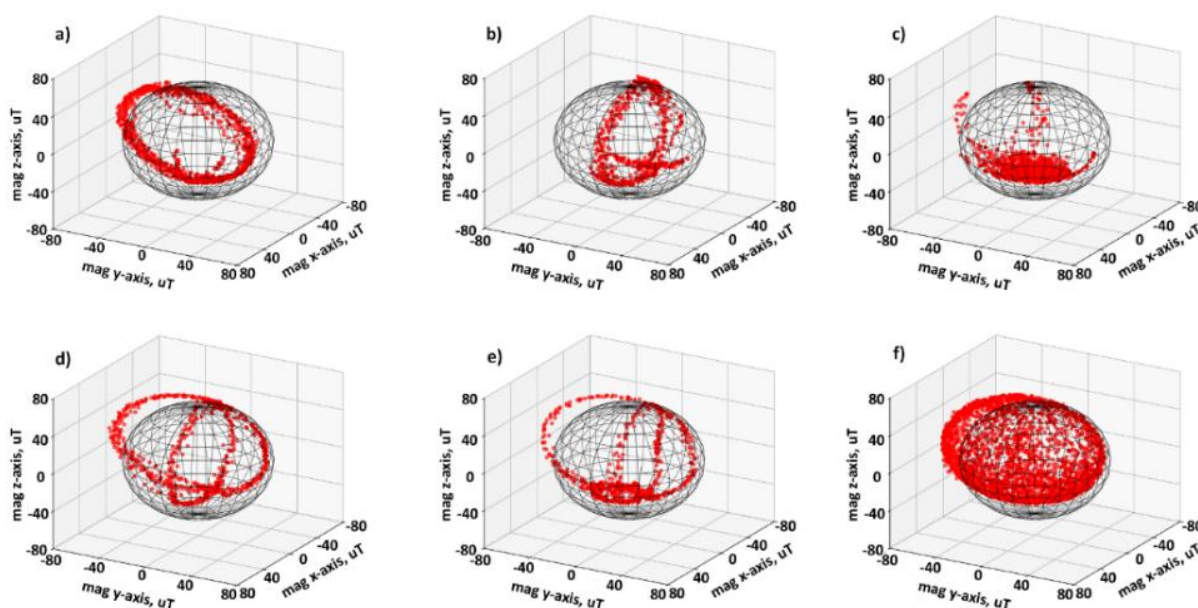


Рис. 1. Полученные наборы данных с магнитометра

Сбор данных производился с магнитометра QMC5883L с частотой 50 Гц в местности, где фоновое магнитное поле составляло $B_0 = 57.229$ мкТл.

Применение алгоритма аппроксимации эллипсоида к полученным наборам данных для получение калибровочных матриц

В качестве алгоритма калибровки магнитометра был выбран алгоритм, предложенный авторами статьи [2], в котором отношение между откалиброванным вектором магнитного поля в ортогональной системе координат и измеренным вектором магнитного поля в системе координат датчика имеет следующий вид:

$$B^r = C^{-1}(B^m - b), \quad (1)$$

где B^r – откалиброванный вектор магнитного поля в ортогональной системе координат, B^m – измеренным вектором магнитного поля в системе координат датчика, C^{-1} – матрица коррекции магнитомягких искажений и b – матрица магнитотвердых искажений.

После применения вышеупомянутый алгоритм калибровки магнитометра, были получены матрицы коррекции магнитомягких и магнитотвердых искажений для каждого набора данных (см. табл. 1).

Таблица 1. Полученные калибровочные матрицы для различных сценариев вращения

Набор вращений вокруг оси X и небольшое качение по оси Y	$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0962 & -0.0316 & 0.0461 \\ 0 & 0.9592 & 0.0812 \\ 0 & 0 & 1.2441 \end{bmatrix}$	$b = \begin{bmatrix} -5.8800 \\ -10.9711 \\ 4.7163 \end{bmatrix}$
Набор вращений вокруг оси Y и небольшое качение по оси X	$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0052 & -0.0616 & 0.0108 \\ 0 & 0.8556 & 0.0917 \\ 0 & 0 & 1.1425 \end{bmatrix}$	$b = \begin{bmatrix} -5.6747 \\ -14.3213 \\ 6.7219 \end{bmatrix}$
Набор вращений вокруг оси Z и небольшое качение по осям X, Y	$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0540 & -0.0770 & -0.0328 \\ 0 & 0.9241 & 0.0391 \\ 0 & 0 & 1.1753 \end{bmatrix}$	$b = \begin{bmatrix} -5.0746 \\ -9.9400 \\ 7.3309 \end{bmatrix}$
Набор вращений вокруг осей X и Y	$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0144 & -0.0400 & 0.0132 \\ 0 & 0.8979 & 0.0756 \\ 0 & 0 & 1.1595 \end{bmatrix}$	$b = \begin{bmatrix} -5.3504 \\ -13.5425 \\ 6.0806 \end{bmatrix}$
Набор вращений вокруг осей X, Y и Z	$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0371 & -0.0451 & 0.0059 \\ 0 & 0.9100 & 0.0751 \\ 0 & 0 & 1.1834 \end{bmatrix}$	$b = \begin{bmatrix} -5.5021 \\ -12.8151 \\ 6.0209 \end{bmatrix}$
Набор вращений, охватывающий максимально широкий диапазон пространственных положений	$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0322 & -0.0471 & 0.0073 \\ 0 & 0.9045 & 0.0768 \\ 0 & 0 & 1.1796 \end{bmatrix}$	$b = \begin{bmatrix} -5.2376 \\ -13.1401 \\ 6.0057 \end{bmatrix}$

Оценка эффективности калибровки

Дополнительно был сформирован контрольный набор данных (рис. 2), предназначенный для оценки влияния равномерности и степени охвата пространства всех угловых положений магнитометра на его итоговую точность калибровки. Этот набор включал измерения, охватывающие широкий диапазон пространственных положений, и использовался в качестве независимого контрольного набора для проверки эффективности каждой пары калибровочных матриц, полученных на предыдущем этапе.

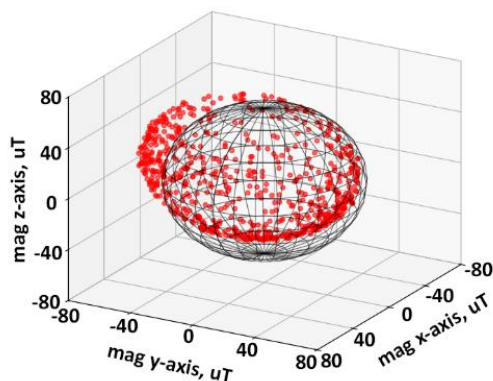


Рис. 2. Набор данных для анализа эффективности калибровки магнитометра

После применения калибровочных матриц к этому набору данных, были получены следующие результаты (рис. 3).

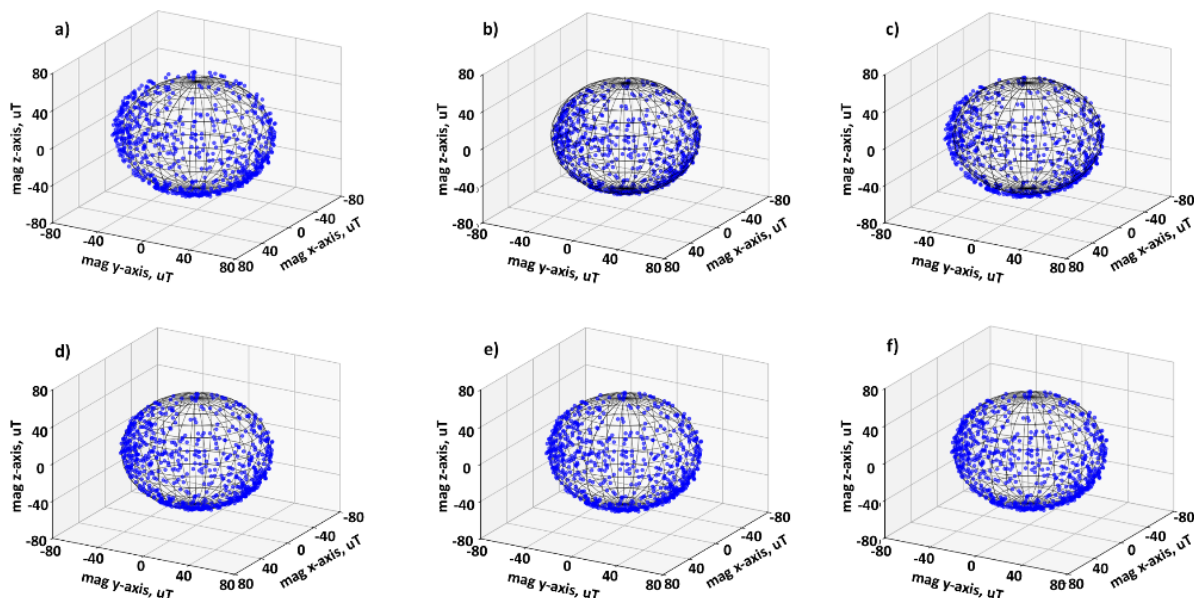


Рис. 3. Результаты применения калибровочных матриц к контрольному набору данных

Для количественной оценки эффективности калибровки выполнен численный анализ, использующий метрику средней относительной ошибки модуля магнитного вектора (в процентах от B_0), определяемую формулой:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\|B_i^r\| - B_0}{B_0} \right| \cdot 100\% \quad (2)$$

Рассчитанные значения ошибки для каждого рассмотренного сценария вращения приведены (см. табл. 2), что даёт возможность сравнить эффективность калибровки при различной полноте охвата ориентаций.

Таблица 2. **Итоговые значения ошибки после применения калибровочных матриц к контрольному набору данных**

Сценарий вращения	ε , %
Вращения вокруг оси X и небольшие качения по оси Y	5.411%
Вращения вокруг оси Y и небольшие качения по оси X	3.680%
Вращения вокруг оси Z и небольшие качения по осям X, Y	3.416%
Вращения вокруг осей X и Y	1.899%
Вращения вокруг осей X, Y и Z	1.307%
Вращения с максимальным охватом пространственных положений	1.306%

Заключение

Проведённый анализ показал, что точность калибровки магнитометра напрямую зависит от полноты охвата его возможных пространственных положений. Минимально допустимые результаты достигаются только при вращении магнитометра по трём взаимно перпендикулярным осям, поскольку именно это обеспечивает корректное формирование эллипсоида измерений. После выполнения базовых вращений по трём осям дальнейшее произвольное дозаполнение пространства возможных положений магнитометра позволяет незначительно улучшить равномерность данных, почти достигнув качества полностью хаотичных вращений. Таким образом, оптимальной является комбинированная процедура: обязательное вращение по трём осям, дополненное свободными движениями для заполнения оставшихся областей пространства возможных положений датчика.

Список литературы

1. Li Y., Zahran S., Zhuang Y., Gao Z., Luo Y., He Z., Pei L., Chen R., El-Sheimy N. IMU/Magnetometer/Barometer/Mass-Flow Sensor Integrated Indoor Quadrotor UAV Localization with Robust Velocity Updates // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, No. 7. – Article 838. <https://doi.org/10.3390/rs11070838>
2. Chih C., Lv J.-W., Wang D. Calibration of triaxial magnetometer with ellipsoid fitting method // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 237. – 032015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/237/3/032015>

3. Farsimadan A., Behnamgol V. Magnetometer Calibration Using Ellipsoid Fitting Method // Transactions on Machine Intelligence. – 2019. – Vol. 2, No. 1. – P. 10–19. <https://doi.org/10.47176/TMI.2019.10>
4. Shakerian A., Bilel S., Landry R. Jr. Calibration of 3-Axis Low-Cost Magnetometer Using the Least Square Ellipsoid Fitting Algorithm // International Journal of Sensors and Sensor Networks. – 2023. – Vol. 11, No. 1. – P. 18–24. <https://doi.org/10.11648/j.ijssn.20231101.13>
5. Renaudin V., Afzal M. H., Lachapelle G. Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain // Journal of Sensors. – 2010. – Article ID 967245. – 10 p. <https://doi.org/10.1155/2010/967245>
6. Hu F., Wu Y., Yu Y., Nie J., Li W., Gao Q. An Improved Method for the Magnetometer Calibration Based on Ellipsoid Fitting // Proceedings of the 2019 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). – 2019. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/CISP-BMEI48845.2019.8965821>
7. Tedesco S., Torres-Sanchez J., O’Flynn B. Real-Time 3D Magnetometer Calibration for Embedded Systems Based on Ellipsoid Fitting // Proceedings of the 2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST). – 2018. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICSensT.2018.8603667>
8. Liu Y. X., Li X. S., Zhang X. J., Feng Y. B. Novel Calibration Algorithm for a Three-Axis Strapdown Magnetometer // Sensors. – 2014. – Vol. 14. – P. 8485–8504. <https://doi.org/10.3390/s140508485>
9. Василюк Н. Н. Калибровка коэффициентов линейной модели интегрального магнитометра за счёт использования измерений трёхосного гироскопа // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – Т. 27, № 1. – С. 107–126. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2018.27.1.107-126>
10. Алиагаев А.Р., Ажмухамедов И.М. Калибровка магнитометра в составе интегрированной навигационной системы необитаемого подводного аппарата малого класса // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 4(124). – С. 751-768. – EDN JZNWIQ.

В.В. Грибова, д.т.н., профессор, gribova@iacp.dvo.ru.

Д.В. Жданов, аспирант, zhdanov.dv@dvfu.ru

Е.Е. Помников, к.т.н., профессор, pomnikov.ee@dvfu.ru

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ КЛАССА ЗАДАЧ РАСЧЕТА НАГРУЗОК НА СТРОИТЕЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ

Аннотация: В статье представлена онтологическая модель, формализующая знания, необходимые для расчёта нагрузок на строительный объект по документам СП 20.13330.2016, СП 14.13330.2018 и СП 385.13258.2018. Модель обеспечивает структурированное представление типов нагрузок, их сочетаний, условий применения и нормативных формул, а также связывает их с региональными коэффициентами из смежных нормативов. Разработанная онтология предназначена для поддержки инженерных расчётов и автоматизированной проверки согласованности требований.

Ключевые слова: Онтологическая модель, СП «Нагрузки и воздействия», типизация нагрузок, строительная отрасль, SMART-стандарты.

V.V. Gribova, Dr. Sci. (Tech.), Professor, gribova@iacp.dvo.ru

D.V. Zhdanov, postgraduate student, zhdanov.dv@dvfu.ru

E.E. Pomnikov, PhD, Professor, pomnikov.ee@dvfu.ru

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

ONTOLOGICAL MODEL FOR THE CLASS OF STRUCTURAL LOAD CALCULATION TASKS

Abstract: The article presents an ontological model that formalizes the knowledge required for calculating loads on a building structure according to the documents Code of Practice (CoP) 20.13330.2016, CoP 14.13330.2018, and CoP 385.13258.2018. The model provides a structured representation of load types, their combinations, application conditions, and regulatory formulas, and also links them to regional coefficients from related standards. The developed ontology is designed to support engineering calculations and automated verification of requirement consistency. The paper describes the method used to construct the model and demonstrates its capability to enhance the accuracy and machine-readability of regulatory data.

Key words: Ontological model, load calculation, Codes of Practice, load typology, regional coefficients, requirement consistency checking.

Современная строительная отрасль переживает этап глубокой цифровой трансформации, что усиливает необходимость новых подходов к управлению знаниями и обработке нормативных документов. Увеличение количества ГОСТов, сводов правил и технических стандартов сопровождается ростом сложности, пересечением требований и неоднозначностью формулировок, что усложняет корректное применение норм в инженерной практике [1].

Дополнительные сложности возникают из-за многосубъектности проектного процесса и использования разнородных программных сред. Отсутствие единого цифрового пространства приводит к дублированию данных, несогласованности версий нормативов и затрудняет контроль их актуальности. Это повышает операционные издержки и риск проектных ошибок [1].

Особенно значимы данные вызовы для работы с документом СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [2], определяющего исходные параметры проектирования и влияющего на выбор материалов, расчёт конструктивных элементов и общую безопасность строительных объектов. Ошибки интерпретации норм или использование устаревших методик могут приводить к серьёзным проектным отклонениям и снижению надёжности. При этом требования множества СП взаимосвязаны, и изменения в одном документе нередко требуют актуализации связанных разделов.

Существующие цифровые инструменты — такие как Техэксперт, КонсультантПлюс, Гарант или NormaCS — обеспечивают поиск и навигацию, но не предоставляют механизмов формального представления структурных взаимосвязей между нормативами [3-6]. Они не решают главной задачи — создания единой машиночитаемой модели, способной поддерживать автоматизированный анализ требований.

Анализ действующей нормативной среды выявляет ключевые проблемы: слабая структурированность текстов, множественность трактовок, необходимость одновременного использования большого числа взаимосвязанных документов и отсутствие формальных методов семантического анализа. Эти факторы затрудняют автоматизированную проверку требований и их интеграцию в цифровые процессы проектирования.

Даже BIM-системы, активно применяемые в проектировании, пока недостаточно интегрированы с нормативной базой: они не интерпретируют положения СП и не связывают параметры объектов с формализованными требованиями. Это ограничивает переход к интеллектуальным цифровым проектным средам нового поколения [7].

Указанные проблемы формируют потребность в методах формализации нормативных данных. Одним из наиболее перспективных подходов является онтологическое моделирование, позволяющее описывать предметную область через сущности, отношения и логические зависимости. Онтология

обеспечивает машинопонимаемое представление требований, уменьшает неоднозначность трактовок и создаёт основу для автоматизированной проверки согласованности норм [8].

В данной работе предлагается подход к построению онтологической модели для задач расчёта нагрузок на строительный объект. Основное внимание уделено формализации требований СП «Нагрузки и воздействия» и связанных документов (СП 20.13330.2016, СП 14.13330.2018, СП 385.132580.2018). Разрабатываемая модель структурирует типы нагрузок, их сочетания, условия применимости расчётных схем, нормативные формулы и связи с региональными коэффициентами. Она предназначена для поддержки инженерных расчётов, автоматизированной проверки согласованности требований и интеграции в цифровые архитектуры проектирования.

Создание такой онтологии является шагом к формированию единого цифрового пространства строительных знаний и развитию технологий машиночитаемых нормативов (SMART-документов), способствующих повышению качества и эффективности проектирования [9].

Используемые подходы для разработки модели

Разработка онтологической модели строительных правил на основе СП «Нагрузки и воздействия» требует применения специализированных методологических и технологических подходов, обеспечивающих формальное, непротиворечивое и машинопонимаемое представление нормативных требований.

Основой для построения онтологии стал системный разбор содержательной структуры СП. На этом этапе применялся метод иерархического контент-анализа, включающий:

- выделение тематических разделов (общие положения, требования, методики расчёта, приложения);
- классификацию типов нагрузок и параметров, влияющих на расчёты;
- идентификацию взаимосвязей между требованиями, формулами, коэффициентами и ограничениями.

Такой подход позволил выделить первичные сущности (например, «временные нагрузки», «постоянные нагрузки», «особые нагрузки» и т.д.), их характеристики и условия применимости.

В качестве базовой методологии формирования онтологии использовались принципы онтологического анализа по Гранту и Грюнбергу и классическая схема инженерии знаний Methontology [10]. Они определяют последовательность действий: от выделения терминов до формализации отношений и построения моделей верхнего уровня.

С их учётом выполнено:

- определение доменных сущностей и их атрибутов;

- выделение отношений типов «занимает значение», «зависит от», «ограничивается», «влияет на», «применяется при»;

- фиксация логических ограничений, отражающих условия применения нормативных требований.

Использовались две формы представления знаний:

1. таксономическая модель — построение иерархий;

2. семантическая модель отношений — фиксация зависимостей между величинами, коэффициентами и контекстными условиями.

Для обеспечения переиспользуемости и устойчивости модели применены онтологические паттерны:

- паттерн классификации для группировки типов нагрузок и воздействий;

- паттерн параметризации для описания числовых характеристик;

- паттерн региональных условий для климатических зон, ветровых районов и др.;

- паттерн нормативных ссылок для описания междокументных зависимостей.

Принципы семантической ясности и недвусмысленности обеспечивали корректную интерпретацию термина в контексте СП. Каждая сущность формировалась таким образом, чтобы исключить вариативность толкования, характерную для текстовых нормативов.

Важной особенностью СП является наличие сложных условий применимости расчётных формул и требований. Поэтому при разработке модели использованы подходы:

- rule-based моделирования — представление условий («если → то»);

- декларативного описания ограничений — фиксация допустимых диапазонов параметров;

- логико-семантического связывания формул и коэффициентов с условиями их выбора.

Этот метод позволил структурировать нормативные зависимости, например, выбор коэффициентов для расчета нагрузки зависит от высоты здания и ветрового района.

Помимо всего прочего, СП 20.13330.2016 содержит ссылки на ГОСТы и другие СП, что потребовало применения подходов межонтологической интеграции:

- фиксация исходных и уточняющих нормативных положений;

- моделирование уровней нормативной иерархии («общие нормы» → «специфические нормы»);

- создание связей типа *refersTo*, *extends*, *isSpecifiedBy*.

Использованы принципы сбалансированной гранулярности, позволяющие:

- поддерживать высокий уровень детализации при необходимости;

- избегать чрезмерного усложнения модели.

Разработанная онтологическая (см. рис. 1) модель основана на системном анализе текста СП «Нагрузки и воздействия» и связанных нормативных документов (СП 14.13330.2018, СП 385.1325800.2018). Анализ позволил выявить ключевые сущности, отношения и логические зависимости, необходимые для формализации знаний, используемых при расчёте нагрузок на строительные объекты.

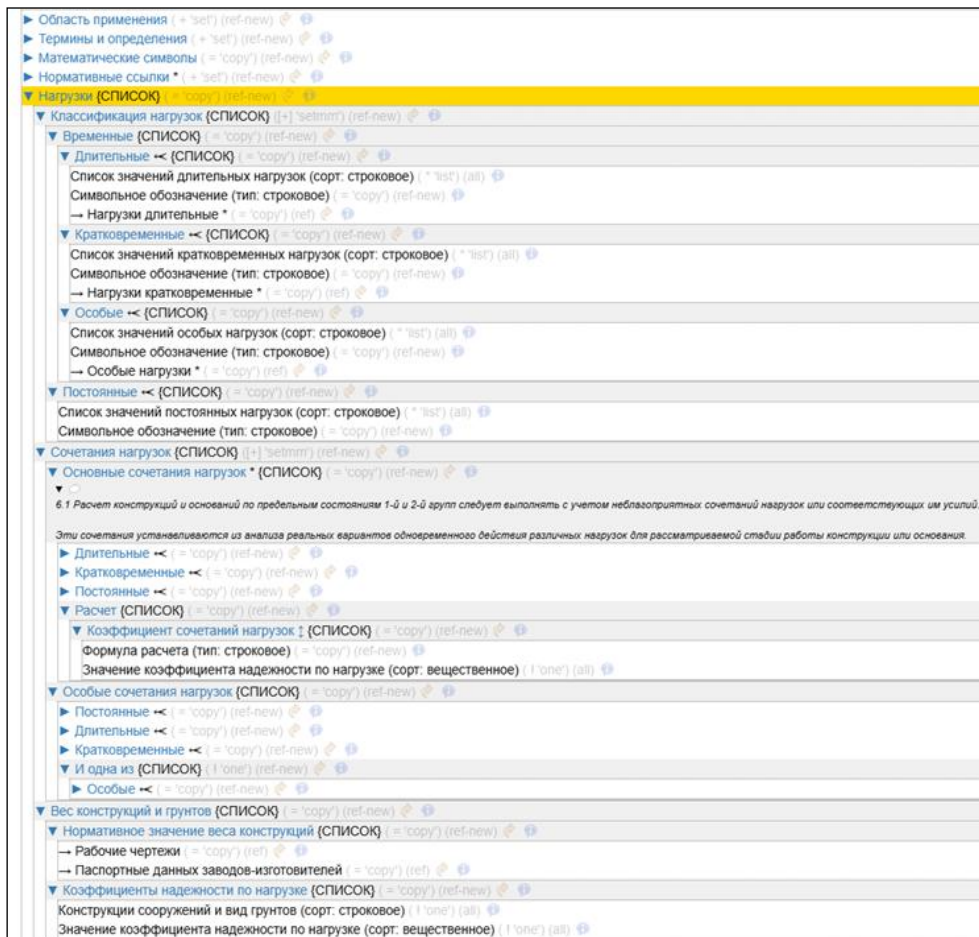


Рис. 1. Онтология СП

Онтология имеет двухуровневую архитектуру [11]:

1. Базовый уровень включает универсальные сущности: типы нагрузок, климатические и региональные параметры, характеристики материалов, общие коэффициенты надежности и сочетаний. Он описывает инвариантную часть предметной области, служащую основой для многократного применения.

2. Предметный уровень соответствует конкретным положениям рассматриваемых СП и детализирует методы расчёта, допустимые значения, ограничения, условия применения и правила сочетания нагрузок.

Оба уровня связаны структурными и терминологическими отношениями, обеспечивающими целостность представления знаний.

На этом (рис. 1) и аналогичном рисунке далее символ $\rightarrow$ отражает структурную связность между орграфами моделей онтологий, а символ $\updownarrow$ – терминологическую связность между вершинами орграфов моделей онтологий, а также между вершинами орграфов целевой информации. Символ $*$, стоящий рядом с меткой вершины, означает, что эта метка заимствуется некоторым множеством вершин. Символ $\Leftarrow$ обозначает тот факт, что в вершину, рядом с меткой которой он отображается, входит более одной дуги. Вершина-начало такой дуги может принадлежать как этому же, так и другому орграфу. Присутствующая в орграфах моделей онтологий разметка типа {СПИСОК}, (= 'copy'), ([=] 'copymm'), (! 'one'), ([!] 'onemm'), (+ 'set'), ([=] 'setmm'), (~'proху'), (new), (ref), (clone), (all) и т.д. задаёт правила формирования орграфов целевых информационных баз и справочников. Семантика данной разметки, а также основанные на ней правила формирования описаны в [12, 13].

В модель включены все основные компоненты, необходимые для автоматизации нормативных расчётов. Типы нагрузок представлены с детализацией постоянных (вес конструкций и отделки, постоянные технологические нагрузки), временных (кратковременные — снеговые, ветровые; длительные — от оборудования), а также особых (сейсмические, взрывные, аварийные).

Климатические параметры включают снеговые и ветровые районы, температурные воздействия, климатические зоны обледенения и осадков, а также их связь с региональной привязкой.

Конструктивные элементы описываются через материалы, физико-механические характеристики, геометрию, схему работы элемента и условия закрепления.

В онтологии формализованы коэффициенты, применяемые при расчётах: коэффициенты надёжности по нагрузке, коэффициенты сочетаний, поправки на особые условия эксплуатации и параметры, определяющие логические зависимости между нагрузками и характеристиками конструкции. Представлены правила сочетания нагрузок, сценарии применения (нормальная, особая эксплуатация), критические ограничения (допустимые значения нагрузок, предельные деформации), а также временные атрибуты (продолжительность, частота возникновения).

Особое место занимают нормативные формулы и методики, представленные как отдельный класс сущностей с параметрами, типами переменных и условиями применимости.

Для проверки корректности работы описанного решения была сформулирована задача, целью которой – выполнение расчетов устойчивости и напряженно-деформированного состояния на сооружение.

Для расчетов было выбрано купольное здание Z10HL Весовые характеристики которого описаны в таблице 1. Материал конструкции – дерево. Строительство производится в VII климатическом районе.

Таблица 1. Весовые характеристики

Наименование	Вес, кг
Здание без второго этажа	8 700
Балки и настил второго этажа	3 180
ИТОГО	11 880

Фрагмент составленной базы знаний представлен на рисунке 2.

▼ Нормативные ссылки (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Список ГОСТ-ов (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

Термины применены согласно ГОСТ 27751 (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Список СП (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 14.13330.2018 "СНиП II-7-81" Строительство в сейсмических районах" (с изменениями № 2, № 3) (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с изменениями № 1, № 2, № 3) (тип: строковое) ⚡

СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Архитектурные решения (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Основные характеристики района строительства (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Снеговой район ⚡ (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

Район VIII (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Сейсмичность ⚡ (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Расчетная сейсмичность района (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

9 (тип: целое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Категория грунта ⚡ (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

3 (тип: целое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Расчетная сейсмичность площадки строительства (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

10 (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 14.13330.2018 "СНиП II-7-81" Строительство в сейсмических районах" (с изменениями № 2, № 3) (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Основные характеристики здания (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с изменениями № 1, № 2, № 3) (тип: строковое) ⚡

ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Тип объекта (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

Купольное здания Z10HL (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Этажность (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Наличие цокольного этажа (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

false (тип: логическое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

2 (тип: целое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Весовые данные установки здания Z10 ⚡ (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Здание без второго этажа, кг (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

8700.0 (тип: вещественное) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Балки и настил второго этажа, кг ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

11880.0 (тип: вещественное) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Нагрузки (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Классификация нагрузок (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Временные (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Длительные (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

Вес нагрузки на балки пола второго этажа (Load, временное нагружение (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Балки и настил второго этажа, кг ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Кратковременные (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Снеговые (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Нормативное значение снеговой нагрузки, p₁₀ (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ коэффициент сноса снега для купольных зданий (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

0.85 (тип: вещественное) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ термический коэффициент (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

1.0 (тип: вещественное) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, принимаемый в соответствии с 10.4 (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ вес снегового покрова на 1 м² (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Район-значение (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Снеговой район ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

5.6 (тип: вещественное) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

кН/м² (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ⚡ (= 'copy') (ref-new) ⓘ

▼ Расчетное значение (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

Рис. 2. База знаний сформированная на основе онтологии

Корректность расчетов была подтверждена экспертом. По итогу можно сказать, что полученный на текущий момент результаты работ говорят о том, что выбранный подход анализа нормативной доку-

ментации эффективен и имеет дальнейшие возможности для масштабирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FWW-2021-0004)

Список литературы

1. Горелова О.А. Проблемы технического нормирования в строительстве РФ // Единый реестр застройщиков. URL: <https://erzrf.ru/publikacii/problemy-tekhnicheskogo-normirovaniya-v-stroitelstve-rf> (дата обращения 20.05.2025)
2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия/ Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. – М., 2019.
3. Техэксперт — профессиональная справочная система «Техэксперт». URL: <https://xn--e1aaougdegv4f.xn--80aswg/> (дата обращения 26.05.2025).
4. КонсультантПлюс — справочно-правовая система «КонсультантПлюс». URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения 26.05.2025).
5. ГАРАНТ — информационно-правовая система «Гарант». URL: <https://www.garant.ru/> (дата обращения 26.05.2025).
6. NormaCS. «О системе NormaCS — единая база нормативов и стандартов, средства поиска и верификации текстов документов». URL: <https://www.normacs.com/> (дата обращения 26.05.2025).
7. Esetova, A. M., Ismailova, S. T., Emirbekova, D. R., Pavluchenko, E. I., & Yusfova, A. M. Managing the information potential of a construction company in the transition to a digital economy. Revista ESPACIOS. 2019. Vol. 40(14), 28.
8. Li C., Petzold F. Ontology-Driven Mixture-of-Domain Documentation: A Backbone Approach Enabling Question Answering for Additive Construction // Buildings. 2025. T. 15, №1. Статья 133. DOI: 10.3390/buildings15010133.
9. Chetyrkina NYu, Chetyrkina ED, Starodubtseva NYu. Prospects for the Application of Smart Standards at an Industrial Enterprise [In Russian]. Society: Politics, Economics, Law. 2022; (5): 60–65.
10. FERNÁNDEZ-LÓPEZ M, GÓMEZ-PÉREZ A. Overview and analysis of methodologies for building ontologies. The Knowledge Engineering Review. 2002;17(2):129-156. DIO:10.1017/S0269888902000462
11. Biagetti, Maria Teresa. 2021. «Ontologies as knowledge organization systems». Knowledge Organization 48, no. 2: 152-176.
12. Gribova V.V., Kleshchev A.S., Moskalenko F.M., Timchenko V.A. A Two-level Model of Information Units with Complex Structure that Correspond to the Questioning Metaphor // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2015. Vol. 49(5). P. 172-181. DOI: 10.3103/S0005105515050052.
13. Gribova V.V., Kleshchev A.S., Moskalenko F.M., Timchenko V.A. A Model for Generation of Directed Graphs of Information by the Directed Graph of Metainformation for a Two-Level Model of Information Units with a Complex Structure // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2015. Vol. 49(6). P. 221-231. DOI: 10.3103/S0005105515060059.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОМПОЗИЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МРТ С ЦЕЛЮ ИХ РАЗМЕТКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РАССЕЯННОГО СКЛЕРОЗА

Аннотация: в статье рассматривается возможность применения методов композиции двух снимков МРТ, полученных с помощью разных способов съемки, для сокращения времени разметки данных.

Ключевые слова: рассеянный склероз, симптом центральной вены, автоматизация, диагностика, разметка данных.

V.V. Ivanova, PhD student, overpace@gmail.com
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia
RTC, Saint Petersburg, Russia

INVESTIGATION OF MRI IMAGE COMPOSITION METHODS FOR MARKING THEM FOR THE DIAGNOSIS OF MULTIPLE SCLEROSIS

Abstract: the article discusses the possibility of using methods of composing two MRI images obtained using different imaging methods to reduce the time needed to mark up the data.

Key words: multiple sclerosis, central vein symptome, automation, diagnostics, data markup.

Первое документированное упоминание рассеянного склероза (РС) встречается еще в рукописи конца XIV века, а с 1930-х годов ученые начали систематически изучать данное явление. РС представляет собой аутоиммунное воспалительное заболевание центральной нервной системы, [1], при этом точная причина его возникновения до сих пор не выявлена [2].

Для диагностики РС на ранних стадиях заболевания используют различные биомаркеры. Например, в начале этого века с помощью магниторезонансной томографии был идентифицирован такой нейровизуализационный биомаркер, как симптом центральной вены (СЦВ). Он представляет собой наличие центральной вены, которая локализована в очагах демиелинизации. При этом для

того, чтобы отделить РС от других заболеваний, необходимо, чтобы СЦВ присутствовал более чем в 45% очагов демиелинизации [3].

Наличие очагов демиелинизации определяется на последовательности МРТ с инверсионно-восстановительным методом (FLAIR – Fluid-Attenuated Inversion Recovery), а присутствие центральной вены обнаруживается на импульсной последовательности (SWI – Magnetic Susceptibility Weighted Imaging). При этом снимки сопоставляются и исследуются параллельно. Таким образом, для разметки данных при использовании методов машинного обучения необходимо два набора снимков, что требует значительных затрат времени.

Цель данной работы заключалась в оценке возможности использования методов композиции при определении наличия СЦВ, что позволило бы вдвое сократить объем данных для разметки.

В качестве входных данных выступала пара снимков DICOM, полученных с помощью разных режимов съемки (SWI и FLAIR). Кроме того, по количеству срезов в снимках был создан набор масок пересечения, указывающих на наличие и расположение на снимке очага поражения или вены.

В связи с тем, что непосредственно определение наличия РС не являлось целью данной работы, на масках изображения были отмечены исключительно те объекты, для которых существовала пара. При этом форма области интереса для очагов поражения и венул совпадала (круг диаметром 10 пикселей), поэтому существовал только один набор масок. На рис. 1 представлен пример пары срезов и их маски, также отмечена локализация СЦВ.

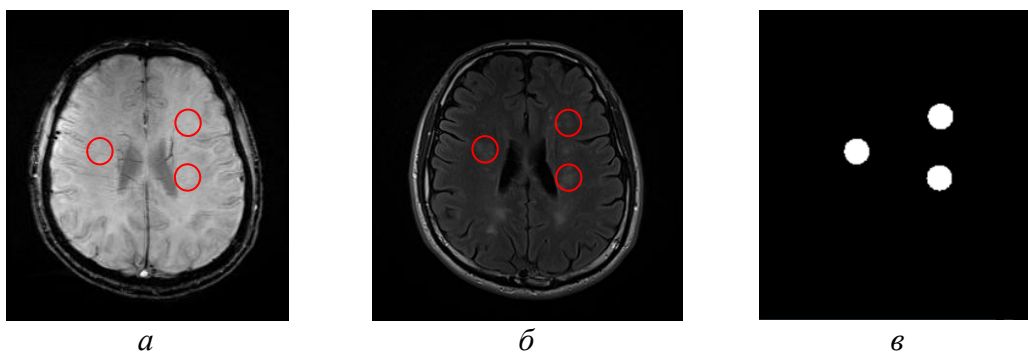


Рис.1. Срезы снимков DICOM в разных режимах съемки: а) срез SWI, б) FLAIR, в) маска изображения

Используемые способы наложения двух изображений были взяты из перечня режимов композиции класса QPainter [4], которые описывают модель объединения пикселей одного изображения (источника) с пикселями другого изображения (целевого). Таким образом, всего было исследовано более 30 различных режимов композиции, начиная от попарного сравнения пикселей по критерию яркости и заканчивая более сложными формулами.

Например, в режиме QPainter::CompositionMode_Screen исходный и конечный цвета инвертируются, а затем перемножаются, а в режиме

QPainter::CompositionMode_Difference происходит вычитание более тёмного цвета пикселя из более светлого.

Для оценки итогового качества методов наложения изображений был введен критерий k , вычисляющийся по формуле:

$$k = 1 - \Delta\_loc / sum\_loc, \quad (1)$$

где Δ_loc – это количество несовпадений численного значения встречаемости СЦВ между масками пересечений и объединений, sum_loc – это суммарное количество маркеров, определенное для масок пересечений.

В случае если значение критерия k оказалось больше, чем 0.9, то исследуемый метод композиции снимков МРТ удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям.

Всего было применено более 30 способов наложения изображений для четырех степеней интенсивности яркости пикселей целевого изображения (0.25, 0.5, 0.75 и 1.0) и двух способов определения источника и целевого изображения. На рис. 2 представлен алгоритм исследования применимости использования того или иного метода композиции с целью разметки данных.

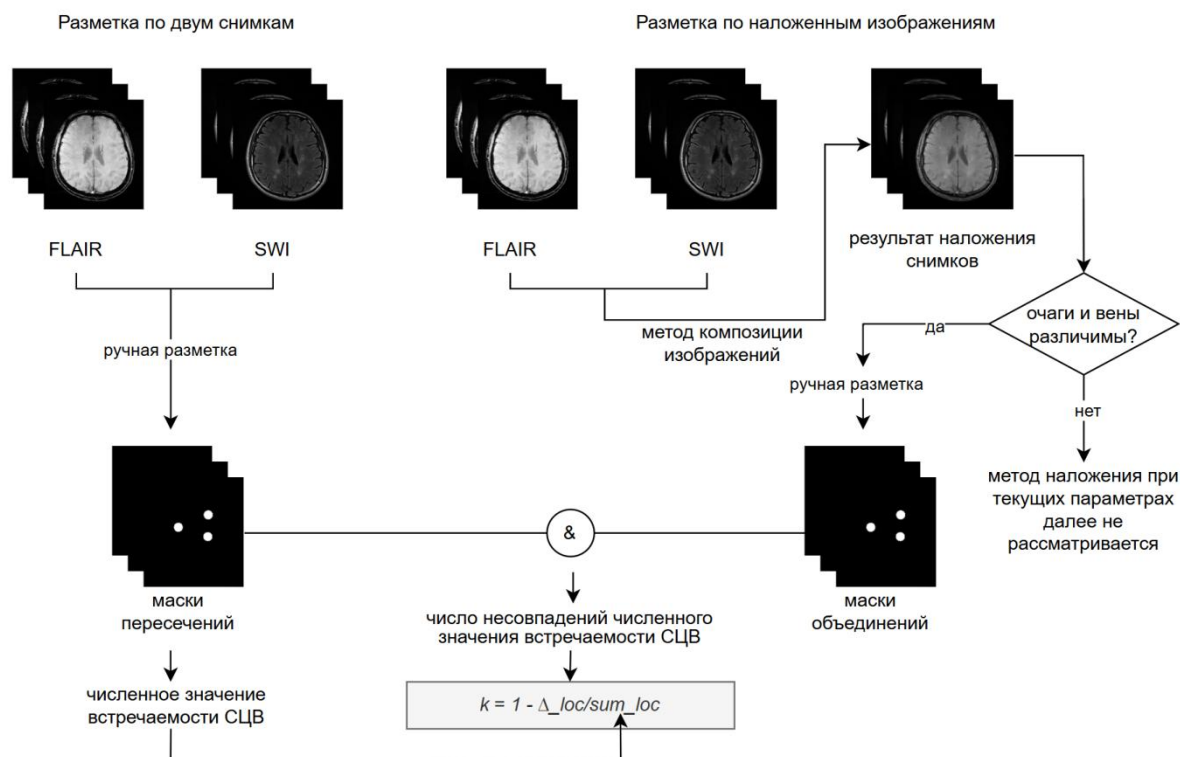


Рис.2. Предлагаемый алгоритм для оценки применимости методов композиции изображений

На первом этапе разметки по наложенным изображениям возможность применения метода композиции изображений определялась на одном срезе снимка. Если очаги патологии и венулы на совмещенном снимке были визуальнее хуже различимы по сравнению с исходными изображениями, то метод наложения при текущих параметрах далее не рассматривался. На рис. 3 приведены примеры подходящего и неподходящего методов композиции изображений.

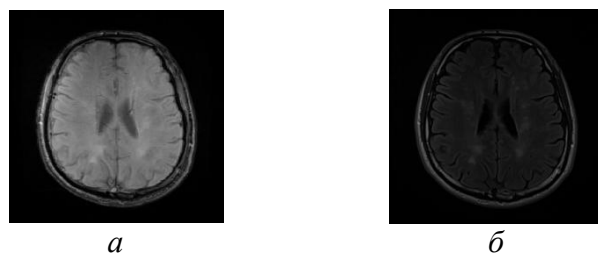


Рис.3. Метод композиции: а) прошедший первичный отбор, б) не прошедший первичный отбор

В результате из 304 различных вариантов наложения изображений было отобрано 5. Они были применены ко всем срезам снимков, после чего вручную размечались маски очагов поражения и венул. Далее маски с одинаковым номером накладывались друг на друга, определяя маску пересечений для каждой пары срезов (маски объединения).

На следующем шаге происходило определение совпадения локализации масок пересечения и масок объединения. Если при наложении масок метки перекрывали друг друга более чем на 50%, то совпадение засчитывалось, иначе – нет.

На финальном этапе согласно описанному ранее критерию определялась применимость каждого из выбранных методов. В таблице 1 представлены результаты применения различных композиций снимков МРТ.

Таблица 1. Оценка применимости различных методов композиции изображений

Название метода	Интенсивность наложения	Источник	Значение коэффициента k
SourceOver	0.5	FLAIR	0.78
SourceIn	0.5	FLAIR	0.72
SourceIn	0.5	SWI	0.72
Multiply	0.5	FLAIR	0.72
NotSourceAndNotDestination	0.25	FLAIR	0.67

Как можно судить по таблице, наиболее приближенное к 1 значение критерия K было у метода SourceOver с интенсивностью наложения 0.5 и изображением-источником последовательности FLAIR.

По результатам работы был сделан вывод о том, что алгоритм нуждается в доработке, поскольку ни один из применяемых методов композиций не показал значение критерия оценки качества близкое к 0.9. Это связано с тем, что в результате применения большинства методов определение местоположения центральной вены было затруднено. В качестве дальнейшего усовершенствования предлагается повышение контрастности и четкости снимков последовательности FLAIR перед применением методов композиций.

Список литературы

1. Dworkin J.D. et al. Automated integration of multimodal MRI for the probabilistic detection of the central vein sign in white matter lesions //American Journal of Neuroradiology. – 2018. – Т. 39. – №. 10. – P. 1806-1813.
2. Dighriri I.M. et al. An overview of the history, pathophysiology, and pharmacological interventions of multiple sclerosis //Cureus. – 2023. – Т. 15. – №. 1.
3. Потемкина Е.А. и др. Симптом центральной вены при магнитно-резонансной диагностике рассеянного склероза //Вестник медицинского института «Реавиз»: реабилитация, врач и здоровье. – 2024. – Т. 14. – №. 2. – С. 123-130.
4. QPainter Class [Электронный ресурс]: режим доступа- <https://doc.qt.io/qt-6/qpainter.html#CompositionMode-enum>.

А.А. Котов, канд. филол. наук, ведущий научный сотрудник, kotov@harpia.ru
З.А. Носовец, канд. физ-мат. наук, научный сотрудник, nosovets@phystech.edu
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
МГЛУ, г. Москва, Россия
А.А. Филатов, старший разработчик, filatov.alex@gmail.com
ООО «Яндекс.Технологии», г. Москва, Россия

СИСТЕМА ВЫВОДА И КОММУНИКАТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ РОБОТА НА ОСНОВЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СЕМАНТИЧЕСКОМ ГРАФЕ

Аннотация: Рассматривается задача понимания роботом-компаньоном текста на естественном языке и конструирования естественно-языковых выводов из текста. Для решения задачи используется аппарат сценариев (отношений типа «если-то»), где каждый сценарий связывает смыслы отдельных высказываний и позволяет по входящему высказыванию построить семантические репрезентации связанных ситуаций. С помощью заданного механизма робот-компаньон Ф-2 строит граф контекста на заданную глубину, оценивая некоторые ситуации в этом графе как эмоционально значимые – для этого используется множество д-сценариев. Мы показываем, что релевантное речевое поведение робота обеспечивается поиском пути в семантическом графе от исходной ситуации (смысла входящего высказывания) к ближайшей эмоционально значимой ситуации (д-сценарию).

Ключевые слова: понимание текста, естественно-языковой вывод, роботы-компаньоны, эмоциональные компьютерные агенты, автоматическое поддержание диалога

A.A. Kotov, Ph. D., Senior researcher, kotov@harpia.ru
Z.A. Nosovets, Ph. D., Researcher, nosovets@phystech.edu
NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia
MGLU, Moscow, Russia
A.A. Filatov, Senior developer, filatov.alex@gmail.com
LLC "Yandex Technologies", Moscow, Russia

A SYSTEM OF INFERENCE AND COMMUNICATIVE BEHAVIOR FOR A COMPANION ROBOT BASED ON MOVEMENT IN A SEMANTIC GRAPH

Abstract: We research the problem of natural text understanding by a companion robot and constructing natural language inference from the incoming text. To solve the

problem, we suggest an apparatus of scenarios (“if-then” production), where each scenario connects the meanings of individual statements and allows semantic representations of related situations to be constructed based on the incoming statement. Using the given mechanism, the F-2 companion robot builds a context graph to a given depth, evaluating some situations in this graph as emotionally significant – a set of d-scenarios is used for this purpose. We show that the relevant speech behavior of the robot is provided by searching for a path in the semantic graph from the initial situation (the meaning of the incoming utterance) to the nearest emotionally significant situation (d-scenario).

Keywords: text comprehension, natural language inference, companion robots, emotional computer agents, automatic dialogue maintenance

Традиционные методы решения задач в области искусственного интеллекта часто использовали перемещение в концептуальном графе: предполагалось, что текущее состояние проблемы и целевое состояние – это содержание задачи, а поиск пути между текущим и целевым состоянием – это решение задачи. Такой подход наиболее широко известен по универсальному решателю задач Ньюэлла и Саймона [1]. В задаче «ханойские башни» текущая конфигурация башен (расположение дисков на стержнях) является исходным состоянием, а каждое перемещение диска формирует новую конфигурацию. При этом все конфигурации перечислимы и могут быть представлены как узлы в графе, а отдельная операция перемещения диска – как ребро между двумя конфигурациями. Подобные методы вывода использовались и в классических работах по моделированию понимания текста, как за рубежом [2], так и в России [3]. В области информационных технологий в настоящее время этот подход почти полностью вытеснен рекуррентными нейросетями (LLM), позволяющими продолжать заданный текст (угадывать следующий токен текста) и, таким образом, строить текстовые ответы по исходному запросу (промпту) на основе масштабного обучения на большом объеме текстов. Для моделирования вывода, подобного классическим моделям искусственного интеллекта, в современных нейросетевых архитектурах начинает применяться подход типа Chain-of-Thought, который по одному фрагменту текста (узлу в графе вывода) строит другой фрагмент текста (новый узел в графе вывода) [4]. Таким образом, происходит частичный возврат к классическим архитектурам искусственного интеллекта, основанным на графах, однако связь между узлами обеспечивается ресурсоёмкими и недетерминированными архитектурами LLM. Это затрудняет использование таких моделей во встраиваемых робототехнических решениях. Для планирования действий роботов-компаньонов и мобильных роботов классические графовые модели планирования и организации поведения – в том числе при поддержании коммуникации с человеком – могут представлять собой оптимальное решение.

В нашей работе мы отталкиваемся от классических графовых архитектур для решения задачи поддержания роботом-компаньоном естественного коммуникативного поведения с человеком. В рамках проекта робота-компаньона Ф-2 разрабатывается архитектура, которая позволяет роботу строить репрезентацию смысла поступивших высказываний (их семантическое представление), делать выводы из этих репрезентаций (строить производные семантические репрезентации), реагировать на слова человека с помощью речи и жестов, ставить цели и пытаться достичь этих целей в коммуникации с человеком, а также – выполнять простые действия, связанные с промежуточными узлами (репрезентациями) в качестве реакций или для достижения целей [5]. Робот Ф-2 использует синтаксический парсер для создания семантического представления [6]. Семантическое представление одного или нескольких входящих высказываний позволяет построить производное семантическое представление – естественно-языковой вывод. Для конструирования выводов используется инвентарь рациональных сценариев (р-сценариев) [5] – отношений типа «если-то» или *продукций*. В этом отношении инвентарь сценариев напоминает классические системы вывода типа Prolog, однако он работает с семантическими представлениями предложений на русском языке. Для создания инвентаря сценариев мы анализируем результаты автоматического разбора парсером текстов на русском языке, а также привлекаем разметчиков [7]. Для исходного высказывания – посылки сценария (например, *Ученик пошёл утром в школу*) разметчики должны предложить описания связанных ситуаций – следствий: что было до или явилось причиной исходной ситуации (связь типа BEFORE, например, *Ученик собрался в школу*), что было после (AFTER – *Ученик сидел на уроках, ученик получил оценку*), и что является интерпретацией этой ситуации (INTERP – *Ученик учился в школе*). Сейчас в инвентаре присутствует 6693 р-сценария. Инвентарь сценариев позволяет создавать графы двух видов: общий предрасчитанный граф знаний и динамический контекстный граф. Предрасчитанный граф отражает знание робота о типичных вариантах развития событий. Он формируется следующим образом: для каждого следствия сценария (ситуация типа BEFORE, AFTER или INTERP) мы заранее рассчитываем степень семантической близости с посылками всех остальных сценариев. Если степень семантической близости превышает заданный порог, между узлами устанавливается ребро перехода (связь типа NEAR). Это позволяет роботу объединить сценарии в общий граф, который сейчас имеет около 50000 вершин (посылок, а также следствий типа BEFORE, AFTER и INTERP). Общий граф позволяет быстро выбирать цепочки рассуждений на заданную глубину, которые используются для создания графа контекста, отражающего ожидания робота в текущей ситуации (на текущем этапе используется глубина 4 шага, что порождает подграфы размером до нескольких сотен узлов). При поступлении стимула (например, *Вася пошёл в гимназию*) система находит релевантный сценарий (например, *Ученик пошёл утром в школу*) и заполняет

валентности сценария конкретными референтами из текста: ‘Вася’ и ‘гимназия’. При этом работает механизм распространения референтов: если в сценарии известно, что агент посылки (*ученик пошёл...*) совпадает с агентом следствия (например, *ученик сидел на уроке*), то в графе контекста конкретный референт ‘Вася’ автоматически заполняет соответствующие валентности во всех порождённых узлах графа. Таким образом, абстрактное следствие сценария *ученик получил оценку* превращается в конкретный вывод *Вася получил оценку* – робот будет ожидать, что в контексте появится утверждение о том, что ‘Вася получил в школе некоторую оценку’. Второе (и последующие) полученное высказывание дополняет граф контекста: если вторым предложением текста будет *Вася получил пятёрку*, то оно сопоставится с графом контекста, а также расширит этот граф (граф будет дополнен ожиданиями BEFORE, AFTER и INTERP для нового высказывания). Одинаковые предикативные структуры с незаполненными референтами в графе контекста сливаются друг с другом, чтобы избежать дублирования.

Р-сценарии позволяют роботу по входящей ситуации конструировать производные ситуации, и далее описывать их в речи или ожидать их появления в тексте или последующих наблюдаемых роботом событиях. При этом возникает проблема релевантности высказываний: робот может описывать различные ситуации из графа контекста, но человеку эти ситуации не будут казаться релевантными, человек не будет понимать, «к чему робот это говорит» (см. рисунок 1 и последующий текстовый пример).

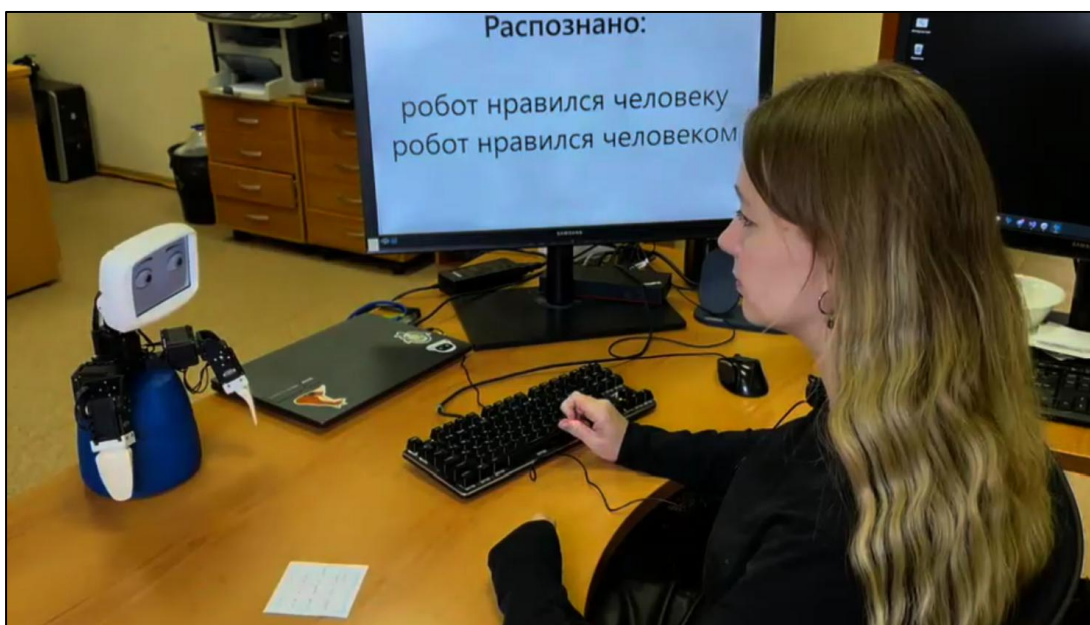


Рис. 1. Ситуация коммуникативного взаимодействия с роботом Ф-2

Человек: *Робот нравился человеку*

Робот: *Робот нравился человеку. Человек встретил робота. Человек познакомился с роботом. Человек влюбился робота.¹ Человек подарил цветок роботу. Робот приглянулся человеку.*

Каждое высказывание в реальном диалоге (и каждое действие в поведении) обычно представляется наблюдателю намеренным и преследующим определённую цель. Если эта цель отсутствует, то речевое поведение выглядит хаотичным и неорганизованным, даже если робот целенаправленно описывает контекст ситуации. Для решения этой проблемы мы предлагаем выбирать такие пути в семантическом графе, которые приводят к эмоционально значимой ситуации. Робот может оценивать некоторые ситуации в своём окружении или предполагаемые ситуации как позитивные или негативные [8]. Описание путей в графе контекста, которые приводят к эмоционально значимым ситуациям, должно сделать речевое поведение робота намеренным со стороны наблюдателя. Этот механизм будет напоминать «универсальный решатель задач» Ньюэлла и Саймона с той разницей, что целевым состоянием задачи будет некоторая эмоциональная ситуация. Робот будет «ожидать» позитивного развития событий (или предпринимать действия, чтобы стимулировать такой исход) и «опасаться» негативного развития событий. Для эмоциональной оценки используется инвентарь так называемых *доминантных сценариев* (или *д-сценариев*), отвечающих за обработку эмоциональных ситуаций: ‘меня никто не любит’, ‘я никому не нужен’, ‘против меня что-то замышляют’ и т. д. Инвентарь д-сценариев разработан на основе монографии [9], где приведено 34 д-сценария, но в практической реализации используются около 360 д-сценариев, поскольку каждая синтактико-семантическая схема выделена отдельно.

При поступлении высказывания робот (а) строит непосредственные эмоциональные реакции на сообщение с помощью д-сценариев, (б) строит контекстный граф естественно-языкового вывода из данного сообщения на некоторую глубину, (в) для каждого узла в графе естественно-языкового вывода оценивает близость этого узла к д-сценариям, и (г) отбирает в графе контекста такие пути, которые с наибольшей близостью приводят к д-сценариям. Избранные пути будут для робота наиболее релевантными развитиями событий, которые он должен выражать в речи и которые (в перспективе) должны вызывать действия робота. В практической реализации этот механизм действует, к примеру, следующим образом:

Человек: *Аспирант описал в диссертации механизмы внимания.*

Робот: *Хороший человек нас понимает [поймёт].*

¹ Отмеченная ошибка связана с тем, что в компоненте синтеза неверно описана модель управления глагола *влюбится*. Этот глагол является непереходным, и ближайший актант присоединяется к нему в виде предложной группы *в X'a* (например, *в Васю*). Здесь же робот использует этот глагол как переходный.

– исходное высказывание приводит к созданию семантического графа на глубину 1 ребро с общим числом узлов – 47. Для каждого узла оценивается близость к д-сценариям. Выбирается ветвь, построенная по сценарию @описываться_14070_34_v3: ‘в статье описывалось, что произошло’ (посылка) – ‘читатели поняли, что произошло’ (следствие типа AFTER). Это следствие соответствует д-сценарию ВНИМАНИЕ ‘приятно, когда меня понимают’ (см. рис. 2). Этот д-сценарий требует, чтобы субъект отождествлял себя с пациентом (с тем, кого понимают), либо считал ‘того, кого понимают’ и ‘того, кто написал текст’ – протагонистом (то есть позитивным героем текста, «своим»). Таким образом, по исходному высказыванию робот строит вывод ‘читатели поняли диссертацию аспиранта’, эмоционально оценивает этот вывод как наиболее релевантный (среди других 47 узлов графа) и эмоционально высказывается об этом событии, считая ‘аспиранта’ «своим» (использует местоимение *мы-нас*). Это эмоциональная оценка, относящаяся к будущему (на сценарии это событие размечено как AFTER), позволяющая роботу «ожидать» или «предполагать», что ‘найдутся хорошие люди, которые поймут диссертацию аспиранта’.

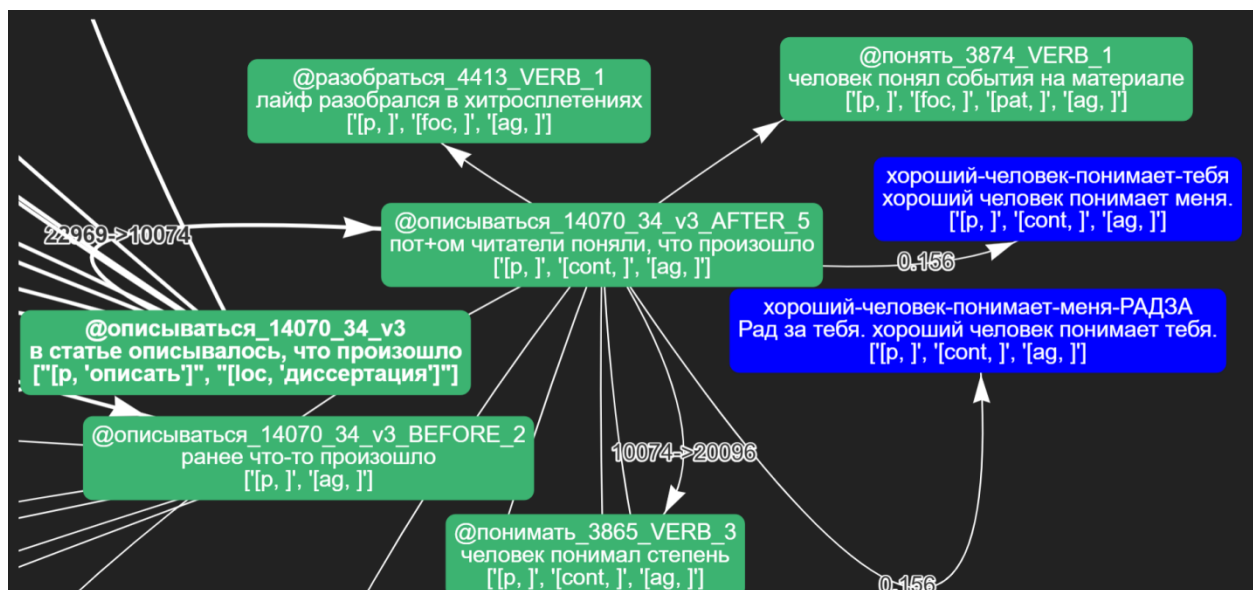


Рис. 2. Визуализация части семантического графа контекста для высказывания *Аспирант описал в диссертации механизмы внимания*

Выводы. Использование аппарата сценариев и семантического графа (как общего графа знаний, так и графа контекста) позволяет роботу по высказыванию строить контекст в виде графа, а также объединять в общий контекст несколько связанных высказываний. Введение эмоциональной ситуации как целевого состояния для поиска пути в этом графе обеспечивает целенаправленность коммуникативного поведения робота: робот получает возможность обсуждать в речи негативные ситуации, наступления которых он «опасается», а также позитивные ситуации, наступления которых он

«ожидает». Это также может позволить интегрировать граф естественно-языкового вывода с системой действий, которая позволит роботу активно предпринимать действия для избежания негативных последствий и для стимулирования позитивных исходов.

Список литературы

1. Newell A., Simon H. Human problem solving. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1972. – 920 p.
2. Schank R. C. Conceptual Information Processing // Conceptual Information Processing. North Holland, 1975. – 374 p.
3. Дорофеев Г. В., Мартемьянов Ю. С. Логический вывод и выявление связей между предложениями в тексте // Машинный перевод и прикладная лингвистика. 1969. Т. 12. С. 36–59.
4. Wei J. et al. Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models // Advances in Neural Information Processing Systems. 2022. Т. 35.
5. Kotov A. A., Filatov A. A., Nosovets Z. A. Cognitive architecture for F-2 companion robot to support semantic shifts and cognitive domains via scenario oppositions // Cogn Syst Res. Elsevier B.V., 2025. Т. 89. С. 101320.
6. Kotov A. A. et al. Frames revisited: automatic extraction of semantic patterns from a natural text // Computational Linguistics and Intellectual Technologies. 2018. Т. 17, № 24. С. 357–367.
7. Kotov A. A. et al. The development of a natural language reasoning system for a companion robot // Computational Linguistics and Intellectual Technologies. Moscow: RSUH, 2025. С. 183–194.
8. Карпов В. Э. Социальные сообщества роботов: Эмоции и темперамент роботов. Общение роботов. Модели контагиозного, подражательного и агрессивного поведения роботов. Командное поведение роботов и образование коалиций. Пространственная память анимата. – М.: URSS, 2018. – 352 с.
9. Котов А. А. Механизмы речевого воздействия. – М.: РГГУ, 2021. – 432 с.

И.А. Малов, магистрант, malovia@student.bmstu.ru
М.Ю. Малова, магистрант, bryychevamyu@student.bmstu.ru
М.В. Мурашов, д.т.н., профессор, Murashov@bmstu.ru
А.А. Моисеев, бакалавр, moiseev.a.a@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРАВИЛ И ВРЕМЕННЫХ ПРИВЫЧЕК ДЛЯ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ KNX-СИСТЕМ

Аннотация: В работе предложен гибридный метод анализа логов KNX-системы, сочетающий извлечение причинно-следственных правил и обнаружение временных привычек пользователя. Метод автоматически генерирует интерпретируемые рекомендации по изменению конфигурации, включая автоматизацию сцен по расписанию и устранение аномалий. Качество правил оценивается без ручной разметки на основе их повторяемости. Эксперимент на реальных данных (4759 событий за 35 дней) показал точность правил 95,4% и выявил 41 извлечённое правило, 171 новых сценариев и 45 предложений по автоматизации сцен. Подход ориентирован на интеграцию в системы автоматизации умного дома, такие как Iridium или Wirenboard.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ, рекомендательная система, извлечение правил, временные привычки, аномалии

I.A. Malov, student, malovia@student.bmstu.ru
M.Y. Malova, student, bryychevamyu@student.bmstu.ru
M.V. Murashov, D.Sc., professor, Murashov@bmstu.ru
A.A. Moiseev, student, moiseev.a.a@student.bmstu.ru
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

HYBRID METHOD FOR RULE AND TEMPORAL HABIT MINING IN KNX CONFIGURATION RECOMMENDATION

Abstract: This paper presents a hybrid method for analyzing KNX system logs that combines causal rule mining and temporal habit discovery. The method automatically generates interpretable configuration recommendations, including time-based scene automation and anomaly resolution. Rule quality is evaluated without manual labeling by measuring consistency across occurrences. Evaluation on real-world data (4759 events over 35 days) achieved 95,4% rule precision and yielded 41 rules, 171 new scenarios, and 45 scene automation proposals. The approach is designed for integration into smart home automation systems such as Iridium or Wirenboard.

Key words: KNX, intelligent analysis, recommender system, rule mining, temporal habits, anomalies

Работа посвящена проблеме отсутствия автоматической адаптации конфигурации систем автоматизации стандарта KNX [1] к изменяющемуся поведению пользователя. Современные подходы сталкиваются с рядом ограничений: одни требуют ручной настройки инженером, другие используют модели машинного обучения «чёрного ящика», что снижает доверие пользователей и затрудняет валидацию поведения системы в бытовых и критически важных сценариях [2–4]. В литературе подчёркивается важность интерпретируемости и прозрачности решений для умного дома, где автоматизация непосредственно влияет на привычки и комфорт жильцов [3]. В связи с этим растёт интерес к гибридным методам, сочетающим понятные человеку правила и алгоритмический анализ данных.

Метод, представленный на рисунке 1, включает последовательную обработку KNX-логов, начинающуюся с генерации событий путём выделения значимых изменений состояний устройств и фильтрации неинформативных значений. Далее события группируются во временные кластеры («всплески») длительностью не более 5 секунд, что соответствует типичным пользовательским сценариям. На основе выявленных всплесков формируются интерпретируемые правила вида «если $A = v$, то $B = v_1$, $C = v_2 \dots$ », для каждого из которых оцениваются поддержка (частота срабатывания) и достоверность (стабильность выполнения реакций). Параллельно проводится анализ устройств, не охваченных правилами, с целью выявления регулярных временных привычек, таких как включение или выключение в определённые часы суток. Отдельно анализируется поведение пользователя в отношении существующих сцен, при обнаружении регулярного ручного запуска сцены формируется предложение по её автоматизации по расписанию. Результатом работы метода является набор рекомендаций по изменению конфигурации KNX-системы, ориентированных на инженера-проектировщика и представленных в виде структурированного текстового или HTML-отчёта.

Для оценки качества использован метод автоматической валидации: правило считается достоверным, если его выполнение наблюдается в ≥ 90 % срабатываний триггера. Это исключает необходимость ручной разметки аномалий [3].

Эксперимент проведён на логе KNX-системы жилого дома за 30 дней (4759 событий, 120 групповых адресов). Результаты:

- точность правил: 95,4 %;
- извлечено 41 правило;
- выявлено 171 новый сценарий (кандидат на правило);
- сформировано 39 временных привычек (включение/выключение по часам);

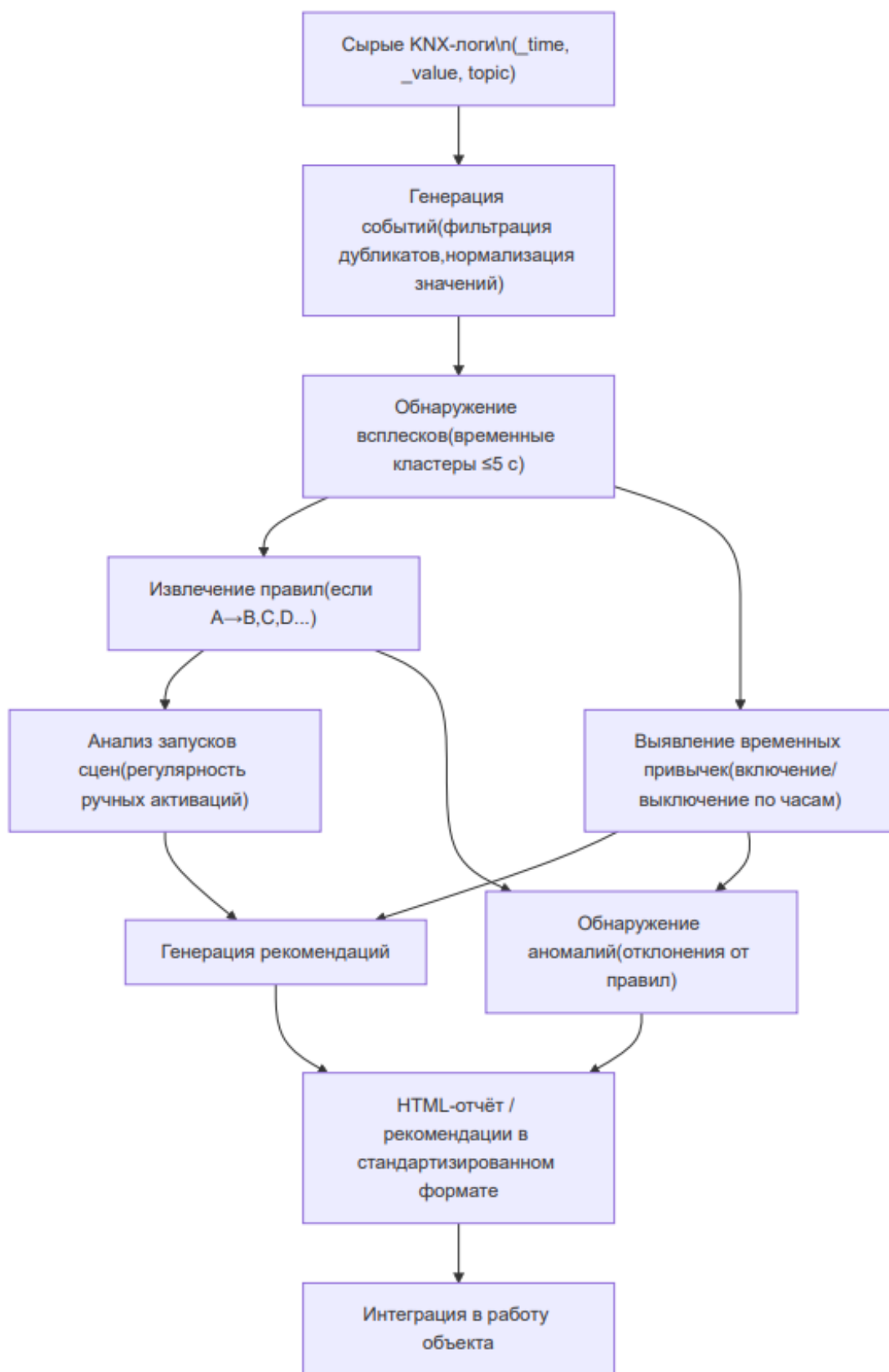


Рис. 1. Последовательная обработка данных в предложенном методе

- предложено 45 автоматизаций сцен (запуск по расписанию).

На рисунке 2 прилагается пример рекомендаций, сгенерированной системой.

Вы активируете '	Dali 1 Scenes 2* Кухня (4)' значением **20.0** в промежутке 04:00–06:00 уже 34 дней. Хотите автоматически отправлять значение 20.0 в 05:03:04?
Вы активируете '	Dali 1 Scenes 2* Кухня (4)' значением **20.0** в промежутке 14:00–16:00 уже 31 дней. Хотите автоматически отправлять значение 20.0 в 14:48:42?
Вы активируете '	Dali 1 Scenes 2* Кухня (4)' значением **20.0** в промежутке 18:00–20:00 уже 32 дней. Хотите автоматически отправлять значение 20.0 в 18:45:54?

Рис. 2. Фрагмент HTML-отчета

Визуализация взаимосвязей между устройствами выполнена в виде тепловой карты условной вероятности (см. рис. 3), где ячейка (i, j) отображает вероятность того, что устройство j активно при условии, что устройство i активно.

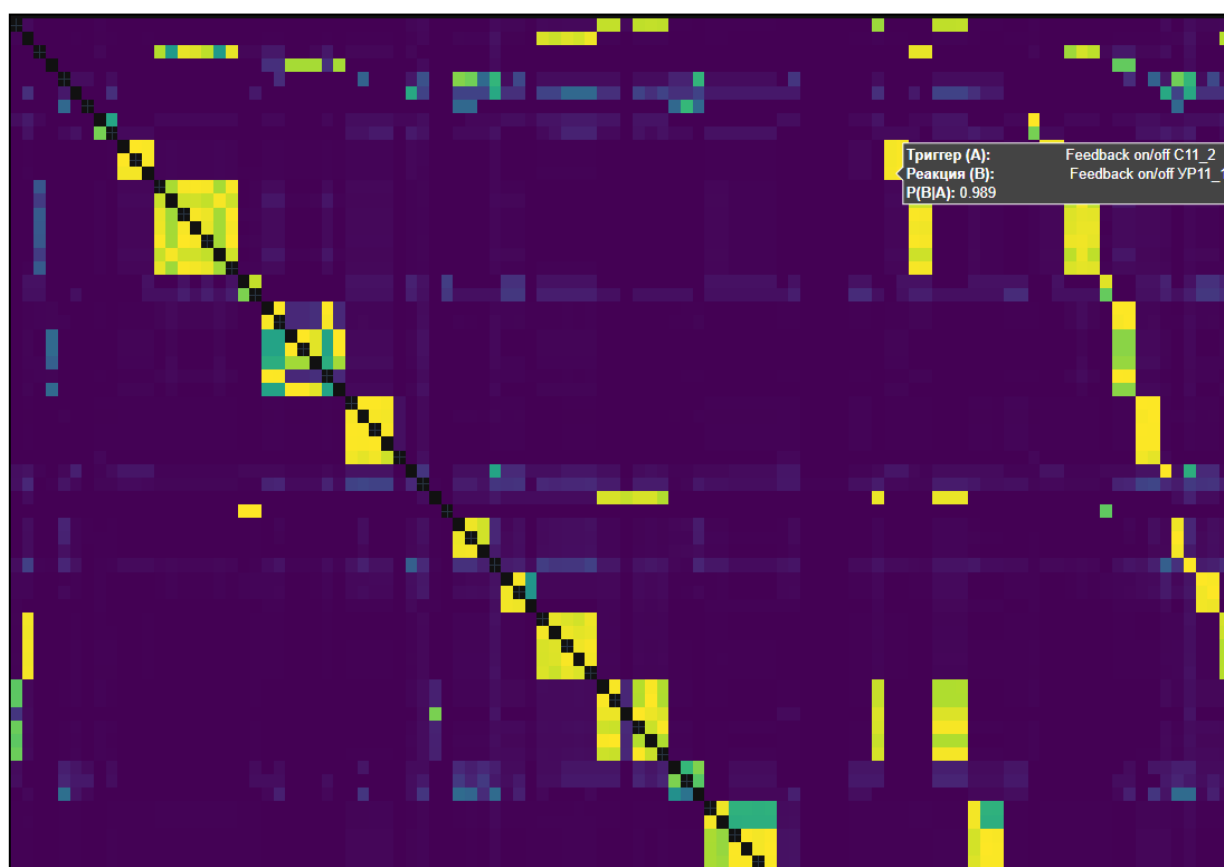


Рис. 3. Тепловая карта условной вероятности активации устройств

Подход реализован на Python с использованием pandas, scikit-learn [5] и plotly. Для обработки пропусков применялся SimpleImputer с заполнением нулями, что корректно для one-hot представления.

Работа демонстрирует, что гибридный подход, объединяющий извлечение правил и обнаружение временных привычек, позволяет создать интерпретируемую, адаптивную и практически применимую систему для KNX. В дальнейшем планируется интеграция в системы автоматизации умного дома, такие как Iridium или Wirenboard, через API и поддержка онлайн-обучения.

Список литературы

1. Ioan-Valentin S., Petru D. KNX Building Automations Interaction with City Resources Management System // *Procedia Technology*. 2014. pp. 212-219 <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.477>
2. Shajalal M et al. Explaining AI Decisions: Towards Achieving Human-Centered Explainability in Smart Home Environments // *Explainable Artificial Intelligence*. 2024. pp.418–440 https://doi.org/10.1007/978-3-031-63803-9_23
3. Al-Khazraji F. et al. Adaptation in Smart Home Automation Systems: A Systematic Review of Decision-Making and Interaction // *Internet of Things*. 2025. Vol. 31. Article 101588. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101588>
4. Qiu M., Han M., Chung H. PBRE: A Rule Extraction Method from Trained Neural Networks Designed for Smart Home Services. *Database and Expert Systems Applications*. 2022. pp. 158–173. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12426-6_13
5. Pedregosa F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python // *Journal of Machine Learning Research*. 2011. pp. 2825–2830 <https://doi.org/10.48550/arXiv.1201.0490>

Секция 4

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

М. А. Белкина, студент, mbelkina@gmail.com
Г. Ш. Шкаберина, доцент, z_guzel@mail.ru
Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия

СРАВНЕНИЕ СТАНДАРТНОГО И УСКОРЕННОГО K-MEANS ДЛЯ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПАЦИЕНТОВ С ДИАБЕТОМ ПО БИОМЕДИЦИНСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Аннотация: В статье рассматривается сравнительный анализ эффективности алгоритмов кластеризации k-means и его ускоренной версии Elkan's k-means на наборе данных о показателях здоровья при диабете. В вычислительном эксперименте проводилось сравнение скорости и точности кластеризации при инициализации тремя способами в равных стартовых условиях

Ключевые слова: кластеризация данных, k-means, Elkan's k-means.

М. А. Belkina, student, mbelkina@gmail.com
G. Sh. Shkaberina., Associate Professor, z_guzel@mail.ru
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

COMPARISON OF STANDARD AND ACCELERATED K-MEANS ALGORITHMS FOR CLUSTERING DIABETIC PATIENTS BASED ON BIOMEDICAL INDICATORS

Abstract: This article presents a comparative analysis of the performance of k-means clustering algorithms and its accelerated version, Elkan's k-means, on a dataset of diabetes health indicators. A computational experiment compared the speed and accuracy of clustering with three initialization methods under identical starting conditions.

Key words: data clustering, k-means, Elkan's k-means.

Современные задачи анализа данных характеризуются одновременно наличием большого объема многомерных данных и высокой потребностью в вычислительных ресурсах, что ставит перед учеными вызовы в области эффективной обработки информации. Например, остро эти вызовы проявляются в задачах кластеризации, где требуется не только выявить скрытые структуры данных, но и выполнить в разумные сроки. Одной из практически значимых областей применения кластеризации является здравоохранение. Диабет является одним из распространенных хронических заболеваний, и

раннее выявление лиц, которые находятся в группе риска, является ключевой задачей в профилактике заболевания.

Одной из наиболее известных моделей автоматической группировки данных является алгоритм *k-means* [1, 2], предложенный Г. Штейнгаузом [3] и реализованный в итеративной форме С. Ллойдом [4].

Несмотря на простоту реализации и широкую применимость, Классический алгоритм *k-means* обладает рядом ограничений. Алгоритм чувствителен к выбору начальной инициализации центроидов, не гарантирует нахождение глобального минимума целевой функции и демонстрирует высокую вычислительная сложность при работе с большими объёмами данных. В качестве альтернативы предложен оптимизированный алгоритм Elkan's *k-means* [5,6], использующий неравенство треугольника для сокращения количества вычислений расстояний на каждой итерации.

Целью данной работы является сравнительный анализ вычислительной эффективности алгоритмов *k-means* и Elkan's *k-means* на медицинских данных, а также оценка влияния способа инициализации центроидов на качество кластеризации, стабильность и скорость сходимости алгоритмов.

Целью задачи *k-means* является поиск k точек (центров, центроидов) $X_1, \dots, X_k$ в d -мерном пространстве, при котором сумма квадратов расстояний от каждой из заданных точек данных (векторов данных) $A_1, \dots, A_N$ до ближайшего к ней центроида достигала минимума (1):

$$\operatorname{argmin} F(X_1, \dots, X_k) = \sum \min_{j \in \{1, k\}} \|X_j - A_i\|^2. \quad (1)$$

Алгоритм *k-means* решает эту задачу путем итеративного разбиения множества векторов наблюдений на k непересекающихся кластеров C_j , $j = 1..k$, где каждый кластер C_j содержит точки, ближайшие к соответствующему центроиду X_j . Как показано в работах Дж. Маккуина [7] базовый алгоритм *k-means*, известный также как алгоритм Ллойда, состоит из итеративного повторения следующих двух шагов:

Дано: k исходных кластерных центров (центроидов).

Шаг 1. Создание нового кластера C_j , назначением каждой точки данных ближайшему центру кластера (центроиду).

Шаг 2. Вычисление новых кластерных центров.

Повторение шагов 1 и 2, пока внутри каждого кластера изменения не прекратятся.

Важно отметить, что в алгоритме *k-means* необходимо первоначально спрогнозировать количество кластеров (групп, подмножеств) и полученный результат зависит от начального выбора центроидов, поскольку алгоритм реализует локальный поиск и не гарантирует нахождения глобального минимума целевой функции. Поэтому однократный запуск алгоритма может привести к субоптимальному решению, что приводит к необходимости много-

кратного запуска алгоритма с различными начальными условиями для надежности результата.

Классический алгоритм k-means на каждой итерации вычисляет расстояния от каждой точки данных до всех центроидов, чтобы определить ближайший кластер. При работе с большими объёмами данных это приводит к высокой вычислительной сложности $O(Nkd)$ на итерацию (N – количество объектов, k – количество кластеров, d – размерность).

В работе [5] предложена оптимизированная версия алгоритма k-means, основанную на использовании неравенства треугольника для сокращения числа вычислений расстояний. Идея заключается в том, чтобы избегать лишних вычислений расстояний, если можно доказать, что точка не может перейти в другой кластер. Выделим ключевые моменты Elkan's k-means:

- Для каждой точки A_i и каждого центроида X_j поддерживается нижняя граница $l_{ij} \leq \|A_i - X_j\|$. Если известно, что текущее расстояние от A_i до её текущего центроида X_j^* меньше, чем l_{ij} для любого другого $j \neq j^*$, то пересчёт расстояния до X_j можно пропустить.

- Поддерживается верхняя граница $u_i \geq \|A_i - X_j^*\|$. Если центроиды изменились незначительно, и u_i остаётся меньше всех l_{ij} , то переназначение точки не требуется.

- При обновлении центроидов новые расстояния могут быть оценены без прямого вычисления (2):

$$\|A_i - X_j^{\text{new}}\| \geq \|A_i - X_j^{\text{old}}\| - \|A_j^{\text{old}} - X_j^{\text{new}}\|. \quad (2)$$

Это позволяет обновлять нижние и верхние границы.

- Если расстояние между двумя центроидами велико, то некоторые точки заведомо не могут перейти от одного к другому. Это позволяет дополнительно сократить число проверок.

- Хранение только $k-1$ нижних границ для каждой точки до всех центроидов, кроме текущего.

В худшем случае вычислительная сложность алгоритма Elkan's k-means остаётся такой же, как у классического алгоритма k-means $O(Nkd)$. Но на практике алгоритм демонстрирует значительное ускорение 2-10 раз и более, особенно при большом N , умеренном или малом k , низкой размерности d , а также высокой кластерной разделимости.

Алгоритм особенно эффективен на итерациях, близких к сходимости, когда центроиды почти не меняются, и границы позволяют отсеять подавляющее большинство вычислений.

Проведены вычислительные эксперименты на двух подвыборках набора данных о показателях здоровья респондентов при диабете, созданного на основе опроса Центра по контролю и профилактике заболеваний США

(CDC) [8]: Diabetes_5000 (5000 векторов данных размерностью 21), Diabetes_16000 (16000 векторов данных размерностью 21).

В каждом эксперименте в качестве меры расстояния использовался квадрат Евклидова расстояния. Инициализация начальных центроидов осуществлялось тремя способами: случайно сгенерированный набор центроидов (random); выбор исходных векторов данных в качестве начальных центроидов (point); предварительное случайное распределение всех векторов данных по кластерам с последующим усреднением координат вектора внутри каждого кластера для определения начальных центроидов (average). Каждый эксперимент повторялся 30 раз для каждого способа инициализации начальных центроидов. Для обеспечения корректного сравнения производительности алгоритмов k-means и Elkan's k-means использовались идентичные начальные центроиды: в каждом запуске оба алгоритма стартовали с одного и того же набора начальных центроидов. Такой подход позволяет объективно сравнить общее время выполнения при одинаковых стартовых условиях.

По каждому алгоритму рассчитаны минимальное (Min), максимальное (Max), среднее (Average), медианное (Median) значения целевой функции и времени выполнения алгоритма, а также среднеквадратичное отклонение (Std.Dev.), значения коэффициентов вариации (V) и размаха(R) целевой функции (см. табл. 1 и 2). Различия в значениях целевой функции между алгоритмами k-means и Elkan's k-means не превышает 0,1%, что находится в пределах машинной точности и подтверждает их численную эквивалентность при идентичных начальных условиях. Оптимальное значение количества кластеров для Diabetes_16000 было найдено по критерию силуэта [9].

Таблица 1. Результаты вычислительных экспериментов для набора данных Diabetes_16000 (16000 векторов данных размерностью 21), 10 кластеров

	k-means			Elkan's k-means		
	random	point	average	random	point	average
	Значение целевой функции					
Min	663530,48	649902,28	649762,95	663441,01	649770,52	649763,32
Max	749924,17	717618,02	702852,69	729407,89	688289,91	8661955,25
Average	688653,47	667633,87	664452,66	686134,35	671013,32	1133032,06
Median	688629,28	667336,03	662483,88	683374,29	667695,75	667695,82
Std.Dev.	19819,39	11277,35	14233,92	16412,97	10005,20	1794764,50
V	2,88	1,69	2,14	2,39	1,49	158,40
R	86393,69	67715,74	53089,74	65966,88	38519,39	8012191,93
	Время выполнения алгоритма, сек					
Min	13,82	10,19	16,31	3,17	2,43	4,34
Max	41,77	51,67	83,01	9,58	7,92	12,25
Average	27,53	32,18	36,60	5,47	5,54	7,18
Median	25,43	30,09	32,91	5,10	6,01	7,15

Наилучшее качество кластеризации достигается при инициализации начальных центроидов способами «point» и «average». При инициализации «random» наблюдаются наибольшие колебания значений целевой функции и времени выполнения. У Elkan's k-means в «average» зафиксирован аномальный выброс: максимальное значение 8661955,25 (при медиане 667695,82), что указывает на возможную нестабильность алгоритма при этой инициализации.

Таблица 2. Результаты вычислительных экспериментов для набора данных **Diabetes_5000 (5000 векторов данных размерностью 21), 3 кластера**

	k-means			Elkan's k-means		
	random	point	average	random	point	average
	Значение целевой функции					
Min	212455,16	479772,12	212453,39	212454,92	479772,12	212453,31
Max	237559,16	495391,33	237813,45	242864,05	495391,33	258038,61
Average	222371,45	490705,56	219894,06	222152,50	491226,40	221541,51
Median	219951,71	495391,33	219363,81	219975,68	495391,33	221431,71
Std.Dev.	6870,70	7279,98	5894,31	6843,07	7024,83	9032,97
V	3,09	1,48	2,68	3,08	1,43	4,08
R	25104,00	15619,21	25360,06	30409,13	15619,21	45585,30
	Время выполнения алгоритма, сек					
Min	4,56	0,30	3,56	0,73	0,08	0,98
Max	28,06	3,63	18,33	3,10	1,10	4,75
Average	10,66	1,64	9,17	1,57	0,55	2,20
Median	8,26	1,69	8,09	1,46	0,57	2,14

Инициализация «point» приводит к значительно худшему значению целевой функции по сравнению с random и average, что свидетельствует о неудачном выборе начальных центров. Elkan's k-means демонстрирует существенное ускорение: в среднем в 3–6 раз быстрее классического k-means при сопоставимом качестве (за исключением «point»).

Наименьшее время выполнения у обоих алгоритмов при инициализации point, несмотря на плохое качество кластеризации, что объясняется быстрой сходимостью к локальному минимуму.

Вычислительные эксперименты продемонстрировали, что Инициализация «average» обеспечивает наиболее стабильные и качественные результаты по значению целевой функции (низкий коэффициент вариации, небольшой размах), особенно на больших данных (Diabetes_16000). Инициализация «point» может привести как к очень хорошим, так и к крайне неудачным результатам в зависимости от структуры данных. Например, на Diabetes_5000 она даёт в 2 раза худшее значение целевой функции, чем другие методы. Это связано с высоким риском выбора аномальных наблюдений в качестве начальных центров. Инициализация «random» демонстрирует умеренную ста-

бильность, но требует большего времени на сходимость и даёт более высокие средние значения. Алгоритм Elkan's k-means значительно эффективнее по времени, но чувствителен к выбору инициализации: при неудачном старте (инициализация «average» для Diabetes_16000) возможны сбои или резкий рост целевой функции.

Таким образом, рекомендуемой стратегией для медицинских данных с выраженным дисбалансом и сложной структурой является инициализация «average», сочетающая баланс между качеством и стабильностью.

Проведённое исследование подтвердило высокую эффективность оптимизированного алгоритма Elkan's k-means в задачах кластеризации больших медицинских датасетов. Однако его преимущества реализуются только при грамотном выборе начальных условий. Стратегия инициализации «average», показала наилучший баланс между стабильностью, качеством и вычислительной эффективностью.

Список литературы

1. Youguo Li., Haiyan W. A Clustering Method Based on K-Means Algorithm // Physics Procedia. – 2012. – №25. – P. 1104 – 1109.
2. Perez-Ortega J., Almanza-Ortega N.N., Romero D. Balancing effort and benefit of Kmeans clustering algorithms in Big Data realms // PLoS ONE. – 2018. – № 13 (9), DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201874>
3. Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // Bull. Acad. Polon. Sci.–1956.–Cl. III, vol IV.–P.801-804.
4. Lloyd S.P. Least Squares Quantization in PCM // IEEE Transactions on Information Theory. – 1982. – Vol. 28. – P. 129-137.
5. Li M., Frank E., Pfahringer B. Large scale K-means clustering using GPUs. Data Mining and Knowledge Discovery, 2022, 37, 67-109.
6. Elkan C. Using the Triangle Inequality to Accelerate k-Means // In Proceedings of the 20th International Conference on Machine Learning (ICML-03), 2003. pp. 147–153.
7. MacQueen J.B. Some Methods of Classification and Analysis of Multivariate Observations // Proceedings of the 5th Berkley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. – 1967. – Vol.1. – P. 281 – 297.
8. Teboul A. Diabetes Health Indicators Dataset, <https://www.kaggle.com/datasets/alexteboul/diabetes-health-indicators-dataset/data>
9. Rousseeuw P. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 1987. – Vol. 20. – P. 53 – 65

Е.А. Евдокимова, магистрант, evdokimova.liza2018@ya.ru
О.К. Альсова, к.т.н., доцент, alsova@corp.nstu.ru
ФГБОУ ВО «НГТУ», г. Новосибирск, Россия

ИНТЕРАКТИВНЫЙ МОДУЛЬ НА БАЗЕ R/SHINY ДЛЯ ОСВОЕНИЯ МЕТОДОВ ПЕРВИЧНОГО АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Аннотация: В статье представлено описание интерактивного образовательного модуля, разработанного на языке программирования R с использованием фреймворка Shiny. Модуль предназначен для начинающих аналитиков и студентов и фокусируется на освоении базовых принципов и методов анализа временных рядов (ВР). Рассмотрена структура первых пяти уроков, охватывающих статистическое описание ВР, его визуализацию, методы заполнения пропущенных значений ВР, обнаружение аномалий во ВР и декомпозицию ВР на составляющие. Особое внимание уделено методике геймификации, используемой в процессе обучения. Методика включает мини-игры и систему начисления баллов, что повышает вовлеченность обучаемых и эффективность процесса обучения в целом. Представленные технические решения позволяют создать гибкую и наглядную среду для практического применения методов первичного анализа ВР.

Ключевые слова: временной ряд, R, Shiny, геймификация, интерактивное обучение, анализ данных

Е.А. Evdokimova, master's student, evdokimova.liza2018@ya.ru
О.К. Alsova, Ph.D., Associate Professor, alsova@corp.nstu.ru
NSTU, Novosibirsk, Russia

INTERACTIVE MODULE BASED ON R/SHINY FOR LEARNING METHODS OF PRIMARY ANALYSIS OF TIME SERIES

Abstract: The article presents a description of an interactive educational module developed in the R programming language using the Shiny framework. The module is designed for novice analysts and students and focuses on mastering the basic principles and methods of time series analysis (TSA). It examines the structure of the first five lessons, covering the statistical description of TS, its visualization, methods for filling in missing TS values, detecting anomalies in TS, and decomposing TS into components. Particular attention is paid to the gamification methodology used in the learning process. The methodology includes mini-games and a scoring system, which increases student engagement and the overall effectiveness of the learning process. The technical solutions presented allow for the creation of a flexible and intuitive environment for the practical application of basic TS analysis methods.

Key words: time series, R, Shiny, gamification, interactive learning, data analysis

В условиях цифровой экономики и повсеместной автоматизации процессов обработки данных, анализ временных рядов (ВР) становится одним из ключевых навыков для специалистов в области Data Science, экономики и инженерии. Однако традиционные методы обучения, основанные на лекциях и рассмотрении статичных примеров, часто не обеспечивают необходимый уровень практического освоения материала. Существует потребность в разработке интерактивных образовательных инструментов, которые позволят пользователям экспериментировать с данными, не отвлекаясь на сложности настройки программного обеспечения [1]. Целью данной работы является описание архитектуры и методической основы интерактивного модуля, реализованного на базе R/Shiny, предназначенного для освоения начального этапа анализа временных рядов. Модуль сочетает теоретический материал, практические задания с мгновенной обратной связью и элементы геймификации.

Модуль разработан на языке R [2] с применением фреймворка Shiny [3], что позволило создать полноценное веб-приложение с интерактивным пользовательским интерфейсом, использующее мощные инструменты и библиотеки R для анализа данных.

В ходе разработки приложения были приняты следующие ключевые технические решения:

1. Использование фреймворка Shiny [3]: обеспечивает реактивность, позволяя пользователю мгновенно видеть результат изменения входных параметров (например, вклада тренда или сезонности) на графике. Это реализуется через функции `reactive`, `renderPlot` и `observeEvent`.

2. Использование библиотек R [2]: для аналитической части используются стандартные и специализированные пакеты: `ggplot2` и `plotly` для высококачественной и интерактивной визуализации; `dplyr` и `tidyr` для манипуляции с данными; `forecast` и `zoo` для реализации алгоритмов работы с временными рядами (декомпозиция, интерполяция).

3. Модульная структура: каждый урок реализован как отдельный модуль, что упрощает разработку, тестирование и масштабирование приложения.

На рис.1 представлена общая структура образовательного процесса, реализованная в модуле. Обучение в модуле строится по принципу «Теория – Практика – Игра».

- Теория: представлена в виде структурированных текстовых блоков с примерами, формулами (используется MathJax для корректного отображения) и наглядными мини-графиками.



Рис. 1. Структура образовательного процесса в интерактивном модуле

- Интерактивная практика: пользователь работает со слайдерами и выпадающими списками, изменяя параметры временного ряда или выбирая методы анализа, и наблюдает результат в реальном времени. Например, в уроке пользователь генерирует ряд, меняя вклад тренда и шума (см. рис. 2).

- Геймификация (Мини-игры): в конце каждого урока реализована мини-игра, за прохождение которой начисляются баллы. Этот элемент, отсутствующий в большинстве академических тренажеров, повышает мотивацию студентов и обеспечивает объективную оценку освоения материала. Начисление баллов происходит на основе анализа правильности и скорости выполнения задания, а суммарный балл используется для выдачи сертификата.

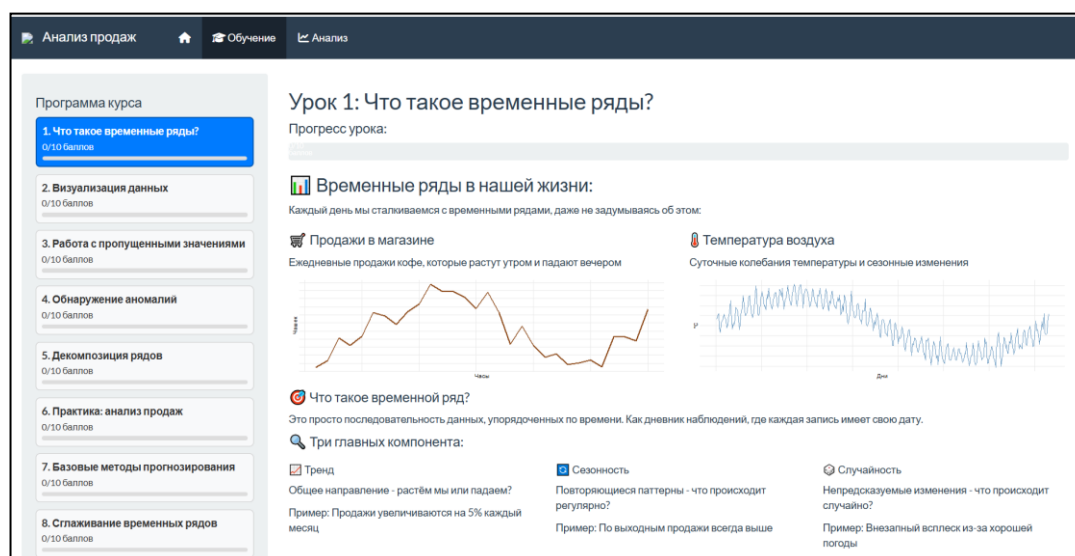


Рис. 2. Фрагмент интерфейса урока 1: Теоретический блок и примеры временных рядов

Первые пять уроков формируют фундаментальную базу для дальнейшего прогнозирования и моделирования временных рядов.

Таблица 1. Структура и содержание первых пяти уроков модуля

№ Уро-ка	Название	Основное содержание	Интерактивная практика	Мини-игра
1	Что такое временной ряд?	Определение ВР, компоненты (тренд, сезонность, шум).	Генерация синтетического ряда с настройкой параметров (вклад тренда, сезонности, шума).	Определение преобладающей компоненты ВР по короткому графику.
2	Визуализация данных	Типы графиков (линейный, диаграмма размаха, тепловая карта), правила интерпретации графиков.	Выбор оптимального типа визуализации для разных типов ВР.	Сопоставление графика и его бизнес интерпретации.
3	Работа с про-	Типы пропусков	Сравнение резуль-	Выбор наиболее

	пущенными значениями	(MCAR, MAR, MNAR), методы импутации (LOCF, интерполяция, скользящее среднее).	татов импутации разными методами на одном ВР.	подходящего метода импутации для заданного типа пропуска.
4	Обнаружение аномалий	Типы аномалий (точечные, всплески, сдвиг уровня), методы (Z score, IQR, скользящее окно).	Применение различных алгоритмов обнаружения аномалий во ВР с заданными выбросами.	«Охотник за аномалиями» — клик по выбросам на графике.
5	Декомпозиция временного ряда	Аддитивная и мультипликативная модели, методы декомпозиции	Выбор корректной модели (аддитивная/ мультипликативная) для идентификации ВР и анализ полученных компонент.	Угадывание типа модели (аддитивная/ мультипликативная) по исходному ВР.

В четвертом уроке реализовано сравнение робастных и неробастных методов обнаружения аномалий. В частности, для демонстрации адаптивного подхода используется метод скользящего окна (Rolling Window), который более эффективен для рядов с выраженным трендом или сезонностью, чем глобальный Z-score. Интерфейс урока позволяет пользователю самостоятельно генерировать ряд, добавлять аномалии различной силы и типа, а затем применять разные методы обнаружения, получая мгновенную оценку качества по метрикам Precision, Recall и F-Score (см. рис.3).

Пятый урок посвящен сравнению аддитивной и мультипликативной моделей декомпозиции ВР [1]. Пользователь выбирает тип модели и наблюдает, как это влияет на выделение сезонной компоненты. Интерактивность позволяет пользователю применить обе модели к ряду с растущей амплитудой сезонности (например, AirPassengers) и увидеть, что аддитивная модель оставляет неслучайные составляющие в остатках, в то время как мультипликативная модель успешно их устраняет (см. рис.4).

Разработанный интерактивный модуль на базе R/Shiny представляет собой эффективный инструмент для освоения методов первичного анализа временных рядов. Предложенное в рамках модуля сочетание теоретической базы, практической работы с реактивными графиками и элементов геймификации [4], по нашему мнению, способствует глубокому пониманию материала и повышению вовлеченности обучающихся. Дальнейшее развитие модуля будет включать добавление уроков по использованию разных классов методов прогнозирования ВР (ARIMA, экспоненциальное сглаживание, Prophet) и расширение функционала мини-игр для более комплексной оценки навыков.

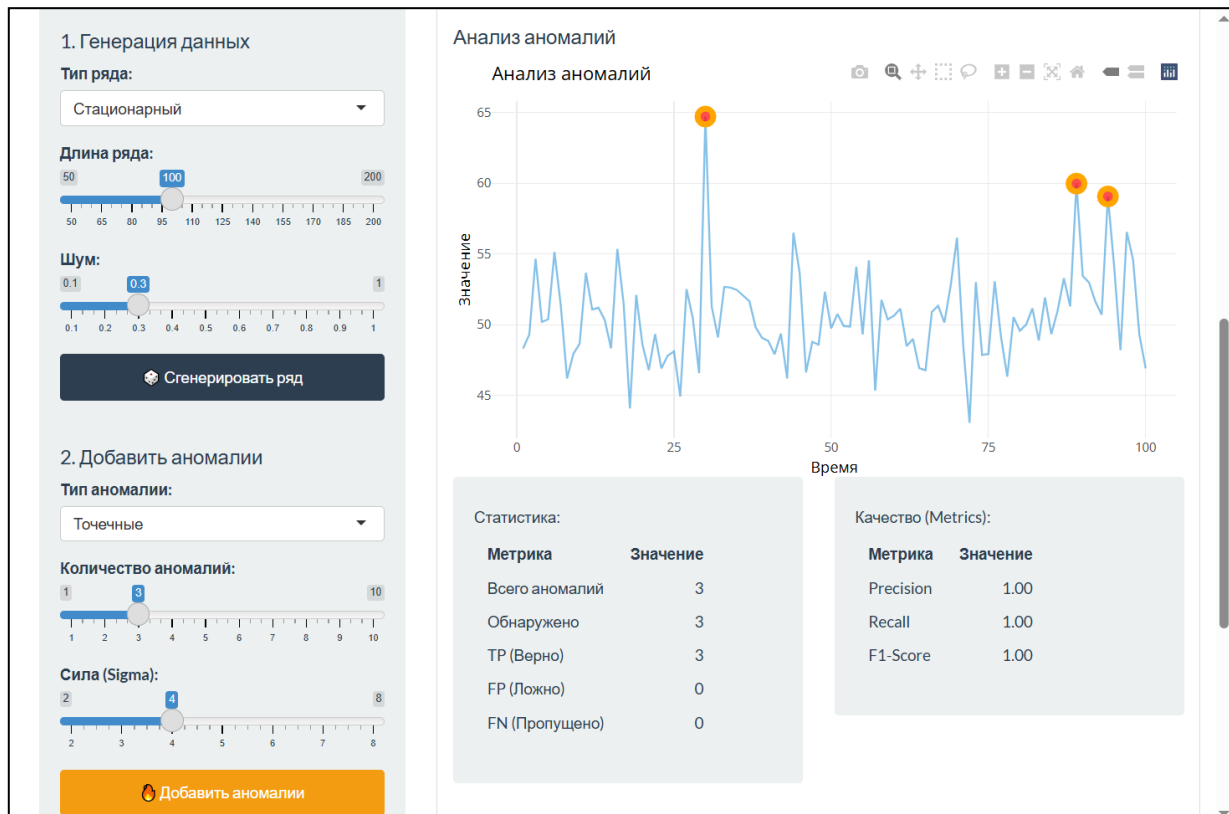


Рис. 3. Фрагмент интерфейса урока 4: Генерация данных, добавление аномалий и оценка качества обнаружения



Рис. 4. Фрагмент интерфейса урока 5: Результаты декомпозиции ряда AirPassengers на основе мультипликативной модели

Список литературы

1. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: principles and practice: in 2 vol. Vol. 1. 3rd ed. – OTexts, 2021. – 380 p. – URL: <https://otexts.com/fpp3/> (дата обращения: 21.11.2025).
2. R: a language and environment for statistical computing [Электронный ресурс] / R Core Team. – Режим доступа: <http://www.r-project.org> (дата обращения: 21.11.2025).
3. Shiny: web application framework for R: User guide and documentation. Version 1.8.5 [Электронный ресурс] / RStudio, PBC. – 2024. – URL: <https://shiny.posit.co/r/getstarted/shiny-basics/lesson1/> (дата обращения: 21.11.2025).
4. Sailer M., Homner L. The Gamification of Learning: A Meta-analysis // Educational Psychology Review. – 2022. – Vol. 34, № 1. – P. 225–251. – URL: https://www.researchgate.net/publication/335189630_The_Gamification_of_Learning_a_Meta-analysis (дата обращения: 26.11.2025).

ОБЗОР ПРАКТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Аннотация: Прогнозирование трещиностойкости (вязкости разрушения) металлов – ключевая задача механики разрушения, напрямую связанная с безопасностью конструкций. Классические методы определения K_{1C} (критической интенсивности напряжений) и других характеристик прочности требуют изготовления стандартизованных образцов (например, СТ (Прямоугольный компактный образец с краевой трещиной для испытаний на внецентренное растяжение)/ССТ (пластина с центральной трещиной) и проведения разрушающих испытаний. Эти подходы хорошо отработаны, но зачастую трудоёмки, дорогие и не подходят для экспресс-оценки свойств непосредственно на изделии. В данном обзоре анализируются современные работы, посвящённые применению ИИ в механике разрушения, включая физически-информированные нейросети (PINN), классические нейросетевые модели (ANN, CNN), гибридный метод обработки данных (GMDH) и гибридные архитектуры. Особое внимание уделено случаям, где в качестве исходных данных используются кривые “нагрузка–углубление индентера”, а также объединению данных эксперимента и численного моделирования. Обсуждаются преимущества ИИ-подходов по сравнению с классическими методами (J-интеграл, закон Пэриса и др.) с точки зрения точности, универсальности, интерпретируемости и ограничений, а также предлагается концепция нового гибридного метода определения трещиностойкости.

Ключевые слова: искусственный интеллект, модели и методы анализа данных, нейросети, прогнозирование трещиностойкости (вязкости разрушения) металлов.

E.I. Zakharov, Master's student, egor_02222@mail.ru
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

AN OVERVIEW OF THE PRACTICE OF USING NEURAL NETWORKS TO DETERMINE THE MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS BASED ON INSTRUMENTAL INDENTATION

Abstract: Predicting the crack resistance (fracture toughness) of metals is a key task of fracture mechanics, directly related to the safety of structures. Classical methods for determining K_{1C} (critical stress intensity) and other strength characteristics require the production of standardized samples (for example, CT (Rectangular compact sample with an edge crack for off-center tension tests)/CCT (plate with a central crack) and destructive testing. These approaches are well-developed, but they are often time-consuming, expensive, and not suitable for rapid assessment of properties directly on the product. This review analyzes modern works on the application of AI in the mechanics of destruction, including physically informed neural networks (PINN), classical neural network models (ANN, CNN), hybrid data processing method (GMDH) and hybrid architectures. Special attention is paid to cases where “load–indenter deepening” curves are used as initial data, as well as combining experimental and numerical modeling data. The advantages of AI approaches in comparison with classical methods (J-integral, Paris's law, etc.) in terms of accuracy, versatility, interpretability, and limitations are discussed, and the concept of a new hybrid method for determining crack resistance is proposed.

Key words: artificial intelligence, models and methods of data analysis, neural networks, prediction of crack resistance (fracture toughness) of metals.

Для глубокого понимания современных методов прогнозирования долговечности конструкций с использованием машинного обучения, особенно в контексте Physics-Informed Neural Networks (PINNs), необходимо создать прочный фундамент в области классической механики разрушения.

Классическая Линейно-Упругая Механика Разрушения (LEFM), основанная на концепции коэффициента интенсивности напряжений, имеет строгое ограничение: она применима только тогда, когда пластическая зона в вершине трещины остается малой по сравнению с размерами самой трещины и других геометрических характеристик образца [1, 2]. В случае высокопластичных материалов или при больших уровнях нагрузки пластическая зона может стать достаточно большой, чтобы влиять на всю картину напряженно-деформированного состояния, и тогда LEFM перестает давать корректные результаты. Для анализа таких ситуаций была разработана Эластопластическая Механика Разрушения (EPFM), которая оперирует другими, более универсальными параметрами, такими как J-интеграл и Crack Tip Opening Displacement (CTOD).

Для практического инженерного анализа жизненного цикла конструкции недостаточно знать лишь о критическом состоянии. Необходимо также понимать, как трещина растет со временем под действием циклических нагрузок. Этот процесс описывается кривой роста трещины, которая обычно имеет S-образную форму при построении на логарифмической шкале зависимости скорости роста трещины ($\frac{da}{dN}$) от изменчивости коэффициента интенсивности напряжений (ΔK) [3]. Эта зависимость была эмпирически установ-

лена и количественно описана французским инженером Paul C. Paris в 1961 году. Ее называют Законом Пэриса (Paris Law) и записывают в виде простой степени:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m [3, 4].$$

Закон Пэриса является фундаментальным инструментом в механике усталости и служит основой для многих методов расчета остаточного ресурса. В отличие от более сложных, нелинейных уравнений, описывающих поведение материала в EPRFM, закон Пэриса представляет собой относительно простое степенное соотношение. Это позволяет легко преобразовать его в условия для производных, которые затем могут быть включены в функцию потерь модели. Таким образом, нейронная сеть, обучаясь на ограниченном наборе экспериментальных данных, будет не просто аппроксимировать эти данные, а будет вынуждена следовать заданному физическому закону, что значительно повышает надежность и обобщающую способность модели, особенно при работе с малыми объемами данных. Этот принцип лежит в основе подхода Physics-Informed Neural Networks (PINN).

Обзор продемонстрировал, что внедрение искусственного интеллекта в механику разрушения – активно развивающееся направление, способное повысить точность и эффективность оценки трещиностойкости металлов. Классические методы (K_{IC} , J-интеграл, законы роста трещин, МКЭ) обеспечивают надёжную базу, но имеют ограничения по применимости и требовательности к испытаниям. Современные ИИ-подходы – от универсальных нейросетей (ANN/CNN) до физически-информированных моделей (PINN) – позволяют преодолеть эти ограничения за счёт использования данных и встроенных знаний о физике процесса. Особенно перспективно использование данных индентирования: простого в выполнении теста, из которого ИИ может “вычислить” свойства материала, ранее доступные лишь через разрушительные испытания. Примеры ряда работ подтверждают возможность извлекать эласто-пластические характеристики из кривых $P-h$ с помощью глубокого обучения [5, 6].

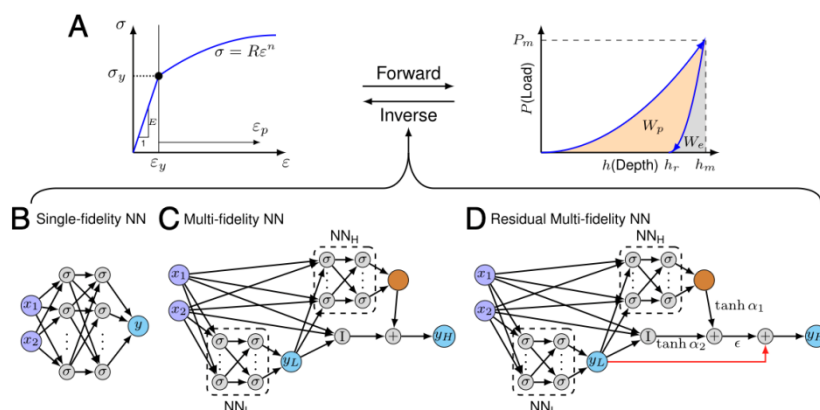


Рис. 1. Методы глубокого обучения для решения обратных задач при инструментальном остром вдавливании с измерением глубины. (А) Схематическое изображение сте-

хорошей подготовки данных и физической подкреплённости – например, ошибка прогноза K_{1C} методом GMDH не превышает 8% [9], а PINN может воспроизводить кривые роста трещин в пределах разброса экспериментов [8].

Универсальность ИИ проявляется в способности одной модели охватывать разные режимы и геометрии, тогда как классический подход требует разных формул для разных случаев [9]. Интерпретируемость больше не является непреодолимой проблемой: внедрение физических переменных в модель делает вывод “прозрачным” и согласующимся с механикой [8]. Главные вызовы ИИ – потребность в репрезентативных данных и гарантии экстраполяции за пределы обученного – решаются через мульти-фиделити обучение [5], data fusion [11] и физическую регуляризацию. Тем не менее, требуется дальнейшая работа над стандартизацией, валидацией и повышением доверия к новым методам.

Перспективы развития области лежат в направлении ещё более тесной интеграции данных и физики. В ближайшие годы стоит ожидать появления моделей, способных в режиме реального времени оценивать повреждаемость конструкции, опираясь на поток данных от сенсоров и результатов выборочных тестов, с высокой точностью предсказывая момент достижения критической трещины. Физически-информированные нейросети, вероятно, станут стандартным инструментом в арсенале инженера-проектировщика наряду с МКЭ, позволяя быстро оценивать различные сценарии нагружения и локализации дефектов. Всё это будет происходить параллельно с развитием вычислительной мощности и методов объяснимого ИИ, что снимет последние барьеры для внедрения таких моделей.

Подводя итог, ИИ в механике разрушения не заменяет полностью классические методы, а дополняет их, образуя новую парадигму анализа прочности материалов. Применение машинного обучения – будь то простая нейросеть или сложная PINN – позволяет учесть совокупность факторов, недоступных учёту в рамках одной традиционной теории, и тем самым вывести оценку трещиностойкости на новый уровень точности и оперативности. Уже сегодня исследования демонстрируют успешные примеры такого синтеза (ANN + эксперимент, PINN + FEM и др.), а завтра эти подходы могут стать промышленным стандартом, обеспечивая более безопасную и эффективную эксплуатацию металлических конструкций в самых различных отраслях.

Список литературы

1. Коэффициент интенсивности напряжений // Википедия [Электронный ресурс]: режим доступа- https://en.wikipedia.org/wiki/Stress_intensity_factor
2. Коэффициент интенсивности напряжений // Руководство по проектированию, устойчивому к повреждениям [Электронный ресурс]: режим доступа- https://www.afgrow.net/applications/DTDHandbook/sections/page2_2_1.aspx

3. Yan Gu, Chuanzeng Zhang, Peijun Zhang, Mikhail V. Golub, Enriched physics-informed neural networks for in-plane crack problems: Theory and MATLAB codes. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 276. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112321>
4. Shahed Rezaei, Ali Harandi, Ahmad Moeineddin, Bai-Xiang Xu, Stefanie Reese A mixed formulation for physics-informed neural networks as a potential solver for engineering problems in heterogeneous domains: comparison with finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 401. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115616>
5. Lu Lu, Ming Dao, Punit Kumar, Upadrasta Ramamurty, George Em Karniadakis, Subra Suresh Extraction of mechanical properties of materials through deep learning from instrumented indentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922210117>
6. Yanmin Zhou, Binwei Xia, Sisong Zhang, Lei Zhou, Xingguo Zhang, Xinling Li Deep learning-based nanoindentation for evaluating the mechanical properties of rock-forming minerals. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.04.023>
7. Hao Xu, Wei Fan, Lecheng Ruan, Rundong Shi, Ambrose C Taylor, Dongxiao Zhang Crack-Net: A Deep Learning Approach to Predict Crack Propagation and Stress–Strain Curves in Particulate Composites. *Engineering*, 2025, 49. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.02.022>
8. Qinyong Wang, Siwei Hong, Xiaofan Liu, Naiwei Lu, Yuwan Chen, Panglu Jiang Remaining life prediction and parameter identification in fatigue crack propagation of welded joints in OSDs using a physical-information neural network approach. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, 23. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05394>
9. Morteza Khomami Abadi, Mohammad Zaman Kabir, Kamran Nikbin An innovative solution for determining stress intensity factors (SIF) using the GMDH neural network. *Procedia Structural Integrity*, 2025, 68. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.06.204>
10. Anantaya Timtong, Atthaphon Ariyarat, Wanwanut Boongsood, Prasert Aengchuan, Attasit Wiangkham AI-driven data fusion modeling for enhanced prediction of mixed-mode I/III fracture toughness. *Results in Engineering*, 2024, 24. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103289>

Д.С. Краснолобов, ученик, crasnobovdanila@yandex.ru
МОБУ СОШ №30, г. Таганрог, Россия

В.А. Углев, к.т.н., доцент, uglev-v@yandex.ru
Московский университет МВД России им. В.Я. Кикотя, г. Москва, Россия

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВЗГЛЯДА ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ, ПОЛУЧЕННЫМ В РЕЗУЛЬТАТЕ КОГНИТИВНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ

Аннотация: Существует проблема фиксации траектории взгляда по изображениям, сформированных в результате графической концентрации данных средствами Data Mining (когнитивной визуализации). В этой статье рассмотрены популярные алгоритмы в сфере айтрекинга и проанализированы их недостатки. На основе полученной информации создан экспериментальный алгоритм (машинное обучение и случайный лес), призванный решить проблемы уже существующих методов.

Ключевые слова: айтрекинг, машинное обучение, компьютерное зрение, алгоритмы, когнитивная визуализация

D. S. Krasnobov, student crasnobovdanila@yandex.ru
Comprehensive school №30, Taganrog, Russia
V.A. Uglev, Ph.D, docent, uglev-v@yandex.ru

Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia Federation

CHALLENGES OF DEVELOPMENT OF AN APPLICATION FOR ANALYZING THE TRAJECTORY OF GAZE MOVEMENT BASED ON IMAGES OBTAINED AS A RESULT OF COGNITIVE DATA VISUALIZATION

Abstract: There is a problem of fixing the trajectory of the gaze on images formed as a result of graphical concentration of data by means of Data Mining (cognitive visualization). This article examines popular algorithms in the field of eyetracing and analyzes their disadvantages. Based on the information received, an experimental algorithm (machine learning and random trees) has been created to solve the problems of existing methods.

Key words: eye tracking, machine learning, computer vision, algorithms, cognitive visualization

Введение

Айтрекинг активно применяется для того, чтобы информационные системы могли «понять» то, как пользователь взаимодействует с ними, какие интерфейсы и средства визуализации наиболее результативны. Если исходные данные сконцентрированы на дисплее в виде компактных изображений, то, следовательно, можно оценить результативность их влияния на принятие тех или иных решений человеком. Особенно это важно для лица, принимающего решения, или системы искусственного интеллекта, вырабатывающего на основании этих данных для пользователя обратную связь. Наиболее сложно обрабатывать изображения, которые стали результатом концентрации больших массивов данных. В Data Mining такие методы визуализации группируются в разделе Data Visualization [1].

Для достижения наилучшего результата (восприятия) при когнитивной визуализации данных требуется критерий оценивания эргономичности размещения информации на оцениваемом изображении. Если на изображении имеются устойчивые структуры, отражающие закономерности в исходных данных, то чем меньше пройденный взглядом испытуемого путь между такими структурами, тем результативнее метод визуализации (тем легче будет воспринять информацию, представленную на изображении). Например, если на изображении нет главного элемента, который «притягивает» внимание, то взгляд пользователя будет бесцельно блуждать по экрану, приводя к рассеиванию внимания. При неудачной группировке данных на изображении, когда взаимосвязанные элементы находятся на слишком большом расстоянии друг от друга, взгляд будет быстрее преодолевать участки между структурами, и будет задерживаться на скоплениях полезных элементов [2]. Чтобы выявить результативность отображения данных различными методами представления, следует проводить специальные тесты этих графическими нотаций. Среди таких тестов важное место занимает метод айтрекинга [3]. Поэтому этот метод активно применяется в качестве инструмента в прокторинге [4], в области психологии [5] и спорта [6].

В процессе реализации задачи айтрекинга возникает ряд сложностей, которые необходимо решать алгоритмически. Рассмотрим такие алгоритмы и их недостатки, осуществив сравнительный анализ решений. Затем предложим экспериментальный метод, улучшающий процесс выявления траектории взгляда по изображениям.

Проблемы реализации алгоритмов автоматического айтрекинга

Выделим основные проблемы, которые вытекают из самой постановки задач айтрекинга [7]:

1. *Движение головы* пользователя. Для определения направления взгляда человека с повернутой в сторону головой требуется найти угол поворота головы и сложить его с углом поворота глаз, что является проблемой при использовании специальных стационарных айтрекеров. Чаще всего эту проблему решают закреплением головы испытуемого в одном положении с помощью специальных подставок, или использованием айтрекеров, жестко закрепляемых на голове испытуемого;

2. *Влияние внешних факторов*. Неравномерное освещение, длинные накрашенные ресницы, помутнение хрусталика (катаракта), другие особенности пользователя - всё это ухудшает точность определения положения зрачка относительно центра глаза. Решить эту проблему можно дополнительной калибровкой или устранением этих факторов (нормализация освещения, удаление туши с ресниц и т.д.);

3. *Необходимость использования сложного оборудования*. Наиболее точные методы определения поворота глаза, такие как фотоэлектрический и фотооптический методы, требуют использования не только видеокамеры, но и инфракрасного излучателя или специальных зеркал. Такое оборудование, как правило, есть в специальных лабораториях, но оно не доступно для массового использования. Эта проблема во многом решается за счёт использования обычных камер, существенно снижая точность фиксации.

Современные методы айтрекинга ориентированы на то, чтобы нивелировать влияние этих проблем.

Сравнительный анализ

Для получения траектории движения глаз человека необходимо поочередно обработать каждый кадр полученной видеозаписи. Впоследствии обработки кадра мы получаем двумерную координату, обозначающую точку на изображении на которую в данный представленный смотрит испытуемый. Эти координаты последовательно соединяются между собой, образуя траекторию

Исходя из вышеописанного можно выделить три критерия сравнения методов определения положения взгляда (точность определения направления взгляда), зависимость от движения головы испытуемого и сложность калибровки. Рассмотрим наиболее распространенные методы: адаптивный алгоритм и фотоэлектрический метод.

Адаптивный алгоритм нахождения границ зрачка на изображении [7] позволяет определить направление взгляда на основе смещения зрачка относительно центра глаза. Данный метод подразумевает что испытуемый будет держать голову неподвижно относительно изначальной позиции калибровки,

что уменьшает точность результатов возможную максимальную длительность проведения экспериментов

Фотоэлектрический метод [8] требует использования специального оборудования и фиксации головы испытуемого в определённом положении, но при этом обеспечивает высокую точность измерений.

Расширить возможности автоматического айтрекинга можно за счёт дополнительной фиксации всего овала лица человека. Включим такой подход в сравнительную таблицу под названием Расширенного алгоритма фиксации взгляда. Из неё следует, что новый алгоритм потенциально позволит обеспечить точность даже при изменении положения головы испытуемого относительно начального. Достигается это благодаря анализу не только положения глаз, но и головы человека во время проведения экспериментов.

Таблица. Сравнение методов айтрекинга

Метод	Точность	Зависимость от движений испытуемого	Сложность калибровки
Адаптивный алгоритм нахождения границ зрачка	средняя	средняя	средняя
Фотоэлектрический метод	высокая	высокая	высокая
Расширенный алгоритм фиксации взгляда	средняя	низкая	средняя

Проект приложения

Рассмотрим реализацию расширенного алгоритма фиксации взгляда. За основу возьмем существующий подход к определению положения головы [9]. Алгоритм состоит из одного предварительного и пяти основных этапов.

0. Сначала, при необходимости, проводится калибровка параметров алгоритма: измеряются расстояния между ключевыми точками лица человека, фокальное расстояние и степень искажения камеры. Калибровка увеличивает точность работы алгоритма, но не является обязательным шагом, т.к. в большинстве случаев отклонение средних значений от действительных пренебрежительно мало. Обязательным изменением является лишь на первом этапе работы алгоритма на полученном с камеры изображении выделяется лицо человека с помощью алгоритма распознавания лиц. Для этой цели используется метод опорных векторов – алгоритм машинного обучения, используемый для быстрой классификации данных [10-12].

1. Затем на выделенном участке изображения выделяются ключевые точки лица (рис. 1), с помощью ансамбля регрессионных деревьев (также известный под названием «случайный лес») [13]. Сам метод регрессионных деревьев – это алгоритм машинного обучения, в основе которого лежит большой набор решающих деревьев, каждое из которых само по себе даёт очень невысокое качество классификации, но за счёт их большого количества результат получается хорошим [14].

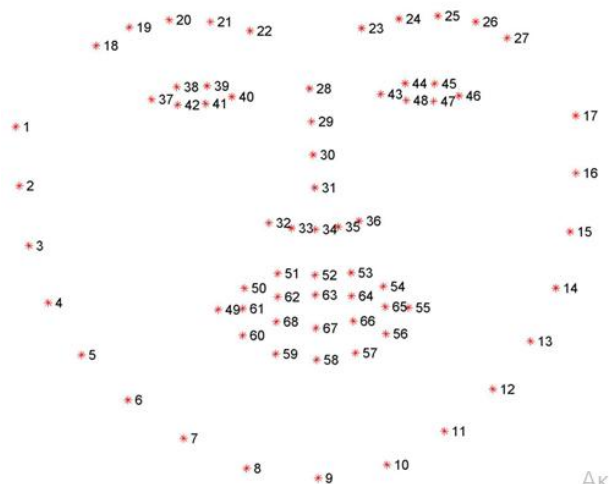


Рис. 1. Ключевые точки лица

2. Используя полученные ранее данные, оценивается положение лица человека относительно камеры. Решить эту задачу можно различными способами, но в нашем алгоритме используется решение Direct Linear Transform (DLT [15]) с последующей оптимизацией Левенберга-Маркуардта [16], т.к. он обеспечивает наибольшую точность. Благодаря этому мы получаем:

- R_x, R_y, R_z – поворот головы вокруг осей Ox, Oy и Oz соответственно;
- $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – смещение головы относительно начального положения по осям Ox, Oy и Oz соответственно.

3. На основе ключевых точек, полученных на шаге 2, выделяются на изображении области расположения глаз. В каждой области отдельно выделяется зрачок глаза. Он является более тёмным эллипсом, относительно окружающей его радужной оболочки, поэтому зрачок на изображении глаза представляется в виде тёмной округлой области с определённой площадью. На основе положения зрачка, вычисляется степень его смещения относительно глаза по формулам (1).

$$\Delta x = \frac{x-w/2}{w}, \quad \Delta y = \frac{y-h/2}{h}, \quad (1)$$

где Δx – смещение по оси Ox , w – ширина глаза в пикселях, x – координата зрачка по оси Ox в пикселях, Δy – смещение по оси Oy , h – высота глаза в пикселях, y – координата зрачка по оси Oy в пикселях.

Результаты вычислений дают значения в интервале $[-1; 1]$, где отрицательные значения обозначают смещение в сторону против направления оси координат, а положительные – вдоль. На основании этих смещений вычисляется поворот глаза по формулам, основанным на данных об особенностях анатомии человека (2) и (3).

$$r_x = \Delta x * 50^\circ, \quad (2)$$

где r_x – поворот глаза вокруг оси Ox в градусах, Δx – смещение зрачка по оси Ox .

$$r_y = \begin{cases} \Delta y * 30^\circ, \Delta y > 0 \\ 0, \Delta y = 0 \\ \Delta y * 20^\circ, \Delta y < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где r_y – поворот глаза вокруг оси Oy в градусах, Δy – смещение зрачка по оси Oy . Таким образом мы получаем поворот глаза в градусах, где отрицательный угол обозначает поворот против оси, а положительный – вдоль.

4. На заключительном этапе алгоритма остается найти координаты точки пересечения линии взгляда и плоскости изображения. Частным случаем этого является фронтальная плоскость, например, когда пользователь смотрит на изображение на экране компьютера и наклоном плоскости можно пренебречь. В таком случае уравнения примут вид (4).

$$X = \Delta Z \tan(r_x + R_x) + \Delta X, \quad Y = \Delta Z \tan(r_y + R_y) + \Delta Y, \quad (4)$$

где X – координата точки взгляда человека по оси Ox , где Y – координата точки взгляда человека по оси Oy

5. Для получения траектории взгляда, следует повторить шаги/этапы 1-5 для множества изображений-кадров. Полученные точки требуется соединить в хронологическом порядке, тем самым получив траекторию.

Рассмотрим пример. Пусть дано изображение, которое необходимо проанализировать с помощью айтрекинга, выводимое на дисплей персонального компьютера. В качестве объекта когнитивной визуализации возьмём когнитивную карту диагностики знаний [17], отражающую текущее состояние учебного процесса студента в среде электронного обучения [18]. Требуется зафиксировать траекторию движения глаз по изображению для дальнейшей аналитики.

При калибровке были зафиксированы общие параметры положения пользователя относительно веб-камеры. В результате распознавания лица (см. пример на рис. 2, слева) производилось наложение на кадр данных о положении головы и направлении взгляда. Одновременно с этим вычислялись координаты элемента карты, на которые смотрел испытуемый. Постепенно на рисунке отражалась траектория перемещения взгляда.

Результаты использования экспериментального алгоритма показали возможность фиксации траектории глаз и сбора данных для последующей обработки. Низкое качество работы в текущих экспериментах в первую очередь связано с низкой разрешающей способностью камеры. Но при этом влияние наклона и поворота головы удалось в значительной степени нивелировать. Работа над экспериментальным приложением продолжается. Дополнительно отрабатывается форма протокола фиксируемых системой данных, которые будут наиболее результативно потом анализироваться интеллектуальной системой на предмет выделения паттернов и их оценки.

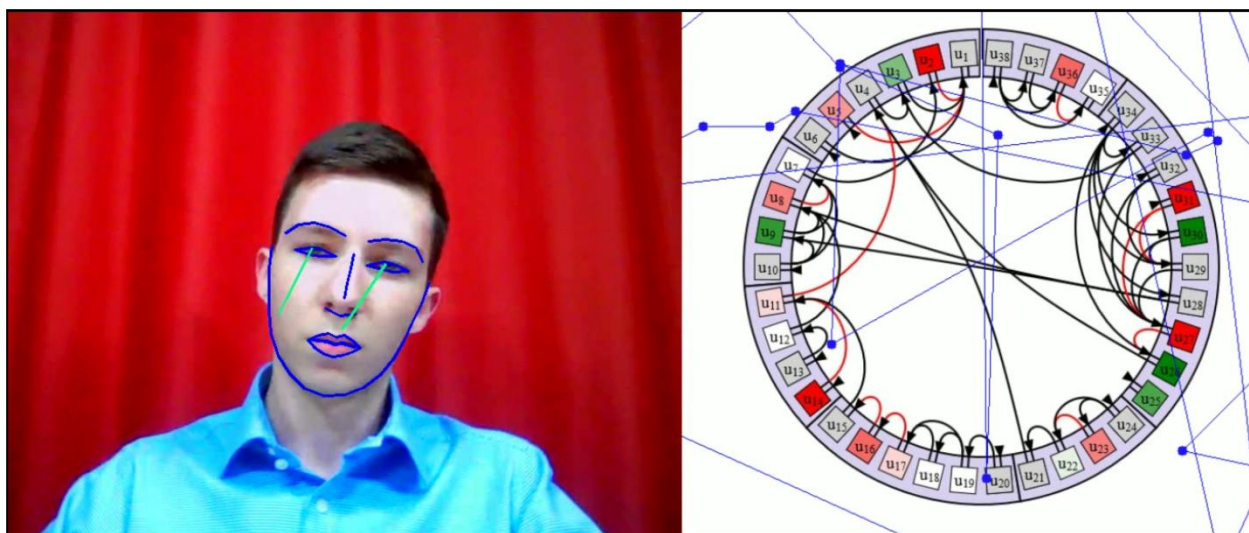


Рис. 2. Пример работы алгоритма: испытуемый с показанными ключевыми точками и направлением взгляда(слева) и траектория движения взгляда по изображению (справа)

Вывод

Анализ траектории движения взгляда играет важную роль для анализа эргономичности когнитивной визуализации данных. Существующие подходы к реализации айтрекинга обладают проблемами, влияние которых мы постарались уменьшить в процессе исследования. Представленный алгоритм позволил улучшить результаты фиксации взгляда человека, свободно держащего голову, при рассматривании сложной визуализации. Решение проблемы точности и сложности калибровки являются предметом наших дальнейших исследований.

Список литературы

1. Han J., Kamber M., Pei J. Data mining concepts and techniques third edition. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems. Vol. 5(4), 2011. – pp. 83–124.
2. Берлянт А.М. Образ пространства: картаи информация. – М.: Мысль, 1986. – 240 с.
3. Лунева Е. А., Скобелкина Н. Г. Айтрекинг в системе современных технологий нейромаркетинга // Сибирский торгово-экономический журнал. – 2016. – №. 3 (24). – С. 50-53.
4. Добровинский Д. С., Ловецкий И. В., Попов М. А. Прокторинг как инструмент развития дистанционного образования // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2018. – Т. 2. – С. 27-32.
5. Робин С. Д., Кружкова О. В. Возможности применения технологии айтрекинга в психолого-педагогической диагностике обучающихся с ограниченными возможностями здоровья и детей с синдромом дефицита внимания и гиперактивности // Специальное образование. – №3. – 2024. – С. 53-67

6. Якушина А. А., Булаева Н. И., Леонов С. В., Поликанова И. С., Клименко В. А. Использование системы мобильного айтрекинга в спортивной практике // Российский психологический журнал. – Т. 21. – №1. – 2024. – С. 34-46.
7. Барабанщиков В. А., Жегалло А. В. Айтрекинг. Методы регистрации движений глаз в психологических исследованиях и практике: Книга. – М.: Когито-Центр, 2014. – 128 с.
8. Лукошков И.А., Артемова А.А., Белов Ю.С. Адаптивный алгоритм нахождения границ зрачка на изображении // Научное обозрение. Технические науки. – №3. – 2020. – С. 19-23.
9. Head orientation estimation using Python and OpenCV + dlib. Статья из блога linuxtut.com [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://linuxtut.com/en/1e68a7572bc5736d474e/>.
10. Будынков А.Н., Масолкин С.И. Проблемы выбора ядра в одноклассовом методе опорных векторов // Проблемы управления. – №6 – 2015. – С. 70-75.
11. Худайбердиев М. Х., Ачилов Б. С., Алимкулов Н. М. Классификация заболеваний раком лёгкого методом опорного вектора // Наука и инновационное развитие. – Т. 7. - №1. – 2024. – С. 8-20.
12. Балахнин Е.Е., Пимонов А.Г. Популярные нейронные и традиционные алгоритмы компьютерного зрения // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы XII международной научно- практической конференции. – Междуреченск: Филиал КузГТУ в г. Междуреченске, 2023. – С. 405-407.
13. Liaw A., Wiener M. Classification and regression by random Forest // R news. – Vol. 2. – 2002. – pp. 18-22.
14. Чистяков С. П. Случайные леса: обзор // Труды Карельского научного центра РАН. - № 1. – 2013. – С. 117–136.
15. Abdel-Aziz Y.I., Karara H.M. Direct linear transformation from comparator-coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry // Photogramm. Eng. Remote Sensing. 2015. vol. 81(2). pp. 103–107.
16. Измаилов А. Ф., Куренной А. С., Стецюк П. И. Метод Левенберга-Марквардта для задач безусловной оптимизации //Вестник российских университетов. Математика. – 2019. – Т. 24. – №. 125. – С. 60-74.
17. Uglev V.A. Cognitive Maps of Knowledge Diagnosis (CMKD): the essence of the method, classification, characteristics and synthesis principles // Novel & Intelligent Digital Systems: Proceedings of the 4th International Conference. LNNS, vol 1170. Springer, Cham. 2023. pp. 594–605. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73344-4_51.
18. Uglev V., Smirnov G. A Cross-Cutting Approach to Analysis of the Learning Situation in ITS Using a Mapping Mechanism // Journal of Integrated Design and Process Science, 2024. vol. 27(3-4). pp. 288-303. <https://doi.org/10.1177/10920617241289777>.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ НАЛОЖЕНИЯ ТРЕКА НА КАРТУ ДЛЯ СПОРТИВНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Аннотация: В данной статье рассматривается реализация интеллектуального модуля для наложения gpx-трека на карту для спортивного ориентирования. Данный модуль является частью системы мониторинга спортивной активности. Реализуется модель компьютерного зрения, позволяющая распознавать контрольные пункты на изображении, и анализируются показатели её качества.

Ключевые слова: компьютерное зрение, предобученные модели, показатели обученности, распознавание объектов.

E.I. Kushner, Master's student, emil.kushner.stud@mail.ru

E. M. Tovbis, Ph.D., Associate Professor, sibstu2006@rambler.ru

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

AN INTELLIGENT TRACK OVERLAY MODULE FOR ORIENTEERING

Abstract: This article discusses the implementation of an intelligent module for superimposing a gpx-track on an orienteering map. This module is part of the sports activity monitoring system. A computer vision model is implemented that makes it possible to recognize checkpoints in an image, and its quality indicators are analyzed.

Key words: computer vision, pre-trained models, learning indicators, object recognition

Введение

Спортивное ориентирование – это вид спорта, в котором участник должен как можно быстрее пройти заданный маршрут через контрольные пункты (КП), пользуясь только картой и компасом. При этом спортсмены используют современные носимые устройства (часы, нагрудные ремни, иные датчики) и облачные спортивные платформы (Garmin, Polar, Suunto, COROS и т.д.), которые позволяют регистрировать и сохранять большой объём дан-

ных: пульс (HR), GPS-треки, мощность, каденс, сигналы акселерометра, вариабельность частоты пульса (HRV) и другие параметры.

В рамках разрабатываемой нами информационной системы мониторинга спортивной активности в спортивном ориентировании, одним из необходимых ее компонентов является модуль наложения сохраненных треков на карту.

Наложение треков на спортивную карту позволяет сопоставить трек, пройденный спортсменом во время гонки или тренировки, с изображением на карте. Данная функция позволяет проанализировать вариант движения, а также, в зависимости от вида программного обеспечения, можно оценить такие показатели, как пульс, темп, изменение высот. Итогом разработки модуля наложения трека на спортивную карту станет автоматизация процесса сопоставления временных показателей прохождения трассы с её графическим отображением. Ожидаемый результат работы модуля показан на рисунке 1.

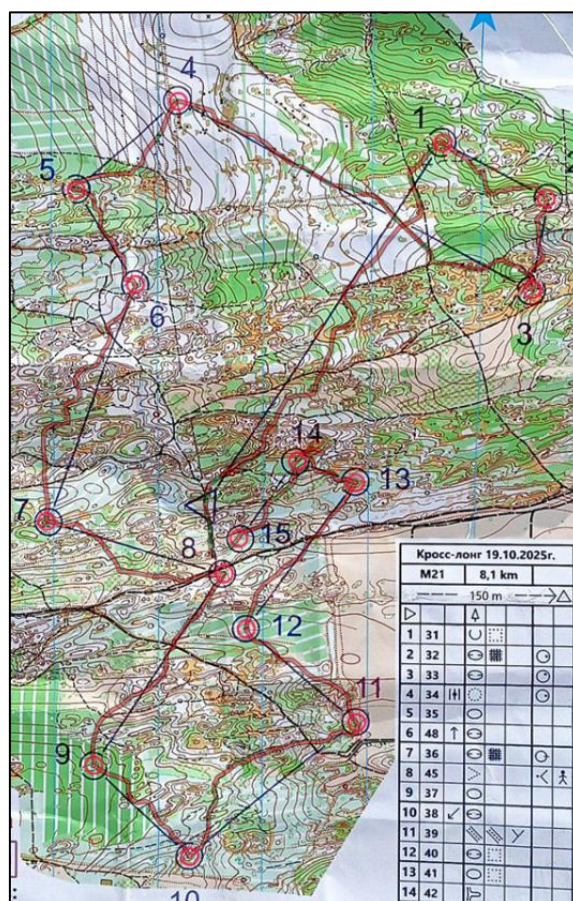


Рис. 1. Планируемое отображение результата модуля

Модуль будет состоять из 3 подмодулей, выполняющих следующие подзадачи:

1. Распознавание контрольных пунктов с фотографии спортивной карты;

2. Распознавание временных отсечек с распечатки зарегистрированных результатов спортсмена, полученной им после соревнований. Данная подзадача может быть опущена в процессе работы модуля, так как спортсмен может производить отсечки при помощи носимых устройств;

3. Сопоставление контрольных пунктов с временными отсечками на grx-треке.

В данной работе рассматривается реализация первой задачи данного модуля.

Материалы и методы

Для сопоставления временных отсечек с визуальным отображением контрольных пунктов необходимо решить задачу определения позиции КП на изображении. В данной работе эта задача решается при помощи инструментов машинного обучения. Используется метод детекции объектов, который позволяет получать координаты центра объекта (КП) [1].

После определения задачи был подготовлен датасет, изображения в котором приведены к единому формату. Изображения сохранялись в расширении png и сжимались до размера 640*640 пикселей, сохраняя исходное соотношение сторон, оставшееся пространство заполнялось белыми полосами. Размер датасета составил 813 изображений. Так как количество изображений относительно невелико, предпочтительным является использование предобученных моделей [2].

Разметка изображений была проведена с помощью программного обеспечения LabelImg, данные о разметке сохранялись в xml-формате [3]. Пример размеченного файла показан на рисунке 2. В результате разметки была сформирована обучающая выборка из 487 изображений, содержащих порядка 7000 искомых объектов.

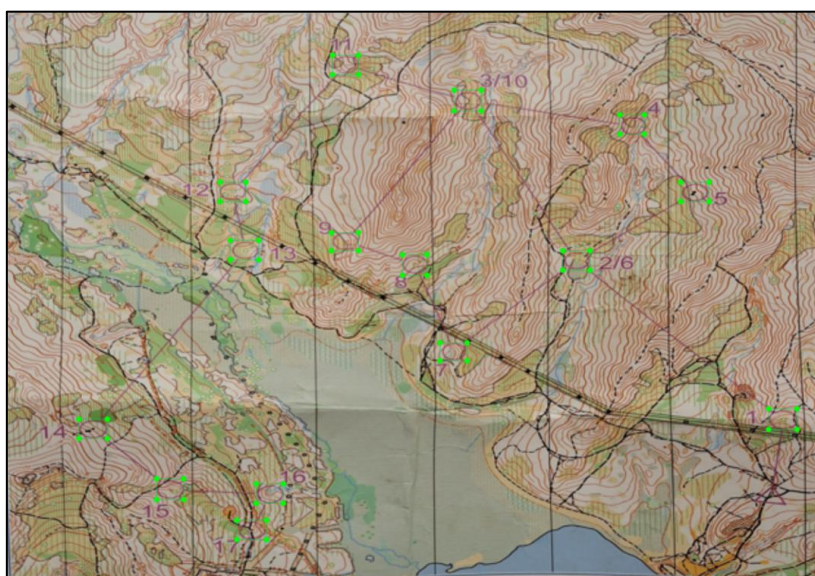


Рис.2. Разметка контрольных пунктов на спортивной карте

Из множества возможных готовых моделей, которые можно дообучить, была выбрана модель YOLO 11 версии, так как она хорошо работает при наличии в данных более 2000 объектов, а категория папо относит эту модель к разряду быстрых и легковесных [4].

Обучение проводилось в соотношении 80/20 для тренировочных и валидационных данных. В результате серии экспериментов были подобраны следующие параметры обучения модели: количество эпох - 20, количество изображений в серии (batch size) равное 8. По итогу обучения получены матрица ошибок, показанная на рисунке 3, а также показатели обученности модели [5]:

- accuracy = 0,963830871;
- error rate = 0,036169129;
- precision = 0,965798877;
- recall = 0,997890295;
- F1 = 0,981582361.

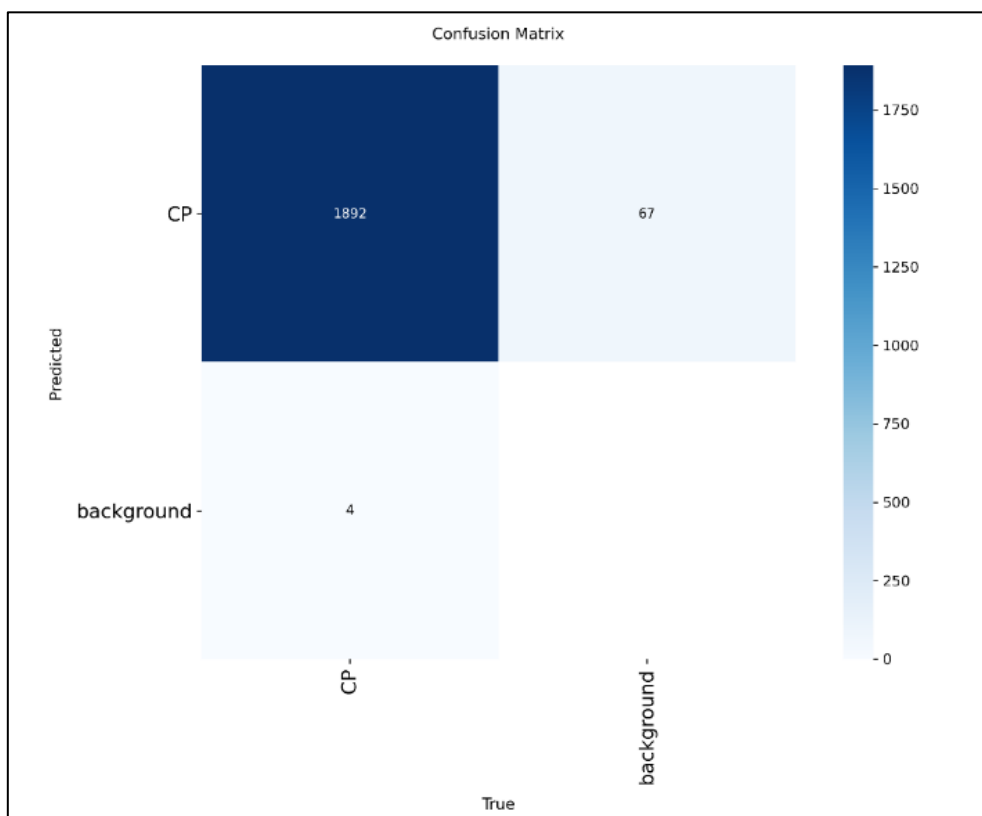


Рис. 3. Матрица ошибок

Затем, оставшиеся 326 изображений были использованы в качестве тестовой выборки для дообученной модели компьютерного зрения. Получены матрица ошибок, отражённая в таблице 1, а также следующие метрики качества модели:

- accuracy = 0,936004;
- error rate = 0,073996;

- precision = 0,970868;
- recall = 0,95247;
- F1 = 0,961581.

Таблица 1. Матрица ошибок для тестовых данных обученной модели

Предсказанный класс	КП	6132	184
	Фон	306	
		КП	Фон
		Реальный класс	

Пример предсказанного файла показан на рисунке 4.



Рис. 4. Результат детекции объектов с помощью обученной модели

Результаты и обсуждение

В данной работе решалась задача распознавания контрольных пунктов с фотографий спортивных карт как часть реализации модуля наложения треков на спортивную карту. Был вручную собран и подготовлен набор данных для обучения, выбрана модель и экспериментально подобраны ее параметры. Модель обучена и протестирована. Показатели качества модели довольно высоки, однако, мы предполагаем, что их можно повысить путём увеличения объёма обучающей выборки.

Впоследствии данный модуль, основанный на обученной модели, будет встроен в тренировочный дневник спортсмена в рамках информационной

системы мониторинга спортивной активности и будет использован как дополнительный инструмент анализа параметров тренировки или гонки, в том числе в связке с модулем, осуществляющим коммуникацию с тренером.

Список литературы

1. Михалев О. Н., Янюшкин А. С. Машинное зрение и распознавание объектов с помощью нейронных сетей // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-zrenie-i-raspoznavanie-obektov-s-pomoschyu-neyronnyh-setey>
2. Коротеев М.В. Обзор некоторых современных тенденций в технологии машинного обучения // E-Management. 2018. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-nekotoryh-sovremennyh-tendentsiy-v-tehnologii-mashinnogo-obucheniya>
3. Бурдуковский С. О. Аналитический обзор программного обеспечения для разметки изображений LabelImg / С. О. Бурдуковский // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности : Сборник научных статей III международной научной конференции, Казань, 30–31 марта 2021 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "КОНВЕРТ", 2021. – С. 156-157. – EDN QJOQUY.
4. Huang J. et al. LW-YOLO11: a lightweight arbitrary-oriented ship detection method based on improved YOLO11 //Sensors. – 2024. – Т. 25. – №. 1. – С. 65.
5. Шелухин О. И., Симонян А. Г., Ванюшина А. В., Влияние структуры обучающей выборки на эффективность классификации приложений трафика методами машинного обучения // T-Comm. 2017. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-struktury-obuchayuschey-vyborki-na-effektivnost-klassifikatsii-prilozheniy-trafika-metodami-mashinnogo-obucheniya>

М.В. Кузнецов, м.н.с., kurt21.89@mail.ru

А.В. Барков, к.т.н., доцент, aleksey.barkov@gmail.com

Е.А. Шангина, к.т.н., доцент, kati6230@ya.ru

В.А. Углев, к.т.н., доцент, uglev-v@yandex.ru

Сибирский федеральный университет, г. Железногорск, Россия

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЕРВИСА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГРАФОВЫХ СТРУКТУР

Аннотация: В статье рассматривается модификация ранее разработанного сервиса визуализации графовых структур. В сервисе произведен переход от простой структуры данных в виде графов (с возможностью последующей фильтрации) к такой структуре, где появляется возможность гибко выделять подграфы по набору признаков. Сервис рассматривается как инструмент для аналитика и может быть интегрирован в системы поддержки принятия решений. Работа сервиса проиллюстрирована на примере задачи мониторинга достижений научно-педагогических работников.

Ключевые слова: data mining, data visualization, когнитивная визуализация, граф, профиль активности, сервис.

M.V. Kuznetsov, Researcher, kurt21.89@mail.ru

A.V. Barkov, Ph.D, docent, aleksey.barkov@gmail.com

E.A. Shangina, Ph.D, docent, kati6230@ya.ru

V.A. Uglev, Ph.D, docent, uglev-v@yandex.ru

Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

ENHANCING THE VISUALIZATION OF GRAPH STRUCTURES SERVICE

Abstract: The article discusses a modification of a previously developed service for visualizing graph structures. The service has transitioned from a simple data structure in the form of graphs (with the ability to filter them later) to a structure that allows for the flexible selection of subgraphs based on a set of features. The service is considered as a tool for analysts and can be integrated into decision support systems. The service's functionality is illustrated through the example of monitoring the achievements of researchers and educators.

Key words: data mining, data visualization, cognitive visualization, graph, activity profile, service.

Анализ динамики показателей сложных объектов или процессов относится к такой интенсивно развивающейся области, как Data Visualization и Graph Mining (разделы Data Mining [1]). Если в области отображения данных о статичных объектах сделано много работ (см., например, монографию [2]), то отображать данные о динамично развивающихся структурах оказалось не так просто.

Традиционно, графы формируются динамически из первичных массивов данных, извлекаемых с помощью статистических методов, семантических анализаторов, больших языковых моделей. Если связи между объектами заданы в явном виде, это не составляет сложности. Но концепты (узлы графа) и связи (ребра) для сложной предметной области могут потребовать извлечения из первичных данных. Это сопряжено с рядом сложностей: появление концептов-синонимов, концептов-сокращений, концептов-переводов (как правило, на английский язык), редких смысловых связей и концептов, очевидных (частых) смысловых связей и концептов и пр. Но самым сложным является отображение частного «взгляда» (точки зрения) на предмет анализа и отображение его динамики. Для этого существуют специальные графические нотации (сети Маркова, когнитивные карты диагностики знаний и пр.). Для их использования потребуется разработать сложные модели представления и целые аналитические системы. Либо, потребуется использование механизма онтологий [3], что для работы аналитика и начинающего инженера по знаниям может оказаться неприемлемым.

Рассмотрим в рамках данной статьи вариант представления данных с помощью сервиса визуализации графовых структур [4]. Его функции были существенно расширены (по сравнению с версией предыдущей [4]). Для этого раскроем суть исходной модели представления данных, покажем её усложнение; опишем новые функции сервиса; а затем на примере проиллюстрируем его работу.

Модель исходных данных

Пусть имеется множество объектов X , каждый из которых характеризуется множеством активом прецедентов (активностей) Y . Каждая активность задана набором ключевых слов из тезауруса Z . Тогда пространство проявления активности в поле ключевых слов (концептов) группы анализируемых объектов можно отобразить в виде графа ключевых слов (ГКС). Общая схема соотношения сущностей приведена на рис. 1 (слева) в нотации SysML [5]. Такая схема будет соответствовать протоколу исходных данных для одного из x_i (где i – индекс объекта), представленных на рис. 1 справа. Как можно заметить, такое описание легко подготовить в текстовом формате без использования каких-либо специальных информационных систем. Для такой поста-

новки задачи был реализован сервис, позволяющий выводить общий граф объектов из X одновременно анализируемых объектов.

Сервис формирования графа версии из [4] позволял выводить и автоматически упорядочивать ГКС по донному из 6 алгоритмов, интегрированных в библиотеку Dash. Были реализованы функции окраски элементов графа по i , по y , и даже по элементам графа (цвет выбирался самостоятельно). Интерактивное взаимодействие поддерживало выделение вершин и их перетаскивание методом «drag&drop». По отношению ко всему графу можно было менять масштаб, вести контрастирование узлов (управлять размерами в пределах от минимального и до максимального значений), а также формировать сводную статистику по графу. Подробнее о возможностях исходного сервиса см. в [4].



Рис. 1. Упрощенная версии описания исходных данных в нотации SysML и пример для [4]

Получается, что для множества событий объекта из информации *тип активности, наименование, год, владелец/организация, значения в различных классификаторах, вектор ключевых слов* учитывались только первое и последнее значения. Это значительно ограничивало возможности анализа данных. Поэтому было принято решение произвести модернизацию сервиса как в плане расширения номенклатуры исходных учитываемых данных, так и некоторых функциональных возможностей интерфейсной части.

Обновленный вариант сущностей, участвующих в формировании протокола данных представлен на рис. 2 (слева). Здесь уже включаются все сопутствующие характеристики объектов: и время, и владелец, и наименования, и даже дополнительные комментарии, отображаемые в информационной панели сервиса. Пример формирования таких данных приведен на рис. 2 (справа). Особенностью такого подхода является возможность описания вектора признаков-классификаторов в каждой модели самостоятельно (динамически формируя основания для дальнейшей фильтрации).

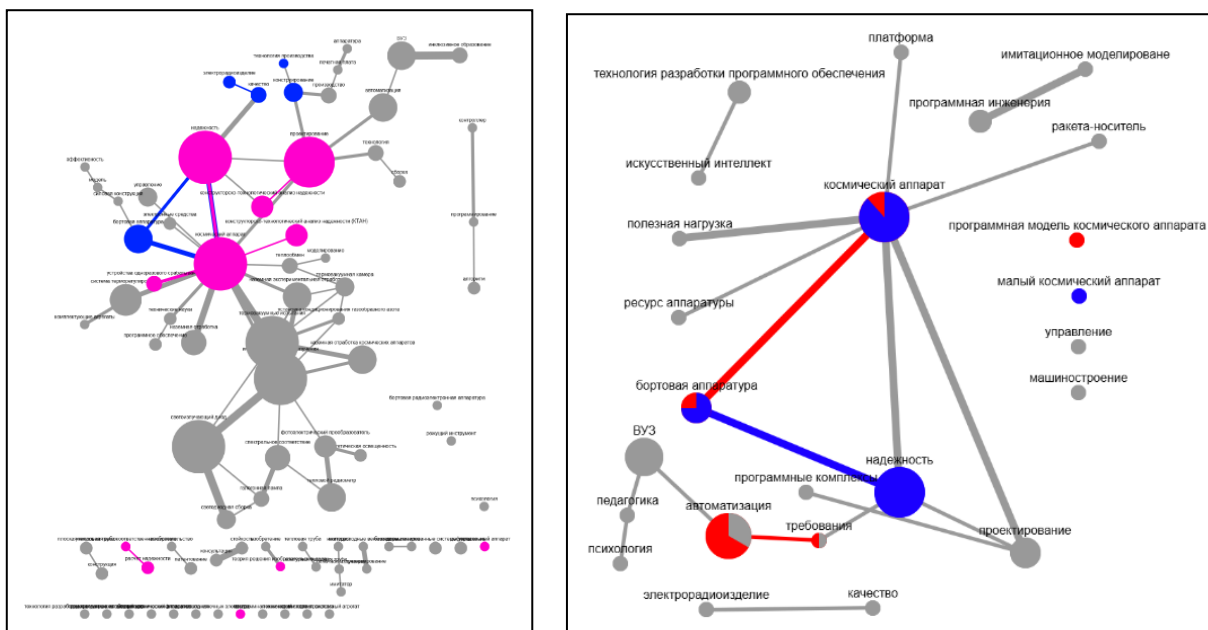


Рис. 3. Примеры ГКС по выделению подструктур и по представлению данных

- выводить на боковой информационной панели дополнительные данные и их обобщения, а также комментарии к выделенному узлу или ребру графа.

Кроме этого, значительно ускорился процесс обработки графов: ряд алгоритмов был оптимизирован.

Пример применения

Использование сервиса по построению ГКС с расширенными возможностями может быть произведено как в рамках существующего экспериментального приложения, так и интегрировано в системы поддержки принятия решений или аналитические сервисы. Среди типовых задач, на которые он ориентирован, можно выделить следующие:

- анализ данных в протоколах активности сущностей (людей, техники, мероприятий, организаций);
- формирование поля знаний при формализации данных о предметных областях;
- отражение специфики полей знаний различных экспертов в процессе формирования баз знаний [6];
- удобный и простой инструмент визуализации графовых структур, исходные данные которого соответствуют приведенному протоколу.

Рассмотрим пример для построения компетентностного профиля научно-педагогических работников. Для обработки первичных данных об их активности (показателях деятельности) была выгружена из информационной системы набор цифровых следов для каждого из сотрудников.

Пакетная загрузка этих данных в сервис позволила не только выявить общую картину достижений на уровне концептов, но и оценить вклад каждо-

го работника в тот или иной фрагмент ГКС. Полученные данные, в сочетании с другими видами когнитивной визуализации (образы в нотации унифицированного графического воплощения активности [7] и когнитивных карт диагностики знаний [8]), позволили обосновать ряд кадровых решений и наметить «точки роста» в тематическом плане НИР кафедры [9].

Приведем конкретные примеры. Отдельные ГКС для этой задачи были приведены выше на рис. 3. В частности, на рисунке слева показан граф активности научно-педагогических работников кафедры «Прикладная физика и космические технологии» за первое полугодие 2025 г. На нем выделены различными цветами подграфы, принадлежащие двум сотрудникам. Они отражают ГКЛ публикаций за отчетный период. На нем, в частности, видно, что авторы практически не пересекаются по полю концептов своих работах, а также имеют различную интенсивность публикационной активности (у автора синего подграфа она гораздо ниже, чем у автора фиолетового). Для формирования этого изображения в сервисе было применено контрастирование к узлам (вывод концептов с частотой появления не менее 10, при ограничении радиуса 150 значениями). Режим упорядочивания графа выбран Compound Spring Embedder (Cose [10]).

Правый граф с рис. 3 построен для достижений только двух работников. Объектом анализа выбраны подграфы ГКС выпускных квалификационных работ магистрантов. Контрастирование включения узлов в граф настроено на интервал значений частот от 3 до 60 (режим вывода тоже выбран Cose). Здесь интересна степень пересечения подграфов на уровне концептов: для этого включен режим отображения долей вклада каждого работника относительно общего ГКС.

Заключение

Сервис визуализации графовых структур был разработан специально для того, чтобы аналитику или инженеру по знаниям было удобный получить инструмент, не требующий высокого порога освоения технологий. Его также можно применять для обучения студентов, школьников, курсантов основам работы со структурами знаний и их анализу (например, в рамках дисциплин «интеллектуальный анализ данных», «базы знаний интеллектуальных систем» и пр.). Особенно сервис полезен для выделения динамики показателей множества связанных объектов и различия в индивидуальном опыте людей-экспертов. Мы используем этот сервис, кроме прочего, при организации практических работ по учебному модулю «инженерия знаний» для студентов (магистрантов) профиля «информатика и вычислительная техника».

Следующим плановым этапом по расширению функциональной возможности сервиса визуализации графовых структур является введение различных типов активностей, отражающих семиотическую структуру знаний.

Так же прорабатывается вопрос разработки унифицированного интерфейса интеграции визуальной части сервиса во внешние приложения, используя технологию API.

Список литературы

1. Han J., Kamber M., Pei J. Data Mining concepts and techniques third edition. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems. Vol. 5(4), 2011. – pp. 83–124.
2. Xuan Q. Graph Data Mining. Algorithm, Security and Application. Springer, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-2609-8>.
3. Гаврилова Т.А., Шванкин В., Кубельский М.В., Иваникова Н.В., Луцков В. Картография и семантика научного знания: пилотный проект // XXII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2025). В 3 ч. Ч. 1. – СПб.: ФИЦ ИУ РАН, 2025. – С. 38-46.
4. Кузнецов М.В., Углев В.А. Визуализация графовых структур для базы компетентностного профиля // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. - Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2023. - С. 59-66.
5. SysML Open Source Project: What is SysML? Who created SysML? [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://sysml.org/>.
6. Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. Инженерия знаний. – СПб.: Лань, 2016. – 324 с.
7. Uglev V., Meshkov S., Kuznetsov M. Methodology of Complex Visual Representation of Human Activity Using Cognitive Visualization // Journal of Integrated Design and Process Science, 2024. vol. 27(3-4). pp. 184-199. <https://doi.org/10.1177/10920617241289768>.
8. Uglev V.A. Cognitive Maps of Knowledge Diagnosis (CMKD): the essence of the method, classification, characteristics and synthesis principles // Novel & Intelligent Digital Systems: Proceedings of the 4th International Conference. LNNS, 2023. vol. 1170. Springer, Cham. pp. 594–605. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73344-4_51.
9. Кузнецов М.В., Боржигон Е.В., Углев В.А. Групповая карта работников научно-образовательного подразделения на примере межинститутской базовой кафедры // Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании: Материалы IX Международной научной конференции. В 4 ч. Ч.1. - Красноярск: КГПУ, 2025. – С. 245-248.
10. Dogrusoz U., Giral E., Cetintas A., Civril A., Demir E. A Layout Algorithm for Undirected Compound Graphs. Information Sciences, 2009, 179, pp. 980–994.

А.В. Матвеев¹, к.х.н., заведующий лабораторией, matveev.nsu@mail.ru

А.В. Нартова^{2,1}, к.х.н., доцент, с.н.с., avnartova@gmail.com

А.Г. Окунев¹, к.х.н., директор Института интеллектуальной робототехники НГУ,
okunev73@mail.ru

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

²Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

ОБЛАЧНЫЙ СЕРВИС DLGRAM ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСКОПИИ

Аннотация: В статье представлен универсальный и удобный облачный сервис DLgram, основанный на технологиях глубокого машинного обучения и не требующий для его использования навыков программирования. Пользователь размечает несколько объектов на изображении и загружает его в облако, где нейросеть обучается распознавать изучаемые объекты. Пользователь получает результаты распознавания, которые при необходимости можно скорректировать – удалить ошибки или добавить пропущенные объекты. Кроме того, возможно проведение статистической обработки полученных данных для получения информации о размерах, площадях и координатах наблюдаемых объектов. Сервис DLgram позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на количественный анализ изображений, уменьшить влияние субъективного фактора и повысить точность анализа.

Ключевые слова: распознавание, глубокие нейронные сети, искусственный интеллект, микроскопия

A.V. Matveev¹, Dr., group leader, matveev.nsu@mail.ru

A.V. Nartova^{2,1}, Dr., associate Professor, senior researcher, avnartova@gmail.com

A.G. Okunev¹, Dr., director of the Institute of Intelligent Robotics NSU, okunev73@mail.ru

¹Novosibirsk state University, Novosibirsk, Russia

²Boriskov Institute of catalysis SB RAS, Novosibirsk, Russia

DLGRAM CLOUD SERVICE FOR AUTOMATIC MICROSCOPY IMAGE ANALYSIS

Abstract: The article presents DLgram, a versatile and convenient cloud service based on deep machine learning technologies that does not require programming skills. The user labels several objects in the image and uploads it to the cloud, where the neural

network trains to recognize the objects being studied. The user receives recognition results, which, if necessary, can be adjusted, errors can be deleted, or missing objects can be added. In addition, it is possible to carry out statistical processing of the data obtained to get information about the sizes, areas and coordinates of the observed objects. The article describes the features of the service. The DLgram service allows to significantly reduce the time spent on quantitative image analysis, reduce the influence of the subjective factor and improve the accuracy of the analysis.

Key words: recognition, deep neural networks, artificial intelligence, microscopy

Введение. В различных областях науки и техники часто возникает задача обработки изображений, связанная с подсчетом и определением параметров многочисленных изучаемых объектов. Объекты могут быть клетками, ядрами, частицами, кристаллами, дефектами, пузырьками и т.д. Измеряемые параметры включают количество объектов, их размер, площадь, степень удлинения, концентрацию, покрытие и т.д. Для получения релевантных статистических данных нередко необходимо подсчитать и измерить сотни изучаемых объектов. Выполнение этой технической работы занимает значительное количество времени даже для высококвалифицированных специалистов. Современные программные пакеты для обработки микроскопических изображений, такие как ImageJ/Fiji [1], WSxM [2], Gwyddion [3] и другие содержат модули для автоматического распознавания объектов, которые обычно основаны на пороговых подходах (библиотека OpenCV [4]). Эти подходы обеспечивают разумные результаты при анализе изображений хорошего качества, но они не могут быть использованы, когда на изображениях присутствует шум или другие особенности. В статье представлен DLgram — универсальный и удобный облачный сервис для автоматического распознавания объектов на изображениях. Сервис основан на применении технологий глубокого машинного обучения, при этом для его использования не требуется навыков программирования.

Подходы и оборудование. В качестве платформы для интерфейса сервиса был выбран Telegram, поскольку он имеет следующие функциональные преимущества по сравнению с традиционным веб-форматом и другими мессенджерами: а) доступность клиента в виде мобильного приложения и для настольных компьютеров; б) возможность оперативно поддерживать обратную связь с пользователями; в) возможность скачивать изображения в полном формате, в отличие от других распространенных мессенджеров; г) минимальные технические усилия для создания сервиса и его поддержки по сравнению с отдельным приложением или использованием веб-интерфейса. Для работы с сервисом DLgram пользователь должен присоединиться к группе Nanoparticles [5].

В сервисе DLgram используются нейронные сети семейства Cascade Mask-RCNN [6] с бэкбонами X-101-64×4d-FPN, предварительно обученные на наборе данных COCO [7]. Нейронная сеть работает на графическом сервере HPE Apollo 6500 Gen10 с восемью видеокартами NVIDIA Tesla V-100, расположенном в ИИР НГУ. При загрузке данных для обучения нейронной сети пользователь может контролировать несколько параметров обучения: количество эпох, аугментацию и порог ответа. Набор коэффициентов для обученной нейронной сети хранится на сервере под определенным именем, и пользователь может впоследствии использовать обученную им нейронную сеть для распознавания подобных объектов в изображениях того же типа.

Разметка объектов. Классические подходы глубокого обучения требуют разметки сотен или даже тысяч объектов для обучения нейронной сети. Например, ранее нами для распознавания наночастиц в изображениях СТМ было размечено 5157 частиц [8]. В сервисе DLgram мы применили аугментационный подход [9], при котором пользователю достаточно разметить лишь несколько объектов на изображении, чтобы нейронная сеть научилась распознавать. Разметка объектов на изображении (а также корректировка распознанных объектов) выполняется с помощью измененной нами программы LabelMe [10]. Для разметки изображения пользователь должен выполнить следующие шаги:

- открыть в программе LabelMe изображение, которое необходимо проанализировать;
- используя команду «Create Rectangle» нарисовать прямоугольник, который должен быть назван «crop» и должен включать несколько объектов, которые необходимо распознать;
- используя команду «Create Polygons» (или «Create Circle» для круглых объектов), пользователь должен разметить все объекты, которые находятся внутри прямоугольника (crop) или частично пересекают его. Рекомендуется, чтобы как минимум 1-2 объекта полностью были расположены внутри него.

Если объекты относятся к одному классу, то они должны быть названы одинаково, например, «particle». Если в изображении присутствуют различные типы (классы) объектов и их необходимо распознавать отдельно, то они должны быть названы по-разному, например, «particle» и «grain».

Распознавание. Размеченный файл должен быть загружен в Telegram-канал сервиса [5]. Данные передаются на сервер ИИР НГУ, где производится обучение нейронной сети. Продолжительность обучения в среднем занимает около 5 минут. По завершении обучения нейронная сеть распознаёт объекты на всём изображении и формирует файл, содержащий исходное изображение и контуры распознанных объектов.

Корректировка. Нейронная сеть может ошибаться – пропускать некоторые объекты или находить объекты там, где их нет. Важной особенностью сервиса DLgram является возможность пользователя исправлять результаты распознавания объектов нейронной сетью. Для этого необходимо открыть

файл с результатами распознавания в программе LabelMe и провести необходимые корректировки.

Получение статистики. Для автоматической обработки распознанных контуров пользователю необходимо нажать кнопку «Calculate Stat» в приложении LabelMe, генерируется файл, который содержит таблицу характеристик каждого объекта: координаты центров масс, площади, проекционные диаметры объектов (определяемые как $d=(4S\pi)^{0.5}$, где S – площадь объекта). Все значения даны в пикселях, поэтому для получения результатов в физических единицах необходимо пересчитать пиксели в единицы измерения с учётом масштаба. Полученный набор данных по отдельным объектам может использоваться для дальнейшей статистической обработки, включая определение среднего размера, построение диаграмм распределения и т.п.

Заключение. В данной статье представлен универсальный и удобный облачный сервис DLgram, созданный на основе последних достижений в области глубокого обучения. Сервис автоматически распознает и подсчитывает количество объектов на изображениях и их параметры. Для использования сервиса не требуются специальные навыки программирования. Сервис DLgram позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на количественный анализ изображений, уменьшить влияние субъективного фактора и повысить точность анализа.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет-2030 и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0032).

Список литературы

1. Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., Kaynig V., Longair M., Pietzsch T., Preibisch S., Rueden C., Saalfeld S., Schmid B., Tinevez J.-Y., White D. J., Hartenstein V., Eliceiri K., Tomancak P., Cardona A. // Nat Methods, 2012, 9, 676.
2. Horcas I., Fernández R., Gomez-Rodriguez J. M., Colchero J., Gómez-Herrero J., Baro A. M. Rev. Sci. Instrum. 2007, 78, 013705–1.
3. Nečas D., Klapetek P. Open Physics, 2012, 10, 181. <https://doi.org/10.2478/s11534-011-0096-2>.
4. Bradski G., Kaehler A., Learning OpenCV Computer Vision in C++ with the OpenCV Library, Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2016.
5. Телеграм-канал Nanoparticles [Электронный ресурс]: режим доступа: https://t.me/nanoparticles_nsk.
6. Cai Z., Vasconcelos N., In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Salt Lake City, UT, USA, 18–22 June 2018, 6154.

7. Lin T.-Y., Maire M., Belongie S., Bourdev L., Girshick R., Hays J., Perona P., Ramanan D., Zitnick C. L., Dollár P. Lect. Notes Comput. Sci., 2014, 8693, 740.

8. Okunev A.G., Mashukov M.Y., Nartova A.V., Matveev A.V., Nanoparticle Recognition on Scanning Probe Microscopy Images Using Computer Vision and Deep Learning // Nanomaterials. 2020. V.10. N7. 1285:1-16. <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/7/1285>

9. Matveev, A. V., Nartova, A. V., Sankova, N. N., Okunev, A. G. DLgram cloud service for deep-learning analysis of microscopy images. Microscopy Research and Technique, 2024, V. 87, N 5, pp. 991-998. <https://doi.org/10.1002/jemt.24480>

10. Приложение в телеграм-канале Nanoparticles [Электронный ресурс]: режим доступа: https://t.me/nanoparticles_nsk/10115

К.В. Макаренко, магистрант, plus.makarenko@yandex.ru
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АВТОМАТИЗАЦИИ ДИАГНОСТИКИ СИСТЕМНЫХ ОШИБОК

Аннотация: В работе исследуется эффективность применения оптимальных методов интеллектуального анализа данных (Data Mining) для повышения точности диагностики системных ошибок серверного оборудования. Традиционные средства мониторинга теряют эффективность при обработке больших объемов гетерогенных данных и зашумленных многомерных временных рядов, не позволяя оперативно выявлять скрытые зависимости и причины сбоев. В качестве решения проведен сравнительный анализ нейросетевых архитектур (CNN, LSTM, Transformer, Autoencoder). Обосновано преимущество моделей на базе Transformer, которые обеспечивают наилучшую точность классификации отказов и интерпретируемость результатов в рамках концепции AIOps.

Ключевые слова: Data Mining, Artificial Intelligence for IT Operations, Transformer, нейронные сети, временные ряды, обнаружение аномалий, диагностика серверов.

K.V. Makarenko, student, plus.makarenko@yandex.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN AUTOMATION OF SYSTEM ERROR DIAGNOSTICS

Abstract: This paper examines the effectiveness of using optimal methods of intelligent data analysis (data mining) to improve the accuracy of diagnosing system errors in server equipment. Traditional monitoring tools lose their effectiveness when processing large volumes of heterogeneous data and noisy multidimensional time series, preventing the rapid identification of hidden dependencies and causes of failures. As a solution, a comparative analysis of neural network architectures (CNN, LSTM, Transformer, Autoencoder) was conducted. The advantage of Transformer-based models, which provide the best accuracy of failure classification and interpretability of results within the AIOps concept, was substantiated.

Key words: Data Mining, Artificial Intelligence for IT Operations, Transformer, neural networks, time series, anomaly detection, server diagnostics.

В эпоху Industry 4.0 и экспоненциального роста объемов данных (Big Data) традиционные методы мониторинга IT-инфраструктуры, основанные на пороговых правилах, демонстрируют низкую эффективность. Современные серверные кластеры генерируют гетерогенные потоки данных: метрики производительности (CPU, Memory, I/O) и неструктурированные текстовые логи. Сложность выявления скрытых зависимостей в таких многомерных временных рядах требует применения продвинутых методов интеллектуального анализа данных (Data Mining) и машинного обучения [1, 2].

Актуальным направлением развития систем управления IT-инфраструктурой является AIOps (Artificial Intelligence for IT Operations) — применение алгоритмов ИИ для автоматизации диагностики. Ключевой задачей Data Mining в этом контексте становится не просто детекция сбоя, а предиктивная аналитика и точная классификация причин деградации производительности [3]. Целью данной работы является выбор оптимальной нейросетевой архитектуры для реализации модуля глубокого анализа данных в системах AIOps.

Диагностика серверного оборудования сводится к двум подзадачам: обнаружение аномалий (Anomaly Detection) и классификация типа неисправности (Fault Diagnosis). Согласно исследованию [8], эффективная модель должна уметь извлекать пространственно-временные признаки из логов предшествующих отказов и метрик состояния.

Для обработки последовательных данных серверной телеметрии были проанализированы следующие классы нейронных сетей, представленные в современной научной литературе (см. табл. 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ нейросетевых

Критерий	CNN (Сверточные сети)	LSTM / BiLSTM (Рекуррентные сети)	Transformer (Механизм Attention)
Принцип работы	Извлечение локальных паттернов через свертки (анализ матриц).	Последовательная обработка с сохранением контекста (памяти).	Параллельная оценка важности связей (Self-Attention).
Точность диагностики	Средняя/Высокая. Эффективны для статических данных, но упускают долгосрочные временные связи [12].	Высокая для временных рядов, но страдает точность на очень длинных дистанциях из-за затухания градиента [7].	Максимальная. Источники подтверждают точность 98.1% (HEMATransformer [9]) и 99% (при использовании мультимодальных моделей [10]).

Интерпретируемость	Низкая. Работает как «черный ящик». Сложно понять, почему принято решение.	Низкая. Трудно отследить вклад конкретного события из прошлого в текущий прогноз.	Высокая. Карты внимания (Attention Maps) позволяют визуализировать вклад каждого параметра в возникновение сбоя [9, 18].
Вычислительная сложность	Низкая. Высокая скорость работы (inference), подходят для real-time систем [19].	Высокая. Последовательная природа алгоритма замедляет обучение и работу.	Средняя/Высокая. Требуется ресурсов для обучения, но отлично распараллеливается, что ускоряет обработку Big Data [17].
Вывод по методу	Подходит для первичной фильтрации данных.	Подходит для простых временных рядов.	Оптимален для экспертной системы сложной диагностики.

Исследование [9] демонстрирует применение модели на базе трансформера (HEMA-Transformer-TDA) для детектирования отказов с точностью до 98.1% (рис. 1).

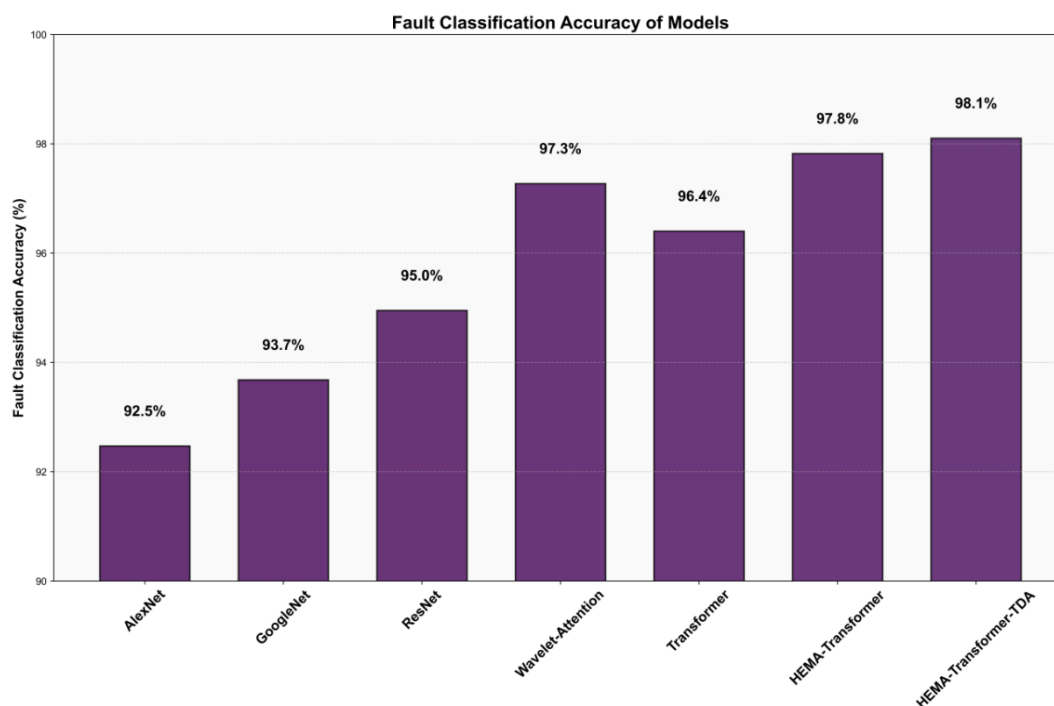


Рис. 1. Точность методов обнаружения неисправностей подшипников с использованием AlexNet, GoogleNet, ResNet, WaveletAttention, Transformer, HEMA-Transformer, HEMA-Transformer-TDA

Высокая эффективность архитектуры Transformer обусловлена применением механизма Temporal Decomposition Attention (TDA). В отличие от стандартных методов, TDA выполняет декомпозицию входного временного ряда на компоненты тренда и сезонности непосредственно в слоях внимания. Это позволяет модели HEMA-Transformer эффективно фильтровать стохастический шум и фокусироваться на скрытых паттернах деградации, достигая точности классификации 98.1%. Для задач мониторинга серверного оборудования данный подход критически важен, так как позволяет разделять легитимные пики нагрузки (сезонность) и аномалии, вызванные системными ошибками. В работе [7] алгоритм Autoformer успешно применяется для прогнозирования сложных многомерных временных рядов, превосходя классические методы.

Количественный анализ эффективности методов показывает явное преимущество архитектур на базе механизмов внимания. В то время как классические методы демонстрируют ограничения при работе со сложными зависимостями, модели Transformer обеспечивают точность детектирования отказов на уровне 98.1% – 99%, что подтверждается экспериментальными данными в работах [9, 10]. Кроме того, в отличие от «черного ящика» CNN, трансформеры обладают высокой интерпретируемостью [9], что позволяет экспертной системе объяснять логику принятого решения — критически важный аспект для операторов серверных залов.

На основе проведенного анализа предлагается следующий стек методов Data Mining для диагностики серверных ошибок:

1. Предобработка: Использование методов очистки данных и оценки их качества [15, 16], а также вейвлет-преобразования для фильтрации шума в метриках [11, 14].

2. Обнаружение аномалий: Применение Autoencoder или GAN (Generative Adversarial Networks) [6] для выявления отклонений от нормального профиля работы сервера.

3. Классификация сбоя: Использование архитектуры Transformer (или гибрида CNN-BiLSTM-Attention [8]) для анализа последовательности событий, приведших к аномалии. Трансформеры предпочтительнее благодаря высокой интерпретируемости через механизмы внимания [13], что позволяет экспертной системе не только сообщить об ошибке, но и указать на вызвавшие её факторы.

Применение методов Data Mining на базе архитектуры Transformer открывает новые возможности для диагностики в системах AIOps. Сравнительный анализ показал, что данные модели превосходят традиционные LSTM и CNN по точности (до 99%) и интерпретируемости. Использование механизмов временной декомпозиции (TDA) позволяет эффективно решать проблему зашумленности телеметрии, обеспечивая переход от реактивного мониторинга к предиктивному устранению неисправностей.

1. Marco S., Geert G. Industrial Process Monitoring in the Big Data/Industry 4.0 Era: from Detection, to Diagnosis, to Prognosis // *Processes*. – 2017. – Vol. 5, iss. 3. – Art. № 35. <https://doi.org/10.3390/pr5030035>
2. Passarella A., Conti M. Data Management in Industry 4.0: State of the Art and Open Challenges // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 38. – P. 957-964. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8764545/>
3. Samatas G., Moumgiakmas S. Predictive Maintenance – Bridging Artificial Intelligence and IoT // *arXiv preprint arXiv:2103.11148*. – 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.11148>
4. Adoshosha A., Haggag A., Neseem G. IoT-based data-driven predictive maintenance relying on fuzzy system and artificial neural networks // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2023. – Vol. 123. – Art. № 106301. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38887-z>
5. Resende C., Folgado D., Oliveira Joao. TIP4.0: Industrial Internet of Things Platform for Predictive Maintenance // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, iss. 14. – Art. № 4676. <https://doi.org/10.3390/s21144676>
6. Jyoti R., Tripura T., Kodamana H. Generative adversarial wavelet neural operator: Application to fault detection and isolation of multivariate time series data // *arXiv preprint arXiv:2401.04004*. – 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.04004>
7. Zhuoran X., Qianmu L. Multi-Sensor Fault Diagnosis Based on Time Series in an Intelligent Mechanical System // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, iss. 24. – Art. № 9973. <https://doi.org/10.3390/s22249973>
8. Xiangdong P., Min Y., Gua M. Application of multivariate time-series model for high performance computing (HPC) fault prediction // *PLOS ONE*. – 2023. – Vol. 18, iss. 10. – Art. № e0281519. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281519>
9. Mirzaeibonehkhater M., Labbaf-Khaniki M., Manthouri M. Transformer-Based Bearing Fault Detection using Temporal Decomposition Attention Mechanism // *arXiv preprint arXiv:2412.11245*. – 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.11245>
10. Gunwoo R., Nohyoony S. Anomaly Detection and Fault Classification in Multivariate Time Series Using Multimodal Deep Models // *Proceedings of the 14th Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2023*. – 2023. <https://doi.org/10.36001/phmconf.2023.v15i1.3810>
11. Mamookho E., Pawan K. Vibration signal acquisition and computer simulation detection of mechanical equipment failure // *Nonlinear Engineering*. – 2021. – Vol. 10, iss. 1. – P. 452-461. <https://doi.org/10.1515/nleng-2022-0026>
12. Hoo-chang S., Holger R. Deep Convolutional Neural Networks for Computer-Aided Detection: CNN Architectures, Dataset Characteristics and Transfer Learning // *IEEE Transactions on Medical Imaging*. – 2016. – Vol. 35, iss. 5. – P. 1285-1298. <https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2528162>
13. Juanjuan L., Defa H. An Image Classification Method Based on Adaptive Attention Mechanism and Feature Extraction Network // *Computational Intelligence and Neuroscience*. – 2023. – Art. № 4305594. <https://doi.org/10.1155/2023/4305594>
14. Парингер Р.А., Мухин А.В., Купиянов А.В. Формирование информативного индекса для различения заданных объектов гиперспектральных данных //

Computer Optics. – 2022. – Vol. 46, iss. 3. – P. 460-468. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-930>

15. Nitin G., Hima P., Shazia A. Data Quality Toolkit: Automatic assessment of data quality and remediation for machine learning datasets // arXiv preprint arXiv:2108.05935. – 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.05935>

16. Corrales D., Ledezma A., Corrales J. From Theory to Practice: A Data Quality Framework for Classification Tasks // Symmetry. – 2018. – Vol. 10, iss. 7. – Art. № 248. <https://doi.org/10.3390/sym10070248>

17. Кобринский Б.А., Благосклонов Н.А. Differential diagnosis of hereditary metabolic diseases using the expert knowledge-based system // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2020. – Т. 19, № 6. – С. 2857. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-4-71-78>

18. Guignard B., Karcher C., Reche X. Optimisation of Deep Learning Small-Object Detectors with Novel Explainable Verification // Sensors. – 2022. – Vol. 22, iss. 15. – Art. № 5692. <https://doi.org/10.3390/s22155692>

19. Shafiee M., Chywl B., Wong A. Fast YOLO: A Fast You Only Look Once System for Real-time Embedded Object Detection in Video // arXiv preprint arXiv:1709.05943. – 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.05943>

БИБЛИОТЕКА ЛОГИКИ ОТРИСОВКИ КОГНИТИВНЫХ КАРТ ДИАГНОСТИКИ ЗНАНИЙ

Аннотация: Метод когнитивных карт диагностики знаний был успешно применён на практике в составе метода сквозной визуализации. Для реализации дальнейших исследовательских целей необходимо отделить детали построения когнитивных карт, упростить их внедрение в сторонние проекты. Мы разработали библиотеку логики отрисовки когнитивных карт, определили входящие данные и их типы. С помощью библиотеки создан конструктор когнитивных карт. Конструктор позволяет создать карту произвольного содержания и настроить каждый из узлов карты. Библиотека и конструктор находятся в открытом доступе и открыты для применения.

Ключевые слова: интеллектуальные автоматизированные обучающие системы, учебная ситуация, когнитивная визуализация, принятие решений

G.A. Smirnov, graduate student, determaer2012@gmail.com
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

RENDER LOGIC LIBRARY OF COGNITIVE MAPS OF KNOWLEDGE DIAGNOSIS

Abstract: The method of cognitive maps of knowledge diagnosis has been successfully applied in practice as part of the cross-cut visualization method. To achieve further research goals, it is necessary to separate the details of building cognitive maps and simplify their implementation in third-party projects. We have developed a library of cognitive map rendering logic and defined the incoming data and their types. A cognitive map constructor has been created using the library. The constructor allows you to create a map with arbitrary content and customize each of the map nodes. The library and constructor are publicly available and open for use.

Key words: интеллектуальные автоматизированные обучающие системы, учебная ситуация, когнитивная визуализация, принятие решений

Метод когнитивных карт диагностики знаний

Когнитивные карты диагностики знаний (ККДЗ) – метод когнитивной визуализации, основывающийся на картировании. Структура когнитивной

карты – ориентированный граф из концептов, основное назначение – свёртка крупного набора данных с целью упростить восприятие информации [1]. ККДЗ универсальны – их возможно применить для разных масштабов ситуации, разных аспектов рассмотрения ситуации. В зависимости от потребности возможно построить когнитивную карту в разных режимах демонстрации: базовая, индивидуализированная, частная, упрощённая частная, сквозная, сводная. Далее на рисунке 1а представлена стандартная форма представления карты в нотации ККДЗ.

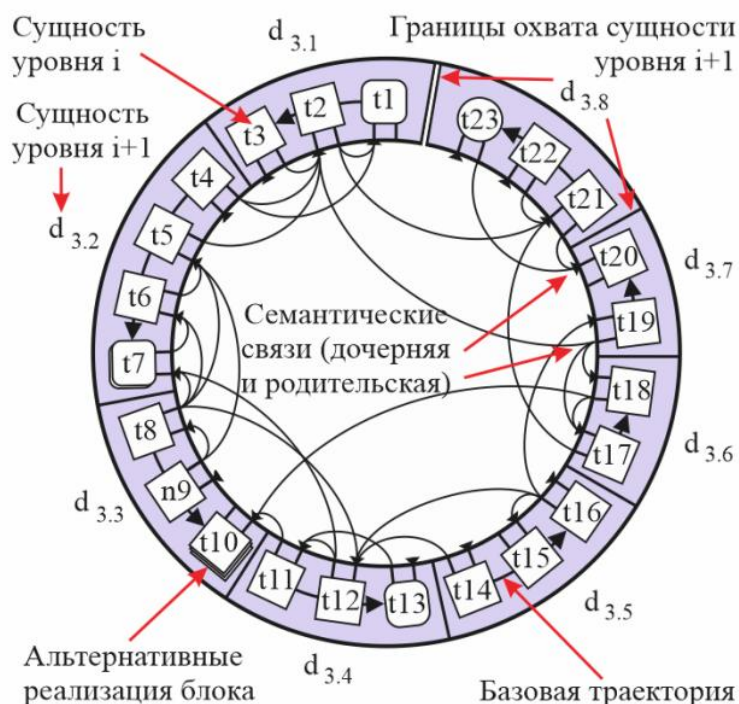


Рис. 1. Карта в нотации ККДЗ, основные элементы

При разработке нотации был определён основной сценарий применения в качестве средства визуализации учебных ситуаций в интеллектуальных автоматизированных обучающих системах (ИАОС). При этом остаётся возможность применить данную нотацию в других областях. Для этого важно наличие у декомпозируемого объекта или процесса узлов с определёнными свойствами и связности между узлами.

Мы применили нотацию в составе метода сквозной визуализации учебной ситуации [2]. Данный метод был реализован в качестве экспериментального web-модуля для ИАОС AESFU. В последствии были собраны данные об использовании web-модуля: в тестировании функционала приняли участие студенты железнодорожного филиала СФУ, по ходу тестирования студенты заполняли анкеты. В ходе обобщения данных из анкет была подтверждена эффективность нотации ККДЗ, как средства когнитивной визуализации для сопровождения обучения. Карту признали понятной в 85% случаев, каждый из студентов отметил пользу от присутствия карты для оценки учебной ситуа-

ции. Более подробно с составом контрольно-измерительных материалов, ходом проведения и результатами экспериментального тестирования можно ознакомиться здесь [3].

Библиотека для отрисовки ККДЗ

Удачная практика применения нотации ККДЗ сподвигла нас на декомпозицию web-модуля для отделения программных методов построения карты от контекста. Мы поставили для себя цель сделать внедрение ККДЗ в любую web-систему более простым, без необходимости заново описывать математику, отрисовку и иные технические моменты. Иными словами – создать универсальное решение, доступное для разворачивания в преимущественно большинстве систем. Для воплощения данной цели был создан проект самописной библиотеки `cmkd-drawer`, опубликованный в свободном доступе на GitHub [4]. В качестве технологического стека выбраны язык программирования JavaScript, библиотека для статической структурной типизации TypeScript, фреймворк для создания пользовательских интерфейсов Vue.JS, библиотека для отрисовки геометрии Konva. Результаты разработки также были опубликованы в NPM: это позволяет автоматизировать обновления и доработки, а также упростить установку библиотеки в целевые проекты. На данный момент существует ограничение по применению библиотеки: необходимо наличие Vue не ниже 3.0, как обязательной зависимости.

Для отрисовки когнитивной карты при помощи библиотеки необходимо убедиться в наличии входных данных. Для этого введены свойства, с помощью вопросительного знака обозначены необязательные:

- `labels` – массив узлов для построения;
- `width?` – ширина и высота области, выделяемой для размещения ККДЗ;
- `drawingMode?` – режим отрисовки карты. Позволяет задать режим базовой, частной, упрощённой карты;
- `showSupportRect?` – флаг включения выносного дополнительного материала. Также применим для задания режима индивидуализированной карты;
- `showImportant?` – флаг выделения красным цветом важных семантических связей;
- `showDefaultRect?` – флаг принудительного задания всем узлам карты формы квадрата;
- `showUnreached?` – флаг показа «недостигнутых» узлов карты. Семантически данный флаг может быть наиболее применим для каких-либо ситуаций учебного характера. Например, неизученный обучающимся элемент может считаться «недостигнутым»;

Для корректной отрисовки необходимо правильно составить список узлов `labels`. Поскольку в библиотеке каждый элемент кодируется почти двумя

десятками свойств, мы решили ввести специальный тип Label для описания. Данный тип доступен к применению вне библиотеки: с его помощью можно упростить и практически автоматизировать сборку списка. Далее представлен набор свойств для типа Label, через двоеточие обозначен тип данных свойства:

```
id: number, идентификатор, ключевое свойство;
prop: number, принадлежность к группе элементов. В рамках образо-
вания такими группами могут быть дидактический материал, компетенции и
другие;
typeText: string, буквенное обозначение элемента;
numText: string, цифровое обозначение элемента;
type: "rect" | "roundrect" | "circle", фигурное обозначение эле-
мента;
num: number, количество представлений элемента;
score: number, значение результата «освоения» элемента [-1; 1];
isBase: boolean, отображение элемента на основной траектории;
connections: number[], идентификаторы элементов для построения
семантических связей;
secStart: boolean, начало сектора;
secEnd: boolean, конец сектора;
fontStyle: string, тип начертания шрифта: bold, normal, italic и
другие варианты, допустимые в библиотеке Konva;
arrowOut: boolean, исходящая стрелка образовательной траектории;
arrowIn: boolean, входящая стрелка образовательной траектории;
level: number, уровень элемента на карте. Если есть элементы с
level > 0, будет построена сводная карта;
grey: boolean, отображение серого фона у элемента. В рамках обра-
зования обозначает элемент, непокрытый тестированием;
yellow: boolean, отображение жёлтого фона у элемента. В рамках
образования обозначает «недостигнутый» элемент;
sectorName: string, наименование сектора;
isLabel: boolean, необязательное свойство, применяемое для эле-
ментов с level > 0 (сводная карта). Регулирует наличие фигурного обо-
значения;
secLength: number, необязательное свойство, применяемое для эле-
ментов с level > 0 (сводная карта). Обозначает длину сектора;
```

При проектировании в библиотеку-отрисовщик была заложена интерактивность при взаимодействии с элементами карты. Пользователь может навести курсор мыши, совершить клик по узлу, семантической связи, сектору и иным элементам [5]. Для отслеживания таких действий существуют два исходящих события: @clicked и @unclicked. С их помощью можно реализовать различные сценарии, позволяющие улучшить пользовательский опыт от взаимодействия с картой. В библиотеке также представлены служебные методы для сброса клика по карте, сохранения карты в png высокого разреше-

ния. С этими методами, входными данными, используемыми типами, генерируемыми событиями и иными интересующими деталями можно ознакомиться в репозитории проекта на GitHub[4].

Конструктор для создания произвольных ККДЗ

Библиотека для отрисовки стала основой также для конструктора ККДЗ. Конструктор позволяет с нуля создать карту любой формы и содержания, определив свойства каждого из элементов. Далее на рисунке 2 представлена панель управления построением ККДЗ в конструкторе.

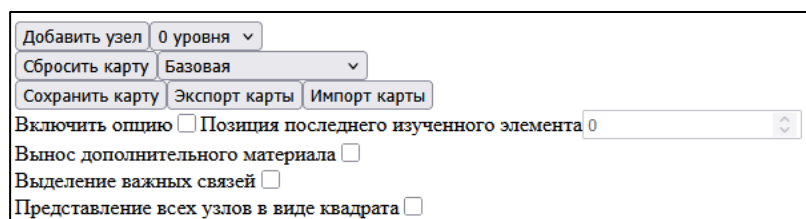


Рис. 2. Панель управления конструктора

Данная панель спроектирована с намерением покрыть все возможные сценарии построения когнитивной карты. Для этого учтены все входные данные, кроме настройки параметра ширины. Также реализован служебный функционал, позволяющий сохранить результаты работы для публикации или для продолжения работы над ней позднее. Кнопка «Сохранить карту» используется для сохранения карты в формате PNG. Для экспорта карты в формат JSON и для последующего импорта карты в конструктор используются кнопки «Экспорт карты» и «Импорт карты» соответственно. Пример сохранённой карты на рисунке 3 – сводная частная карта.

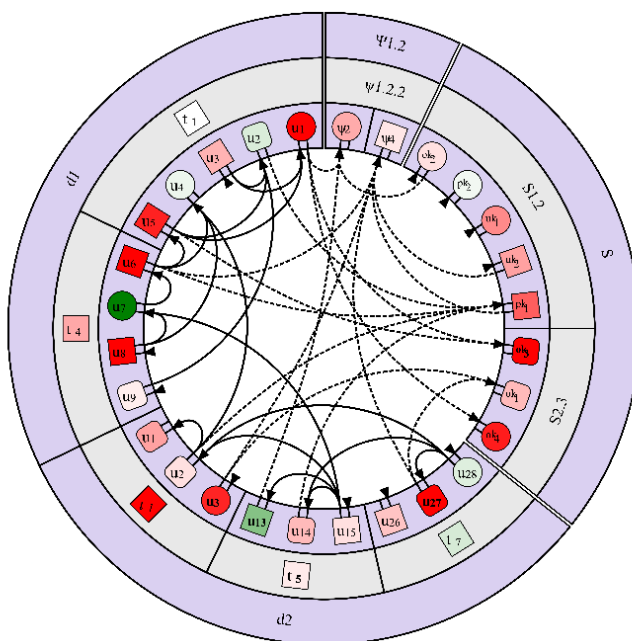


Рис. 3. Сводная карта, сформированная с применением конструктора

Непосредственная работа с конструктором строится на добавлении, редактировании и удалении узлов ККДЗ. Добавление узла производится посредством кнопки «Добавить узел». Предварительно необходимо выбрать уровень, задаваемый узлу. Важно учитывать его заранее – в последствии значение уровня не подлежит редактированию. Форма добавления узлов карты представлена на рисунке 4.

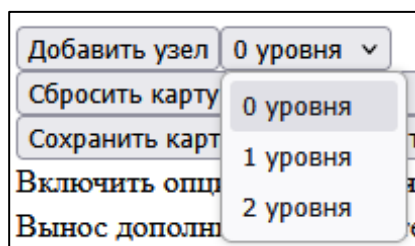


Рис. 4. Форма добавления узлов ККДЗ

Для более тонкой настройки карты потребуется редактировать или удалять узлы. Чтобы выбрать конкретный узел, его необходимо выделить кликом левой кнопки мыши, после этого нажать на кнопку «Редактировать узел». Далее на экран будет выведена форма для настройки узла, её вид представлен на рисунке 5а, б.

а

б

Рис. 5. Форма редактирования узла уровня 0 (а) и уровней 1, 2 (б)

Заключение

Мы провели декомпозицию метода сквозной визуализации и выделили в отдельную библиотеку методики для отрисовки ККДЗ[4]. С приме-

нением библиотеки удалось упростить и унифицировать процесс внедрения когнитивных карт в сторонние web-системы. Важно учитывать имеющиеся ограничения при внедрении: система должна иметь контейнер, исполняемый на JavaScript, должен быть установлен фреймворк Vue версии 3.0 и выше. На базе данной библиотеки создан конструктор ККДЗ[6] – инструмент для самостоятельной сборки карт и их последующего сохранения в разных форматах. Это может быть удобно для визуализации данных в статье, публикации в печать, иллюстрации на web-сайте. В дальнейшем мы планируем сделать библиотеку более доступной для web-систем: рассматривается доработка до требований концепции web-компонента, также планируется перенести конструктор на домен AESFU.

Список литературы

1. Uglev V. Cognitive maps of knowledge diagnosis (CMKD): the essence of the method, classification, characteristics and synthesis principles. Novel & intelligent digital systems conferences. LNNS, Springer, 2024, vol. 1170, pp. 594-605, DOI 10.1007/978-3-031-73344-4_51.
2. Смирнов Г.А. Разработка метода сквозной визуализации учебной ситуации в автоматизированных интеллектуальных обучающих системах: магистерская диссертация по специальности 09.04.01 «Информатика вычислительная техника». – Красноярск: СФУ, 2024. – 76 с.
3. Smirnov G., Uglev V. Experimental Results of Using Cognitive Maps of Knowledge Diagnosis in Different Modes to Explain the Recommendations of Intelligent Tutoring Systems. LNNS, Springer, 2024, vol. 1170, pp. 639-650, DOI 10.1007/978-3-031-73344-4_56.
4. Репозиторий проекта cmkd_drawer: [Электронный ресурс]. – Красноярск, 2025. URL: <https://github.com/determaer/CMKD> (дата обращения: 10.12.2025)
5. Смирнов Г.А. Сервис автоматического построения когнитивных карт диагностики знаний // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2023. – С. 67-73.
6. Конструктор ККДЗ: [Электронный ресурс]. – Красноярск, 2025. URL: <https://determaer.github.io/cmkd-constructor/> (дата обращения: 10.12.2025)

Секция 5

АЛГОРИТМЫ И СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

К. А. Аксенов, д.т.н., доцен, k.a.aksenov@urfu.ru

Чжоу Цихан, магистрант, 2487112317@qq.com

Ван Цзинь, магистрант, 1557464033@qq.com

Сунь Лина, ассистент, lina.sun@urfu.ru

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
г. Чжэнчжоу, г. Паньцзинь, г. Харбин, Китайская народная республика

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГРИБА

Аннотация: для решения задачи идентификации ядовитых грибов в данной статье разработан и апробирован прототип интеллектуальной системы. Прототип позволяет загружать изоб-ражение гриба, и решать задачу идентификации класса гриба на основе легковесных нейронных сетей и вопросно-ответной системы, на основе базы знаний о грибах. Кроме идентификации класса гриба, для некоторых случаев ядовитых грибов, база знаний содержит рекомендаций по неотложной помощи. Ключевые этапы работы включают: 1) разработку архитектуры системы; 2) тонкую настройку моделей на собранном наборе данных, содержащем 20 категорий и 1000 изобра-жений, что позволило достичь точности базовой идентификации в 85.1%; 3) создание базы знаний, интегрирующей информацию о классе и категории грибов (съедобный \ несъедобный) и данные экстренных служб, а также установление эффективного механизма взаимодействия между моделью и базой данных. Тестирование показало, что прототип системы способен выполнять замкнутый цикл услуг «идентификация – оценка – рекомендация».

Ключевые слова: распознавание ядовитых грибов; ResNet; структурированная база данных; компьютерное зрение

K. A. Aksenov, Ph.D, k.a.aksenov@urfu.ru

Zhou Qihang, Master's Student, 2487112317@qq.com

Wang Jinyi, Master's Student, 1557464033@qq.com

Sun Lina, Assistant Professor, lina.sun@urfu.ru

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SYSTEM PROTOTYPE FOR MUSHROOM IDENTIFICATION

Abstract: This paper presents the development and validation of an intelligent system prototype designed for identifying poisonous mushrooms. The prototype enables users to upload mushroom images and perform class identification using lightweight neural networks and a knowledge-based question-answering system. In addition to classification, the knowledge base provides emergency response guidance for certain poisonous mushroom types. Key implementation phases include: (1) system architecture design; (2)

fine-tuning models on a custom dataset containing 1,000 images across 20 categories, achieving a baseline identification accuracy of 85.1%; and (3) constructing a knowledge base that integrates mushroom classification (edible/inedible) with emergency service data, along with establishing an efficient model-database interaction mechanism. System testing confirms the prototype's capability to execute a complete service workflow of “identification – risk assessment – recommendation”.

Keywords: poisonous mushroom recognition; ResNet; structured database; computer vision

Грибы, являясь распространенным пищевым продуктом и лекарственным средством, скрывают в себе потенциальную токсичность, что приводит к частым случаям отравлений по всему миру и создает устойчивую угрозу общественной безопасности [1]. Особенно остро эта проблема стоит в таких регионах Китая, как провинция Юньнань, для которых характерны высокогорный рельеф, и богатая растительность здесь сосредоточено подавляющее большинство известных в стране видов грибов [2]. Ежегодные случаи отравлений из-за ошибочного сбора и употребления ядовитых грибов превратились в серьезную проблему для здравоохранения.

Традиционные методы идентификации, основанные на экспертных знаниях, не способны удовлетворить насущную потребность населения в оперативной и точной диагностике класса гриба. Ранее уже предпринимались попытки применения компьютерного зрения для классификации грибов. Например, Мэн Лиша и Ян Сяньчжао с соавторами (2022) достигли высокой точности классификации с помощью CNN-модели, однако не интегрировали в систему оценку ядовитости и механизмы экстренного реагирования [3]. Кроме того, универсальные инструменты распознавания изображений (такие как Large-UniDet [4], Cascade-DETR [5]) демонстрируют недостаточную точность в специализированной идентификации ядовитых грибов и пока не сформировали законченную систему, охватывающую весь цикл от восприятия входных данных о грибе до принятия решений.

Для устранения вышеуказанных недостатков в данном исследовании предложен и разработан прототип системы для оценки ядовитых грибов и идентификации.

Общая архитектура системы

Общая архитектура данной системы была разработана на основе глубокого анализа ключевых потребностей пользователей в реальных полевых условиях (для использования на смартфонах при походе в лес). Исследование позволило выявить наиболее важные запросы: быстрая идентификация ядовитых грибов, оценка риска отравления и получение инструкций по оказанию первой помощи в случае случайного употребления. В соответствии с

Система идентификации ядовитых грибов на основе компьютерного зрения

Уровень взаимодействия на переднем плане

- Пользователь загружает изображение гриба
- Поиск текста по грибам
- Отчет об испытаниях
- Функция экстренного вызова

Слой распознавания изображений

- Предварительная обработка изображений
- Облегченная модель распознавания изображений

Уровень обслуживания данных

- Модуль управления файлами изображений
- Модуль обработки информации о грибах
- База данных видов грибов
- Модуль обновления метаданных изображения
- Метаданные изображения
- Контактный номер службы экстренной помощи

Уровень API

- Функция GPS
- Модуль обработки информации о местоположении

Детали и потоки данных:

- Пользователь** → **Предварительная обработка изображений** (Изображение гриба)
- Пользователь** → **Поиск текста по грибам** (Имя, внешний вид, цвет, окружающая среда)
- Предварительная обработка изображений** → **Облегченная модель распознавания изображений** (Метки результатов прогнозирования модели)
- Облегченная модель распознавания изображений** → **Модуль обновления метаданных изображения** (Метки результатов прогнозирования модели)
- Модуль управления файлами изображений** → **Модуль обработки информации о грибах** (Идентификатор вида гриба)
- Модуль управления файлами изображений** → **Метаданные изображения** (Сгенерировать идентификатор изображения, путь и т. д.)
- Модуль обработки информации о грибах** → **База данных видов грибов**
- База данных видов грибов** → **Модуль обновления метаданных изображения** (Идентификатор вида гриба)
- Модуль обновления метаданных изображения** → **Метаданные изображения** (1. Обновите достоверность метки категории. 2. Установите связь между изображением и характеристиками гриба (обновите внешний ключ).)
- Метаданные изображения** → **Модуль обновления метаданных изображения**
- Модуль обновления метаданных изображения** → **Контактный номер службы экстренной помощи** (Описание биоморфологии грибов: симптомы отравления и варианты первой помощи)
- Функция GPS** → **Модуль обработки информации о местоположении**
- Модуль обработки информации о местоположении** → **Контактный номер службы экстренной помощи**

Рабочий процесс системы реализован следующим образом: пользователь загружает фотографию гриба через фронтенд, после чего легковесная нейронная сеть в модуле распознавания изображений выполняет инференс (вывод) в реальном времени. Полученная метка предсказанного вида гриба выступает ключевым индексом, связывающим физический объект с его цифровой моделью, и передается на уровень сервисов данных.

- Предсказанная метка передается в модуль обновления метаданных изображений. Данный модуль по идентификатору изображения (ID) находит соответствующую запись в метабазе и обновляет в ней название вида гриба и уровень достоверности распознавания, завершая цифровую аннотацию изображения объекта.

- Одновременно эта же метка направляется в модуль обработки информации о грибах. На основе полученной метки модуль точно извлекает из структурированной базы данных биологические характеристики соответствующего вида (включая признак ядовитости, симптомы отравления и рекомендации по первой помощи), тем самым формируя рекомендацию. Кроме того, сервис возвращает идентификатор вида гриба (species ID) для связывания с метаданными изображения, обеспечивая целостность и согласованность информационной модели.

В завершение система объединяет результат распознавания и подробную видовую информацию, предоставляя их пользователю. Такая автоматизированная замкнутая архитектура, основанная на «управляемой предсказанием модели ассоциации и запроса данных», гарантирует высокую скорость ответа и точность информации, полностью отвечая потребностям пользователей от обработки данных (изображении) гриба до получения результатов диагностики и рекомендаций.

Проектирование структурированной базы данных системы идентификации грибов

Структурированная база данных включает две основные таблицы:

- таблица информации о грибах (содержащая поля: ID вида, признак ядовит или нет, описание токсичности, симптомы отравления и др.);
- таблица аварийно-спасательных учреждений (содержащая поля: страна, город, регион, наименование учреждения, контактные данные, и др.).

Эта база данных динамически связана с модулем распознавания изображений: в процессе идентификации она возвращает подробную информацию и обеспечивает необходимые данные для функции автоматического вызова помощи в случае необходимости. Взаимосвязь между таблицами структурированной базы данных показана на Рис. 2, а примеры данных информация о грибах и данные об экстренной помощи представлены в таблицах на Рис. 3 и Рис. 4 соответственно.

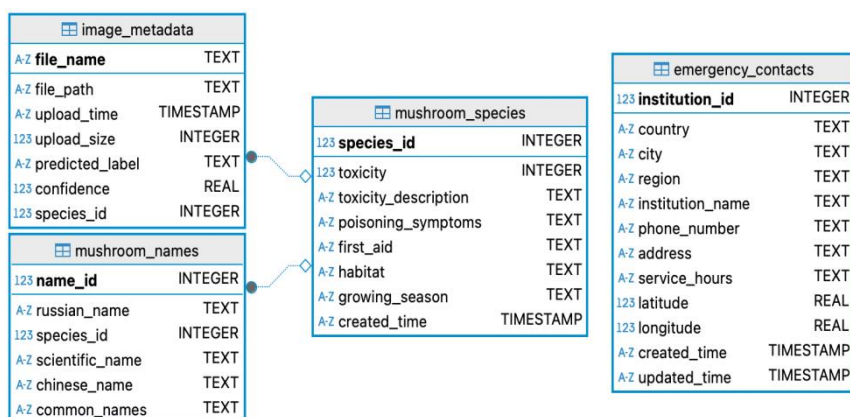


Рис. 2. Схема структурированной базы данных системы идентификации ядовитых грибов

	123 species_id	123 toxicity	A-Z toxicity_description	A-Z poisoning_symptoms	A-Z first_aid	A-Z habitat	A-Z growing_season
4	4	0	Не ядовит, съедобен, питат	Нет симптомов отравлени	Не требует сп	Лиственные лес	Лето-осень
5	5	1	Сильно ядовит, содержит а	Поражение печени и поче	Немедленно о	Лиственные лес	Лето-осень
6	6	1	Сильно ядовит, содержит а	Сильная рвота и диарея, п	Немедленно о	Лиственные лес	Лето-осень
7	7	0	Не ядовит, вкусный съедоб	Нет симптомов отравлени	Не требует сп	Возле термитн	Сезон дождей
8	8	1	Ядовит, раздражает желу	Тошнота, рвота, диарея	Вызвать рвоту, Лиственные лес	Лето-осень	
9	9	1	Ядовит, содержит псилоци	Галлюцинации, психическ	Немедленно о	Сосновые леса	Лето-осень
10	10	0	Не ядовит, обычный съедоб	Нет симптомов отравлени	Не требует сп	Гниющая древе	Круглый год в культ
11	11	0	Не ядовит, качественный с	Нет симптомов отравлени	Не требует сп	Луга	Лето-осень
12	12	1	Содержит гиромитрин, гем	Гемолиз, желтуха, пораже	Немедленно о	Хвойные леса	Весна
13	13	0	Ядовит при употреблении с	Дискомфорт при употребл	Избегать алко	Луга, леса	Лето-осень
14	14	0	Не ядовит, обычный съедоб	Нет симптомов отравлени	Не требует сп	Гниющая древе	Круглый год в культ

Рис. 3. Часть данных из таблицы видов грибов

	A-Z country	A-Z city	A-Z region	A-Z institution_name	A-Z phone_number	A-Z address
2	Россия	Санкт-Петербург	Петроградский р	Мариинская больница С	+7-812-333-44-55	Санкт-Петербург, Литейный пр., д. 56
3	Россия	Екатеринбург	Ленинский район	Екатеринбургская город	+7-343-222-33-44	Екатеринбург, ул. Войкова, д. 12
4	Россия	Иркутск	Октябрьский рай	Иркутская городская кл	+7-3952-123-456	Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 29
5	Россия	Вся страна	Вся страна	Скорая медицинская по	103,112	Телефон экстренной медицинской помо
6	Россия	Новосибирск	Центральный рай	Новосибирская областн	+7-383-210-00-00	Новосибирск, ул. Немировича-Данченко
7	Россия	Владивосток	Ленинский район	Краевая клиническая бс	+7-423-245-00-00	Владивосток, ул. Алеутская, д. 57
8	Россия	Казань	Вахитовский рай	Республиканская клини	+7-843-231-20-20	Казань, ул. Оренбургский тракт, д. 138
9	Украина	Киев	Печерский район	Киевская городская кли	+380-44-234-56-78	Киев, ул. Госпитальная, д. 5
10	Беларусь	Минск	Центральный рай	Минская городская кли	+375-17-218-00-00	Минск, ул. Кижеватова, д. 58
11	Казахстан	Алматы	Алмалинский рай	Городская клиническая	+7-727-291-01-01	Алматы, ул. Жандосова, д. 55
12	США	Нью-Йорк	Манхэттен	Центр контроля отравле	+1-800-222-1222	Нью-Йорк Манхэттен

Рис. 4. Таблица экстренных телефонов скорой помощи

Построение и обучение ключевой модели

3.1 Подготовка набора данных : В типичном сценарии использования системы идентификации ядовитых грибов пользователи обычно делают четкие снимки одного или нескольких грибов с близкого расстояния. «Объект съёмки» на таких изображениях может быть однозначно определён, и всю область изображения можно рассматривать как единый объект, подлежащий классификации.

С учётом требований сценария мы самостоятельно собрали собственный набор данных, включающий 20 распространённых видов грибов, из которых 10 ядовитые. Для каждого вида было собрано около 50 высококачественных изображений, что в совокупности составляет 1000 образцов. Набор данных называется: Грибы ЕК. Описание набора данных приведено в Таблице 1, а частичная визуализация на Рис. 5.

Таблица 1. Характеристики набора данных «Грибы ЕК»

Название набора данных	Количество меток (видов)	Количество изображений	Форматы файлов
Грибы ЕК	20	1000	JPEG / JPG / PNG



Рис. 5. Характеристики набора данных «Грибы ЕК»

3.2 Выбор и настройка модели : С учётом типичного сценария использования когда пользователи применяют систему на мобильных устройствах в естественных условиях, таких как горы и леса, и ограниченных вычислительных ресурсов, мы выбрали для дообучения (fine-tuning) компактную, но высокоэффективную в промышленной практике модель ResNet-18 [6], MobileNetV3 [7] и EfficientNet Lite [8].

В процессе дообучения исходный набор данных был разделён в соотношении 4:1 на обучающую и тестовую выборки. Скорость обучения (learning rate) была установлена на уровне 0,001, размер пакета (batch size) 10, количество эпох обучения 5. Для повышения обобщающей способности модели в процессе обучения применялись методы аугментации данных: случайное обрезание (random cropping), горизонтальное отражение (flipping), а также регулировка яркости, контрастности, насыщенности и тона.

В Таблице 2 представлены результаты сравнения производительности трёх моделей по метрикам классификации изображений. Кроме точности, важным фактором, влияющим на пользовательский опыт, является скорость работы модели. Тестирование проводилось на смартфоне с Android и портативном ноутбуке. мобильный телефон (М.Р.): процессор Qualcomm Snapdragon 860, 12 ГБ оперативной памяти. Конфигурация компьютера (Р.С.) следующая: процессор AMD Ryzen 7 4800H, 16 ГБ оперативной памяти и видеокарта NVIDIA GeForce RTX 2060 с 6 ГБ видеопамати.

Таблица 2. Сравнение производительности моделей

Название модели	Точность (Accuracy)	F1-мера (F1-score)	Р.С.среднее время обработки/ms	М.Р.среднее время обработки/ms
ResNet-18	0,851	0,823	59.37	125.63
MobileNetV3 Large	0,770	0,767	22.47	62.12
EfficientNet Lite	0,782	0,729	27.19	70.28

Тестирование системы

Мы интегрировали обученную модель в систему и провели тестирование взаимодействия процесса распознавания с компонентами структурированной базы данных. Результаты, полученные на стороне сервера (бэкенда), представлены на Рис. 6-а и Рис. 6-б.

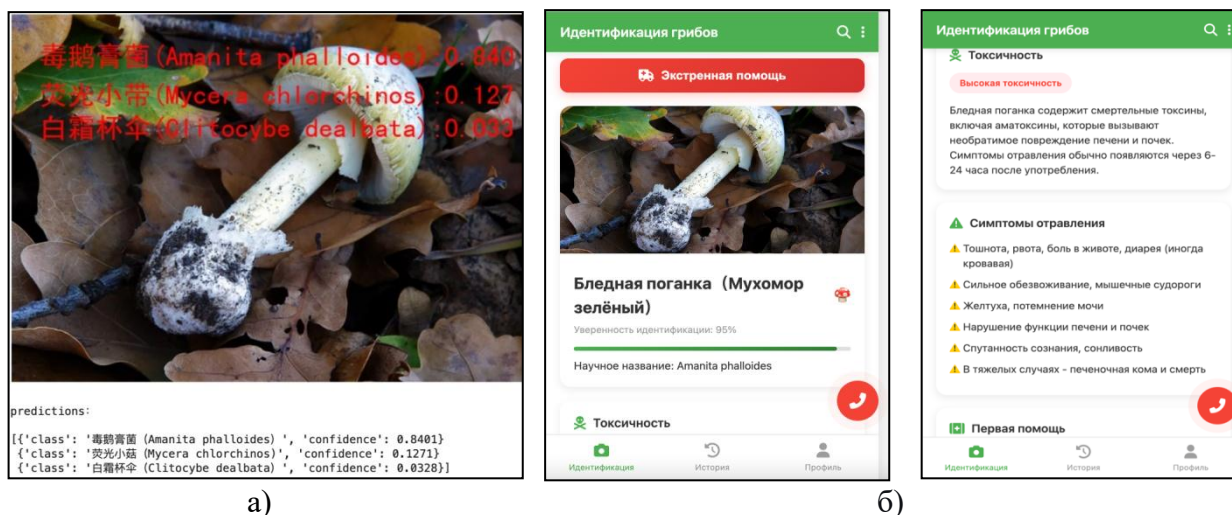


Рис. 6. Тестирование бэкенда системы распознавания грибов (а); тестирование фронтенда системы распознавания грибов (б)

Было проведено сквозное (end-to-end) функциональное тестирование всей системы. В частности, в ходе полевых испытаний пользователь сделал фотографию неизвестного гриба в лесу и загрузил её в систему. Система успешно распознала вид, вернула информацию о его токсичности и предложила опции экстренной связи. Результаты тестов показали, что система сохраняет устойчивую способность к распознаванию даже в сложных полевых условиях, а её ключевые функции работают корректно.

Заключение и перспективы

В данном исследовании был успешно разработан и протестирован прототип системы для определения грибов. Система интегрирует технологии компьютерного зрения и структурированную базу данных, позволяя распознавать ядовитые грибы с точностью 85,1%, а также предоставляет функцию экстренных указаний при отравлении, что способствует оперативному оказанию первой помощи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miles P G, Chang S T., Mushrooms: cultivation, nutritional value, medicinal effect, and environ-mental impact. CRC press, 2004. <https://doi.org/10.1201/9780203492086>
2. 高帆, et al. "毒蘑菇鉴别技术研究进展" Journal of Food Safety & Quality 15(9) , 2024. Русский Перевод : [Гао Фань и др. «Исследовательский прогресс в области методов идентификации ядовитых грибов». Journal of Food Safety & Quality 15(9), 2024]

3. 孟莉莎, 杨贤昭, and 刘惠康. "基于 CA-EfficientNetV2 的蘑菇图像分类算法研究." *Laser & Optoelectronics Progress* 59.24 (2022): 2410005-2410005. Русский Перевод : [Мэн Лиша, Ян Сяньчжао и Лю Хуэйкан. «Исследование алгоритма классификации изображений грибов на основе CA-EfficientNetV2». *Laser & Optoelectronics Progress* 59.24 (2022): 2410005-2410005.]
4. Lin F, Hu W, Wang Y, et al., Universal object detection with large vision model[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2024, 132(4): 1258-1276. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.09408>
5. Ye M, Ke L, Li S, et al., Cascade-DETR: Delving into high-quality universal object detection, *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2023: 6704-6714. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.11035>
6. He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep residual learning for image recognition, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016: 770-778.
7. Howard, Andrew, et al. "Searching for mobilenetv3." *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.02244>
8. Tan M, Le Q E., Rethinking model scaling for convolutional neural networks, *Proceedings of the International conference on machine learning*, Long Beach, CA, USA. 2019, 15. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.11946>

П.О. Гуськов, магистрант, pavel_guskov_o@mail.ru
г. Шымкент, Республика Казахстан
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
Р.В. Брежнев, к.т.н., доцент, rbrejnev@sfu-kras.ru
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И РАНЖИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ НА ОСНОВЕ МЕТАДАННЫХ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Аннотация: В работе представлена модель интеллектуальной фильтрации и ранжирования спутниковых снимков на основе анализа метаданных и качественных показателей изображений. Рассматривается задача автоматизации выбора наиболее информативных снимков для последующей обработки и публикации в системах дистанционного зондирования Земли. В качестве исходных данных используются параметры облачности, сезонность, спектральные характеристики и пространственное разрешение. Предложенный подход основан на применении методов интеллектуального анализа данных, включая построение решающих деревьев и алгоритмов отбора признаков. Модель реализуется в составе модулей индексации автоматизированной системы приёма космоснимков ИКИТ СФУ и обеспечивает повышение эффективности формирования архивов снимков и их использования в прикладных задачах мониторинга.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, интеллектуальная фильтрация, метаданные, ранжирование снимков, облачность, добыча данных, дерево решений.

P.O. Guskov, student, pavel_guskov_o@mail.ru
R.V. Brezhnev, Ph.D., docent, rbrejnev@sfu-kras.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR INTELLIGENT FILTERING AND RANKING OF SATELLITE IMAGES BASED ON METADATA AND QUALITY INDICATORS

Abstract: The paper presents a model for intelligent filtering and ranking of satellite images based on the analysis of metadata and image quality indicators. It considers the task of automating the selection of the most informative images for subsequent processing and publication in Earth remote sensing systems. The initial data used includes cloudiness parameters, seasonality, spectral characteristics, and spatial resolution. The proposed approach is based on the application of intelligent data analysis methods, including the construction of decision trees and feature selection algorithms. The model is implemented as part of the indexing modules of the automated space image reception

system of the SFU Institute of Space Research and Technology and improves the efficiency of image archive formation and their use in applied monitoring tasks.

Key words: remote sensing of the Earth, intelligent filtering, metadata, image ranking, cloud cover, data mining, decision tree.

Введение

С увеличением объёмов данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) возникает проблема оптимального отбора снимков, удовлетворяющих требованиям конкретных прикладных задач. Большинство существующих систем хранения и публикации спутниковых данных (например, Sentinel Hub, Earth Explorer, GeoServer) не обладают механизмами интеллектуальной фильтрации, что приводит к необходимости ручного выбора изображений. Это снижает скорость обработки, увеличивает нагрузку на вычислительные ресурсы и усложняет интеграцию с внешними ведомственными сервисами.

Проблема особенно актуальна в контексте систем, где данные поступают от различных спутников (Landsat, Sentinel, Kanopus, SPOT) и отличаются по структуре метаданных, форматам и качеству изображений. Использование интеллектуальных методов анализа метаданных позволяет формировать автоматические критерии фильтрации и ранжирования, повышая производительность и точность последующих этапов обработки.

Целью данной работы является разработка и апробация модели интеллектуальной фильтрации спутниковых снимков, основанной на анализе метаданных и показателей качества изображения с применением методов Data Mining.

Постановка задачи

Пусть множество $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ представляет собой набор спутниковых снимков, каждый из которых описывается набором метаданных $M_i = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$, содержащих параметры:

- облачность (CloudCover);
- дата съёмки (AcquisitionDate);
- сезонность (Season);
- тип сенсора (SensorType);
- пространственное разрешение (SpatialResolution);
- спектральные характеристики (BandSet);
- наличие геометрических и радиометрических искажений.

Необходимо построить функцию ранжирования (1):

$$R(s_i) = f(M_i), \quad (1)$$

которая на основе анализа метаданных и обученной модели классификатора определяет степень полезности снимка для заданной задачи обработки.

В рамках исследования решались следующие задачи:

1. Сбор и нормализация метаданных спутниковых снимков;
2. Отбор значимых признаков для оценки качества изображений (feature selection);
3. Обучение модели ранжирования на основе решающих деревьев (DecisionTreeClassifier);
4. Интеграция модуля фильтрации в процесс индексации АСПКС.

Разработка модели интеллектуальной фильтрации

Для реализации предложенной модели использовалась методология интеллектуального анализа данных (Data Mining) и алгоритмы классификации.

На первом этапе выполняется парсинг и нормализация метаданных, сопровождающих спутниковые изображения.

В зависимости от космического аппарата (Sentinel-2, Landsat-8/9, SPOT-4/5, Канопус-В) исходные файлы имеют различную структуру (XML, DIM, MTL, TXT), однако содержат схожие информационные блоки, которые могут быть приведены к унифицированному виду.

В ходе анализа были выделены основные группы параметров, оказывающих влияние на качество и пригодность снимков:

- геометрические параметры – пространственное разрешение, координаты углов сцены, параметры проекции, геометрическая ошибка;
- радиометрические параметры – калибровочные коэффициенты яркости и отражательной способности;
- атмосферно-освещённые параметры – облачность, солнечный азимут и высота над горизонтом (CLOUD_COVER, SUN_AZIMUTH, SUN_ELEVATION);
- временные и орбитальные характеристики – дата и время съёмки;
- качественные индикаторы – уровень обработки и категория коллекции, флаги насыщения по каналам, индексы качества.

Такой подход позволяет объединить данные различных спутниковых систем в единую модель признаков, которая может быть использована для автоматической фильтрации и ранжирования сцен.

На основе выбранных характеристик формируется оценка информативности снимков $R(s)$, отражающая их пригодность для дальнейшей обработки и публикации в составе модулей индексации.

На втором этапе проводится feature selection – выбор наиболее значимых признаков с использованием алгоритмов энтропийного анализа и корреляционной матрицы.

На третьем этапе выполняется построение дерева решений, где в качестве критерия расщепления используется метрика Gini Impurity (2):

$$G = 1 - \sum_{i=1}^C p_i^2, \quad (2)$$

где p_i – вероятность отнесения снимка к классу “информативный” или “неинформативный”.

В результате каждому снимку присваивается рейтинг полезности $R \in [0,1]$, который используется при публикации снимков в GeoServer. На заключительном этапе реализуется ранжирование и фильтрация в модуле индексации АСПКС, что позволяет автоматически исключать снимки с высокой облачностью, низким пространственным разрешением или неподходящей сезонностью.

Заключение

В рамках работы была разработана модель интеллектуальной фильтрации и ранжирования спутниковых снимков на основе анализа метаданных, что стало важным шагом в автоматизации процессов обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Предложенный подход основан на интеграции методов анализа данных, таких как Data Mining и классификация с использованием решающих деревьев, что позволяет эффективно отбирать снимки, соответствующие требуемым характеристикам для дальнейшего анализа. В результате проведённого анализа метаданных из различных источников, таких как MTL, XML, DIM и других, была создана унифицированная модель для фильтрации спутниковых снимков. Важным элементом данной работы является использование реальных параметров, таких как облачность, солнечная освещённость, геометрическая ошибка, а также качество сенсоров и радиометрические характеристики изображений, что позволяет повысить точность фильтрации и ускорить выбор снимков для дальнейшей обработки.

Несмотря на то, что на текущий момент модель фильтрации интегрирована в теоретическую часть разработки, её внедрение в систему индексации и публикации спутниковых данных является следующей важной стадией. Реализация данного модуля в рабочем процессе позволит существенно снизить время, затрачиваемое на выбор и публикацию снимков, а также повысить качество последующего анализа данных. Это особенно важно для таких задач, как мониторинг пожаров, сельского хозяйства и экологии, где точность и скорость обработки данных критично важны. Дальнейшие исследования будут направлены на усовершенствование модели с использованием более сложных методов машинного обучения, таких как глубокие нейронные сети для классификации сцен, а также на интеграцию модели с уже существующими сервисами, такими как GeoServer, для автоматической публикации и визуализации обработанных снимков. Также предстоит расширение функционала системы за счёт добавления анализов временных рядов для более

сложных задач, например, мониторинга динамики экосистем. Таким образом, предложенная модель фильтрации является важным шагом в развитии технологий обработки спутниковых данных, и её внедрение в практические системы мониторинга обеспечит эффективное использование данных ДЗЗ для решения актуальных задач устойчивого развития и экосистемного контроля.

Список литературы

1. Гуськов П. О., Брежнев Р. В. Разработка программно-технологической инфраструктуры обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2024. – С. 119-123.
2. Nigar A, Li Y, Jat Baloch MY, Alrefaei AF and Almutairi MH (2024) Comparison of machine and deep learning algorithms using Google Earth Engine and Python for land classifications. *Front. Environ. Sci.* 12:1378443. doi: 10.3389/fenvs.2024.1378443. – [Электронный ресурс].
3. Adegun, A.A., Viriri, S. & Tapamo, JR. Review of deep learning methods for remote sensing satellite images classification: experimental survey and comparative analysis. *J Big Data* 10, 93 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00772-x>. – [Электронный ресурс].
4. Каличкин В. К., Гарафутдинова Л. В., Федоров Д. С. Применение геопространственного искусственного интеллекта для классификации изображений дистанционного зондирования // Региональные геосистемы. 2024. №4. – С. 526-541. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-geoprostranstvennogo-iskusstvennogo-intellekta-dlya-klassifikatsii-izobrazheniy-distantionnogo-zondirovaniya> (дата обращения: 11.11.2025).
5. Landsat 8 Data Users Handbook. – United States Geological Survey (USGS), 2023. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook>

АДАПТИВНЫЙ КОНТЕКСТНО-ЗАВИСИМЫЙ ПРУНИНГ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Аннотация: Развитие больших языковых моделей (LLM) в контексте современных технологий искусственного интеллекта актуализировало проблему инференса данных алгоритмов. Ключевыми ограничениями их развертывания выступают высокие вычислительные требования и значительное потребление памяти, препятствующие массовому внедрению. В данном обзоре систематизированы и проанализированы оптимизационные методы, позволяющие повысить доступность LLM и снизить их углеродный след. Работа представляет собой теоретический этап подготовки к магистерской диссертации.

Ключевые слова: большие языковые модели, инференс, вычислительные требования, оптимизация

М.М. Kotyga, student, kotyga.mm@phystech.edu
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Moscow, Russia

ADAPTIVE CONTEXT-SENSITIVE PRUNING AS A METHOD TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY AND THROUGHPUT OF LARGE LANGUAGE MODELS

Abstract: The development of large language models (LLM) in the context of modern artificial intelligence technologies has actualized the problem of inference of these algorithms. The key limitations of their deployment are high computational requirements and significant memory consumption, which hinder mass adoption. This review systematizes and analyzes optimization methods to increase the availability of LLMs and reduce their carbon footprint. The work is a theoretical stage of preparation for a master's thesis.

Key words: large language models, inference, computational requirements, optimization

Целью данного обзора является систематизация современных методов динамического прунинга. Важность работы обусловлена необходимостью сни-

жения ресурсозатратности LLM. Обзор играет ключевую роль в научно-исследовательской работе, в его рамках осуществляется анализ существующих подходов с оценкой их эффективности. В рамках работы будут выделены перспективные направления для дальнейших исследований в контексте оптимизации LLM.

Архитектура трансформер [1] стала фундаментом LLM. Её ключевое преимущество — механизм self-attention, позволяющий эффективно улавливать долгосрочные зависимости в текстах. Благодаря этому подходу трансформеры быстро вытеснили RNN и CNN в задачах обработки естественного языка, а большинство современных моделей базируются именно на этой архитектуре вне зависимости от домена.

Несмотря на высокую эффективность, архитектура трансформеров обладает рядом принципиальных ограничений, затрудняющих её практическое применение. Во-первых, современные LLM содержат миллиарды и даже триллионы параметров, что требует колоссальных вычислительных ресурсов и пропускной способности памяти: например, LLaMA-2-70B занимает около 140 ГБ в формате FP16, делая её непригодной для многих сценариев развертывания. Во-вторых, механизм self-attention имеет квадратичную сложность $O(N^2)$ относительно длины входной последовательности, из-за чего обработка длинных контекстов становится крайне затратной — особенно на этапе предварительной обработки, когда весь запрос анализируется одновременно. В-третьих, авто-регрессивное декодирование порождает две существенные неэффективности: постоянную перезагрузку весов модели из памяти для каждого нового токена и непрерывный рост кэша ключ-значение (KV), который необходимо хранить и обновлять на протяжении всей генерации. Эти факторы в совокупности ограничивают масштабируемость и экономичность трансформерных моделей в реальных приложениях.

В современной практике оптимизации больших языковых моделей (LLM) выделяют три ключевых стратегических направления: оптимизация на уровне модели, на уровне данных и на уровне инфраструктуры. Наибольший исследовательский интерес сосредоточен на методах оптимизации на уровне модели, поскольку именно они позволяют достигать существенного прироста эффективности без кардинального пересмотра архитектуры или аппаратной платформы. В рамках этого направления развиваются как специализированные архитектурные решения (например, Mamba [2]), так и универсальные техники сжатия моделей — прунинг, дистилляция, квантизация.

Особую актуальность в последнее время приобрели методы прунинга, что обусловлено их универсальностью и совместимостью с разнообразными архитектурами трансформеров. Современная тенденция в разработке LLM направлена на линеаризацию вычислительной сложности, прежде всего за счёт сокращения ресурсоёмкости блоков внимания (рис. 1). При этом даже облегчённые модели сохраняют потребность в дополнительной оптимизации посредством

прореживания параметров, которое зарекомендовало себя как наиболее эффективный алгоритм снижения вычислительной нагрузки.

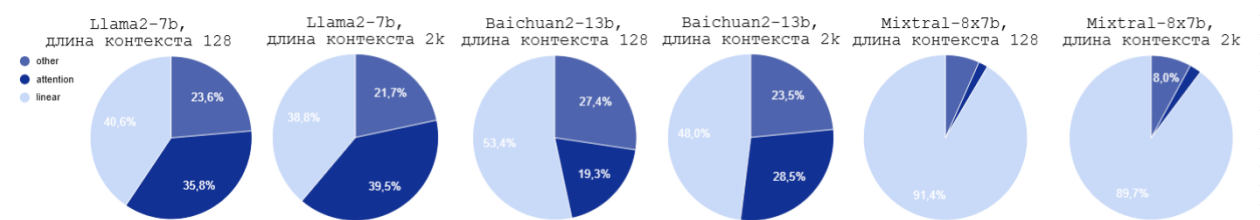


Рис.1. Распределение вычислений по компонентам модели показывает различное влияние внимания в зависимости от размера модели и длины контекста

Традиционно методы прунинга применяются на этапе обучения модели с целью повышения её эффективности в процессе эксплуатации. Однако на практике итоговые модели нередко демонстрируют недостаточную точность, что требует пересмотра дизайна экспериментов и поиска решений сопутствующих проблем, связанных с сохранением качества предсказаний при значительном сокращении параметров.

С тех пор знания о классическом прореживании были систематизированы и классифицированы по различным критериям (рис. 2):

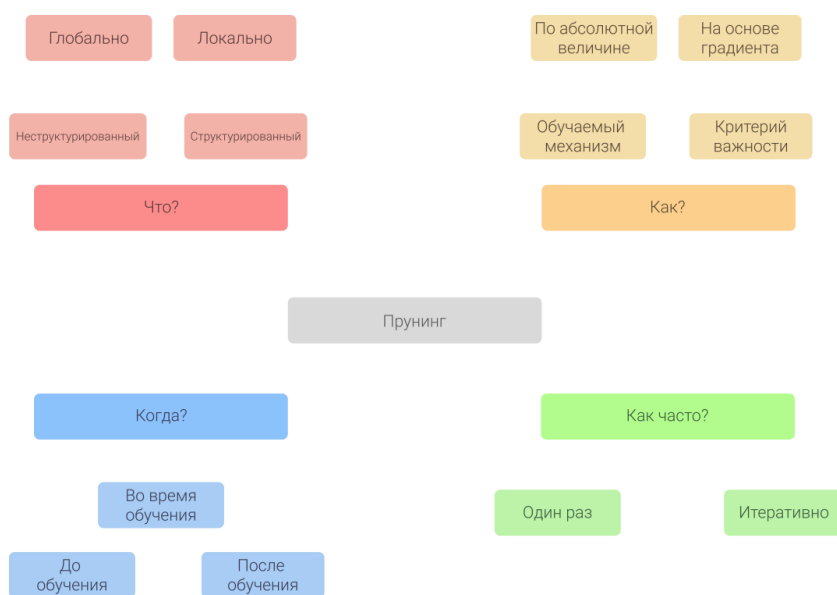


Рис.2. Классификация прунинга

- Объект прореживания: это могут быть отдельные веса, нейроны, каналы или даже целые слои сети.

- Маска: включают в себя подходы на основе величины весов, методы оптимизации, а также использование алгоритмов регуляризации для стимулирования разреженности.

- Время проведения прореживания: некоторые методы применяются до начала обучения сети, другие — динамически в процессе обучения, а есть подходы, предусматривающие прореживание после завершения обучения.

- Структурированность прунинга: структурированное подразумевает удаление целых структурных единиц сети, что упрощает её аппаратную реализацию, тогда как неструктурированное фокусируется на отдельных весах без учета их расположения.

Такая систематизация позволяет более эффективно выбирать подходящие методы прореживания в зависимости от конкретных задач и ограничений, а также способствует разработке новых алгоритмов, способных уменьшить вычислительные затраты и улучшить производительность нейронных сетей без значительной потери качества.

Перспективным альтернативным подходом является оптимизация в процессе инференса. В работе [3] предложен метод, основанный на концепции контекстуальной разреженности: предполагается, что лишь ограниченное подмножество голов внимания и нейронов MLP оказывает существенное влияние на результат для конкретного входного сигнала. Это позволяет деактивировать значительную часть модели без заметного ущерба для производительности. Для реализации механизма селективного «отключения» разработана вспомогательная модель, прогнозирующая оптимальную структуру прореживания для каждой входной последовательности. Данная работа считается отправной точкой в исследовании контекстуальной разреженности и динамического прунинга.

В последующие годы научное сообщество предложило ряд модификаций исходной концепции, направленных на улучшение перплексии и более рациональное использование вычислительных ресурсов при сохранении высокого качества предсказаний. Современные методы контекстуальной разреженности подразделяются на два основных класса:

- обучаемые методы, предполагающие обучение метамоделей для прогнозирования структуры разреженности блоков трансформера. Такие метамоделей могут реализовываться как автономные модули [3-4] или интегрироваться в виде гейтинговых механизмов непосредственно в базовую архитектуру [5]. При этом для каждого генерируемого токена требуется вызов предсказывающей модели, что создаёт дополнительную вычислительную нагрузку;

- необучаемые методы, отличающиеся большим разнообразием подходов: от применения простых статистическо-магнитудных методов [6-7] и кластерного анализа [8] до использования разреженности словаря модели [9], градиентных методов [10], флокинга [11-12] и сокращения размерности входной последовательности [13].

В зависимости от объекта прунинга различают структурированные и неструктурированные виды прореживания. Особый научный интерес представляет полуструктурированная разреженность, объединяющая преимущества обоих подходов. Её суть заключается в применении правила «N из M»: матрица параметров разбивается на небольшие блоки размером M, в каждом из которых сохраняется ровно N ненулевых элементов, а остальные принудительно зануляются.

В рамках магистерской диссертации разрабатывается метод полуструктурированной разреженности активаций больших языковых моделей, основанный на метрической оценке важности элементов контекста. Данный подход потенциально способен обеспечить баланс между вычислительной эффективностью и качеством предсказаний, что делает его перспективным направлением для дальнейшей разработки оптимизированных LLM.

Список литературы

1. Vaswani, A. Attention is all you need / A. Vaswani [et al.] // *Advances in Neural Information Processing Systems*. — 2017. — Vol. 30. — P. 5998–6008.
2. Gu, A. Mamba: Linear-Time Sequence Modeling with Selective State Spaces / A. Gu, T. Dao. — 2023. — arXiv:2312.00752.
3. Liu, Z. Deja Vu: Contextual sparsity for efficient LLMs at inference time / Z. Liu, J. Wang, T. Dao, T. Zhou, B. Yuan, Z. Song, ..., B. Chen // *International Conference on Machine Learning: proceedings*. — PMLR, 2023. — P. 22137–22176.
4. Akhauri, Y. Shadowllm: Predictor-based contextual sparsity for large language models / Y. Akhauri [et al.]. — 2024. — arXiv:2406.16635.
5. Anagnostidis, S. Dynamic context pruning for efficient and interpretable autoregressive transformers / S. Anagnostidis [et al.] // *Advances in Neural Information Processing Systems*. — 2023. — Vol. 36. — P. 65202–65223.
6. Le, Q. Probe pruning: Accelerating LLMs through dynamic pruning via model-probing / Q. Le [et al.]. — 2025. — arXiv:2502.15618.
7. Chen, S. WINA: Weight Informed Neuron Activation for Accelerating Large Language Model Inference / S. Chen [et al.]. — 2025. — arXiv:2505.19427.
8. Agarwal, S. CHAI: Clustered Head Attention for Efficient LLM Inference / S. Agarwal, B. Acun, B. Hosmer, M. Elhoushi, Y. Lee, S. Venkataraman, D. Papailiopoulos, C.-J. Wu // *Proceedings of the 41st International Conference on Machine Learning*. — 2024. — Vol. 235. — P. 291–312.
9. Vincenti, J. Dynamic Vocabulary Pruning in Early-Exit LLMs / J. Vincenti [et al.]. — 2024. — arXiv:2410.18952.
10. Gao, Y. Bypass back-propagation: Optimization-based structural pruning for large language models via policy gradient / Y. Gao [et al.]. — 2024. — arXiv:2406.10576.
11. Liu, J. Training-free activation sparsity in large language models / J. Liu [et al.]. — 2024. — arXiv:2408.14690.
12. He, J. CHESS: Optimizing LLM Inference via Channel-Wise Thresholding and Selective Sparsification / J. He [et al.] // *Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP 2024): proceedings*. — Association for Computational Linguistics, 2024. — P. 18658–18668.
13. Zhong, S. Propd: Dynamic token tree pruning and generation for LLM parallel decoding / S. Zhong [et al.] // *Proceedings of the 43rd IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design*. — 2024. — P. 1–8.

Е.А. Макарова, д.т.н., профессор, ea-makarova@mail.ru
А.К. Парамонова, магистрант, nastjaparr@yandex.ru
Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

ПОСТРОЕНИЕ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ СЕКТОРА ДОМОХОЗЯЙСТВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОГО КРУГООБОРОТА

Аннотация: Предложена процедура построения агент-ориентированной модели поведения сектора домохозяйств в системе макроэкономического кругооборота с учетом его квинтильной декомпозиции на основе динамической модели макроэкономического кругооборота финансовых потоков. Процедура содержит четыре этапа. Особенность процедуры состоит в использовании знаний о структуре динамической модели и агрегированных закономерностях поведения групп населения для формирования правил агентов взаимодействия в агентной модели. Предложенную процедуру целесообразно использовать при проведении исследований сложных динамических процессов взаимодействия агентов макро- и микроуровня в системе макроэкономического кругооборота с учетом дифференциации населения по доходам.

Ключевые слова: агент-ориентированная модель, макроэкономический кругооборот, домохозяйство, дифференциация доходов, динамическая модель

E.A. Makarova, Ph.D., professor, ea-makarova@mail.ru
A.K. Paramonova, graduate student, nastjaparr@yandex.ru
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

BUILDING AN AGENT-BASED MODEL OF THE HOUSEHOLD SECTOR BASED ON A DYNAMIC MODEL OF MACROECONOMIC CIRCULATION

Abstract: A procedure is proposed for constructing an agent-oriented model of the behavior of the household sector in the system of macroeconomic circulation, taking into account its quintile decomposition based on a dynamic model of the macroeconomic circulation of financial flows. The procedure consists of four stages. The special feature of the procedure is the use of knowledge about the structure of the dynamic model and the aggregated patterns of behavior of population groups to form the rules of agents of interaction in the agent model. It is advisable to use the proposed procedure when conducting research on complex dynamic processes of interaction between macro- and micro-level agents in the system of macroeconomic circulation, taking into account the differentiation of the population by income.

Key words: agent-based model, macroeconomic cycle, household, income differentiation, dynamic model

Современные условия развития экономики характеризуются наличием множества проблем, обусловленных снижением доходов многих групп населения и ростом дифференциации доходов населения. Одним из направлений исследований, предназначенных для решения этих проблем, являются исследования в области оценки эффективности решений по формированию государственных расходов и прогнозирования результатов таких решений. Применение динамических и имитационных моделей социально-экономических систем на макро-, мезо- и микроуровнях позволяют дать ответ на многие вопросы, связанные с корректировкой государственной политики в области доходов [1,2]. Примером являются исследования динамики возникновения последствий субсидирования различных групп населения, выявление тенденций изменения поведения секторов социально-экономической системы при корректировке прогрессивной шкалы налогообложения.

Исследованию динамики поведения социально-экономических систем посвящены многие исследования, направленные на разработку динамических моделей различных классов [3,4]. Ведутся разработки моделей системной динамики, применяемых для исследования проблем взаимодействия элементов городской системы, региональных систем, эколого-экономических и политических систем. Развивается направление, связанное с построением моделей динамического стохастического равновесия DSGE (Dynamic Stochastic General Equilibrium), которые позволяют исследовать равновесные и неравновесные процессы в динамике с учетом неопределенных условий внешней среды [5]. Помимо классических подходов к моделированию динамики социально-экономических систем, основанных на рассмотрении агрегированных процессов и потоков, их связывающих, проводятся исследования по разработке агент-ориентированных моделей, основанных на формировании классов агентов (фирм, домохозяйств, банков), взаимодействующих друг с другом по определенным правилам и формирующих на основе неоднородных микровзаимодействий различные макроэкономические показатели. На основе агентного подхода решаются проблемы исследования развития научно-производственных кластеров, развития экономики с учетом денежно-кредитной политики и другие [6,7].

В работе обсуждаются вопросы построения агент-ориентированной модели поведения сектора домохозяйств с учетом декомпозиции его на квинтильные группы на основе использования разработанной ранее динамической модели макроэкономического кругооборота финансовых потоков [8,9]. Предложена процедура построения агент-ориентированной модели (АОМ) поведения сектора домохозяйств в системе макроэкономического кругобо-

рота с учетом его квинтильной декомпозиции на основе динамической модели. Выделены следующие этапы процедуры.

Первым этапом является корректировка динамической модели макроэкономического кругооборота (МЭК) путем декомпозиции модели сектора домохозяйств на пять моделей поведения квинтильных групп населения (рис.1). Особенность такого преобразования заключается в перерасчете балансовых соотношений сектора домохозяйств (СД), который связан финансовыми потоками с реальным сектором, а также с секторами банковских и государственных организаций. Перерасчет предполагает декомпозицию финансовых потоков оплаты труда, прибыли домохозяйств как собственников факторов производства, совместно образующих доходы сектора домохозяйств. Декомпозиция расходов выполняется для финансовых потоков потребления, сбережений и выплаты налогов.

Проведены экспериментальные исследования для равновесных режимов функционирования СД в составе МЭК с целью контроля установления равновесия и соблюдения всех балансовых соотношений как для каждой квинтильной группы в отдельности, так и для всего сектора домохозяйств в целом. Проведены экспериментальные исследования неравновесных режимов функционирования СД в составе МЭК с целью выявления степени влияния изменений доходов отдельных квинтильных групп населения на потребительский спрос и последующий экономический рост.

Вторым этапом является определение структуры АОМ сектора домохозяйств, функционирующего в составе макроэкономического кругооборота. Определены основные классы агентов, соответствующие секторам: реальному сектору, сектору банковских и государственных учреждений. Выделены также пять классов агентов для квинтильных групп домохозяйств. Определены основные параметры доходов и расходов населения с учетом их декомпозиции.

Третьим этапом является разработка алгоритмов потребительского поведения для каждой отдельной группы населения на основе модели Энгеля – Торнквиста [10]. Особенностью этих алгоритмов является формирование правил распределения агентами своих расходов на приобретение товаров первой, второй необходимости или предметов роскоши. Эти правила различаются для агентов различных квинтильных групп, отличающихся доходами.

Четвертым этапом является построение АОМ поведения сектора домохозяйств в рамках макроэкономического кругооборота в среде AnyLogic. Разработаны диаграммы состояний для всех классов АОМ. Показано, что диаграммы состояний для квинтильных групп населения являются сильно связанными графами (рис. 2). Особенность модели агентов квинтильной группы состоит в том, что этап потребления и сбережения выполняется по результатам выполнения этапа получения доходов, при этом учитывается эластичность потребления по текущему уровню доходов и его динамика. Ко-

эффициенты модели рассчитаны на основе статистических данных Федеральной службы государственной статистики.

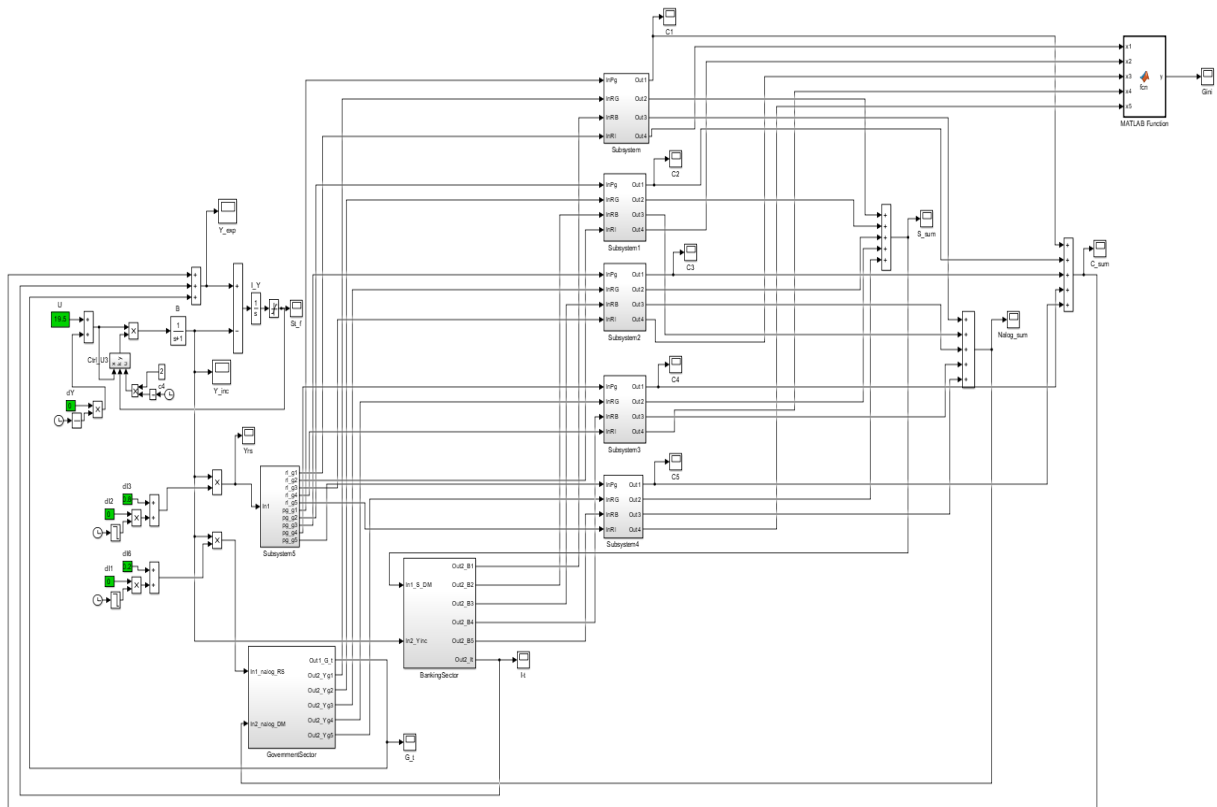


Рис. 1. Функциональная схема динамической модели макроэкономического кругооборота с учетом декомпозиции сектора домохозяйств на квинтильные группы

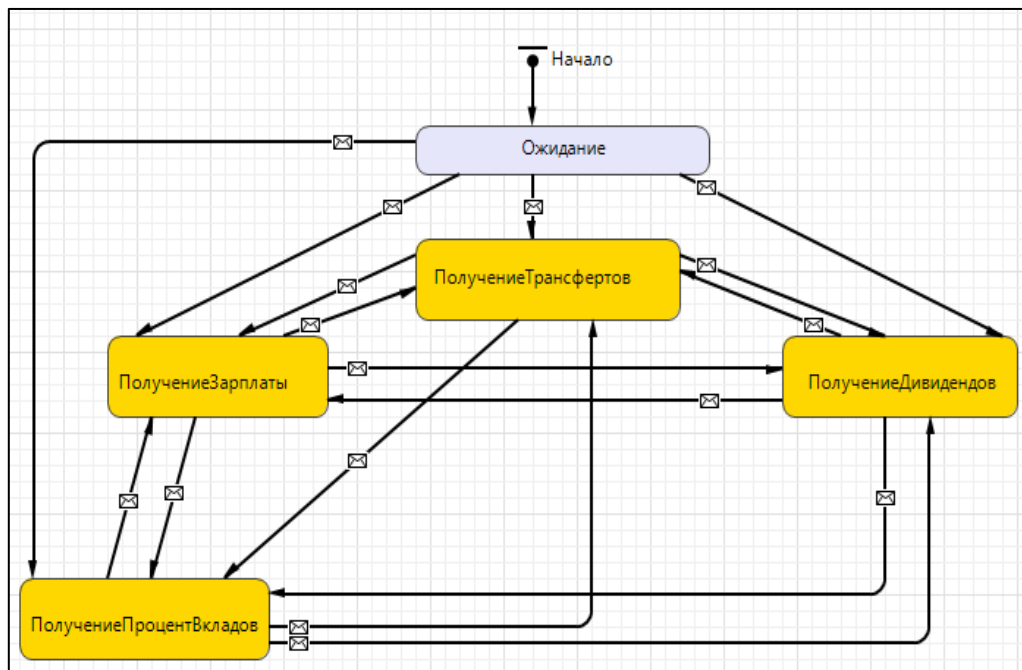


Рис. 2. Формирование дохода агента «Средний Класс»

Другой особенностью построения агентной модели квинтильной группы является использование динамического алгоритма управления по запасам, встроенного в динамическую модель макроэкономического кругооборота, для расширения правил принятия решений агентами в АОМ. Это позволило учесть планы агентов по формированию запасов и поддержанию их необходимого уровня.

Проведен предварительный этап экспериментальных исследований на основе разработанной АОМ с целью анализа влияния изменения доходов отдельных квинтильных групп населения на агрегированное потребление. Продemonстрирован эффект большего роста потребительского спроса при повышении доходов именно бедных слоев населения, чем при росте доходов среднего и высшего класса, что объясняется существенным недопотреблением на уровне отдельных домохозяйств с низким уровнем доходов, а также отсутствием перевода дополнительных доходов в запасы.

Таким образом, предложенная процедура построения агент-ориентированной модели сектора домохозяйств на основе ранее разработанной динамической модели макроэкономического кругооборота позволила выделить ряд ее достоинств. Во-первых, предварительное построение динамической модели макроэкономического кругооборота финансовых потоков позволяет выявить макроэкономические закономерности поведения системы на динамически равновесных и неравновесных режимах с учетом знаний балансовых соотношений. Эти зависимости служат ориентиром при проведении экспериментальных исследований агентной модели. Во-вторых, знание структуры и агрегированных закономерностей поведения отдельных групп населения, выявленные при проведении экспериментов с динамической моделью позволяет использовать эти знания и дезагрегировать их для формирования правил взаимодействия агентов в агентной модели. В-третьих, параметрическая настройка агентной модели может основываться на расчете базового равновесного режима динамической модели. Предложенную процедуру целесообразно использовать при проведении исследований сложных динамических процессов взаимовлияния агентов макро- и микроуровня в системе макроэкономического кругооборота с учетом дифференциации населения по доходам.

Список литературы

1. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. Агент-ориентированная суперкомпьютерная демографическая модель России: анализ апробации // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2019. Т. 12. № 6. С. 74–90.

2. Амирханова Л.Р., Бикметов Е.Ю., Нагимова И.А., Газимов А.Ш. Методология управления устойчивостью равновесия социально-экономического объекта. Kant. 2025. № 3 (56). С. 12-17.
3. Серков Л.А., Красных С.С. Объединение агентного подхода и подхода общего равновесия для анализа влияния теневого сектора на российскую экономику. Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т.12. №3. С. 669-684.
4. Ростислав К. В., Пономарев Ю.Ю., Радченко Д.М. Имитационная пространственная модель развития российских городов // Экономическое развитие России. 2022. Т. 29, № 5. С. 20-33.
5. Полбин А.В., Фокин Н.Д. DSGE-модели с гетерогенными агентами: новый взгляд на особенности функционирования экономики. Вопросы экономики. 2022;(9):53-72.
6. Бахтизин А. Р., Макаров В. Л., Эпштейн Д. Агент-ориентированное моделирование для сложного мира. Часть 1 // Экономика и математические методы, 2022. Т. 58, № 1. С. 5–26.
7. Белотелов Н.В., Сушко Д.А. Агентная модель социальной динамики с использованием подходов роевого интеллекта // Компьютерные исследования и моделирование, 2024, т. 16, № 6, с. 24-31.
8. Ильясов Б.Г., Макарова Е.А., Валитов Р.Р. Имитационная модель регулирования расходов и доходов населения в системе макроэкономического кругооборота// Программные продукты и системы. 2011. № 1. С. 123–126.
9. Ильясов Б.Г., Макарова Е.А., Павлова А.Н. Регулирование неравновесных процессов макроэкономического кругооборота финансовых потоков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 1. С. 120–128.
10. Макроэкономика: научные школы, концепции, экономическая политика / А.А. Никифоров, О.Н. Антипина, Н.А. Миклашевская; под общ. ред. А.В. Сидорovichа. – М.: Дело и Сервис, 2008. – 534 с.

П.Н. Максимов, инженер, аспирант, 1528d@mail.ru
АО «РЕШЕТНЕВ» г. Железногорск
СибГУ г. Красноярск, Россия

Ф.К. Синьковский, к.т.н., директор отраслевого центра крупногабаритных
трансформируемых механических систем, sfk@iss-reshetnev.ru
АО «РЕШЕТНЕВ» г. Железногорск

В.Н. Максимов, инженер 3-й категории, аспирант, 1928d@mail.ru
АО «РЕШЕТНЕВ» г. Железногорск
СибГУ г. Красноярск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация: Представлен алгоритм генерации обучающей и тестовой выборки, с дальнейшим обучением нейронной сети и оценкой ее точности. Для генерации данных использовался расчет конечно-элементной модели (КЭМ). Алгоритм позволил получить модель, которая способна предсказывать вытягивающую силу магнитного актуатора в зависимости от шести его конструктивных параметров.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронные сети, актуаторы.

P.N. Maksimov, engineer, postgraduate student, 1528d@mail.ru
JSC "Information Satellite Systems", Zheleznogorsk

«Siberian State University of Science and Technology Krasnoyarsk», Russian Federation

F.K. Sinkovsky, PhD, the director of the industry center for large-sized transformable
mechanical systems, sfk@iss-reshetnev.ru

JSC "Information Satellite Systems", Zheleznogorsk

V.N. Maksimov, engineer of 3-th category, postgraduate student, 1928d@mail.ru

JSC "Information Satellite Systems", Zheleznogorsk

«Siberian State University of Science and Technology Krasnoyarsk», Russian Federation

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR MODELING NONLINEAR PROCESSES

Abstract: The algorithm for generating training and test samples, with further training of the neural network and evaluation of its accuracy, is presented. A finite element model (FEM) calculation was used to generate the data. The algorithm allowed us to obtain a model that is able to predict the pulling force of a magnetic actuator depending on six of its parameters.

Key words: machine learning, neural networks, actuators.

В ходе разработки электромагнитного актуатора возникла проблема его оптимизации, в целях достижения максимально возможной удельной характеристики

$$\max \frac{F_m}{M},$$

где F_m – втягивающая сила, генерируемая электромагнитом; M – масса актуатора.

Решение поставленной задачи требует построение математической модели устройства, выражающую втягивающую силу в зависимости от 6 конструктивных параметров.

Поскольку данная характеристика изделия имеет сложное нелинейное поведение, определяемое в первую очередь насыщением ферромагнитного материала, ее аналитическое выведение является затруднительным. Поэтому было решено воспользоваться методами машинного обучения, для построения регрессионной модели.

В машинном обучении существует множество моделей, направленных на решение задач широкого спектра [1-3], в нашем случае была применена нейронная сеть, поскольку она гарантирует высокую точность, при моделировании нелинейных процессов, и имеет широкий диапазон регулирования, за счет изменения количества слоев, нейронов и функций активации.

На предварительной выборке была составлена следующая нейронная сеть (рис.1).

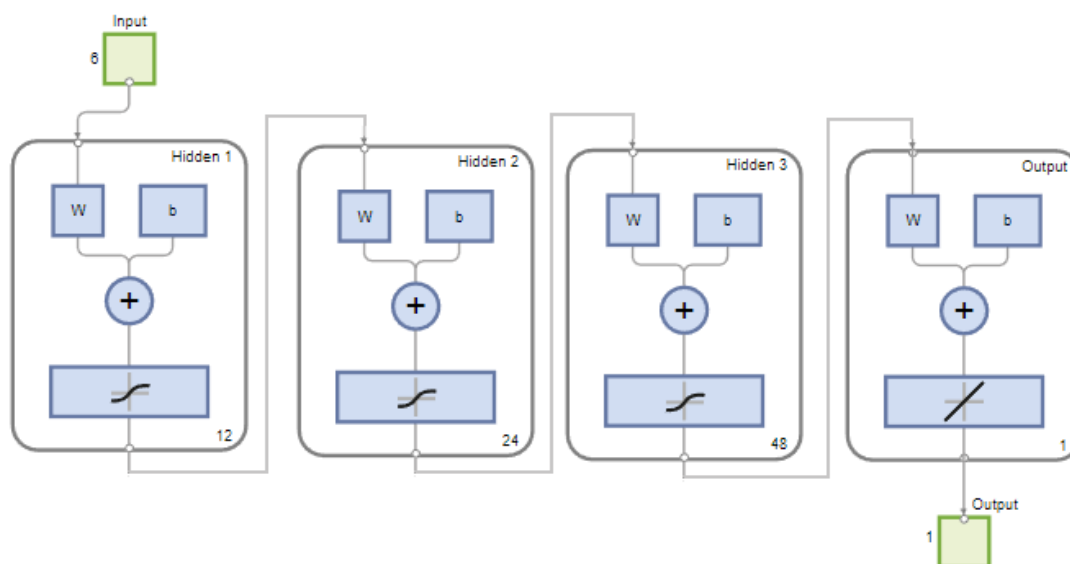


Рис. 1. Общий вид нейронной сети

Как видно из рисунка, нейронная сеть представляет собой три полно-связных скрытых слоя с гиперболическим тангенсом, используемым как функция активации. Нейроны сети кратны количеству признаков и равняют-

ся 12, 24, 48 для 1, 2, 3 скрытых слоев соответственно, на выходе используется линейная функция.

Для защиты от переобучения была выбрана Байесовская регуляризация, которая хорошую точность и эффективность при обучении на малом наборе данных [4,5]. Данный метод минимизирует функцию потерь следующим методом

$$F(w) = \frac{1}{N} \beta ||y - \hat{y}||_2^2 + \alpha ||w||_2^2 ,$$

где y – вектор истинных значений, $\hat{y}$ – вектор предсказанных значений, w – вектор весов, N – количество наблюдений в обучающей выборке, α и β – коэффициенты регуляризации, которые автоматически подбираются в ходе обучения.

Обновление весов происходило через алгоритм Левенберга-Марквардта, который быстрее стандартного градиентного спуска с обратным распространением, в дополнение данный алгоритм также хорошо работает с ограниченным набором данных [5]. Обновления весов происходят следующим образом

$$w_{i+1} = w_i - (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e ,$$

где J – матрица Якоби, которая состоит из первых производных ошибок нейронной сети по весам, e – вектор ошибки, I – единичная матрица, μ – коэффициент демпфирования Левенберга, который подбирается автоматически в ходе обучения.

Данные перед обучением нормализовались, для приведения к одному масштабы. Нормализация проходила по стандартной формуле

$$x_{ni} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} ,$$

где x_{ni} – i -е значение параметра в выборке после нормализации, x_i – i -е значение параметра в выборке, $x_{\min}$ – минимально значение параметра в выборке, $x_{\max}$ – максимальное значение параметра в выборке.

Оценка точности модели проводилась через коэффициент детерминации R^2 , который рассчитывался для каждого набора значений конструктивных параметров изделия и описывается следующим образом

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} ,$$

где y_i – i -е значение целевой переменной, $\hat{y}_i$ – предсказанное i -е значение целевой переменной, $\bar{y}$ – среднее значение целевой переменной по выборке, n – количество целевых переменных в выборке.

Обучение модели проводилось по алгоритму, составленному в ПО MATLAB (рис.2). Генерация выборки осуществлялось через расчет параметрической КЭМ, сопряженую с MATLAB через специально написанный скрипт.

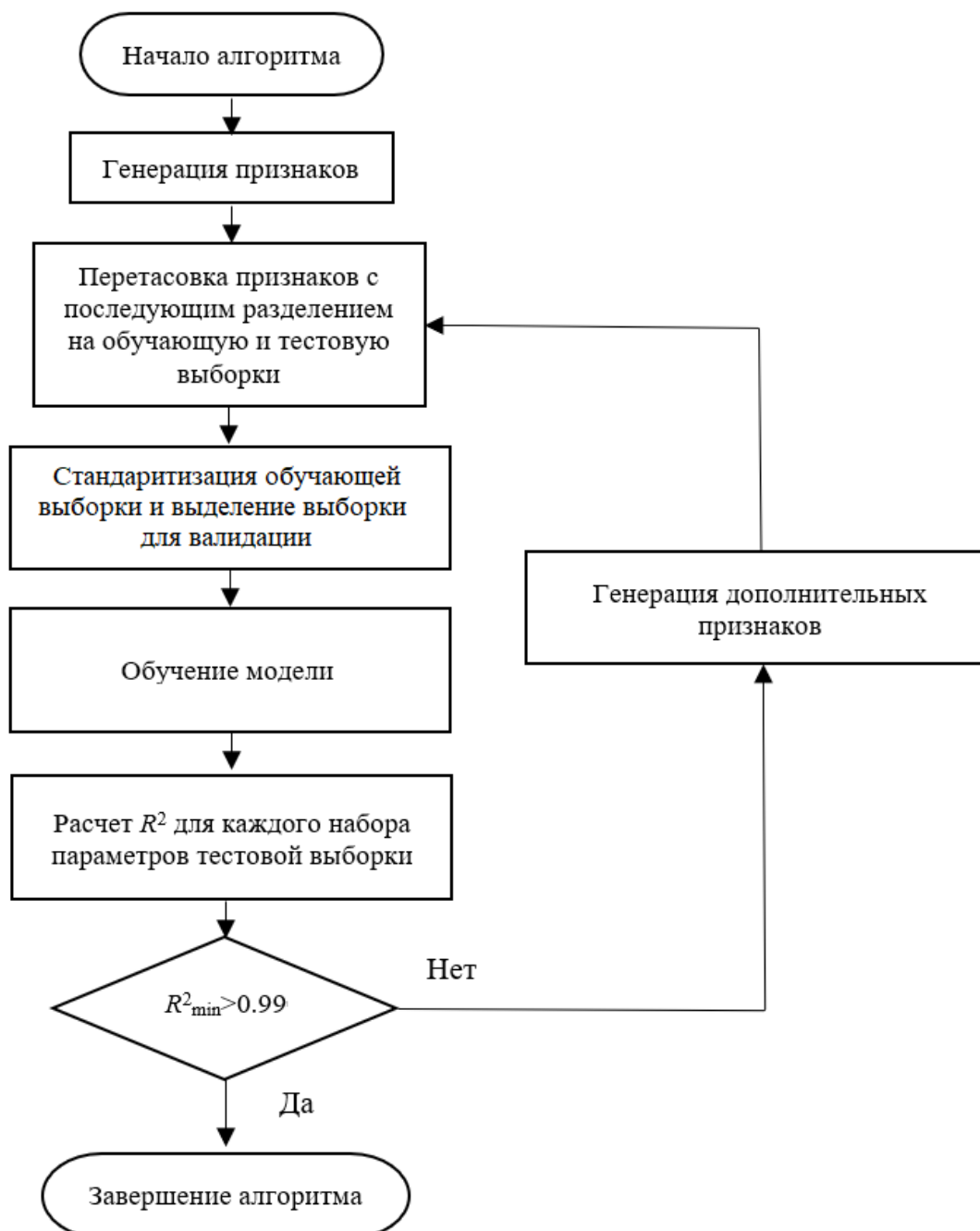


Рис. 2. Алгоритм обучения

Диапазон генерации параметров приведен в табл. 1.

Таблица 1. Диапазон генерируемых значений параметров

Параметр	l_1 , мм	l_2 , мм	D_1 , мм	D_2 , мм	b , мм
Нижняя граница	0	5	0	4	1
Верхняя граница	8	14	11	12	6

Процесс обучения потребовал 5 итераций, где было сгенерировано 250 комбинация значений параметров, результат приведен на рис. 3

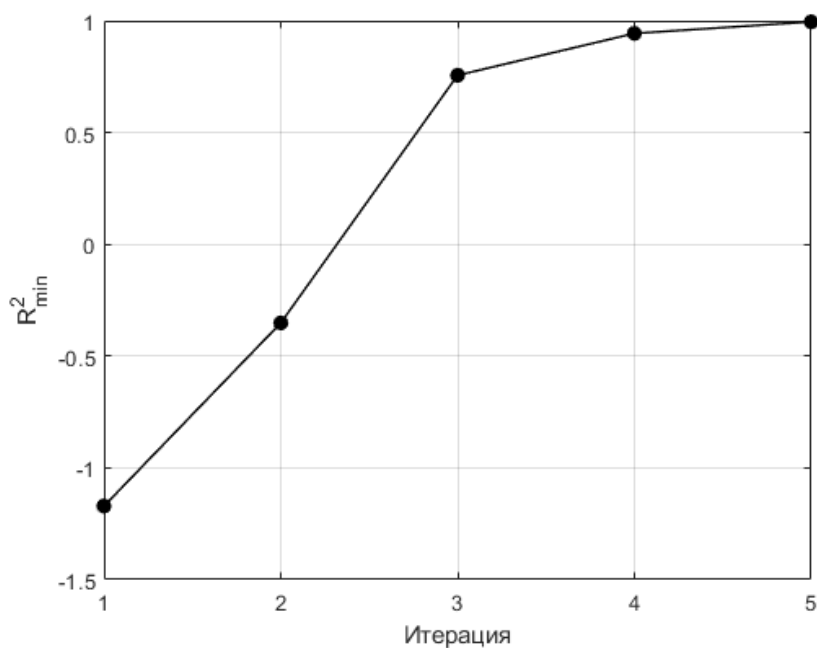


Рис. 3. Минимальные значения коэффициента детерминации для отдельного набора параметров тестовой выборки в каждой итерации

Для дополнительной валидации, было сгенерировано 50 комбинаций параметров с последующим расчетом коэффициента детерминации. Результаты приведены на рис. 4

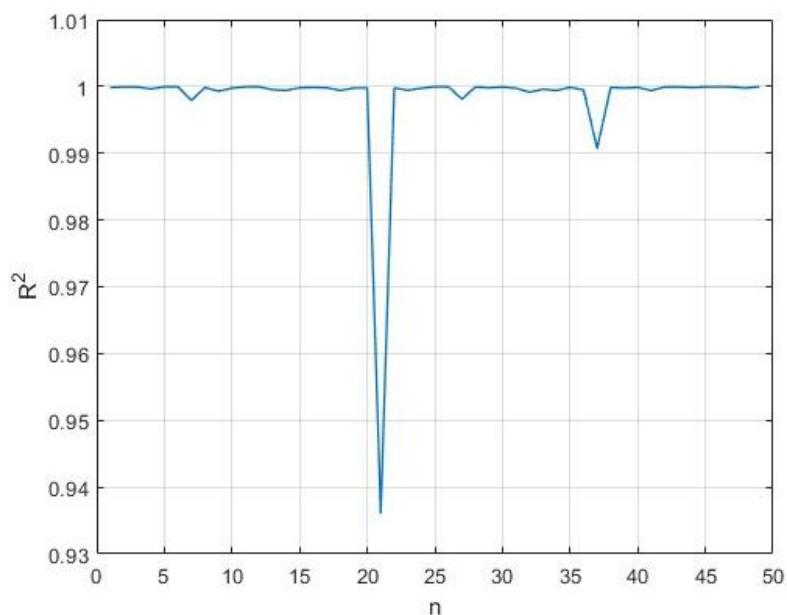


Рис. 4. Значения коэффициента детерминации для каждой комбинации значений параметров дополнительных данных

Как видно значение коэффициента детерминации не ниже 0,9, что подтверждает точность полученной модели.

В дальнейшем была проведена оптимизация, результаты которой приведены на рис.5.

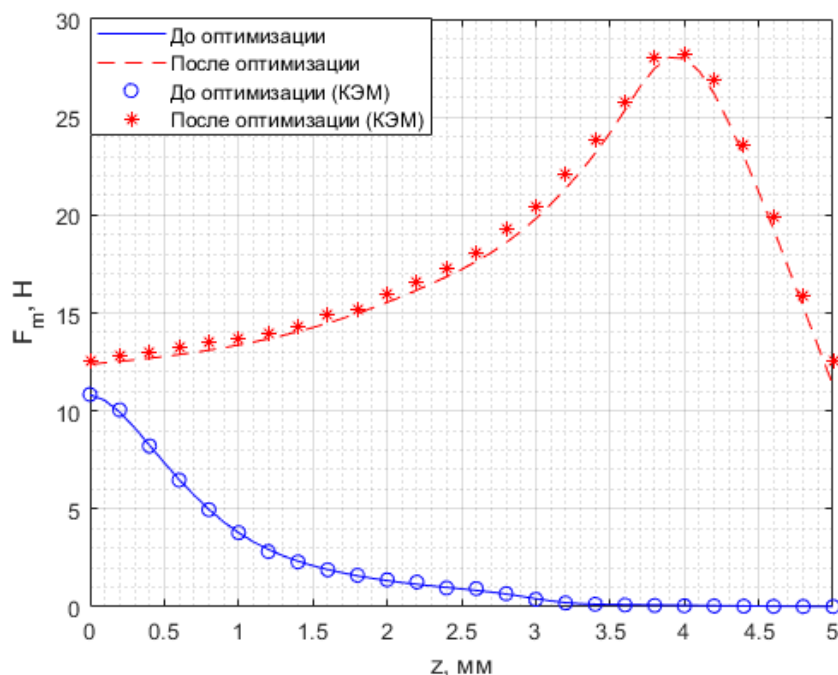


Рис. 5. Сравнение магнитной силы F_m до и после оптимизации для КЭМ и полученной модели

Результаты проделанной работы подтверждают возможность применения методов машинного обучения для решения инженерных задач.

Список литературы

1. Дорошев А.С., Шеломанов Д.А., Методика подбора гиперпараметров нейросетевой модели в задачах оптической навигации // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185106>
2. Акалу Йехалем Айнвага, Ван Чанцин, Еленев Д.В., Лу Хонши. Применение нейронных сетей для анализа движения космической тросовой системы // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185113>
3. Uglev V., Sychev O. Evaluation, Comparison and Monitoring of Multiparameter Systems by Unified Graphic Visualization of Activity Method on the Example of Learning Process. Algorithms, 2022, 15, 468. <https://doi.org/10.3390/a15120468>
4. Kayri M. Predictive abilities of Bayesian regularization and levenberg-marquardt algorithms in artificial neural networks: a comparative empirical study on social data. // Math Comput Appl, 2016, 21. URL: <https://doi.org/10.3390/mca21020020.5>
5. Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. Инженерия знаний: Учебник. – СПб.: Лань, 2016. – 324 с.
5. M. Troiano, E. Nobile, F. Mangini, et al., A Comparative Analysis of the Bayesian Regularization and Levenberg–Marquardt Training Algorithms in Neural Networks for Small Datasets: A Metrics Prediction of Neolithic Laminar Artefacts // Information, 2024, vol.15 No. 5, pp. 1–25. DOI: 10.3390/info15050270

СИСТЕМНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ВИДЕОАНАЛИТИКИ

Аннотация: Данная статья посвящена решению проблемы организации совместного выполнения и взаимодействия различных алгоритмов компьютерного зрения с целью достижения синергии на примере интеллектуальной системы видеоаналитики для автоматического трекинга объектов. В статье рассмотрены причины возникновения изменчивости образа объекта как основного источника проблем при решении задачи трекинга. В числе интегрируемых алгоритмов фигурируют как классические алгоритмы компьютерного зрения, так и современные модели машинного обучения, а также алгоритм основанный на интуиционистских нечетких множествах.

Ключевые слова: системная интеграция, алгоритмы компьютерного зрения, трекинг объектов на видео.

K.I.Morev, programmer, morev-ki@ya.ru

JSC «Scientific Design Bureau of Computing Systems», Taganrog, Russia

COMPUTER VISION ALGORITHMS SYSTEM INTEGRATION FOR INTELLECTUAL VIDEO ANALYTICS TASKS

Abstract: This article is devoted to solving the problem of organizing the joint execution and interaction of various computer vision algorithms in order to achieve synergy using the example of an intelligent video analytics system for automatic objects tracking. The article examines the causes of the variability of the object image as the main source of problems in solving the tracking problem. The final complex algorithms include both classical computer vision algorithms, modern machine learning models, and an algorithm based on intuitionistic fuzzy sets.

Key words: system integration, computer vision algorithms, video object tracking.

Согласно определению [1], видеоаналитика — это основанная на компьютерном зрении технология обработки изображений с целью автоматизированного получения данных. Искусственный интеллект, как область научного знания, активно развивается что положительно отражается на всех входящих в его состав дисциплинах. В частности, развиваются применяемые в системах видеоаналитики методы компьютерного зрения, переходя от клас-

сических детерминированных алгоритмов обработки изображений к когнитивным технологиям, основанным на искусственном интеллекте, которые способны определять и интерпретировать контекст событий, происходящих в наблюдаемой сцене. В условиях усложнения и развития применяемых алгоритмов возникает задача их эффективной интеграции, позволяющей сохранить индивидуальные характеристики каждого алгоритма и одновременно обеспечить повышение качества работы и общих функциональных возможностей системы в целом.

Рассмотрим пример построения комплексного алгоритма компьютерного зрения для решения задач автоматического трекинга объектов [1]. На современном этапе развития, основными инструментами при обработке изображений являются сверточные нейронные сети. Однако, при решении задач трекинга даже современные модели не всегда способны выполнить поставленную задачу, о чем свидетельствуют результаты открытых соревнований алгоритмов трекинга MOT2017 – текущий лидер алгоритм FastTracker показывает точность 82% [2].

Как показывает практика, основной проблемой при трекинге является изменчивость наблюдаемого образа сопровождаемого объекта. Ниже представлена классификация причин изменчивости образа объекта. Классификация выполнена на основе практического опыта разработки алгоритмов компьютерного зрения с целью выявления первопричин изменчивости наблюдаемого образа объекта и устранения этих причин для повышения качества работы системы в целом.

Изменение образа объекта может быть вызвано одной из следующих или любой комбинацией перечисленных ниже причин:

- активность камеры;
- активность сопровождаемого объекта;
- активность прочих объектов в сцене;
- изменение освещенности;
- изменение условий распространения ЭМИ-волны;
- шум матрицы;
- аберрации оптической системы.

Каждая из приведенных причин изменчивости в разной степени влияет на качество выполнения задачи сопровождения. Предполагается, что устранение выявленных первопричин позволит разработать высокоэффективный алгоритм сопровождения объектов. Далее подробнее рассмотрены каждая из причин изменчивости образа объекта и предложены способы их устранения.

Активность камеры. Под активностью камеры понимается изменение ее внутренних или внешних параметров [3]. Т.е. движение камеры в пространстве или изменение свойств ее объектива (например, фокусное расстояние). Активность камеры провоцирует движение всех элементов фона в кадре, что уже осложняет разделение объект/фон. А также может приводить к

изменению образа объекта в кадре, вызванное изменением угла проекции объекта 3Д-мира в 2Д-кадр.

Под устранением активности камеры имеется в виду устранение нежелательного движения камеры, приводящего к изменению наблюдаемой сцены. В рамках разработки комплексного алгоритма компьютерного зрения рассматривается цифровая стабилизация видеопоследовательности методом, основанным на сопоставлении особых точек двух соседних изображений видеопоследовательности и вычислении модели движения, описывающей преобразование координат между наборами особых точек этих изображений. Сопоставление ведется с использованием интуиционистских нечетких множеств. Вычисленная модель движения аппроксимируется матрицей гомографии, плавно приводящей текущее изображение к предыдущему. Подробно процесс сопоставления изображений описан в [4]

Активность сопровождаемого объекта. Под активностью сопровождаемого объекта понимается любое передвижение сопровождаемого объекта. Он может стоять на месте и производить вращение вокруг своей оси, что порождает существенное изменение ракурса, также объект может, не изменяя ракурса, двигаться в направлении камеры или противоположном что приведет к значительному изменению масштаба объекта в кадре. Устранение активности сопровождаемого объекта с целью прекращения изменения его образа – задача, лишенная смысла. Алгоритм должен быть готов к движению объекта, изменению ракурса и обновлению его образа. Следовательно, нужно выработать инвариантное к образу конкретного объекта признаковое описание. Так, не смотря на любое изменение образа объекта, неизменным остается его признак «класс объекта». А именно: если велось сопровождение автомобиля, то класс «автомобиль» останется индифферентным к изменению ракурса объекта признаком. Если велось сопровождение объекта класса «человек», то при любом ракурсе объекта, его класс остается неизменным и т.д.

Таким образом, основным признаком при сопровождении является класс объекта. А формирование этого признака выполняется на основе обученной для детектирования объектов архитектуры сверточной нейронной сети.

Активность прочих объектов в сцене. Активность прочих объектов определяется аналогично активности целевого объекта, только касается исключительно прочих относительно сопровождаемого объектов. Активность прочих объектов приводит к различного рода перекрытиям или окклюзии сопровождаемого объекта, пересечении траекторий с последующим срывом сопровождения.

Как правило, под прочими объектами понимаются все объекты в кадре, не являющиеся фоном, а также за исключением сопровождаемого объекта. Для устранения влияния прочих объектов следует точно отслеживать их траектории и принимать соответствующие меры в случаях сближения траекторий сопровождаемого объекта и прочих в кадре. Решение проблемы построе-

ния и анализа траекторий объектов в сцене выполняется за счет алгоритма SORT [5]. Метод SORT состоит из двух основных этапов:

- завязывание траекторий для всех детектированных в сцене объектов и аппроксимация их модели движения фильтром Калмана [6]
- сопоставление в каждом новом кадре текущих входных детекций и уже имеющихся в памяти траекторий при помощи Венгерского алгоритма [5].

Изменение освещенности. Изменение освещенности значительно влияет как на вид сцены в кадре, так и на изображение сопровождаемого объекта. В общем случае, изменение освещенности сцены изменяет среднюю энергию сигнала, воспринимаемого сенсором камеры что, проявляется в изменении средней яркости изображения. Это приводит к потере деталей в слишком темных или слишком светлых областях изображения. Для исправления проблем потери деталей применяется нормализация изображения — процесс, направленный на выравнивание яркости и контрастности по всему изображению. Чаще всего используются методы контрастирования выравниванием гистограммы. Задача контрастирования связана с улучшением согласования динамического диапазона исходного изображения и изображения подлежащего дальнейшей обработке [7].

Общая формула получения контрастированного изображения приведена ниже:

$$Img_{dst}(i,j) = F(Img_{src}(i,j)), \quad (1)$$

где i и j - координаты по горизонтальной и вертикальной составляющим матрицы изображения соответственно, $Img_{dst}(i,j)$ - пиксель результирующего значения с координатами i , и j , $(Img_{src}(i,j))$ - пиксель исходного изображения с координатами i , j , а $F()$ - функция преобразования яркости (контрастирования). Диапазон значений результирующего изображения соответствует диапазону исходного.

Изменения условий распространения ЭМИ-волны. Свойства распространения электромагнитного излучения в среде определяют условия распространения волны и определяют образ объекта, получаемый камерой при регистрации сцены. Так, на границе между резко различными по плотности и температуре слоями воздуха может возникнуть сильное преломление потоков света. Такое преломление приведет к появлению миража и наблюдению объектов, не видимых при нормальных условиях распространения волны. И наоборот.

В целом, проблемы изменений условий распространения волны имеют фундаментальный характер и, как правило, не могут быть устранены средствами цифровой обработки изображений. В рамках данной работы эта причина изменчивости остается не устраненной.

Шум матрицы. Шум матрицы – паразитная составляющая сигнала снимаемого с матрицы сенсора камеры. Шумы камеры имеют различную природу и описываются различными моделями. Наличие шумов в образе объекта

вносит искажение в сам образ. Также наличие шума уменьшает отношение сигнал/шум (далее – ОСШ), что опять же отрицательно влияет на качество решения задачи сопровождения объектов.

Одним из приложений сопоставления изображений для стабилизации является накопление зашумленных изображений [8]. В качестве примера рассмотрим зашумленное изображение $C(x,y)$. Изображение $C(x,y)$ складывается из примешивания шума $n(x,y)$ к «чистому» изображению или оригинальному сигналу $S(x,y)$.

Таким образом, зашумленное изображение может быть представлено в виде:

$$C(x,y) = S(x,y) + n(x,y), \quad (2)$$

причем в указанной модели предполагается, что значения шума в каждой точке (x,y) некоррелированы, а среднее значение шума – 0.

Предположим, что изображение $C'(x,y)$ – полученное усреднением серии изображений $C(x,y)$ в количестве K штук. Исходя из предположения о работе с некоррелированным шумом с 0 средним, справедливо следующее:

$$C'(x,y) = 1/K * \sum_{i=1}^K (C_i(x,y)). \quad (3)$$

Пользуясь свойствами дисперсии случайных величин, не сложно доказать следующее:

$$\mu\{C'(x,y)\} = S(x,y), \text{ и } \delta^2_{C'(x,y)} = 1/K * \delta^2_{n(x,y)}, \quad (4)$$

где $\mu\{C'(x,y)\}$ – математическое ожидание усредненного изображения, а $\delta^2_{C'(x,y)}$ и $\delta^2_{n(x,y)}$ – дисперсии усредненного изображения и шума соответственно.

Таким образом при усреднении серии из 5 кадров, ожидается увеличение ОСШ в 2,23 раза, а при усреднении серии из 10 кадров – в 3,16 раза. Однако на практике получено среднее повышение ОСШ при фильтрации окном ширины 5 в 1,85 раза, а для окна 10 кадров ОСШ увеличилось в среднем в 2,1 раз. Расхождение теоретических расчетов и полученных в ходе экспериментов результатов можно объяснить погрешностями межкадровой стабилизации: эти погрешности могут вносить смазы в образы объектов и повышать среднюю яркость окрестности вокруг объекта, а значит снижать ОСШ.

Аберрации оптической системы. Аберрация оптической системы — искажение изображения в оптической системе, вызываемое отклонением луча от того направления, по которому он должен идти согласно идеальной модели.

Наиболее явным примером аберрации считается дисторсия объектива – искажения изображения точек, находящихся на краях кадра. Эффект влияния дисторсии тем сильнее, чем дальше отстоит точка от оптической оси камеры. Величина эффекта нелинейно возрастает с удалением точки от оптической оси.

Для устранения дисторсии необходимо вычислить полиномы, которые описывают искажение изображения. Для вычисления полинома дисторсии объектива используются метод наименьших квадратов, или метод Фурье. Эти

методы позволяют определить коэффициенты полинома, которые наилучшим образом описывают искажение объектива.

После вычисления коэффициентов полинома дисторсии объектива можно использовать его для коррекции изображений, полученных с помощью этого объектива.

Таким образом, выше перечислены причины изменчивости образа сопровождаемого объекта, а также представлены способы их устранения. Обобщенная схема итогового комплексного алгоритма компьютерного зрения представлена ниже на рисунке (рис. 1).

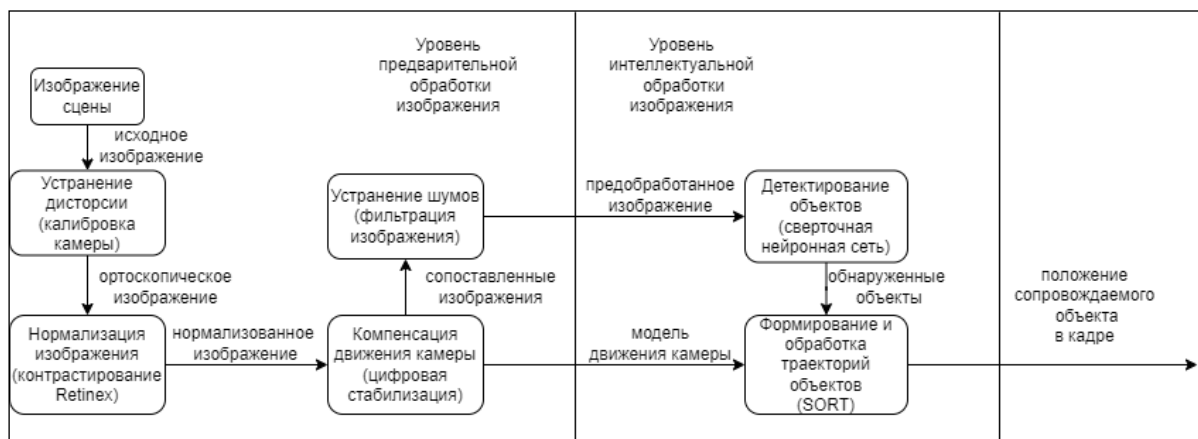


Рис. 1. Обобщенная схема комплексного алгоритма компьютерного зрения

Результаты экспериментов показали повышение оценок качества выполнения задачи сопровождения объектов комплексным доработанным алгоритмом, относительно базового (SORT). Оценки полученные в ходе тестирования на открытом наборе данных UAV123 [9] приведены ниже (см. табл. 1).

Таблица 1. Результаты тестирования описанного алгоритма

Показатель	Алгоритм SORT	Комплексный алгоритм
Интегральная оценка качества	0.742	0.821

При формировании описанного комплексного алгоритма выполнена системная интеграция различных методов цифровой обработки изображений. Центральным элементом комплексного алгоритма выступил алгоритм сопоставления изображений, основанный на интуиционистских нечетких множествах. Данные о связи изображений используются и для фильтрации изображений от шума, и для устранения нежелательного движения камеры, и при построении траекторий объектов для привязки их к неподвижной (стабилизированной) системе координат. Синергия и системный эффект выражаются в повышении характеристик комплексного алгоритма относительно базового, а также в организации обмена данными и взаимодействия между алгоритмами, входящими в состав системы.

Список литературы

1. ГОСТ 59385—2021. Информационные технологии. Искусственный интеллект. СИТУАЦИОННАЯ ВИДЕОАНАЛИТИКА Термины и определения. // Москва: Стандартинформ, 2021. – 16 с.
2. Hamidreza H. and Yu Dong H. FastTracker: Real-Time and Accurate Visual Tracking, 2025, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.14370>
3. Морев К.И. Алгоритм стабилизации изображений с камеры БПЛА // Сборник трудов II научно-методической конференции НПР «Современные компьютерные технологии». Таганрог. Издательство ЮФУ, 2021. – С. 53-55
4. Морев К.И. Метод сопоставления облаков особых точек изображений для задач трекинга, основанный на интуиционистской нечеткой логике // Известия ЮФУ. Технические науки, № 1. 2019. – С. 293-306.
5. Alex B., Zongyuan G., Lionel O., Fabio R, Ben U. Simple online and realtime tracking. 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2016, 3464-3468 pp. <http://dx.doi.org/10.1109/ICIP.2016.7533003>
6. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of Basic Engineering, 1960, vol. 82, no. 1, pp. 35-45.
7. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А, Цифровая обработка изображений в информационных системах // Новосибирск: Изд-во НГТУ, учебное пособие. 2000. – 514 с.
8. Bozhenyuk A., Morev K., Dolgiy I. Image Stabilization by Orientation of The Unmanned Aerial Vehicle. In: Proceedings of Fifth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (ITI'21). Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 330 Springer, Cham., 2022, pp. 647-653. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87178-9_64
9. Mueller, M., Smith, N., Ghanem, B., A benchmark and simulator for uav tracking. In European Conf. Computer Vision, 2016, pp. 445-461. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_27

ОБЗОР АРХИТЕКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ С БОЛЬШИМИ ЯЗЫКОВЫМИ МОДЕЛЯМИ

Аннотация: Настоящая статья представляет собой обзор архитектурных подходов к построению многоагентных систем (МАС) с использованием больших языковых моделей (БЯМ). В работе анализируются ключевые архитектуры (оркестрирование, коллаборация, соревнование/торг и цепь агентов) и примеры областей применения. Также дополнительное внимание уделено архитектуре «Соревнование или торг» для автоматизации матчмейкинга и переговорных процессов в B2B-секторе как дальнейшему направлению исследований. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на повышении устойчивости, безопасности и разработке надёжных механизмов оценки коллективного поведения агентов.

Ключевые слова: многоагентные системы, агентный искусственный интеллект, большие языковые модели

S.A. Potapov, student, potapo.potapov2014@yandex.ru
State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

A SURVEY OF ARCHITECTURAL MODELS OF MULTI-AGENTIC AI SYSTEMS WITH LARGE LANGUAGE MODELS

Abstract: This article provides a review of architectural approaches for building Multi-Agent Systems (MAS) using Large Language Models (LLMs). The work analyzes key architectures (orchestration, collaboration, competition/bargaining and agent chain). Additionally, particular attention is given to the "Competition or Bargain" architecture for automating B2B matchmaking and negotiation processes as a further research direction. Further research should focus on enhancing robustness and security, and developing reliable mechanisms for evaluating the collective behavior of agents.

Keywords: multi-agent AI, agentic AI, LLM

Целью данной работы является обзор архитектурных подходов к построению многоагентных систем (МАС) с использованием больших языковых моделей (БЯМ), а также краткое рассмотрение примеров областей их применения:

Перед данной работой стоят следующие **задачи**:

1. анализ ключевых архитектурных подходов к организации МАС на основе БЯМ;
2. рассмотрение областей применения и актуальных тенденций МАС на основе БЯМ;
3. определение основных проблем и ограничений, стоящих перед развитием МАС на основе БЯМ;
4. предложение направления исследований, основанного на архитектуре «Соревнование или торг», для автоматизации матчмейкинга и торга в B2B-секторе.

Введение. Ранние системы искусственного интеллекта опирались на базы знаний и чётко заданные правила, что гарантировало надёжность, но ограничивало гибкость при работе с неструктурированными данными или изменении контекста. С появлением больших языковых моделей (БЯМ) единичные агенты получили возможность подходить к решению задач гораздо более разнообразно и динамично. Однако возложение всех задач на одного агента, особенно при увеличении объёма входных данных (контекстного окна), приводит к проблемам расфокусировки внимания, снижению точности и склонности к усреднению результата. Одним из решений данной проблемы стала организация агентов в группы, где обязанности распределяются между различными специализированными субъектами. Такой мультиагентный подход позволяет сузить контекстное окно для каждого агента, обеспечивая более эффективное и качественное выполнение поставленных задач.

Теоретические основы. В основе агента в виде БЯМ лежат следующие ключевые составляющие:

- **восприятие:** процесс обработки информации о контексте задания;
- **обоснование:** описание последовательности заключений о воспринятой информации;
- **память:** сохранение дополненного контекста в памяти, которая может быть реализована как контекстное окно – короткая память, или запись в базу данных (реляционную, графовую, векторную и др.) – долгосрочная память;
- **действие:** выполнение (при необходимости) действия с помощью данных агенту инструментов (взаимодействие с API, базой данных и т.п.) [1].

Для эффективной работы в системе агенту назначается набор инструкций, являющихся частью промпт-инжиниринга (англ. prompt engineering): определение роли (предметная область и статус), цели (требуемые действия), контекста (текущее состояние системы), формата (ожидаемый вид ответа), ограничений (что запрещено) и критериев качества.

Архитектурные подходы к организации МАС с БЯМ

1. Оркестрирование (Orchestration)

Для группы из множества агентов, для которых распределены различные роли, задан оркестратор. Им может выступать агент как в виде БЯМ, так и любой другой подсистемы принятия решений. Целью оркестратора является назначение агента (или команды агентов) на выполнение поступающей в

систему задачи. Данный подход может быть расширен за счёт наделения оркестратора возможностью самостоятельно назначать роли и создавать новых агентов в зависимости от поступающего запроса (рис. 1) [2, 3].

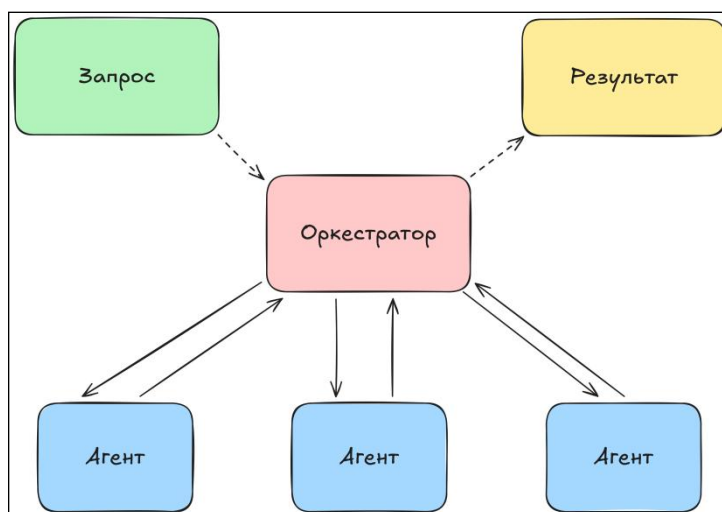


Рис. 1. Оркестрирование

Преимущество: обеспечивает централизованный контроль и эффективное распределение задач.

Недостаток: оркестратор может стать «узким горлышком» системы.

Применение: задачи, требующие чёткой иерархии и распределения специализированных ролей.

Пример: автоматическое решение задач через групповой чат (3 участника, 1 менеджер), где менеджер выступает в роли оркестратора, распределяющего подзадачи [4].

2. Коллаборация (Peer-to-Peer)

Множество агентов со схожими ролями последовательно обменивается сообщениями друг с другом по кругу до тех пор, пока не достигнет желаемого результата. Решение о прекращении диалога может быть принято либо любым участвующим в диалоге агентом (рис. 2-а), либо оркестратором (рис. 2-б) [2].

Преимущество: способствует коллективному поиску решения и итеративной доработке.

Недостаток: может приводить к заикливанию диалога или медленному достижению консенсуса.

Применение: задачи, требующие совместного творчества или проверки информации среди равных экспертов.

Пример: автоматизация визуализации данных через групповой чат, где агенты поочерёдно обрабатывают и уточняют данные [4].

3. Соревнование (Competition) или торг (Bargain)

Множество агентов принимает конфликтующие друг с другом роли при медиации оркестратора. В результате проведённых дебатов (которые могут

идти несколько итераций) оркестратор принимает заключительное решение и возвращает результат (рис. 3) [1, 3].

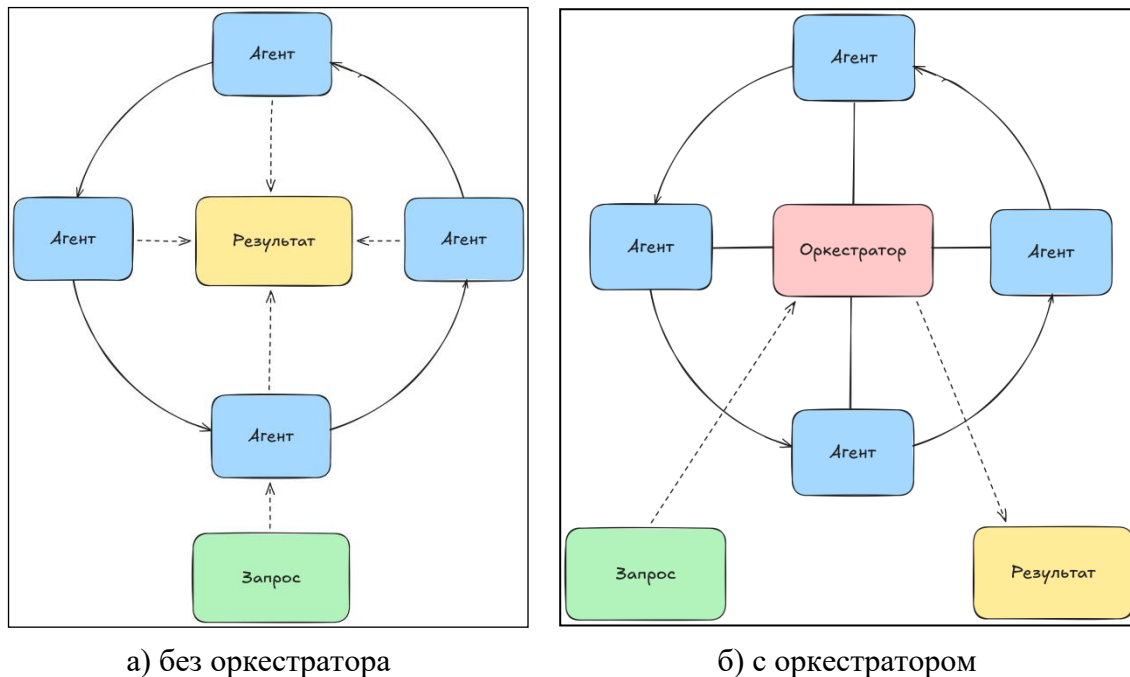


Рис. 2. Коллаборация

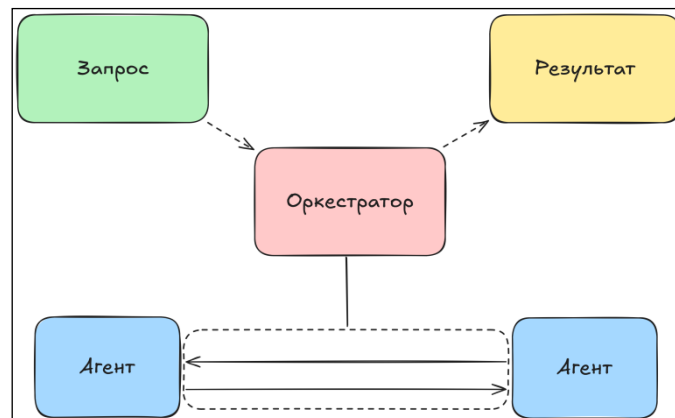


Рис. 3. Соревнование или торг

Преимущество: улучшает достоверность и качество вывода за счёт критического анализа и дебатов.

Недостаток: нехватка контекстного окна для обработки длительных дебатов, а также высокие требования к вычислительным ресурсам [5].

Применение: верификация фактов, принятие ответственных решений и моделирование переговорных процессов.

Пример: использование агентов в конфликтующих ролях для тестирования кибербезопасности [4].

4. Динамическое управление контекстом (Dynamic Context Management) или цепь агентов

Данный подход реализует обработку запроса с помощью агентов, представленных в виде графа. Каждый узел графа является состоянием системы, в зависимости от которого выполняются различные действия с помощью агента (рис. 4) [2].

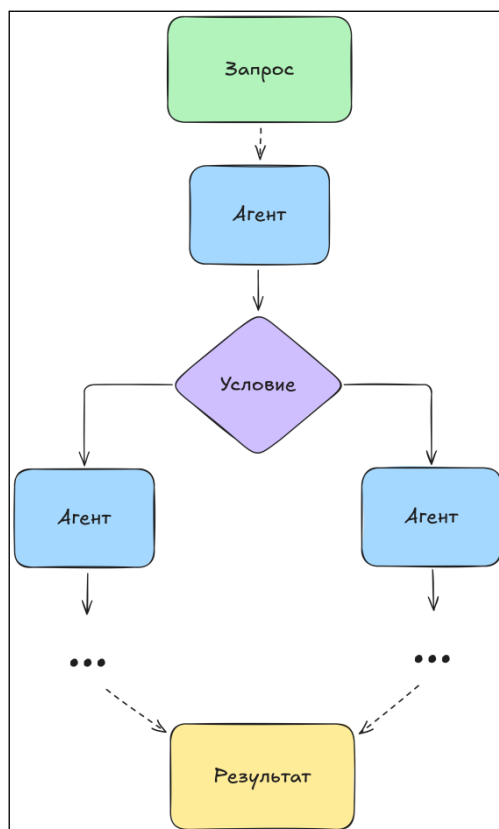


Рис. 4. Динамическое управление контекстом или цепь агентов

Преимущество: обеспечение чёткого, структурированного, пошагового и хорошо управляемого рабочего процесса.

Недостаток: низкая гибкость при обработке непредвиденных внешних изменений (в отличие от оркестрирования).

Применение: задачи с чётко определёнными последовательностью шагов и условиями перехода между этапами.

Пример: решение задач оптимизации цепи поставок с использованием вложенных чатов и агентов для кодирования и защиты [4].

Существующие задачи, области применения и актуальные тенденции

МАС с БЯМ демонстрируют высокую эффективность коллективного интеллекта и обладают широкими возможностями для решения сложных проблем. Такие системы используются для автоматизации бизнес-процессов, разработки ПО, финансового анализа, автоматизированной торговли акциями и других задач. Основным преимуществом использования МАС на основе БЯМ для решения такого рода задач является возможность имитации коман-

ды экспертов с различными полномочиями и обязанностями. Например, при разработке ПО требуется взаимодействие различных ролей: системные архитекторы, Frontend и Backend разработчики, тестировщики и др. Реализация взаимодействия между агентами с упомянутыми ролями в МАС на основе БЯМ позволяет эффективно и автономно разрабатывать ПО [5, 6].

В качестве актуального направления исследований выделяется автоматизация B2B-матчмейкинга и торго на основе архитектурного подхода «Соревнование или торг», где агенты с конфликтующими ролями (Покупатель и Продавец) ведут диалог под модерацией оркестратора для заключения сделки. Применение МАС на основе БЯМ позволит упростить, ускорить и масштабировать сложные переговорные процессы, сокращая время и повышая экономическую ценность для обеих сторон. Наиболее перспективными направлениями развития систем автоматизированного торго являются [7]:

- **обучение коммуникации и убеждению:** включение в общение между агентами приёмов аргументации и тактик убеждения;

- **взаимодействие между агентом и человеком:** проектирование агентов таким образом, чтобы они могли в сложных переговорных процессах служить интеллектуальными помощниками для человека, принимающего окончательное решение, а не действовали исключительно автономно;

- **федеративное обучение:** обучение агентов на коллективном опыте переговоров без обмена чувствительными данными;

- **устойчивость к состязательным атакам:** исследование и минимизация уязвимости агентов, участвующих в переговорах, к состязательным атакам (например, к умышленно создаваемым мошенническим предложениям).

Заключение. МАС с БЯМ представляют собой одно из наиболее инновационных и перспективных направлений в области искусственного интеллекта, демонстрируя многообещающий коллективный интеллект и способность к адаптации в сложных условиях, однако при их эффективности и гибкости они всё же сталкиваются со следующими проблемами [5]:

- возможность появления галлюцинаций у больших языковых моделей;
- низкая интерпретируемость действий;
- стохастическая природа таких систем может послужить как преимуществом, так и недостатком – особенно в предметных областях, где требуется высокая надёжность и стабильность системы автоматизации;
- высокие требования к вычислительным ресурсам;
- отсутствие единых методов оценки достоверности результатов.

Список литературы

1. Ramachandran A. A Survey of Agentic AI, Multi-Agent Systems, and Multimodal Frameworks Architectures, Applications, and Future Directions // Официальный сайт ResearchGate [Электронный ресурс]: режим доступа –

https://www.researchgate.net/publication/387577302_A_Survey_of_Agentic_AI_Multi-Agent_Systems_and_Multimodal_Frameworks_Architectures_Applications_and_Future_Directions

2. Abou Ali M., Dornaika F., Charafeddine J. Agentic AI: a comprehensive survey of architectures, applications, and future directions // Artificial Intelligence Review. – Vol. 59. – № 11. – 2026. – DOI: 10.1007/s10462-025-11422-4.

3. Finio M., Downie A. What is AI agent orchestration? // Официальный сайт IBM [Электронный ресурс]: режим доступа – <https://www.ibm.com/think/topics/ai-agent-orchestration>

4. 500+ AI Agent Projects / UseCases // Репозиторий GitHub [Электронный ресурс]: режим доступа – <https://github.com/ashishpatel26/500-AI-Agents-Projects?tab=readme-ov-file>

5. Xi Z. The Rise and Potential of Large Language Model Based Agents: A Survey [Электронный ресурс]: режим доступа – <https://arxiv.org/abs/2309.07864>

6. Дидковский Б.Р., Григорьев А.И. Мультиагенты на основе больших языковых моделей: анализ прогресса и проблем [Электронный ресурс]: режим доступа – <https://na-journal.ru/6-2024-informacionnye-tehnologii/12984-multiagenty-na-osnove-bolshih-yazykovyh-modelei-analiz-progressa-i-problem>

7. Patel A., Mishra A. Intelligent bargaining agents in digital marketplaces: a fusion of reinforcement learning and game-theoretic principles // International Journal of Advanced Artificial Intelligence Research. – Vol. 2. – Issue 3. – 2025. – pp. 6-12. – DOI: 10.55640/ijaair-v02i03-02.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОТБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ МОДЕЛЕЙ FEW-SHOT КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВ НА ПРИМЕРЕ SETFIT

Аннотация: В работе рассматриваются методы повышения качества много-классовой классификации текста с вариативным количеством классов и различным количеством данных. Исследуется влияние различных стратегий отбора примеров на качество модели few-shot классификации SetFit, использующей предварительно обученный энкодер предложений. Проведены эксперименты с пятью подходами к выбору данных: случайная выборка, фильтрация по расстоянию Левенштейна, выбор самых длинных текстов, метрике Жаккара и взвешиванию TF-IDF совместно с косинусным сходством. Использовалась русскоязычная модель deepvk/USER-bge-m3 и датасет с 50 классами пользовательских запросов.

Ключевые слова: классификация текста, машинное обучение, few-shot learning, SetFit, отбор данных, BERT.

Simakhin D.E., student, dima-simahin@mail.ru

Aksenov K.A., Ph.D., wiper99@mail.ru

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

RESEARCH ON DATA SELECTION TECHNIQUES FOR FEW-SHOT TEXT CLASSIFICATION USING SETFIT

Abstract: The paper examines methods for improving the quality of multiclass text classification with a variable number of classes and different amounts of training data. It investigates the impact of various data selection strategies on the performance of the few-shot SetFit model, which employs a pre-trained sentence encoder. Experiments were conducted using five data selection approaches: random sampling, Levenshtein distance filtering, selection of the longest texts, the Jaccard similarity metric, and TF-IDF weighting combined with cosine similarity. The Russian-language model deepvk/USER-bge-m3 and a dataset containing 50 classes of user requests were used.

Keywords: text classification, machine learning, few-shot learning, SetFit, sampling, BERT

ИИ-агенты — это интеллектуальные системы, способные понимать и обрабатывать естественный язык, взаимодействуя с пользователем в формате диалога. Они широко применяются в клиентской поддержке, финансовых и образовательных сервисах, где качество обработки обращений напрямую зависит от точности классификации пользовательских запросов.

Одной из основных проблем является ограниченность размеченных данных: подготовка большого числа примеров для каждого класса требует значительных временных и человеческих ресурсов. В связи с этим актуальной становится задача построения эффективных моделей классификации при минимальном количестве обучающих примеров.

В данной работе рассматривается подход few-shot[1] обучения с использованием архитектуры SetFit[2], где ключевое влияние на качество оказывает не только количество примеров, но и их информативность. Исследование посвящено анализу методов отбора обучающих примеров и их влияния на качество классификации в задаче анализа обращений пользователей.

Постановка задачи

Целью исследования является повышение точности многоклассовой классификации пользовательских обращений при сохранении ограниченного объёма обучающих данных.

Основная гипотеза: качество модели SetFit можно улучшить за счёт выбора более информативных и разнообразных примеров внутри каждого класса.

Для проверки гипотезы были реализованы и протестированы пять стратегий выбора данных:

- случайная выборка;
- фильтрация по расстоянию Левенштейна (с допуском $\leq 30\%$);
- выбор самых длинных текстов;
- метрика Жаккара;
- TF-IDF[3] совместно с косинусным сходством.

Оценка проводилась на фиксированном количестве примеров (20, 40 и 60) для каждого из 50 классов. Метрикой качества выступает макро F1-score.

Апробация работы

Апробация нескольких моделей из работы приведена на платформе для создания голосовых и текстовых чат ботов – TWIN. Модели нацелены на усвоение machine learning сервиса – NLU[4]. NLU (от natural language understanding) — это набор микросервисов, которые предоставляют инструменты для автоматизированного обучения, оценки и использования моделей для классификации текста на намерения и сущности. Сервис обслуживает

~30.000 обученных моделей на 32 естественных языках, обеспечивая доступность каждой из них и штатную скорость ответа около 50-80мс.

Данные

Набор данных представляет собой файл в формате json на 10 тысяч примеров. Он содержит 50 уникальных несбалансированных классов, в каждом из которых от 45 до 1435 примеров, которые максимально отражают характер, разношёрстность и качество имеющихся обучающих данных, с которыми моделям в последующем нужно будет работать. Каждый пример был очищен, нормализован, приведён к нижнему регистру и содержит только русские/английские буквы, цифры и знаки препинания. Дополнительно к каждому классу добавлено короткое имя и небольшое описание на русском языке длиной до 130 символов.

Данные разделены на обучающую, валидационную и тестовую выборки в пропорции 80/10/10% (8711/1135/1135 соответственно). В каждой выборке сохранено исходное число классов, их названия и описание, различия только в количестве примеров в каждом классе.

Метрики качества классификации

Для оценки качества модели была взята метрика F1-score. Она строится на основе двух более простых метрик.

1.Precision(точность) показывает, какая доля предсказанных положительных примеров действительно является положительными:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}, \quad (1)$$

где TP – предсказанная положительная метка оказалась верной, FP – предсказанная положительная метка оказалась неверной.

2.Recall(полнота) измеряет, какую долю реальных положительных примеров модель смогла правильно предсказать:

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (2)$$

где FN – предсказанная отрицательная метка оказалась неверной.

3.F1-score — это гармоническое среднее между Precision и Recall. Используется, когда важно учитывать как ложноположительные, так и ложноотрицательные ошибки:

$$F1\ score = 2 * \frac{Recall * Precision}{Recall + Precision}. \quad (3)$$

Современные подходы к классификации текста с помощью машинного обучения

Для исследования была выбрана архитектура SetFit (Sentence Transformer Fine-Tuning) представляющая собой метод few-shot обучения, основанный на дообучении модели преобразования предложений на небольшом числе помеченных примеров. Обучение проходит в два этапа:

1. тонкая настройка энкодера предложений на целевой задаче, что позволяет модели адаптировать эмбединги[5] к конкретной предметной области;

2. обучение лёгкого классификатора (логистической регрессии) на полученных эмбедингах.

В качестве базовой модели использовался русскоязычный энкодер `deepvk/USER-bge-m3`, основанный на архитектуре BERT[6] и оптимизированный для задач смыслового поиска и классификации коротких текстов.

Методы и архитектура эксперимента

Для каждого из 50 классов выбирались подвыборки по 20, 40 и 60 примеров. Отбор проводился следующими методами:

1. расстояние Левенштейна, метод, который основан на измерении редакционного расстояния между парами текстов, то есть минимального количества операций (вставка, удаление, замена символа), необходимых для превращения одной строки в другую:

$$D(a, b) = \min ops(a \rightarrow b). \quad (4)$$

Для нормализации расстояния используется отношение:

$$Lev_{sim(a,b)} = 1 - \frac{D(a,b)}{\max D(a,b)}. \quad (5)$$

В исследовании применялся порог схожести 0.7 ($\leq 30\%$ различий). Примеры, превышающие этот порог, считались дубликатами и исключались. Таким образом, отбор по расстоянию Левенштейна позволял устранить слишком похожие тексты внутри одного класса, обеспечивая большее разнообразие обучающих данных и снижая переобучение.

2. метрика Жаккара (Jaccard Similarity) используется для оценки степени пересечения множеств токенов двух текстов:

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}, \quad (6)$$

где A и B — множества уникальных слов в двух предложениях.

Чем выше коэффициент Жаккара, тем больше словесное пересечение между примерами. В рамках эксперимента тексты с высокой схожестью по метрике Жаккара удалялись, чтобы сохранить баланс между повторяемостью и разнообразием. Метод оказался полезен при фильтрации коротких запросов и команд, где часто встречаются повторяющиеся слова.

3. TF-IDF (Term Frequency–Inverse Document Frequency) вычисляется по формулам:

$$tf_{t,d} = \frac{n_{t,d}}{\sum_k n_{k,d}}, \quad idf_t = \log \frac{N}{df_t}, \quad w_{t,d} = tf_{t,d} * idf_t, \quad (7)$$

где $n_{t,d}$ — количество вхождений термина t в документ d , N — общее число документов, df_t — число документов, содержащих термин t .

После векторизации каждого текста косинусное сходство между двумя предложениями вычисляется как:

$$\cos(\theta) = \frac{A*B}{\|A\|\|B\|}. \quad (8)$$

Для фильтрации использовался порог сходства 0.7: если два примера имели более высокое косинусное сходство, один из них исключался. Такой метод позволяет сохранять примеры, различающиеся по смыслу, и тем самым повышает устойчивость модели к переобучению.

4. Прочие методы отбора:

- случайная выборка служила базовым уровнем для сравнения;
- выбор самых длинных текстов позволял проверить, влияет ли объём контекста на обучающую способность модели.

Все эксперименты проводились при фиксированном random seed для обеспечения воспроизводимости.

Результаты экспериментов

Анализ показал, что при увеличении числа примеров качество растёт, однако ключевое улучшение достигается не только за счёт количества, но и за счёт фильтрации схожих текстов. Методы, основанные на расстоянии Левенштейна и TF-IDF с косинусным сходством, обеспечивают наибольший рост f1-score, устраняя избыточные или дублирующиеся примеры.

Результаты подтверждают, что даже при использовании ограниченного набора данных качество классификации можно улучшить, если примеры отобраны с учётом их разнообразия и представительности (см. табл. 1).

Таблица 1. Сравнение стратегий отбора данных при обучении SetFit

Метод отбора данных	Количество примеров на класс	F1-score (валидационная выборка)
Случайная выборка	20	0.7
Самые длинные тексты	20	0.54
Расстояние Левенштейна	20	0.72
Метрика Жаккара	20	0.71
TF-IDF с косинусным сходством	20	0.71
Случайная выборка	40	0.71
Самые длинные тексты	40	0.61
Расстояние Левенштейна	40	0.75
Метрика Жаккара	40	0.73
TF-IDF с косинусным сходством	40	0.75
Случайная выборка	60	0.77
Самые длинные тексты	60	0.65
Расстояние Левенштейна	60	0.81
Метрика Жаккара	60	0.78
TF-IDF с косинусным сходством	60	0.80

Для практических NLU-систем это особенно важно, поскольку позволяет ускорить ввод новых классов без масштабной разметки.

Заключение

В работе проведено исследование методов отбора данных для обучения моделей few-shot классификации на примере подхода SetFit. Показано, что качественный отбор обучающих примеров влияет на итоговую метрику: использование фильтрации по расстоянию Левенштейна позволило достичь значения F1-score = 0.81.

Таким образом, предложенные подходы позволяют сократить затраты на подготовку данных и ускорить внедрение новых моделей в продуктивных системах анализа обращений.

Перспективными направлениями развития работы являются:

1. применение Active Learning [7] для автоматического выбора наиболее информативных примеров;
2. комбинирование методов отбора с аугментацией данных;
3. оценка устойчивости моделей к шуму и дрейфу данных.

Список литературы

1. A Survey of Few-Shot Learning: An Effective Method for Intrusion Detection/researchgate, URL: https://www.researchgate.net/publication/355802675_A_Survey_of_FewShot_Learning_An_Effective_Method_for_Intrusion_Detection (дата обращения: 02.03.2025).

2. Lewis Tunstall, Nils Reimers, Unso Eun Seo Jo, Luke Bates, Daniel Korat, Moshe Wasserblat, Oren Pereg [Электронный ресурс] // researchgate.net: [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/figure/SETFIT-s-fine-tuning-and-training-block-diagram_fig1_363765489 (дата обращения: 08.04.2025).

3. Qaiser, Shahzad & Ali, Ramsha. Text Mining: Use of TF-IDF to Examine the Relevance of WordstoDocuments. International Journal of Computer Applications//ijcaonline.org, URL: <https://ijcaonline.org/archives/volume181/number1/29681-2018917395/> (дата обращения: 02.11.2025).

4. Nicolas Crausaz, Jacky Casas, Karl Daher, Omar Abou Khaled, Elena Mugellini Natural Language Understanding (NLU) on the Edge / [Электронный ресурс]//researchgate.net:[сайт]. URL: https://www.researchgate.net/publication/350904877_Natural_Language_Understanding_NLU_on_the_Edge (дата обращения: 10.04.2025).

5. Nils Reimers, Iryna Gurevych Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks / Nils Reimers, Iryna Gurevych [Электронный ресурс] // ar-

xiv.org: [сайт]. — URL: <https://arxiv.org/abs/1908.10084> (дата обращения: 08.04.2025).

6. Jacob Devlin, Ming-Wei Chang, Kenton Lee, Kristina Toutanova BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / [Электронный ресурс] // arxiv.org: [сайт]. — URL: <https://arxiv.org/abs/1810.04805> (дата обращения: 08.04.2025).

7. Anita Krishnakumar, Active Learning Literature Survey // researchgate URL:https://www.researchgate.net/publication/228971426_Active_Learning_Literature_Survey (дата обращения: 02.11.2025).

С.Е. Шашкин, магистрант, jeremiah7toner@gmail.com
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ (LSTM/GRU) В ДИСПЕТЧЕРСКОЙ НЕФТЕГАЗОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

Аннотация: В работе рассматривается применение методов анализа временных рядов на основе рекуррентных нейронных сетей LSTM/GRU для прогнозирования отказов насосных агрегатов нефтегазовой инфраструктуры. Особое внимание уделяется использованию гибридной модели, объединяющей физическое описание гидравлических процессов и нейросетевой прогноз, что позволяет учитывать реальные условия эксплуатации оборудования. Анализируются особенности промышленной телеметрии и приводится обоснование применимости предложенного подхода в условиях диспетчерского контроля. Описывается архитектура внедрения методов прогнозирования в производственный контур управления.

Ключевые слова: предиктивная аналитика, LSTM, GRU, гидравлическая модель, нефтегазовая отрасль, диспетчеризация

S.E. Shashkin, student, jeremiah7toner@gmail.com
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

LSTM/GRU-BASED PREDICTIVE FAILURE FORECASTING FOR PUMP- ING UNITS IN OIL AND GAS DISPATCHING SYSTEMS

Abstract: This paper examines the application of time-series analysis methods based on recurrent neural networks (LSTM/GRU) for failure prediction of pump units in oil and gas infrastructure. Special attention is given to a hybrid model that combines a physical description of hydraulic processes with a neural-network forecast, enabling the consideration of real operating conditions of the equipment. The study analyzes the characteristics of industrial telemetry and provides a rationale for the applicability of the proposed approach in dispatch control environments. The architecture of integrating predictive methods into the operational control loop is also described.

Key words: predictive analytics, LSTM, GRU, hydraulic model, oil and gas industry, dispatching.

Отказы насосных агрегатов остаются одной из ключевых причин нарушений в магистральных нефтегазовых системах, вызывая снижение пропускной способности и значительные экономические потери [1]. Наиболее уязвимыми являются подшипниковые узлы, деградация которых проявляется в изменении вибрационных характеристик и может выявляться при корректно организованном мониторинге.

Современные методы раннего обнаружения дефектов базируются на анализе временных рядов и машинном обучении, включая нейросетевые модели, доказавшие свою эффективность в диагностике вращающихся механизмов [2]. Однако их прямое применение в нефтегазовой отрасли осложняется требованиями к интерпретируемости, устойчивости и совместимости с диспетчерскими системами [3].

В этих условиях возрастает интерес к гибридным моделям, объединяющим физические закономерности износа с нейросетевым анализом данных, что повышает достоверность оценки остаточного ресурса и снижает влияние случайных возмущений.

Цель работы — провести исследование гибридного подхода к прогнозированию отказов подшипников насосных агрегатов на основе анализа открытых вибрационных данных и сопоставления результатов с физической моделью естественного износа.

Постановка задачи

Пусть $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)\}$ — фрагмент вибрационных измерений в момент времени t . Требуется определить вероятность наступления отказа в горизонте τ и оценить остаточный ресурс: $RUL(t) = T_{fail} - t$

Ключевая сложность заключается в том, что вибрационные сигналы насосных агрегатов нестационарны, их форма определяется режимом прокачки, температурой транспортируемой среды, состоянием смазки и рядом других факторов. Это делает невозможным применение фиксированных порогов и требует моделей, которые учитывают динамику сигнала во времени. Для решения задачи вводится гибридная модель, включающая: физическую траекторию естественного износа, отражающую нормальный плавный рост вибрации в отсутствие дефекта, фактическую оценку вибрации через RMS, отклонение от физической модели, служащее показателем перехода к деградации и прогноз будущей динамики вибрации

Таким образом, задача сводится к тому, чтобы определить момент начала ускоренного роста отклонения. Данные критерии позволяют интегрировать методику в диспетчерский контур, обеспечивая раннее предупреждение об отказе.

Данные и особенности промышленной телеметрии

Для проверки предложенного подхода использованы два открытых набора вибрационных данных, применяемых в задачах прогнозирования отказов подшипников: NASA IMS [4] и FEMTO PRONOSTIA [5]. Оба набора содержат длительные записи работы подшипников вплоть до полного отказа, что позволяет наблюдать переход от нормального режима к стадии ускоренной деградации.

В данных NASA IMS подшипники работают при постоянной нагрузке, и временные ряды содержат длительные стабильные участки. Среднее значение вибрации в нормальном состоянии составляет около 0.17–0.20 g, а перед отказом — 0.35–0.45 g. График вибрации представлен на рисунке 1.

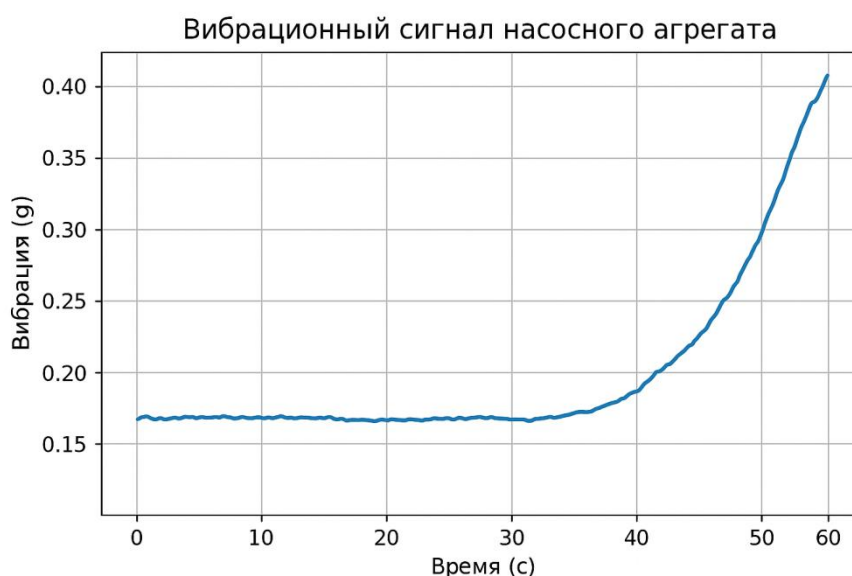


Рис. 1. График вибрации насосного агрегата

Деградация выражается в постепенном и устойчивом росте вибрации, предшествующем резкому скачку при разрушении дорожки качения.

Набор PRONOSTIA включает режимы с изменяющейся нагрузкой, что делает его ближе к условиям реальных насосных станций, где давление и расход меняются в течение суток. Типичные значения RMS в норме находятся в диапазоне 0.14–0.16 g, а при развитии дефекта — 0.29–0.39 g. Изменения нагрузки сопровождаются кратковременными скачками вибрации, что имитирует реальные возмущения технологического процесса. Для анализа использовался показатель виброэнергии — среднеквадратичное значение (RMS): $x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$, где $x_i(t)$ — значение вибрационного сигнала в момент времени t для i -го отсчёта, N — число отсчётов в окне анализа.

Рост RMS перед отказом 50–120% подтверждён как экспериментальными испытаниями, так и промышленными наблюдениями на насосных агрегатах, статистика отказов на агрегатах представлена на рисунке 2.

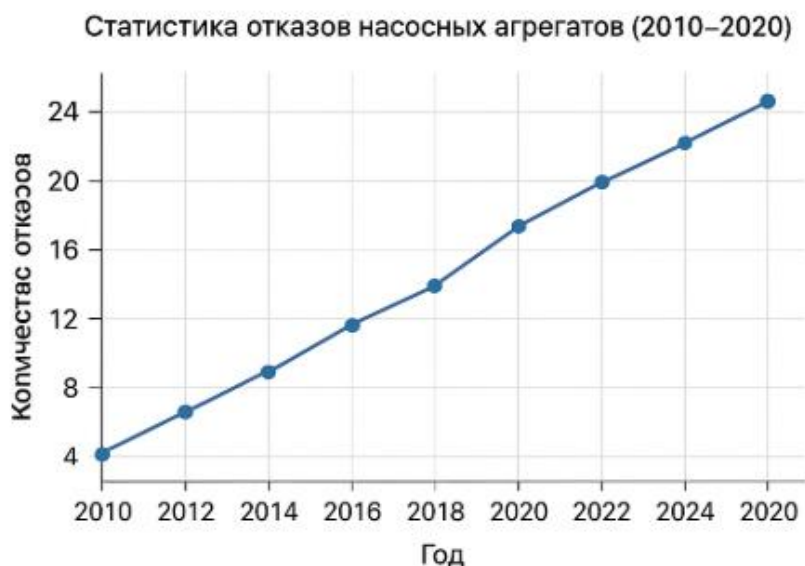


Рис. 2. Статистика отказов

Статистический анализ данных о повреждениях насосных агрегатов за 2010–2020 гг. демонстрирует устойчивую тенденцию к росту числа отказов. В среднем ежегодный прирост составляет около 1–1,3 отказа в год, что отражает постепенное усложнение режима эксплуатации, рост объёмов транспортировки и старение парка оборудования. Наиболее заметные скачки фиксируются в период 2014–2016 гг. и 2018–2020 гг., что соответствует общеотраслевым тенденциям, отмеченным в международных отчётах IOGP.

Динамика отказов не является линейной: на временном графике заметны как периоды стабилизации, так и резкие всплески, вероятно связанные с деградацией изношенных подшипниковых узлов. Такая вариативность указывает на необходимость методов раннего прогнозирования, способных учитывать не только общие тренды, но и краткосрочные изменения состояния агрегатов.

Гибридная модель прогнозирования

Физическое поведение подшипника без дефекта моделируется линейной зависимостью вычисляется по формуле: $y_{\text{phys}}(t) = at + b$, где a — малая скорость естественного роста вибрации, b — базовый уровень, t — время работы подшипника. Отклонение фактического сигнала от физической модели вычисляется как: $r(t) = y_{\text{LSTM}}(t) - y_{\text{phys}}(t)$. Если $r(t)$ близко к нулю, система работает в пределах нормального износа. Устойчивый рост $r(t)$ свидетельствует о начале ускоренной деградации. Такая логика лежит в основе промыш-

ленных систем прогноза технического состояния. Нейросетевая часть модели дополняет анализ, предсказывая будущие значения временного ряда на основе LSTM-архитектуры: $Y(t + \tau) = f(X(t - k), \dots, X(t))$, где $X(t)$ — вектор вибрационных измерений в момент времени t , k — длина временного окна, используемого для прогноза, τ — горизонт прогноза (на сколько вперед делается предсказание), $Y(t)$ — прогнозируемый уровень вибрации или отклонения в будущем моменте времени. Прогноз используется как дополнительный индикатор изменения состояния [6].

Экспериментальная проверка

На данных NASA IMS средний RMS нормальных участков составил: $x_{RMS}^{norm} = 0,138g$, а на участках ближайших к отказу $x_{RMS}^{fault} = 0,348g$, что свидетельствует о росте RMS более 90%. На данных PRONOSTIA наблюдался рост с 0.152 до 0.326 g (более 100%).

Из линейной модели естественного износа были получены значения углового коэффициента a для стабильных участков порядка $2 \cdot 10^{-5} g/мин$, в период деградации $2 \cdot 10^{-3} g/мин$

Отклонение от модели на стабильных участках не превышало 0.02 g: $r(t) \leq 0,02g$, а при деградации достигало 0.10 – 0.20 g. Следующим шагом была оценка оставшегося времени до отказа. Поскольку в период деградации рост вибрации становится почти линейным, использовалась простая экстраполяция: $T_{fail} = t + \frac{x_{crit} - x_{RMS}(t)}{v(t)}$, где x_{crit} — вибрация, при которой наступает отказ. Пороговое значение 0.05 g превышалось — NASA IMS за 40 – 65 минут до отказа, у PRONOSTIA за 50 – 80 минут. График прогнозирования вибрации представлен на рисунке 3.

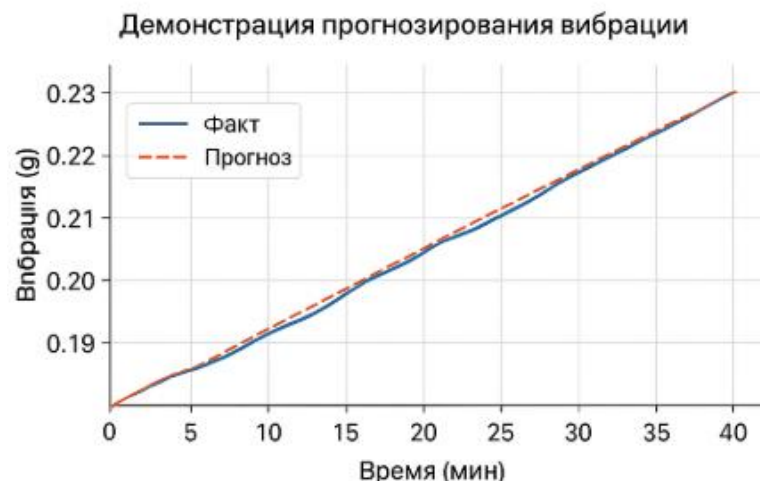


Рис. 3. График прогнозирования вибрации

График прогноза демонстрирует два ряда: фактические вибрационные данные и прогноз модели, построенной на основе временных зависимостей. Отличие между ними минимально: модель воспроизводит общий тренд роста

вибрации, а также частично — колебательную структуру сигнала. Наиболее важным является то, что модель мягко «опережает» реальное развитие процесса, что позволяет идентифицировать деградацию до того, как вибрация выходит за безопасный диапазон.

Отклонение прогноза от факта усиливается ближе к концу временного интервала — это нормальный эффект моделей на основе рекуррентных сетей, связанных с накоплением ошибки. Погрешность остаётся в допустимых пределах и не нарушает форму тренда, что делает прогноз индустриально полезным.

Таким образом, визуализированные результаты демонстрируют, что даже при использовании открытых данных модель способна формировать сигнал раннего предупреждения. Это подтверждает возможность интеграции подобных методов в диспетчерские системы. Такая динамика хорошо согласуется с отчётами компаний, внедряющих цифровые методы диагностики [7].

Заключение

Проведённое исследование подтвердило эффективность гибридного подхода к прогнозированию состояния подшипников насосных агрегатов, основанного на сочетании физической модели естественного износа и анализа вибрационных данных. Использование открытых наборов NASA IMS и FEMTO PRONOSTIA обеспечило прозрачность экспериментов и воспроизводимость результатов. Показано, что простые показатели, такие как RMS и отклонение от линейной модели, позволяют выявлять переход от нормального режима к ускоренной деградации за значительное время до отказа.

Полученные результаты демонстрируют применимость метода для задач раннего обнаружения неисправностей в магистральной нефтегазовой инфраструктуре. Благодаря интерпретируемости и низкой вычислительной сложности подход может быть интегрирован в действующие диспетчерские системы, повышая надёжность работы насосных станций и оптимизируя обслуживание.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением перечня телеметрических параметров, уточнением физических моделей износа и интеграцией гибридного метода с более сложными алгоритмами машинного обучения. При этом уже представленная версия метода может рассматриваться как практичный инструмент промышленного мониторинга.

Список литературы

1. International Association of Oil & Gas Producers (IOGP). Oil and Gas Pipeline Failure Statistics Report. 2021. 54 p.

2. Li C., Sánchez R.-V., Zurita G. A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, vol. 64–65, pp. 285–306 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327015002034>
3. Shell Global Solutions. Predictive analytics for rotating machinery in downstream oil & gas assets. Shell Technical Report, 2021. 33 p.
4. Loparo, K. A., et al. Real-Time Condition Monitoring of Bearing Data. NASA / University of Cincinnati, Intelligent Maintenance Systems (IMS). <https://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/groups/pcoe/prognostic-data-repository/>
5. Medjaher K., Zerhouni N., Gouriveau R. PHM of bearings using vibration analysis. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2010, pp. 1–10.
6. Saudi Aramco. Digital Twin and Predictive Maintenance Strategy for Pumping Stations. Aramco Research Report, 2022. 41 p.
7. Aker BP. Smart Maintenance Program: Data-Driven Reliability Improvement in Offshore Production. Technical Report. Aker BP, 2020. 27 p.

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ С МЕХАНИЗМОМ ВНИМАНИЯ В ЗАДАЧАХ БИНАРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Аннотация: Рассматривается задача бинарной классификации, решаемая с помощью двух моделей нейронных сетей. Сравнивается классический подход нейронных сетей со свёрточными слоями и нейронных сетей, использующих механизм внимания. В работе освещается скорость схождения обучения, точность и скорость вывода. Описаны потенциальные преимущества использования нейронных сетей с механизмом внимания над классическими.

Ключевые слова: искусственный интеллект (ИИ), нейронные сети, свёрточные нейронные сети, компьютерное зрение, классификация, внимание.

D.E. Shkurat, Postgraduate student, danilshkurat@gmail.com
University of State Fire Service of EMERCOM, St Petersburg, Russia

USING NEURAL NETWORKS WITH ATTENTION MECHANISM IN BINARY CLASSIFICATION PROBLEMS

Abstract: Binary classification problem is considered, which solved using two neural network models. Classical convolutional neural networks are compared with networks with attention mechanism. Learning speed, average precision and inference time are spotlighted. Potentional advantages of neural networks with attention are described.

Key words: Artificial intelligence (AI), neural networks, convolutional neural networks (CNN), computer vision (CV), classification, attention.

Была поставлена задача классификации изображений, поступающих с видеокамеры (отдельные кадры), на предмет наличия пожара, а именно очагов пламени. Данная задача актуальна в системах раннего обнаружения возгораний, где задержка обнаружения может привести, как к экономическим тратам, так и к человеческим жертвам и травмам. Необходимо отличать очаги пламени от схожих по цвету и форме объектов, чтобы минимизировать число ложных срабатываний.

Было принято решение реализовать две нейронные сети: «классическую» свёрточную нейронную сеть (Р) и нейронную сеть с механизмом вни-

мания (А). В основе обеих сетей лежит одна и та же нейросеть (бэкбон): mobilenetv3 large 100. На вход принимаются изображения, преобразованные в трёхмерный тензор размером $(3, 256, 256)$, где 3 – количество каналов (красный, зелёный, голубой), а последние две компоненты соответствуют размеру изображения в пикселях: 256×256 по высоте и ширине. Отличия нейросетей заключались в головах (см. рис. 1, 2). Первый слой InvertedResidual – это последний слой бэкбона. Голова Р начинается с пулингового слоя (по среднему), сигнал с него упрощается и после линейного преобразования возвращается. Голова А начинается с двух параллельных свёрточных слоёв: размером 16×16 карты внимания [1] (на рис. 2 справа) и «свидетельства» (рис. 2 слева). Дальнейшие вычисления, происходящие в голове А, являются чисто арифметическими и не зависят от обучаемых параметров.

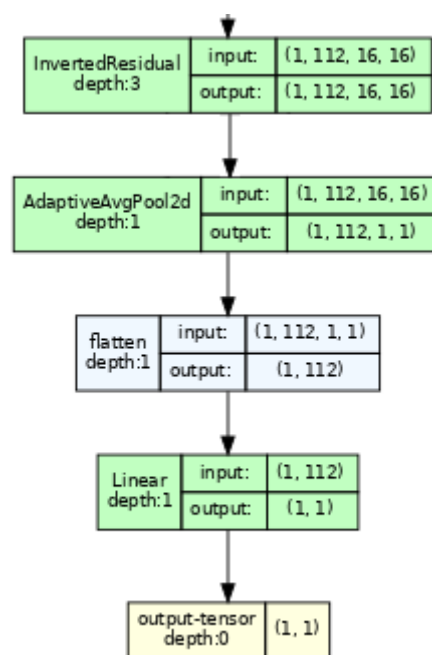


Рис. 1. Голова Р

Карта внимания возвращает тензор размером $(B, 1, 16, 16)$, где B – количество переданных наблюдений, 1 – использование только одного положительного класса, а два последних измерения задают высоту и ширину карты внимания. Таким образом карта внимания разбивает оригинальное изображения (не обязательно размером 256×256) на 256 прямоугольников, каждый из которых имеет свой вес, отображающий интенсивность внимания в заданной области.

Для обучения использовалось 537 примеров, которые не могут быть выложены в свободный доступ. Исходные изображения были разного размера и были отмасштабированы до размера 256×256 . Разбиение на наборы данных следующее:

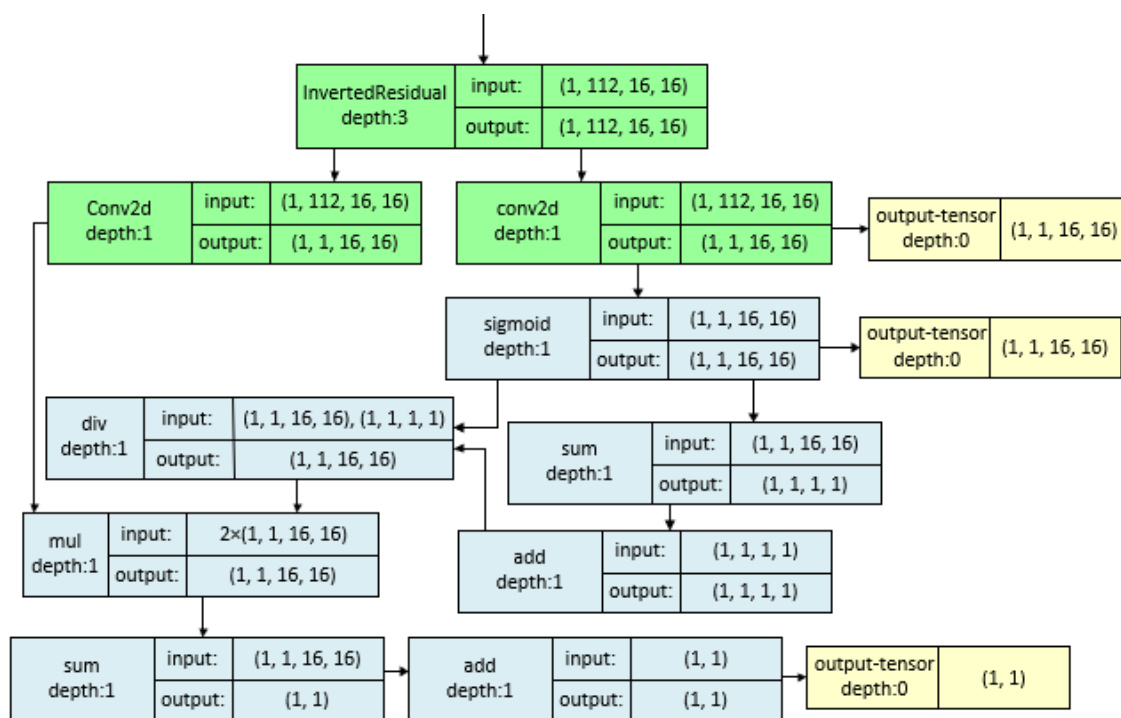


Рис. 2. Голова А

- обучение: 190 положительных, 137 отрицательных (363 в сумме);
- валидация: 48 положительных, 39 отрицательных (87 в сумме);
- тест: 47 положительных, 40 отрицательных (87 в сумме).

Нейронные сети были обучены на одинаковых наборах данных с точностью до перестановки внутри подвыборки.

Для нейросети Р набор состоял из изображений и записи о принадлежности к положительному/негативному классу. Для обучения карты внимания в нейросети А дополнительно была необходима разметка с указанием расположения положительного объекта, для чего использовались ограничивающие рамки (bounding boxes) [2].

Используемый язык программирования: Python 3.10.12, также использовались библиотеки torch [3] и numpy [4].

Технические характеристики машины для обучения:

- GPU: NVIDIA GeForce 3060 Ti (с использованием CUDA-ядер);
- CPU: AMD Ryzen 5 5600X 6-Core;
- RAM: 16 Gb.

В качестве функции потери для обеих нейросетей была выбрана бинарную кросс-энтропию. Дополнительные функции потери для карты внимания не использовались.

Обучение велось до 25 эпох без улучшений; под улучшением понимается изменение метрики AP, где AP – это средняя точность: площадь под PR-кривой, более, чем на 0.001 [5].

Не смотря на немного большее количество параметров нейронная сеть А сошла быстрее, чем Р – на 168 эпохе против 203 (последние успешные: 143 и 178 соответственно).

Результаты обучения продемонстрированы на рис. 3, PR-кривая была построена на тестовой выборке. Вопреки ожиданиям модель с вниманием дала результат несколько хуже, чем без такового, но разница AP не превышает 0,01034, при том, что у модели Р $AP \approx 0.994$, а у А – $AP \approx 0.984$, т.е. оба результата высокие.

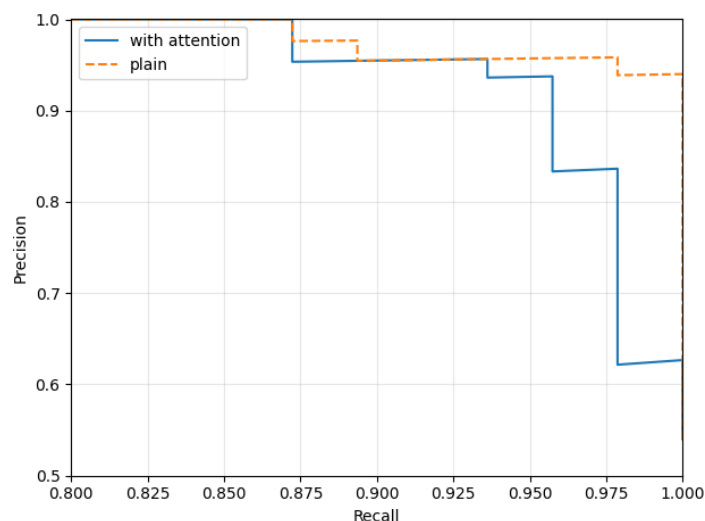


Рис. 3. PR-кривая. Синяя сплошная линия – модель А, оранжевая пунктирная – Р

Также нейронная сеть А незначительно (в статистическом смысле слова) быстрее выводит результат по сравнению с Р (см. рис. 4). Измерения производились после «разогрева» в 20 проходов, было измерено 1000 проходов (без учёта «разогрева»).

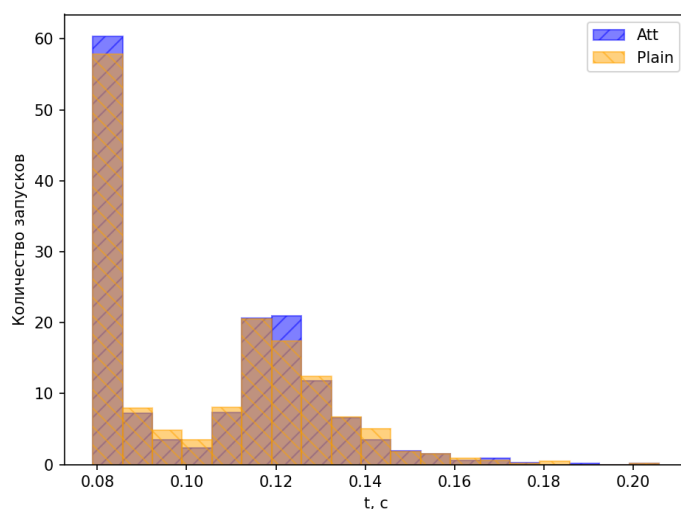


Рис. 4. Время вывода в секундах. Модель А – синяя, линии с правого верхнего угла в левый нижний, модель Р – жёлтый, линии с левого верхнего в правый нижний

Хоть модель А уступает модели Р в плане классификации у модели А есть потенциальные преимущества, которые следует проверить в дальнейшем. Перечислим их:

- уменьшение межклассовой путаницы (при многоклассовой классификации) [6];
- механизм объяснения выбора – почему именно модель отнесла экземпляр к тому или другому классу;
- визуализация ошибок классификации;
- извлечение новых признаков для классификации.

Получили две обученных модели нейронной сети: «классической» свёрточной нейронной сети и сети с механизмом внимания. Отметили у последней более быструю скорость схождения на обучении, незначительное преимущество в скорости, но при этом меньшую точность (precision) при большой полноте по сравнению с первой моделью. Обозначили потенциальные преимущества использования модели с механизмом внимания, которыми не обладает «классическая» модель.

Список литературы

1. Zhou B., Khosla A., Lapedriza À., Oliva A., Torralba A. Learning Deep Features for Discriminative Localization // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). - 2015. - P. 2921-2929.
2. Wang J., Xia B. Weakly supervised image segmentation beyond tight bounding box annotations // Computers in Biology and Medicine. - 2024. - №169
3. PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library // arXiv URL: <https://arxiv.org/abs/1912.01703> (дата обращения: 17.11.2025).
4. Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J., Gommers R., Virtanen P., Cournapeau D., Wieser E., Taylor J., Berg S., Smith N. J., Kern R., Picus M., Hoyer S., van Kerkwijk M. H., Brett M., Haldane A., Fernández del Río J., Wiebe M., Peterson P., Gérard-Marchant P., Sheppard K., Reddy T., Weckesser W., Abbasi H., Gohlke C., Oliphant T. E. Array programming with NumPy // Nature. - 2020. - №585. - С. 357-362.
5. Lin T.-Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollár P., Zitnick C. L. Microsoft COCO: Common Objects in Context // Computer Vision -- ECCV 2014. - Cham: Springer International Publishing, 2014. - P. 740-755.
6. Wang L., Wu Z., Karanam S., Peng K.-Ch., Singh R. V. Reducing Visual Confusion with Discriminative Attention [Электронный ресурс]. — 2018. — 11 p. Режим доступа: [arXiv:1811.07484](https://arxiv.org/abs/1811.07484), DOI: [10.48550/arXiv.1811.07484](https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.07484).

Секция 6

УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ

В.А. Горин, инженер, лаборант, gorin.va@dvfu.ru
А.С. Губанков, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, gubankov@iacp.dvo.ru
Д.А. Юхимец, д.т.н., доцент, undim@iacp.dvo.ru
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАВИГАЦИИ БПЛА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ

Аннотация: В докладе рассматривается подход к построению системы для навигации беспилотного летательного аппарата (БПЛА) внутри помещения с использованием технологии UWB, позволяющей определять его положение и ориентацию. Представлены результаты моделирования работы предложенной системы навигации при движении БПЛА, подтверждающие работоспособность системы.

Ключевые слова: система навигации в помещении, БПЛА, UWB.

V.A. Gorin, engineer, laboratory assistant, gorin.va@dvfu.ru
A.S. Gubankov, PhD, associate professor, Head of laboratory, gubankov@iacp.dvo.ru
D.A. Yukhimets, Dr. Sc., associate professor, undim@iacp.dvo.ru
Institute of Automation and Control Processes FEB RAS,
Admiral Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, Russia

AN APPROACH TO DEVELOPING INDOOR UAV NAVIGATION SYSTEM

Abstract: The report considers an approach to developing an indoor navigation system for an unmanned aerial vehicle (UAV) using UWB technology, which makes it possible to determine its position and orientation. The results of modeling the operation of the proposed navigation system during UAV movement are presented, confirming the operability of the system.

Key words: indoor navigation system, UAV, UWB.

Введение

В настоящее время большинство БПЛА для выполнения миссий в автоматических режимах используют информацию от глобальных навигацион-

ных спутниковых систем (ГНСС), которые обладают невысокой точностью [1], а также не способны обеспечивать позиционирование внутри помещений из-за существенного ослабления или полного затухания сигналов ГНСС внутри зданий. Помимо этого, наличие в зданиях крупных металлических предметов может приводить к некорректным показаниям магнитного компаса, используемого на БПЛА для расчета углов ориентации.

Существует несколько подходов к решению задачи навигации внутри помещений при отсутствии сигналов ГНСС. Первый подход заключается в использовании систем визуальной навигации, построенных с применением алгоритмов SLAM [2-4] или визуальной одометрии [5,6]. Такие системы позволяют определять положение БПЛА, применяя устанавливаемую на нём камеру, однако их недостатками является зависимость качества работы от условий освещения, а также постепенное накопление навигационной ошибки в случае систем на базе алгоритмов визуальной одометрии.

Еще одним подходом является использование локальных навигационных систем. Например, в работах [7,8] для навигации внутри помещения предлагается использовать систему на базе BLE (Bluetooth Low Energy) маяков, которые позволяют за счёт использования значений RSSI (Received Signal Strength Indicator) определять расстояния до них, после чего рассчитывать положение БПЛА. Аналогичный принцип используется в системе, представленной в работе [9], где для навигации БПЛА предлагается использовать ультразвуковые маяки. Недостатками таких систем является зависимость точности определения положения БПЛА от наличия препятствий между ним и маяками, а также малый радиус их действия.

В связи с этим в настоящей работе решается задача построения локальной навигационной системы для БПЛА, позволяющей определять его положение и ориентацию в процессе полета для успешного выполнения им миссий внутри помещений в автоматических режимах.

Описание локальной навигационной системы

Для построения локальной навигационной системы предлагается использовать радиомаяки с применением технологии UWB (Ultra Wide Bandwidth).

На БПЛА устанавливаются 4 радиомаяка, работающих по стандарту UWB в режиме меток (tags). Координаты меток $x_u^{tj} = (x_u^{tj}, y_u^{tj}, z_u^{tj})^T$, где $j = (\overline{1,4})$, заданы в связанной с БПЛА системе координат (ССК) $Ox_u y_u z_u$ (см. рис. 1). В рабочей области внутри помещения размещается N радиомаяков в режиме якорей (anchors). Координаты якорей $x_p^{ai} = (x_p^{ai}, y_p^{ai}, z_p^{ai})^T$, где $i = (\overline{1,N})$, заданы в локальной системе координат (СК) $Ox_p y_p z_p$, связанной с помещением, и известны БПЛА. В процессе работы системы для каждой j -ой метки определяются расстояния $d_{t_j a_i}$ до каждого i -ого якоря. Расчёт положения БПЛА осуществляется в локальной СК $Ox_p y_p z_p$.

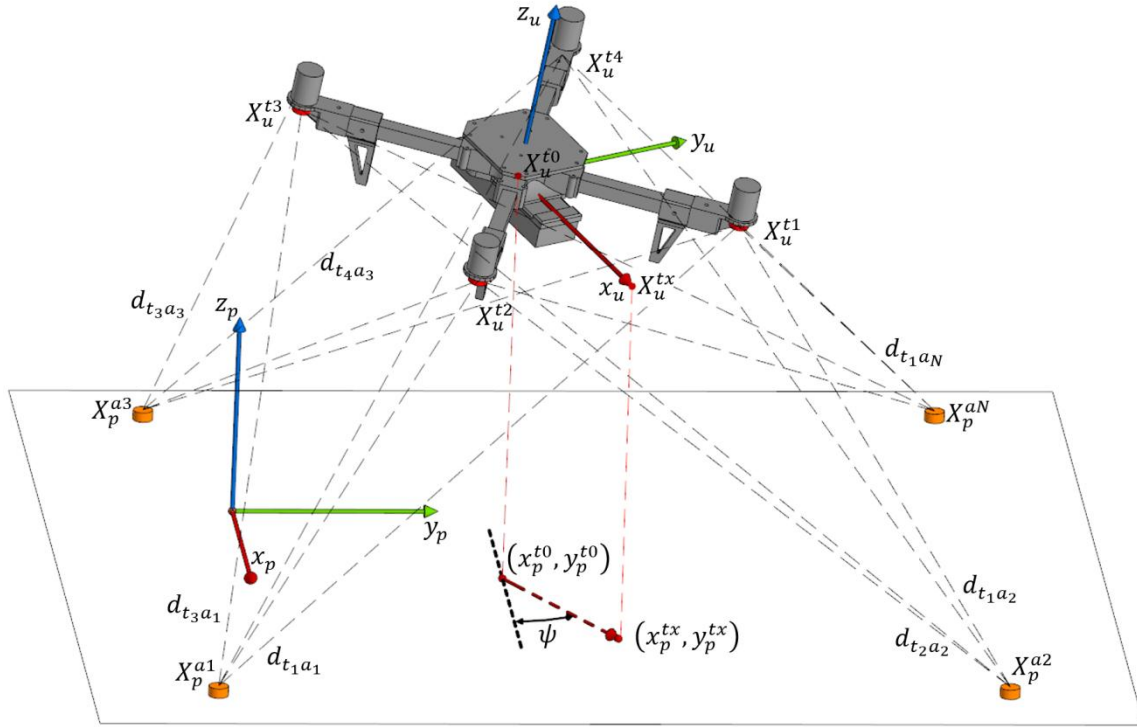


Рис. 1. Расположение систем координат

На первом этапе, используя информацию о дальностях между метками и якорями, рассчитываются координаты каждой метки в локальной СК $Ox_p y_p z_p$. Связь между координатами j -ой метки и i -ого якоря в СК $Ox_p y_p z_p$ описывается выражением:

$$d_{t_j a_i}^2 = (x_p^{tj} - x_p^{ai})^2 + (y_p^{tj} - y_p^{ai})^2 + (z_p^{tj} - z_p^{ai})^2, \quad (1)$$

где $X_p^{tj} = (x_p^{tj}, y_p^{tj}, z_p^{tj})^T$ – координаты j -ой метки в СК $Ox_p y_p z_p$.

Для определения пространственного положения j -ой метки достаточно информации о дальностях от неё до 4-х якорей, расположенных в помещении:

$$\begin{aligned} d_{t_j a_1}^2 &= (x_p^{tj} - x_p^{a1})^2 + (y_p^{tj} - y_p^{a1})^2 + (z_p^{tj} - z_p^{a1})^2, \\ d_{t_j a_2}^2 &= (x_p^{tj} - x_p^{a2})^2 + (y_p^{tj} - y_p^{a2})^2 + (z_p^{tj} - z_p^{a2})^2, \\ d_{t_j a_3}^2 &= (x_p^{tj} - x_p^{a3})^2 + (y_p^{tj} - y_p^{a3})^2 + (z_p^{tj} - z_p^{a3})^2, \\ d_{t_j a_4}^2 &= (x_p^{tj} - x_p^{a4})^2 + (y_p^{tj} - y_p^{a4})^2 + (z_p^{tj} - z_p^{a4})^2, \end{aligned} \quad (2)$$

Раскрыв выражения (2) и вычтя второе из первого, третье из второго, четвертое из третьего получим:

$$\begin{aligned} &2(x_p^{a2} - x_p^{a1})x_p^{tj} + 2(y_p^{a2} - y_p^{a1})y_p^{tj} + 2(z_p^{a2} - z_p^{a1})z_p^{tj} \\ &= d_{t_j a_1}^2 - d_{t_j a_2}^2 - x_p^{a1^2} + x_p^{a2^2} - y_p^{a1^2} + y_p^{a2^2} - z_p^{a1^2} + z_p^{a2^2}, \\ &2(x_p^{a3} - x_p^{a2})x_p^{tj} + 2(y_p^{a3} - y_p^{a2})y_p^{tj} + 2(z_p^{a3} - z_p^{a2})z_p^{tj} = \\ &= d_{t_j a_2}^2 - d_{t_j a_3}^2 - x_p^{a2^2} + x_p^{a3^2} - y_p^{a2^2} + y_p^{a3^2} - z_p^{a2^2} + z_p^{a3^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$2(x_p^{a4} - x_p^{a3})x_p^{tj} + 2(y_p^{a4} - y_p^{a3})y_p^{tj} + 2(z_p^{a4} - z_p^{a3})z_p^{tj} = \\ = d_{t_j a_3}^2 - d_{t_j a_4}^2 - x_p^{a3^2} + x_p^{a4^2} - y_p^{a3^2} + y_p^{a4^2} - z_p^{a3^2} + z_p^{a4^2}.$$

Систему уравнений (3) можно записать в матричном виде:

$$F_p^t X_p^{tj} = b_p^t, \\ F_p^t = 2 \begin{bmatrix} x_p^{a2} - x_p^{a1} & y_p^{a2} - y_p^{a1} & z_p^{a2} - z_p^{a1} \\ x_p^{a3} - x_p^{a2} & y_p^{a3} - y_p^{a2} & z_p^{a3} - z_p^{a2} \\ x_p^{a3} - x_p^{a2} & y_p^{a4} - y_p^{a3} & z_p^{a4} - z_p^{a3} \end{bmatrix}, \\ b_p^t = \begin{bmatrix} d_{t_j a_1}^2 - d_{t_j a_2}^2 - x_p^{a1^2} + x_p^{a2^2} - y_p^{a1^2} + y_p^{a2^2} - z_p^{a1^2} + z_p^{a2^2} \\ d_{t_j a_2}^2 - d_{t_j a_3}^2 - x_p^{a2^2} + x_p^{a3^2} - y_p^{a2^2} + y_p^{a3^2} - z_p^{a2^2} + z_p^{a3^2} \\ d_{t_j a_3}^2 - d_{t_j a_4}^2 - x_p^{a3^2} + x_p^{a4^2} - y_p^{a3^2} + y_p^{a4^2} - z_p^{a3^2} + z_p^{a4^2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Поскольку система (4) является линейной относительно искомым координат X_p^{tj} можно применить для их нахождения метод наименьших квадратов. Если число якорей $N \geq 4$, то можно сформировать матрицы F_{pk}^t и b_{pk}^t , где $k = (\overline{1, m})$, $m = N!/(4! \cdot (N-4)!)$ – число всех возможных сочетаний якорей. В результате оценка координат $\tilde{X}_p^{tj}$ для j -ой метки будет вычисляться по формуле:

$$\tilde{X}_p^{tj} = [\Phi_p^{tT} \Phi_p^t]^{-1} \Phi_p^t Y_p^t, \text{ где } \Phi_p^t = \begin{bmatrix} F_{p1}^t \\ \dots \\ F_{pm}^t \end{bmatrix}, Y_p^t = \begin{bmatrix} b_{p1}^t \\ \dots \\ b_{pm}^t \end{bmatrix}. \quad (5)$$

После получения оценок координат $\tilde{X}_p^{tj}$ для всех четырех меток производится оценка положения начала ССК $X_u^{t0} = (0,0,0)^T$ и единичного вектора ССК $X_u^{tx} = (1,0,0)^T$ в СК $Ox_p y_p z_p$. Оценка происходит аналогично (1-5), только вместо координат якорей X_p^{ai} используются полученные ранее оценки координат меток $\tilde{X}_p^{tj}$, а расстояния $d_{t_j a_i}^2$ заменяются для X_u^{t0} на $d_{t_0 t_j}^2 = x_u^{tj^2} + y_u^{tj^2} + z_u^{tj^2}$, а для X_u^{tx} на $d_{t_x t_j}^2 = (x_u^{tx} - x_u^{tj})^2 + y_u^{tj^2} + z_u^{tj^2}$. В результате получаются оценки координат $\tilde{X}_p^{t0}$ и $\tilde{X}_p^{tx}$. Полученная оценка координат $\tilde{X}_p^{t0}$ является искомым положением БПЛА в СК $Ox_p y_p z_p$.

Ориентация БПЛА определяется в несколько этапов. Сначала рассчитывается угол курса БПЛА согласно выражению:

$$\psi = \text{atan}(\tilde{y}_p^{t0} - \tilde{y}_p^{tx} / \tilde{x}_p^{t0} - \tilde{x}_p^{tx}), \quad (6)$$

где ψ – угол курса БПЛА относительно СК $Ox_p y_p z_p$.

Для нахождения углов ориентации БПЛА запишем систему уравнений (7), связывающих положения меток в ССК с их положениями в СК $Ox_p y_p z_p$:

$$X_p^{tj} = X_p^{t0} + R_p^u X_u^{tj}, \quad (7)$$

где $j = (\overline{1,4})$, $A = (\varphi, \theta, \psi)^T$ – углы крена, тангажа и курса БПЛА относительно СК $Ox_p y_p z_p$,

$$R_p^u = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\theta + c_\psi s_\theta s_\varphi & s_\psi s_\theta + c_\psi c_\theta s_\varphi \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\theta + s_\psi s_\theta s_\varphi & -c_\psi s_\theta + s_\psi c_\theta s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\theta c_\varphi \end{bmatrix}.$$

Исключим из системы (7) вектор X_p^{t0} , для чего из первого уравнения вычтем второе, а из третьего четвертое, после чего сложим получившиеся уравнения и приравняем их сумму к нулю:

$$X_p^{t1} - X_p^{t2} + X_p^{t3} - X_p^{t4} - R_p^u(X_u^{t1} - X_u^{t2} + X_u^{t3} - X_u^{t4}) = 0. \quad (8)$$

Уравнение вида (8) является существенно нелинейными и не может быть решено аналитически. Поэтому для определения ориентации БПЛА $A = (\varphi, \theta, \psi)^T$ используется метод наискорейшего спуска [10]. Начальное приближение $A_0 = (0, 0, \psi)^T$ вычисляется согласно (6).

Результаты моделирования

Для исследования качества разработанной системы навигации было проведено компьютерное моделирование. Движение БПЛА осуществлялось по следующим законам $x_p = 15 \sin(0.5t)$, $y_p = 17 \cos(0.5t)$, $z_p = 5 + 2 \sin(0.5t)$, при этом углы его ориентации менялись согласно выражениям $\varphi = 0.25 \sin(0.3t)$, $\theta = -0.38 \cos(0.4t)$, $\psi = 2.4 \sin(0.3t)$.

В помещении были установлены 8 якорей с координатами $X_p^{a1} = (20, 20, 10)^T$, $X_p^{a2} = (-20, 20, 10)^T$, $X_p^{a3} = (20, -20, 10)^T$, $X_p^{a4} = (-20, -20, 10)^T$, $X_p^{a5} = (20, 20, 0)^T$, $X_p^{a6} = (-20, 20, 0)^T$, $X_p^{a7} = (20, -20, 0)^T$, $X_p^{a8} = (0, 0, 0)^T$.

Результаты измерений дистанций от меток до якорей содержали случайную ошибку в пределах 0.05 м.

На рис. 2 показаны ошибки определения координат и углов ориентации БПЛА. Как видно из приведенных графиков, навигационная система обеспечивает точное определение пространственного положения и ориентации БПЛА. В процессе моделирования ошибка определения координат БПЛА не

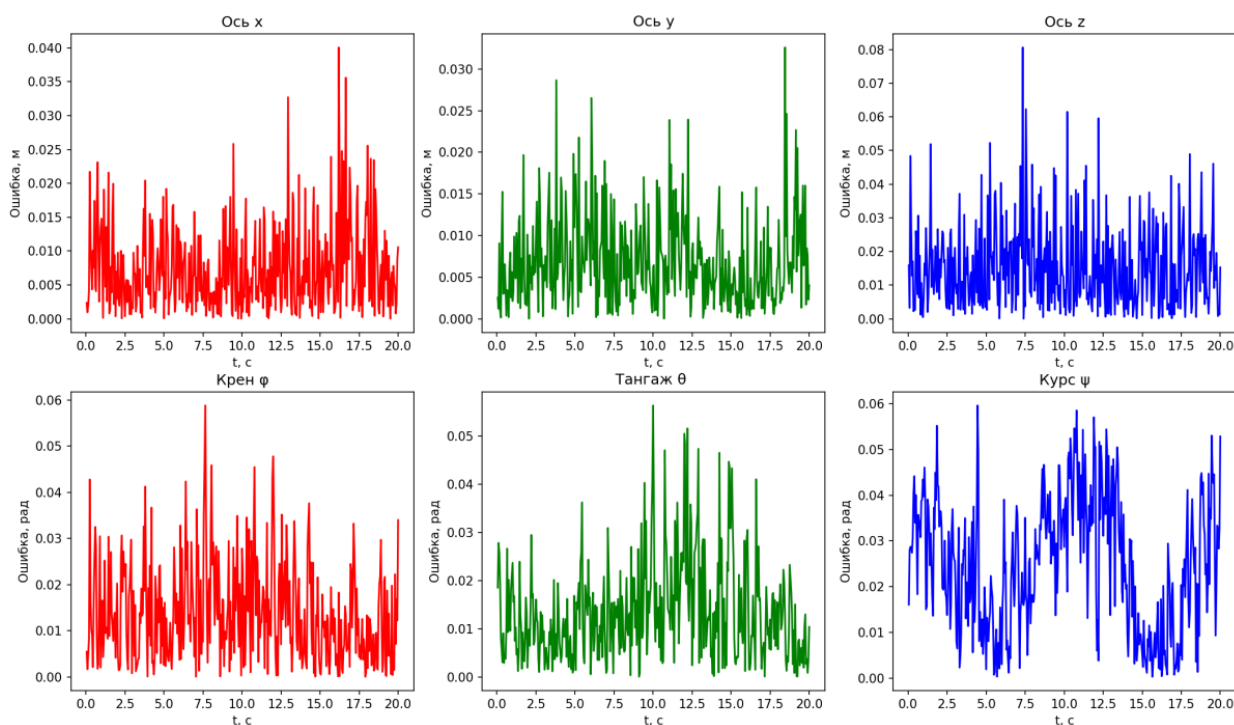


Рис. 2. Ошибки определения координат и углов ориентации БПЛА

превышала 0.08 м по каждой из осей. При этом ошибка определения углов ориентации сохранялась в пределах 0.06 рад для каждого из углов.

Таким образом, результаты моделирования показывают высокое качество работы предложенной навигационной системы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 24-29-00489).

Список литературы

1. Скрыпник О.Н., Нечаев Е.Е., Арефьев Р.О., Астраханцева Н.Г. Исследование точности совмещенного ГЛОНАСС/GPS приемника // Материалы докладов 25-ой Международной Крымской конференции. – Т. 1. – 2015. – С. 239-240.
2. Shao P., Mo F., Chen Y., Ding N., Huang R. Monocular Object SLAM using Quadrics and Landmark Reference Map for Outdoor UAV Applications. In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), Xining, China, 2021, pp. 1195–1201.
3. Yang S, Scherer SA, Yi X, Zell A. Multi-camera visual SLAM for autonomous navigation of micro aerial vehicles. Robot. Auton. Syst. 2017, 93, pp. 116–134.
4. Kumar, G.A. Patil, A.K. Patil, R. Park, S.S. Chai, Y.H. A LiDAR and IMU Integrated Indoor Navigation System for UAVs and Its Application in Real-Time Pipeline Classification. Sensors 2017, 17.
5. Luo H., Li G., Zou D., Li K., Li X., Yang Z. UAV navigation with monocular visual inertial odometry under GNSS-denied environment. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, vol. pp. 61, 1–15.
6. Gageik N, Strohmeier M, Montenegro S. An autonomous UAV with an optical flow sensor for positioning and navigation. Int. J. Adv. Robot. Syst. 2013, 10, 341.
7. Ponte S., Ariante G., Greco A., Del Core G. Differential Positioning with Bluetooth Low Energy (BLE) Beacons for UAS Indoor Operations: Analysis and Results. Sensors 2024, 24, 7170.
8. Yukhimets D.A., Naidanova I.E., Andrukhovsky N.V. Local Navigation System for a Robot Based on a Network of BLE Beacons. Proceedings of the Int. Russian Automation Conf., Sochi, Russia, 2024, pp. 663–668.
9. Gualda D., Ureña J., Pérez M. C., Posso H., Bachiller S., Nieto R. 3D Position Estimation of an UAV in Indoor Environments using an Ultrasonic Local Positioning System. 9th Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Nantes, France, 2018, 212808.
10. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 636 с.

АНАЛИЗ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ICP ДЛЯ SLAM

Аннотация: В данной работе рассмотрен алгоритм ICP для построения карты занятости, используемой в методе SLAM. Также приведены результаты тестирования данного алгоритма. При тестировании были взяты условия расчета позиции робота как на основе выходных данных ICP, так и с источником колесной одометрии. Тестирование алгоритма ICP производилось в самостоятельно написанной программе на языке программирования Python с использованием библиотек OpenCV и Numpy.

Ключевые слова: ICP, SLAM, карта занятости, скан, скан-матчер, одометрия.

R.S. Znamenskij, MA, senyor.it@yandex.ru

A.V. Gavrilov, T.D., associate professor, gavrilov@corp.nstu.ru

Novosibirsk Technical State University, Krasnoyarsk, Russia

ANALYSIS OF THE ICP ALGORITHM FOR SLAM

Abstract: In this paper, we consider the ICP algorithm for constructing an employment map used in the SLAM method. The results of testing of this algorithm are also given. During testing, the conditions for calculating the robot's position were taken both based on the ICP output data and with a source of wheel odometry. The ICP algorithm was tested in a self-written program in the Python programming language using the OpenCV and Numpy libraries.

Key words: ICP, SLAM, occupancy map grid, scan, scan-matcher, odometry.

Метод SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) предназначен для одновременной локализации робота и построения карты [7][8]. Существуют разные наборы карт для разных методов SLAM, в частности, карта занятости.

Карта занятости представляет собой дискретную сетку ячеек, где каждая ячейка отображает некоторую область в пространстве. Ячейки могут принимать значение вероятности нахождения препятствий от 0 до 1, где 0 означает, что на месте ячейки нет препятствий, а 1 – препятствие есть. Промежуточные значения также могут присутствовать на карте в качестве дополнительного источника информации при работе алгоритмов принятия ре-

шений, например, для ранее упомянутого планирования и построения маршрута.

ICP — это алгоритм регистрации облака точек, который используется для выравнивания двух облаков точек путем минимизации расстояния между соответствующими точками. Для решения задачи выравнивания (нахождение смещения и поворота) эвристический алгоритм не требуется, и уже доказано, что она решается с использованием выравнивания на основе SVD-разложения [5]. SVD — это метод факторизации матрицы, который представляет ее в виде произведения трех других матриц (Формула 1).

$$U, \Sigma, V^T, \quad (1)$$

где U — матрица размером m на m , содержащая левые сингулярные векторы, Σ — диагональная матрица размером m на n , содержащая сингулярные значения, V^T — транспонированная матрица V , которая имеет размер n на n и содержит правые сингулярные векторы.

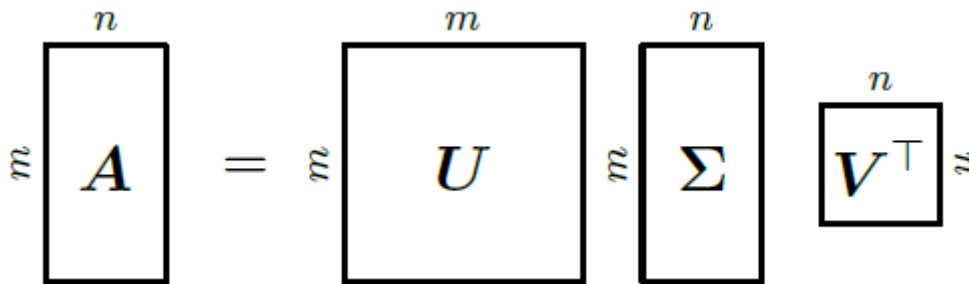


Рис. 1. Сингулярное разложение произвольной матрицы

Суть SVD для ICP заключается в том, что метод SVD находит «основные направления» данных и уровень «распространения» данных по этим направлениям (Формула 2) [12].

$$H = U \cdot \Sigma \cdot V^T. \quad (2)$$

Алгоритм минимизации расстояния нового скана с текущим математически иллюстрируется формулой 3, где $S = \{s_1, s_2, \dots, s_I\}$ — облако точек текущего скана, облако точек предыдущего скана $D = \{d_1, d_2, \dots, d_J\}$, а $C(s_i) = \{(i, j)\}$ — соответствие. Также необходимо найти вектор смещения t и матрицу поворота R , которые должны быть определены для минимизации суммы расстояний между всеми точками двух сканов. Затем операцию можно обозначить как F [5]:

$$F(C(S), S, D) = \min_{R, t} \sum_{i, j \in C} |d_i - R \cdot s_j - t|_2^2. \quad (3)$$

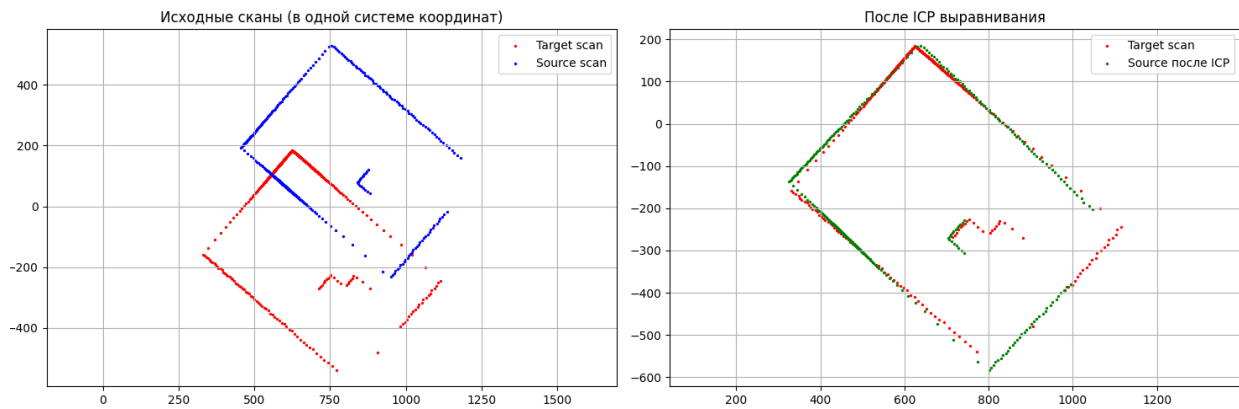


Рис. 2. ICP для двух сканов, сделанных в разных точках карты

Для тестирования метода ICP воспользуемся самостоятельно реализованной программой на языке программирования Python. Основная задача, которую решает написанная программа – генерация данных сканов лидара и их визуализация в процессе построения карты занятости при помощи реализованного метода ICP (рис. 3).

```
# Итерации ICP
for iteration in range(self.max_iterations):
    # Шаг 1: Применяем текущую трансформацию к source точкам
    transformed_source = self.transform_points(source_points, current_transformation)

    # Шаг 2: Находим ближайшие точки между transformed_source и target
    correspondences, distances = self.find_closest_points(transformed_source, target_points)

    if len(correspondences) < 3:
        print("Недостаточно соответствий для вычисления трансформации")
        break

    # Шаг 3: Вычисляем ошибку
    current_error = np.mean(distances ** 2)
    errors.append(current_error)

    # Шаг 4: Вычисляем новую трансформацию между source и target
    incremental_transformation = self.compute_transformation(correspondences)

    # Шаг 5: Обновляем общую трансформацию
    current_transformation = incremental_transformation @ current_transformation

    # Проверяем сходимость
    if iteration > 0 and abs(errors[-2] - errors[-1]) < self.tolerance:
        print(f"ICP сошелся на итерации {iteration}")
        break

return current_transformation, errors
```

Рис. 3. Фрагмент кода на Python, реализующий алгоритм метода ICP

Построим карту, двигаясь с некоторой угловой скоростью, используя только выходные данные (dx , dy , $d\theta$), полученные из ICP (рис. 4).

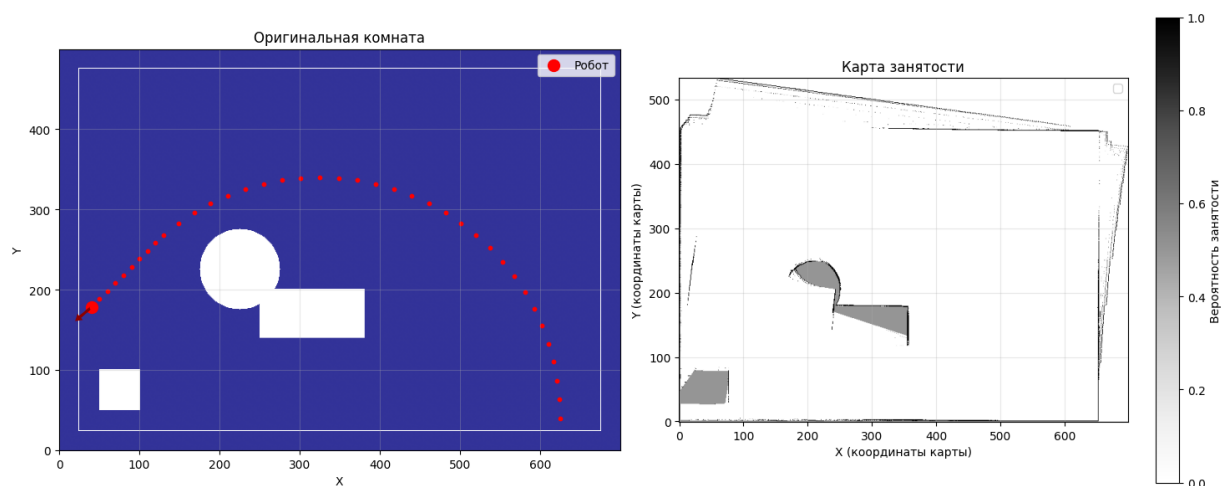


Рис. 4. Построение карты без колесной одометрии при движении с угловой скоростью

Построим карту, двигаясь с некоторой угловой скоростью, используя, колесную одометрию (рис. 5).

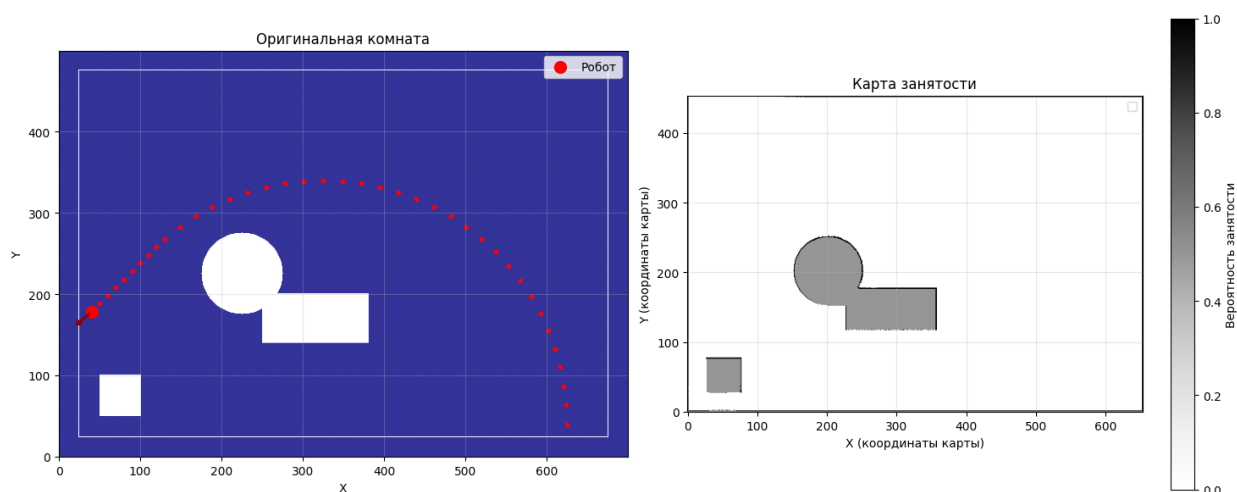


Рис. 5. Построение карты с колесной одометрией

В результате движения с угловой скоростью получаем сходимость ИСР, показанную на рис. 6. Данные о сходимости алгоритма ИСР показывают, что СКО асимптотически стремится к значению 5.

Поскольку данные сканов представляют собой массив расстояний до препятствий относительно позиции робота, откуда был сделан скан, то для нахождения новой позиции робота необходимо привести новый скан к системе координат текущего скана. Если на данном этапе появится ошибочная оценка позиции робота, то итоговая карта окажется построена с ошибкой.

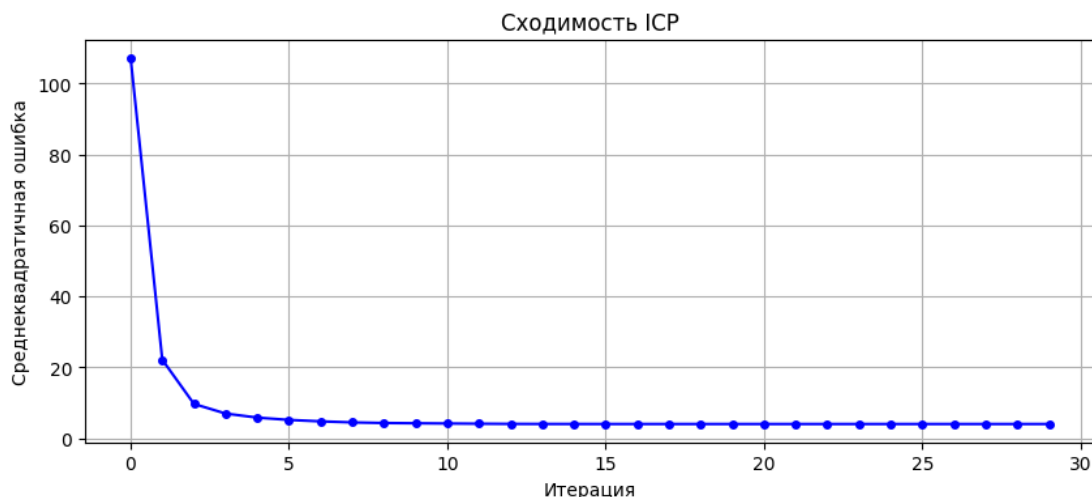


Рис. 6. Сходимость ICP при движении с угловой скоростью

В случае движения без колесной одометрии (рис. 4) карта имеет заметное искажение. Это связано с тем, что каждое новое положение робота и карта вычислялись с учетом позиции робота, найденной исключительно на основе сопоставления текущего и предыдущего скана. В таком случае при появлении выброса общий результат построения карты искажается, что явно отражено на рис. 4. Также, попадание алгоритма ICP в локальный минимум могло повлиять на результат построения карты.

Введение колесной одометрии помогло решить проблему. Такое изменение позволило избавиться от влияния выбросов ICP на построение карты, причем также снизилась и погрешность оценки положения робота в пространстве на каждом шаге построения карты.

В дальнейшем планируется усовершенствовать метод ICP, реализовав для него фильтр на основе отбраковки выбросов и метрики качества. Для уменьшения ошибки оценки положения робота в пространстве планируется ввести в использование дополнительный инерциальный измерительный блок для точного определения угловой скорости.

Список литературы

1. Global Dataset of Annual Urban Extents (2023) from Landsat Imagery / Y. Zhang, X. Yang, D. R. Donati, M. A. Friedl, C. Qiu // Remote Sensing. – 2023 – URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/11/2740/xml>
2. Murphy R. B. Introduction to AI Robotics / R. B. Murphy. — 2е изд. — Кембридж: MIT Press, 2019.
3. GitHub [Электронный ресурс]. «SLAM_Pose_Graph_Optimization». — Режим доступа: https://github.com/Swaroopainapurapu/SLAM_Pose_Graph_Optimization, - свободный.
4. GitHub [Электронный ресурс]. «slam_in_autonomous_driving». — Режим доступа: https://github.com/gaoxiang12/slam_in_autonomous_driving, - свободный.

5. Данилова С.Д. Разработка модели визуальной одометрии на основе сенсоров и анализа видеопотока // Computational Nanotechnology. 2024. Т. 11. № 1. С. 36–47. DOI: 10.33693/2313-223X-2024-11-1-36-47. EDN: DFHVNZ
6. Habr [Электронный ресурс]. «Визуальный SLAM: делаем HD-карты при помощи смартфона» – Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/innopolis/articles/653929/>, свободный.
7. Habr [Электронный ресурс]. «Vision-based SLAM: монокулярный SLAM» – Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/singularis/articles/277537/>, свободный
8. Labbé, M, Michaud, F. RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation. J Field Robotics. 2019.
9. Mathieu Labbé and François Michaud. Online Global Loop Closure Detection for LargeScale Multi-Session Graph-Based SLAM. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
10. Building Maps Using Google Cartographer and the OS1 Lidar Sensor [Электронный ресурс] URL: <https://ouster.com/blog/building-maps-using-google-cartographer-and-the-os1-lidar-sensor/>.
11. Adaptive Monte Carlo localization [Электронный ресурс] URL: <http://wiki.ros.org/amcl>.
12. Habr [Электронный ресурс]. «Детекция дефектов дорожного покрытия без размеченных данных: Хакатон, LiDAR, RANSAC, ICP и 44 бессонных часов» – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/765230/>

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ РЕСУРСЕ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация: Предложен новый метод формирования задающих воздействий для решения задачи построения программных траекторий движения робототехнических объектов с желаемой постоянной скоростью при наличии ограничений на управляющие сигналы. Метод позволяет автоматически обеспечивать наибольшее возможное значение модуля этой скорости, которое может быть реализовано в любой точке криволинейной траектории с учетом изменяющегося радиуса ее кривизны. При этом гарантируется сохранение требуемых ускорений по каждой координате в пределах указанных ограничений. Синтезировано задающее устройство, реализующее разработанный закон формирования программных воздействий с учетом конкретного вида траектории.

Ключевые слова: управление движением, скорость, ускорение, программные траектории, ограничение, робототехнический объект

A.V. Lebedev, Ph.D., lebedev@dvo.ru
Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, Russia

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF TRAJECTORY FORMATION FOR ROBOTIC OBJECTS MOTION UNDER LIMITED CONTROL RESOURCE

Abstract: A new method of setting signals formation is proposed for solving the problem of program trajectories constructing for robotic objects motion at a desired constant velocity under control signals saturation. The method provides automatically the highest possible absolute value of this velocity, which can be achieved at any point on a curved trajectory considering its changing radius of curvature. This method guarantees the maintenance of the required accelerations for each coordinate within given saturation. A command device is synthesized, which implements the developed law of program signals formation taking into account the specific type of given trajectory.

Key words: motion control, velocity, acceleration, program trajectories, saturation, robotic object

В настоящее время одной из важнейших проблем теории управления является обеспечение точного движения робототехнических объектов (подводных роботов, беспилотных летательных аппаратов и т.д.) с высокой скоростью по сложным пространственным траекториям [1-4].

В работе [5] предлагается разделять общую задачу управления движением объекта по заданной траектории в пространстве на подзадачи стабилизации системы относительно этой траектории и организации желаемого режима движения по ней за счет применения относительного и продольного управления. Однако при этом возникает необходимость построения различных, достаточно сложных законов формирования соответствующих управляющих воздействий.

Другим достаточно эффективным способом обеспечения требуемого пространственного движения робототехнических объектов является формирование задающих воздействий для отдельных каналов управления этим движением как параметрических уравнений заданных кривых (траекторий). В этом случае высокое качество управления обеспечивается за счет применения универсальных адаптивных или робастных законов управления по каждой степени подвижности объекта [6].

Дополнительную сложность при решении указанной проблемы управления представляет собой необходимость учета ограничений мощности исполнительных устройств. Разработке методов формирования скоростного режима движения по траекториям, реализуемым при наличии таких ограничений, посвящены, в частности, работы [7, 8].

Достаточно простой и эффективный метод построения произвольной траектории и обеспечения желаемого закона изменения скорости движения по ней динамического объекта предложен в статье [9]. Однако этот метод не учитывает ограничения на управляющие воздействия, которые приводят к искажению сформированной траектории при большой скорости движения.

В связи с этим целью данной работы является создание метода формирования таких траекторий движения робототехнических объектов и скоростей этого движения, для которых автоматически обеспечивается ограниченность ускорений по каждой пространственной координате.

Желаемая траектория движения центра масс робототехнического объекта в общем случае представляет собой некоторую пространственную кривую. В дальнейшем рассмотрим случай движения объекта в заданной плоскости, когда траектория его центра масс является плоской кривой. Как известно, такая кривая в абсолютной (неподвижной) декартовой системе координат однозначно определяется уравнением следующего вида:

$$y = g_y(x), \quad (1)$$

где x, y – декартовы координаты центра масс объекта, $g_y(x)$ – желаемая (нелинейная) функция переменной x , задающая конкретный вид траектории.

При выполнении многих ответственных исследовательских миссий и технологических операций (подводная фото- и видеосъемка, отслеживание протяженных подводных объектов, окраска сложных поверхностей, лазерная резка материала и т.д.) требуется обеспечить движение робототехнического объекта или его рабочего органа по криволинейной траектории с постоянной (по возможности наибольшей) по модулю контурной скоростью $|\dot{\nu}(t)| = k_\nu = \text{const}$ (где k_ν – заданный постоянный коэффициент).

При этом необходимым условием реализуемости формируемой траектории и желаемого значения k_ν скорости объекта является сохранение требуемых для этого ускорений внутри заданных диапазонов, определяемых ограничениями развиваемых движителями сил тяги.

Пусть некоторые функции $x = x(t)$, $y = y(t)$ удовлетворяют уравнению (1), т.е. при подстановке в это уравнение обращают его в тождество относительно t . Тогда они являются параметрическими уравнениями кривой (1) и определяют требуемые законы изменения декартовых координат центра масс объекта во времени.

Задача формирования желаемой траектории (1) движения центра масс объекта сводится таким образом к определению указанных функций, которые в дальнейшем могут быть использованы в качестве задающих сигналов для подсистем управления по каждой его степени подвижности.

Как отмечено в работе [9], при отсутствии каких-либо дополнительных требований искомая функция $x = x(t)$ может быть выбрана произвольно (например, $x = t$), а функция $y = y(t)$ в этом случае должна быть сформирована в соответствии с уравнением (1) в виде $y = g_y(x(t))$.

Однако в этом случае не контролируются скорость и ускорение при движении объекта по сформированной траектории, не гарантируется выполнение перечисленных выше условий, и возможно возникновение ситуаций, когда требуемые управляющие сигналы превышают имеющиеся ограничения. Как следствие, в условиях ограниченного ресурса управления исполнительные органы оказываются неспособны обеспечить точное движение объекта по желаемой траектории с заданной скоростью.

Для учета ограничений, накладываемых на управление, сформулируем дополнительные требования к функциям $x = x(t)$, $y = y(t)$ в виде неравенств для проекций $a_x(t) = d^2x/dt^2$, $a_y(t) = d^2y/dt^2$ вектора ускорения $a(t)$ центра масс объекта на оси декартовой системы координат:

$$|a_x(t)| \leq a_{x \max}, \quad |a_y(t)| \leq a_{y \max}, \quad (2)$$

где $a_{x \max}$, $a_{y \max}$ – наибольшие возможные значения ускорений, которые могут быть обеспечены движителями по каждой степени подвижности объекта.

Далее разработаем метод формирования функций $x = x(t)$, $y = y(t)$ как параметрических уравнений кривой (1), который автоматически обеспечивал бы наибольшее возможное значение $k_\nu = k_{\nu \max}$ модуля скорости движения объекта по траектории (1) без нарушения неравенств (2).

Прежде всего отметим, что для постоянства модуля скорости $|\nu(t)| = k_v$ необходимо и достаточно обеспечить равенство нулю тангенциального ускорения a_τ в любой точке формируемой траектории, т.е. гарантировать, что $a_\tau(x) = 0$ при любом x . Из указанного условия следует требование равенства полного вектора ускорения $a(x)$ и нормального ускорения $a_n(x)$ при любом x (в любой момент времени t при движении вдоль заданной кривой).

При этом для неизменного сохранения формы траектории необходимо и достаточно, чтобы в любой ее точке (при любом x) выполнялось условие:

$$a_n(x) = k_{tr}(x)k_v^2, \quad (3)$$

где $k_{tr}(x)$ – кривизна траектории (1), определяемая в точке с координатой x .

Как известно, кривизна траектории вычисляется по формуле следующего вида (здесь и далее для обозначения производной по координате используем символ «штрих»):

$$k_{tr}(x) = |g''_y(x)|(1 + (g'_y(x))^2)^{-3/2}. \quad (4)$$

Подставим (4) в выражение (3), заменив при этом $|g''_y(x)|$ на $g''_y(x)$ для корректного определения в дальнейшем направления проекций нормального ускорения на выпуклых вниз или вверх участках траектории (т.е. фактически используя так называемую ориентированную кривизну плоской кривой), и в результате будем иметь:

$$a_n(x) = g''_y(x)k_v^2(1 + (g'_y(x))^2)^{-3/2}. \quad (5)$$

Теперь получим выражения для определения проекций вектора ускорения $a_x(x)$, $a_y(x)$ при заданном x через $a_n(x)$ с учетом условия $a(x) = a_n(x)$.

Пусть в произвольной точке траектории вектор скорости $\nu(t)$ составляет с осью Ox некоторый угол α . Не снижая общности рассуждений, будем полагать, что движение центра масс объекта по траектории (1) происходит в положительном направлении оси Ox . В этом случае, очевидно, справедливо неравенство $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$. Тогда выполняются соотношения:

$$a_x(x) = -a_n(x)\sin\alpha, \quad a_y(x) = a_n(x)\cos\alpha. \quad (6)$$

Выразим по известным тождествам $\sin\alpha$ и $\cos\alpha$ через $\operatorname{tg}\alpha$, примем во внимание равенство $\operatorname{tg}\alpha = g'_y(x)$ для угла α наклона касательной к кривой (1) и перепишем соотношения (6) в следующем виде:

$$\begin{aligned} a_x(x) &= -a_n(x)g'_y(x)(1 + (g'_y(x))^2)^{-1/2}, \\ a_y(x) &= a_n(x)(1 + (g'_y(x))^2)^{-1/2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставим в выражения (7) соотношение (5) и окончательно получим:

$$\begin{aligned} a_x(x) &= -g'_y(x)g''_y(x)k_v^2(1 + (g'_y(x))^2)^{-2}, \\ a_y(x) &= g''_y(x)k_v^2(1 + (g'_y(x))^2)^{-2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для удобства введем в рассмотрение вспомогательную функцию $G(x)$:

$$G(x) = g''_y(x)(1 + (g'_y(x))^2)^{-2}. \quad (9)$$

Принимая во внимание выражения (8), (9) и учитывая, что $g'_y(x)$, $g''_y(x)$ и $G(x)$ в силу зависимости $x = x(t)$ неявно представляют собой функции време-

ни, определим $x(t)$, $y(t)$ как решения дифференциальных уравнений второго порядка следующего вида:

$$d^2x/dt^2 = -G(x(t))g'_y(x(t))k_v^2, \quad d^2y/dt^2 = G(x(t))k_v^2. \quad (10)$$

Важно отметить, что функции $g'_y(x)$, $g''_y(x)$ однозначно определяются из соотношения (1) и не зависят от скорости $v(t)$ движения центра масс объекта по траектории. Поэтому при заданной форме траектории (1) выражения (8) в явном виде однозначно определяют зависимость проекций ускорения, требуемых для ее реализации, от величины k_v модуля этой скорости.

Поэтому для автоматического соблюдения ограничений (2) в процессе движения по формируемой траектории достаточно предварительно выбрать такое желаемое значение $k_v \leq k_{v \max}$, при котором наибольшие значения величин $|a_x(x)|$, $|a_y(x)|$, рассчитанных в соответствии с выражениями (8) для любой точки траектории (любого момента времени t), не выходят за пределы этих ограничений.

В общем случае для этого требуется с учетом конкретного вида функции $g_y(x)$ найти на всем заданном диапазоне изменения координаты x наибольшие значения $y_{1 \max}$ и $y_{2 \max}$ функций $G(x)$ и $G(x)g'_y(x)$, соответственно. Затем следует рассчитать значение $k_{v \max}$ в соответствии с выражением:

$$k_{v \max} = \min((a_{x \max}/|y_{2 \max}|)^{1/2}, (a_{y \max}/|y_{1 \max}|)^{1/2}). \quad (11)$$

Уравнения (9), (10) представляют собой законы формирования задающих сигналов $x = x(t)$, $y = y(t)$ для системы управления движением центра масс объекта, которые обеспечивают, при условии расчета $k_{v \max}$ согласно соотношению (11), построение программной траектории этого движения в соответствии со всеми установленными выше требованиями.

Структурная схема устройства формирования желаемой траектории, построенная на основе выражений (9), (10), приведена на рис. 1. Здесь с помощью обозначений $g'_y(x)$, $g''_y(x)$ условно показаны блоки, реализующие соответствующие функциональные зависимости, $s = 1$ – постоянный сигнал.

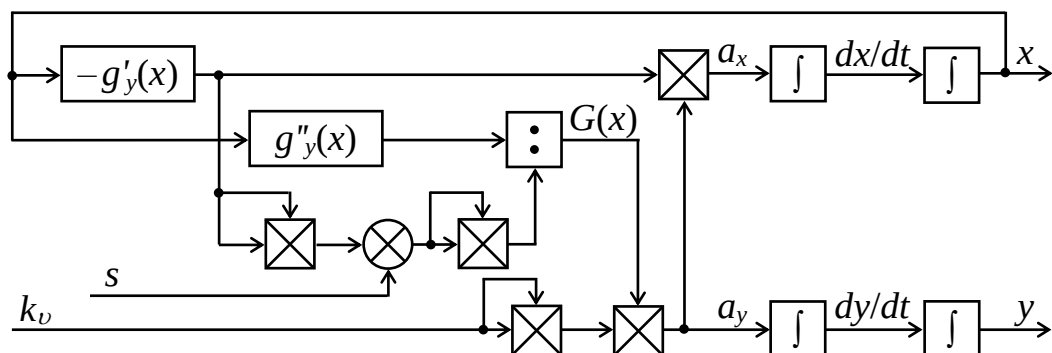


Рис. 1. Структурная схема устройства формирования траектории

Отметим, что в данном устройстве должна быть реализована возможность перенастройки для реализации разных функций $g'_y(x)$, $g''_y(x)$ при построении различных траекторий.

Результаты численного моделирования работы синтезированного устройства при формировании траекторий разного вида, в частности, задаваемых функциями $g_y(x) = x^2$ и $g_y(x) = \sin x$, подтвердили эффективность предложенного метода.

Таким образом, в работе создан метод и синтезировано устройство для формирования программных воздействий по отдельным степеням подвижности робототехнического объекта как параметрических уравнений заданных траекторий, позволяющие автоматически обеспечивать наибольшее возможное значение желаемой постоянной скорости движения по этим траекториям в условиях ограниченного ресурса управления.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема №FWFW-2025-0002).

Список литературы

1. Zhou B., Pan J., Gao F., Shen S. Raptor: Robust and Perception-Aware Trajectory Replanning for Quadrotor Fast Flight // IEEE Transactions on Robotics. 2021. Vol. 37, Iss. 6. pp. 1992-2009.
2. Ren Y. et al. Safety-Assured High-Speed Navigation for MAVs // Science Robotics. 2025. Vol. 10, Iss. 98. pp. 61-87.
3. Jiang C. et al. An Improved S-Plane Controller for High-Speed Multi-Purpose AUVs with Situational Static Loads // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, Iss. 3. Art. No. 646.
4. Chen P., Yu L., Guo K., Qiao L. Fast and Accurate Trajectory Tracking Control for Underactuated AUVs with Mismatched Disturbances: Theory and Experiment // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2025. Vol. 72, Iss. 8, pp. 8312-8321.
5. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
6. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов. – М.: Наука, 2005. – 270 с.
7. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов управления движением подводного аппарата по сложным пространственным траекториям // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 99-107.
8. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. – Владивосток: Дальнаука, 2016. – 400 с.
9. Lebedev A.V. Synthesis of Desirable Trajectories of Dynamic Objects Spatial Movement // Proceedings of the Sixth IASTED International Conference on Intelligent Systems and Control. Honolulu, HI, USA. 2004. С. 36-39.

Д.А. Новикова, магистрант, novikovadarya13@gmail.com
Г.И. Толоконников, магистрант, useful.georgeous@mail.ru
Г.Э. Рего, к.т.н., доцент ПМиК, regoGr@yandex.ru
Ю.В. Суханов, к.т.н., доцент ТЛКиЛА, yv_sukhanov@petrsu.ru
Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ВЫРАЩИВАНИЯ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ

Аннотация: В рамках межинститутского взаимодействия реализуется проект по автоматизации ряда технологических операций лесных питомников. Для задач детектирования целевых сеянцев, их количества в ячейках кассеты и сорных растений применяется нейронная сеть YOLO11n. Разработана конструкция опытного образца исполнительного механизма, позволяющего как перемещать камеру для сбора изображений, так и для переносить рабочий орган в виде лазерного диода, позволяющего удалять сорные и лишние целевые растения

Ключевые слова: контейнеризированные сеянцы, сорные растения, нейронные сети, YOLO11n, лазерное удаление растений, микроконтроллерное управление

D.A. Novikova, Master's student, novikovadarya13@gmail.com
G.I. Tolokonnikov, Master's student, useful.georgeous@mail.ru
G.E. Rego, Ph.D., Associate Professor of PMiK, regoGr@yandex.ru
Yu.V. Sukhanov, Ph.D., Associate Professor of TLKiLA, yv_sukhanov@petrsu.ru
Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

PROCESSES AUTOMATION FOR GROWING CONTAINERIZED TREE SEEDLING

Abstract: As part of the interinstitutional cooperation, a project is being implemented to automate a number of technological operations of forest tree nurseries. The YOLO11n neural network is used to detect target seedlings, their number in cassette cells, and weeds. The design of a prototype executive mechanism has been developed, which allows both moving the camera to collect images and transferring the laser diode, which allows removing weeds and excess target plants

Key words: container seedlings, weeds, neural networks, YOLO11n, laser plant removal, MCU control

В настоящее время активизация межинститутского/межфакультетского сотрудничества становятся актуальной задачей при работе над учебными и исследовательскими проектами в учебном заведении, так как подобное взаимодействие позволяет находить новые подходы и свежие решения, а для студентов разных направлений обучения, участвующих в подобных практико-ориентированных проектах, это возможность развития их межпрофессиональных компетенций. В Петрозаводском государственном университете в течение уже нескольких лет ведётся плодотворное взаимодействие между Институтом математики и информационных технологий и Институтом лесных, горных и строительных наук по тематике цифровизации лесной отрасли [1,2].

Одним из направлений совместной работы является разработка современных компьютеризированных решений, способных автоматизировать процессы выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой (ЗКС) в условиях лесных питомников закрытого грунта. Посадочный материал с ЗКС становится всё более востребован при лесовосстановлении, так как действующие Правила [3] предписывают не менее 30% площадей искусственного или комбинированного восстановления производить посадочным материалом с ЗКС. Сегодня в Российской Федерации 277 питомников, занимающихся выращиванием посадочного материала с ЗКС [4] и их число будет расти. На Европейской части России наиболее востребованными для задач лесовосстановления являются такие хвойные древесные породы как сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и ель европейская/обыкновенная (*Picea abies* L. Karst.). Сеянцы выращиваются в специальных кассетах, имеющих отдельные ячейки, заполненные субстратом, для каждого сеянца, например, в кассетах на 121 ячейку с размерами ячейки 33x33x73 мм (рис. 1).

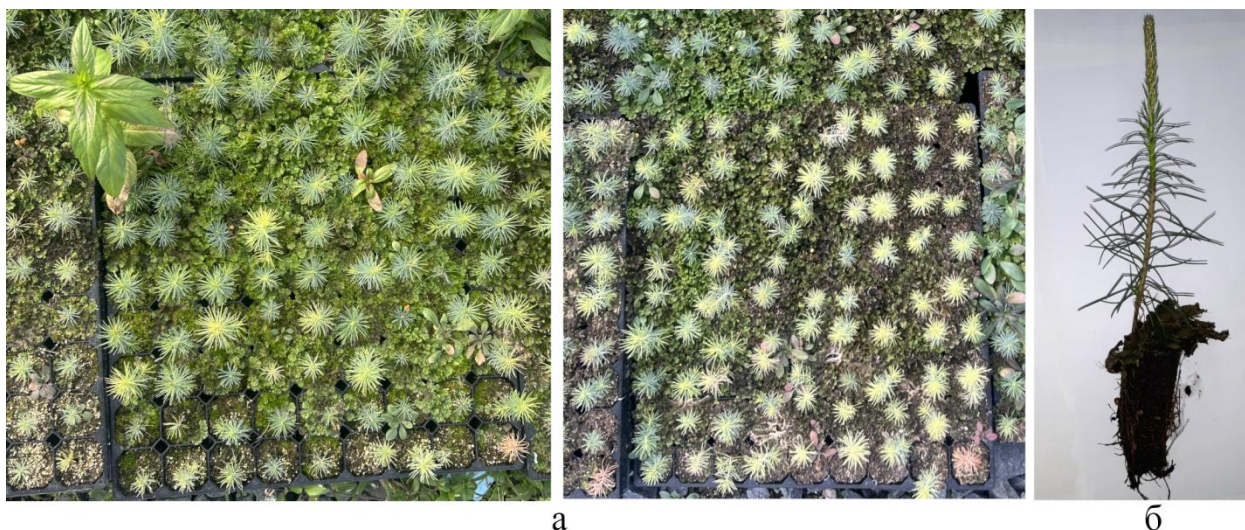


Рис. 1. Сеянцы в кассетах (а) и выращенный сеянец (б) ЛССЦ «Вилга»

Технология выращивания в данных питомниках достаточно хорошо механизирована [5], но все ещё остаётся большая доля тяжёлого и монотонного ручного труда на таких операциях как прополка сорняков и пикировка сеянцев. Из-за того, что не каждый год урожайный на семена, часто для посадки сеянцев используют семена прошлых лет сбора, что отрицательно влияет на их всхожесть. Поэтому при посадке в ячейку кассеты может закладываться не одно, а несколько семян, что далее требует прореживания и дополнения всходов. Если в ячейке всходит сразу несколько семян, то лишние ростки надо убрать и оставлять только один сеянец, при этом в те ячейки, где ничего не взошло, подсаживают эти лишние ростки. Микроклимат в теплице, создаваемый для выращивания сеянцев целевых пород, благоприятен для сорняков и болезней. Сорняки успешно конкурируют с сеянцами за ресурсы (воду, свет и питательные вещества), угнетая их рост, а борьба с сорняками не только благоприятно сказывается на росте сеянцев, но и снижают риск их заболеваний и появления вредителей. Данные операции производятся вручную, они дорогостоящие и не всегда возможно их провести вовремя и в нужном объёме. Часто на эти сезонные работы приглашают местных жителей, которые могут не являться профессионалами в подобной деятельности.

Целью проводимого исследования является проработка методов, позволяющих автоматизировать часть работ, требующих утомительного ручного труда при выращивании сеянцев с ЗКС в условиях теплиц. На семинарах в ходе обсуждений было предложено проработать решение, включающее две стадии: детектирование растений и борьба с нежелательными растениями. Для первой стадии было предложено изучить возможность использования технологий нейронных сетей и компьютерного зрения для распознавания и отделения отдельных сеянцев в кассетах от сорняков. Для второй стадии требовалось изучить перспективные технологии для автоматизированной борьбы с сорняками, применяемые в сельском хозяйстве. На подготовительном этапе был проведён обзор литературы, проведены работы по предварительному сбору данных, которые могут понадобиться для машинного обучения моделей, проведён анализ методов борьбы с нежелательными растениями и протестировано воздействие мощного лазерного диода на сорные и целевые растения [6].

Изображения с камеры будут передаваться в нейронную сеть YOLO11n (You Only Look Once) в рамках фреймворка Ultralytics. Выбор данной модели обусловлен её относительно малой вычислительной сложностью и компактностью, что является значимым фактором для развёртывания на устройствах с ограниченными ресурсами. После обработки нейронной сетью на изображениях будут отмечены сеянцы и сорняки в контейнерах, разделённых на ячейки. Координатам центра каждого найденного целевого и сорного растения должны записываться для дальнейшей работы исполнительного механизма по удалению растения. Как показала практика, сложно классифицировать сеянцы на изображении пока они совсем маленькие и когда их несколь-

ко в ячейке, а классификация сорняков осложнена тем, что они значительно разнятся по внешнему виду: как по форме и размерам листа, так и по форме всего сорного растения.

Эти сложности порождают неопределённость, как в локализации целей, так и в оценке результата воздействия, для решения задачи перспективным представляется применение методов обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL). RL – это парадигма машинного обучения, в которой агент обучается оптимальной политике π (policy). Политика $\pi(a | s)$ является распределением вероятностей выбора действия в каждом состоянии. Оптимизировать политику, значит максимизировать математическое ожидание суммарной дисконтированной награды:

$$R_t = E[\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1}], \quad (1)$$

где r_t – вознаграждение в момент времени t ; k – порядковый номер будущего шага от текущего момента t ; $\gamma \in [0,1]$ – коэффициент дисконтирования, который определяет степень предпочтения текущего вознаграждения перед будущими вознаграждениями.

Для каждого изображения после детекции YOLO формируется состояние среды через множество объектов $O_t = \{o_1, o_2, \dots, o_N\}$, где каждый объект o_i описывается вектором признаков $o_i = (x_i, y_i, V_i, c_i, d_i, p_i)$, в котором:

- x_i, y_i – координаты центра ограничивающего прямоугольника;
- V_i – площадь объекта;
- $c_i \in \{\text{саженец, сорняк}\}$ – класс объекта;
- d_i – расстояние до ближайшего целевого сохраняемого растения;
- $p_i \in [0; 1]$ – уверенность детекции.

Состояние среды в момент t задаётся как

$$s_t = \{O_t, L_t, u_t\}, \quad (2)$$

где L_t – текущая позиция исполнительного механизма; $u_t = (u_1, \dots, u_N)$ – вектор числа попыток воздействия по каждому объекту (сколько раз его уже пытались удалить).

Полученное состояние s_t будет подаваться на вход RL-агенту, задачей которого является определение оптимальной последовательности удаления объектов. Пространство действий A будет включать операции выбора растения, параметров воздействия исполнительного механизма и решения «удалить/двигаться/остановиться». Состоянием среды будет являться текущая пространственная конфигурация сеянцев и сорняков в контейнере, а вознаграждение r_t будет положительным за корректное удаление сорняка или лишнего побега и отрицательным за ошибочное удаление культурного растения и попытку удаления растения из ячейки, содержащей единственный сеянец.

Вместо многократного анализа изображений после каждого удаления предлагается стратегия последовательного прохода по всем сорнякам, чтобы лазер произвёл удаление по координатам. После завершения прохода прини-

мается решение о необходимости повторного удаления отдельных сорняков, которые не удалились за первый проход. Это можно описать как частично наблюдаемый марковский процесс принятия решений, где агент оперирует не полной информацией о состоянии s_t , а наблюдением z_t . Такое наблюдение должно содержать вероятностные оценки классов, координаты объектов и состояний ячеек $b_j \in \{0, 1, \geq 2\}$, где j – индекс ячейки; 0 – нет семян; 1 – один сеянец; ≥ 2 – несколько сеянцев, на момент времени t . На рис.2 представлена схема работы предлагаемой системы.

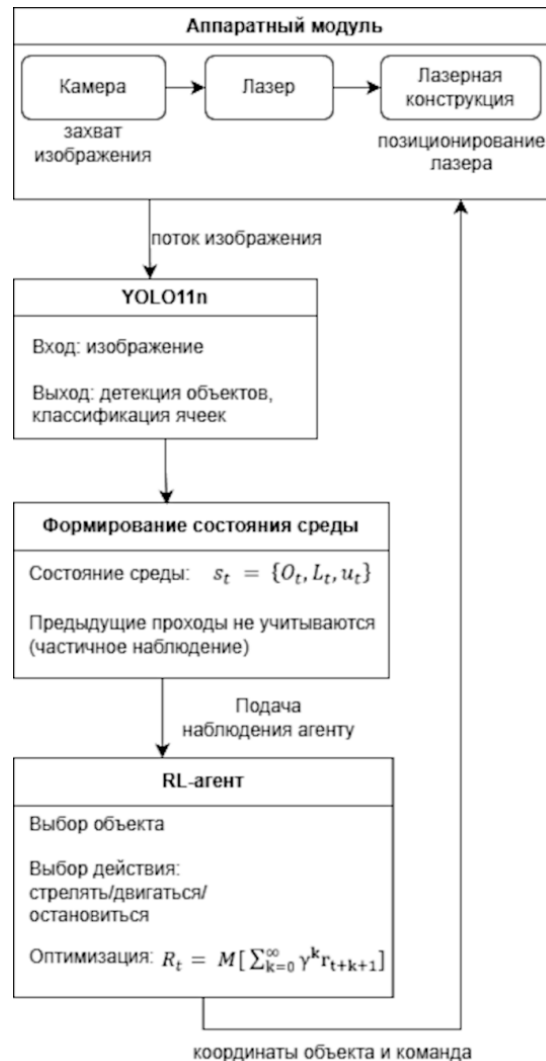


Рис. 2. Схема работы предлагаемой системы

Если в ячейке кассеты не найдено сеянцев, то координаты ячейки записываются и передаются специалистам питомника для дальнейшей пикировки. Если в ячейке найдено более одного семца, то выбирается самый крупный сеянец, а количество менее развитых сеянцев и их координаты записываются и передаются специалистам питомника. Специалисты питомника принимают решение сколько из лишних сеянцев надо сохранить для пикировки в пустые ячейки. Остальные лишние сеянцы по команде специалистов удаляются ис-

полнительным механизмом по сохраненным координатам. Также необходимо удалять сорные растений, которые конкурируют с культурными растениями за ресурсы.

В качестве опытного образца исполнительного механизма в проекте изготавливается переносная рама, которая устанавливается над кассетами с сеянцами. Опытный образец будет применяться для отработки конструкции и алгоритма работы. Рама изготавливается из алюминиевого профиля и соединяется посредством деталей, напечатанных на 3D-принтере (рис. 3). На первом этапе рама позволит перемещать камеру над сеянцами по осям X и Y посредством передач винт-гайка, приводимых от шаговых двигателей, управляемых микроконтроллером через драйвера. Для перемещения по оси X используется два шаговых двигателя, а по оси Y – один.

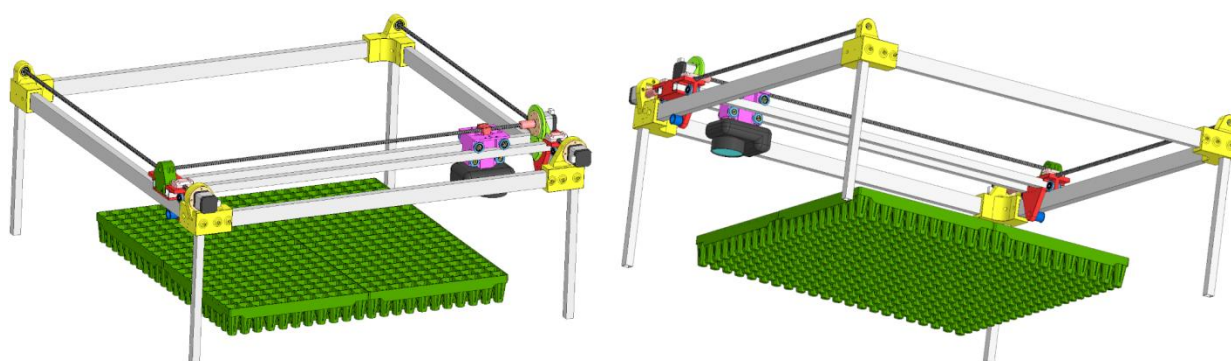


Рис. 3. Опытный образец исполнительного механизма

На втором этапе планируется, что на раму к камере будет навешен лазерный указатель. Это позволит моделировать воздействие на растения, отмечая их красной точкой указателя без фактического воздействия на них. Такая симуляция позволит создавать синтетические эпизоды для обучения RL-агента и проводить доменную рандомизацию, варьируя освещение, фокус, влажность, углы обзора и погрешности позиционирования лазера, так как перемещение устройства в заданные координаты может производиться с некоторой ошибкой. Это позволит добиться устойчивости модели к дрейфу условий и обеспечить возможность безопасного дообучения по логам реальных испытаний без необходимости полной перекалибровки между культурами, сезонами и стадиями роста. На третьем этапе на раму будет устанавливаться уже более мощный лазер, который позволит удалять растения. Для фокусировки лазера на растении будет реализовано его перемещение по оси Z . RL-агент будет передавать координаты целевого объекта лазерному прореживателю, который осуществит удаление после срабатывания механизма подтверждения корректности выбора.

В дальнейшем доработанный исполнительный механизм может устанавливаться на поливочную рампу теплицы, применяемую для равномерного полива и внесения удобрений.

Список литературы

1. Научный семинар Центра искусственного интеллекта // Официальный сайт ПетрГУ. 14 июня 2023 года. [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://petrsu.ru/news/2023/120726/nautchnyi-seminar-ts>. Дата посещения: 02.12.2025
2. Итоги научного семинара Центра искусственного интеллекта // Официальный сайт ПетрГУ. 19 июня 2025 года. [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://petrsu.ru/news/2025/149624/itogi-nautchnogo-sem>. Дата посещения: 02.12.2025
3. Приказ Минприроды России от 29.12.2021 № 1024 «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления». [Электронный ресурс]: режим доступа - publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202202110024. Дата посещения: 02.12.2025
4. Российские лесопитомники в 2024 г. планируют вырастить порядка 340 млн сеянцев с закрытой корневой системой // АО «РосБизнесКонсалтинг» (РБК). 19 декабря 2023. [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://marketing.rbc.ru/articles/14521/>. Дата посещения: 02.12.2025
5. Бобушкина С. В., Сеньков А. О., Файзулин Д. Х. Практика выращивания лесного посадочного материала с закрытой корневой системой применительно к тепличным комплексам архангельской области // Вопросы лесной науки. 2020. №4. С. 1-16. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-16>
6. Гаврилов К. В. Перспективы автоматизации выращивания сеянцев с закрытой корневой системой в лесных питомниках // StudArctic Forum. – 2025. – Т. 10, № 3. – С. 76-81. – EDN LBVKOH

Б.А. Самаке, магистрант, bsamake-ki25@stud.sfu-kras.ru

г. Бамако, Республика Мали

А.В. Чубарь, к.т.н., доцент, Achubar@sfu-kras.ru

С.В. Ченцов, д.т.н., профессор, schentsov@sfu-kras.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОМ ДРОБИЛКИ

Аннотация: Рассмотрена модель системы автоматического управления теплообменником для регулирования температуры смазочной жидкости дробилки в золотодобывающей промышленности. Модель создана в среде SimInTech и включает два контура — нагрев и охлаждение. Цель исследования заключается в поддержании температуры в оптимальном диапазоне. Полученные результаты позволяют оценить стабильность системы и её применение для надёжности оборудования.

Ключевые слова: теплообменник, температура, регулирование, SimInTech, смазочная жидкость

B.A. Samake, magister, bsamake-ki25@stud.sfu-kras.ru

A.V. Chubar, **Cand.Sc.**, associate professor, Achubar@sfu-kras.ru

S.V. Chentsov, **Dr. of eng. sc.**, professor, schentsov@sfu-kras.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

MODELING AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF A CRUSHER HEAT EXCHANGER

Abstract: A model of an automatic control system for a heat exchanger regulating the lubricant temperature of a crusher used in gold mining is presented. The model was developed in the SimInTech environment and includes two control loops — heating and cooling. The aim of the study is to maintain the lubricant temperature within an optimal operating range. The results obtained make it possible to assess the stability of the system and its potential use for improving equipment reliability.

Key words: heat exchanger, temperature, regulation, SimInTech, lubricant¹

В процессе функционирования дробилки выделяется тепловая энергия, которая может привести к снижению производительности оборудования, и увеличению простоев [1].

Для решения этой проблемой переменяем терморегулирование [2]. В контуре смазки дробилки предельное значение температуры(T) смазочной жидкости от 20 до 110 °С [3]. При T ниже 20 °С масло становится слишком вязким, а при T выше 60 °С увеличивается вероятность выхода оборудования из рабочего состояния [2,4,3]. Оптимальным является диапазон от 38 до 54°С [2].

Для обеспечения стабильности и надёжности системы определяем 40–50 °С, что соответствует максимальной эффективности работы теплообменника.

Для поддержания температуры в этой зоне мы установили целевую температуру $T_{\text{треб}}$ 45°С и допуск $T_{\text{зона}}$ 5°С. Эта настройка позволяет системе обеспечить таким образом стабильную работу в диапазоне (45 ± 5°С).

Таблица 1. Основные параметры
Значение

Параметр	Значение
Минимальная температура	20°С
Максимальная температура	110 °С
Заданная температура	45 °С
Зона регулирования	5 °С

Модель реализована в SimInTech, и представляет собой два основных регулятора и набор вычислительных блоков. Схема моделирования в целом представлена на рисунке (Рис. 1).

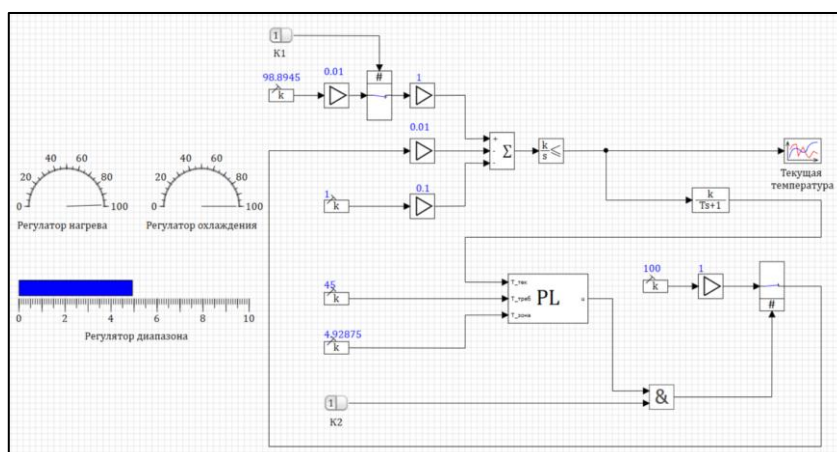


Рис. 1. Модель системы автоматического управления теплообменником

Из рисунка 1 видно, что процесс начинается в контуре нагрева. Регулятор нагрева настраивается от 0 до 100 и включается через K_1 . Горячая тем-

пература проходит через усилитель с коэффициентом 1 и подается на положительный вход сумматора.

Минимальные и максимальные возможные температуры (20 и 110) определены в блоке интегратор с ограничением « $k/s \leq$ ».

Сигнал с этого интегратора переходит динамический блок $k/(Ts+1)$, моделирующий тепловую инерцию системы, и поступает в блок программирования, где также получают заданные температуры $T_{\text{треб}}$ и $T_{\text{зона}}$.

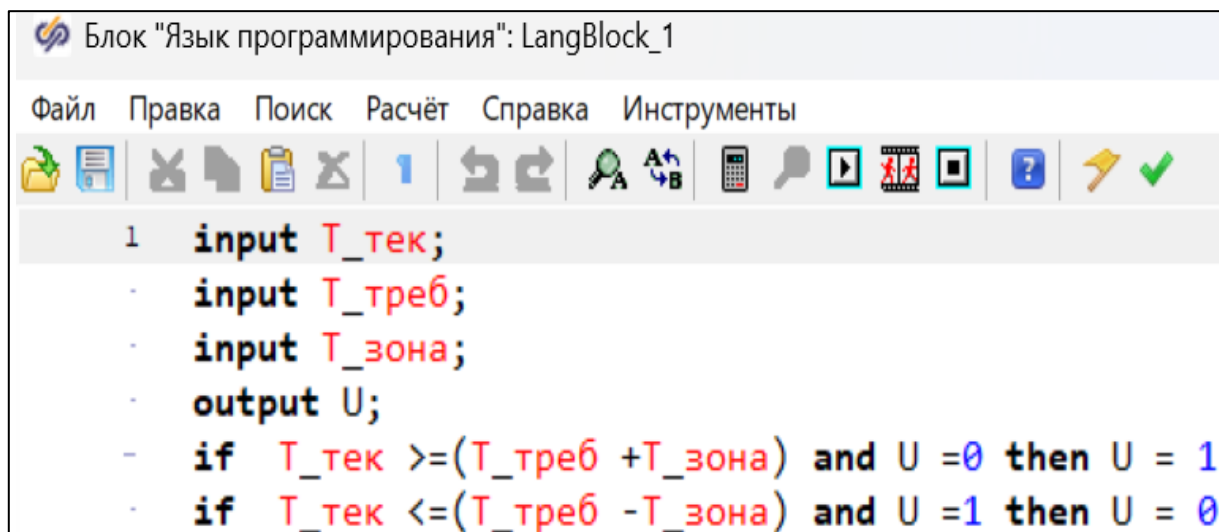
Логика позволяет давать команду на включение или выключение регулятора до прибытия сигнала в контур охлаждения. А Оператор (&) обеспечивает связь с системой охлаждения.

Так же, как и нагрев, контур охлаждения включается, используя K_2 , и его регулятор настраивается от 0 до 100.

Таким образом $T_{\text{тек}}$ направляется к сумматору через усилитель с коэффициентом 0,01, и отображается на графике.

Для проведения экспериментов есть возможность задать другие значения $T_{\text{зона}}$ с помощью регулятора диапазона, настроенного от 0 до 10.

На рисунке 2 скрипт, который позволяет автоматически включать нагрев или охлаждение в зависимости от заданных порогов.



```
1  input T_тек;
   input T_треб;
   input T_зона;
   output U;
   if T_тек >=(T_треб +T_зона) and U =0 then U = 1
   if T_тек <=(T_треб -T_зона) and U =1 then U = 0
```

Рис. 2. Логика включения нагрева и охлаждения

При запуске системы температура смазки начинает нагреваться. Когда достигает верхний диапазон 50 °С, автоматически включается охлаждение и охлаждается до нижнего предела диапазона 40 °С. Таким образом, обеспечивается циклическое поддержание температуры в безопасной зоне (Рис. 3).

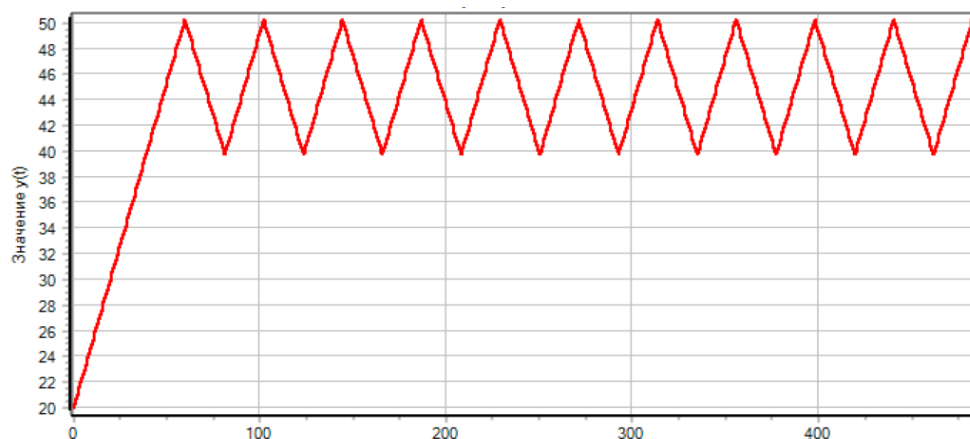


Рис. 3. Поддержание температуры в оптимальном диапазоне

Если одна из кнопок режимов отключена, система выходит из равновесия (Рис. 4). При выключенном охлаждении происходит перегрев до 110°C (Рис. 4). А при выключенном нагрева — переохлаждение до 20°C (Рис. 5).

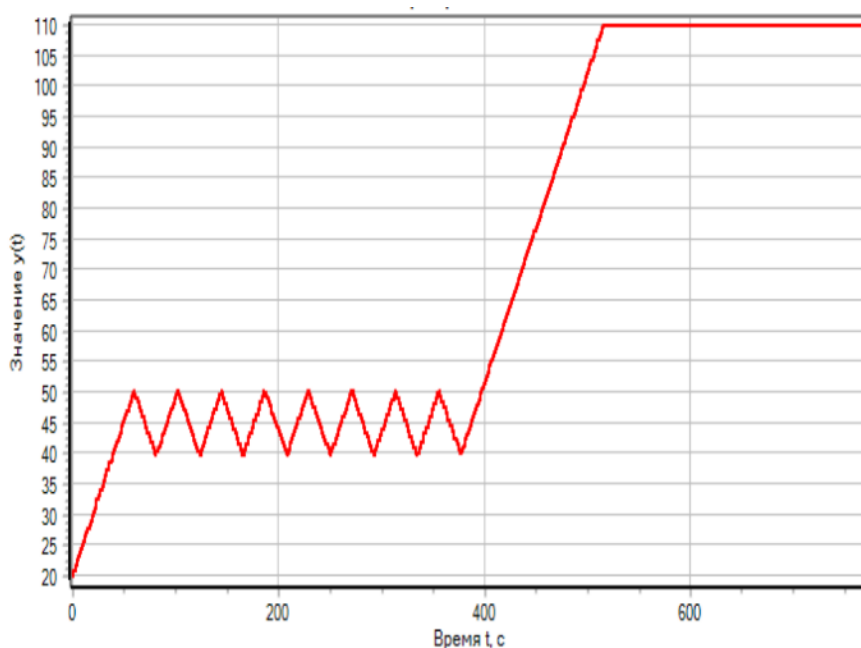


Рис. 4. Наблюдение перегрева до 110°C

В ходе выполнения работы реализована модель системы автоматического управления системы теплообменником в контуре смазки дробилки. Модель демонстрирует возможность поддерживать температуру смазки в оптимальном диапазоне стабильности работы. Её можно использовать как основу для дальнейшей работы надежности горного оборудования.

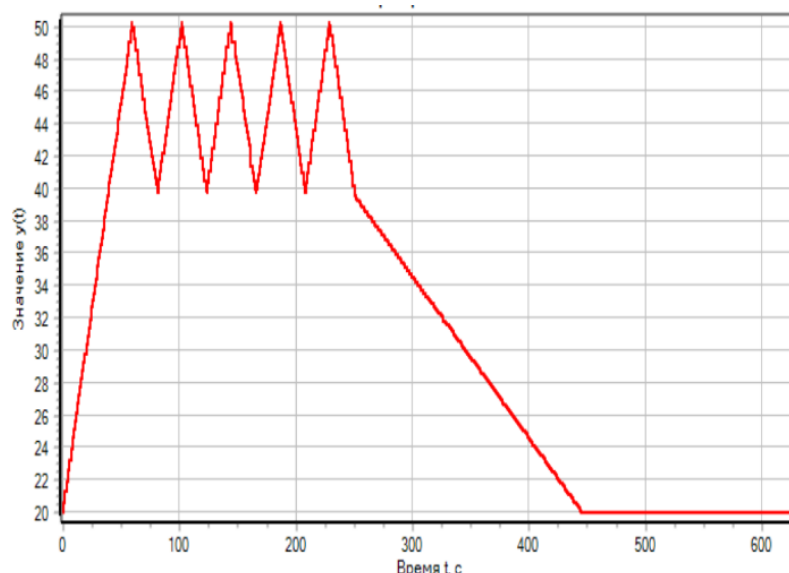


Рис. 5. Наблюдение переохлаждения до 20 °С

Список литературы

1. BERG. The Role of Heat Exchangers in Industrial Cooling Systems. 2023[Электронный ресурс] Режим доступа: <https://berg-group.com/blog/the-role-of-heat-exchangers-in-industrial-cooling-systems>
2. Metso Minerals. Five Steps for Optimal Performance of Crusher's Lubrication System. WJ Parts, 2024 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.wj-parts.com/news/five-steps-for-optimal-performance-of-crusher-lubrication-system/>
3. Tkáč Z., Kosiba J., Skladaný D., Nagy M., Jablonický J., Tulík J., Čurgaliová G., Danis S. Degradation Processes of Transmission–Hydraulic Fluid During an Operational Trial., 2025. <https://doi.org/10.3390/lubricants13110477>

Т. Е. Филиппов, магистрант, filiptim@yandex.ru
М. Е. Филиппова, ст.преподаватель, m.e.filippova@urfu.ru
А. А. Тарасьев, ст.преподаватель, andrej.tarasyev@urfu.ru
Е.К. Аксенова, магистрант, wiper99@mail.ru
К.А. Аксенов, к.т.н., доцент, k.a.aksenov@urfu.ru
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ НА ОСНОВЕ Q-LEARNING

Аннотация: В статье рассматривается применение алгоритмов искусственного интеллекта для задач интеллектуальной автоматизации управления ресурсами в сложных системах. На примере автоматизированной системы обработки запросов показана реализация Q-learning агента, динамически оптимизирующего распределение вычислительных ресурсов. Предложена архитектура интеграции AnyLogic-моделей с Python-библиотеками машинного обучения через Pyplain.

Ключевые слова: AnyLogic, Q-learning, Pyplain, интеллектуальные системы

T. E. Filippov, student, filiptim@yandex.ru
M. E. Filippova, senior lecturer, m.e.filippova@urfu.ru
A. A. Tarasyev, senior lecturer, andrej.tarasyev@urfu.ru
E.K. Aksenova, student, wiper99@mail.ru
K.A. Aksenov, associate professor, k.a.aksenov@urfu.ru
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

INTELLIGENT AUTOMATION SYSTEM FOR RESOURCE MANAGEMENT BASED ON Q-LEARNING

Abstract: The article discusses the application of artificial intelligence algorithms for the tasks of intelligent automation of resource management in complex systems. Using the example of an automated query processing system, the implementation of a Q-learning agent that dynamically optimizes the allocation of computing resources is shown. An architecture for integrating AnyLogic models with Python machine learning libraries via Pyplain is proposed.

Keywords: AnyLogic, Q-learning, Pyplain, intelligent systems

Современные сложные системы требуют интеллектуальных подходов к управлению. AnyLogic - это ведущая платформа имитационного моделиро-

вания[1], но ее встроенные методы оптимизации часто не справляются с динамически изменяющимися условиями.

Интеграция машинного обучения с имитационными моделями открывает новые возможности, но остается сложной задачей. Библиотека Pyplain[2,3] решает эту проблему, создавая мост между AnyLogic и Python.

Цель работы - разработка метода интеграции обучения с подкреплением с моделями AnyLogic через Pyplain. На примере управления контактным центром демонстрируется создание адаптивной системы управления.

Для эксперимента была разработана имитационная модель контактного центра в среде AnyLogic. Модель воспроизводит процесс обработки входящих звонков с учетом их категориальной принадлежности и включает следующие структурные элементы:

- Источник запросов (Source) - генерирует входящие звонки с экспоненциальным распределением времени между поступлениями;
- Распределитель запросов (SelectOutput) - классифицирует звонки на три категории:
 - обычные (60% потока),
 - важные (20% потока),
 - технические (20% потока);
- Блоки обслуживания (Service) - три параллельных канала обслуживания, каждый со своей очередью и количеством операторов. Клиент покидает очередь, если время ожидания превышает 3 минуты модельного времени;
- Точки выхода (Sink) - фиксируют завершение обслуживания для удовлетворенных и ушедших клиентов;
- Переменные для мониторинга состояния системы:
 - operatorsBasic, operatorsPremium, operatorsTech - количество операторов по категориям;
 - abandonedBasic, abandonedPremium, abandonedTech - количество клиентов, покинувших очередь

Ключевой особенностью модели является интеграция с Python-окружением через модуль PyCom библиотеки PyPLAIN. Данный модуль добавляет возможность использования кода, изначально написанного на python, без необходимости переноса на Java. Для использования кода в AnyLogic используются следующие команды:

- pyCom.run() - выполнение Python-кода в контексте модели;
- pyCom.runResults() – возврат запрашиваемых переменных из среды выполнения Python в AnyLogic;

Механизм обучения активируется событием с периодичностью в одну минуту модельного времени, что обеспечивает регулярное взаимодействие RL-агента со средой и поэтапное обучение методом Q-learning[4, 5].

Данная модель со всеми связями показана на рисунке 1.

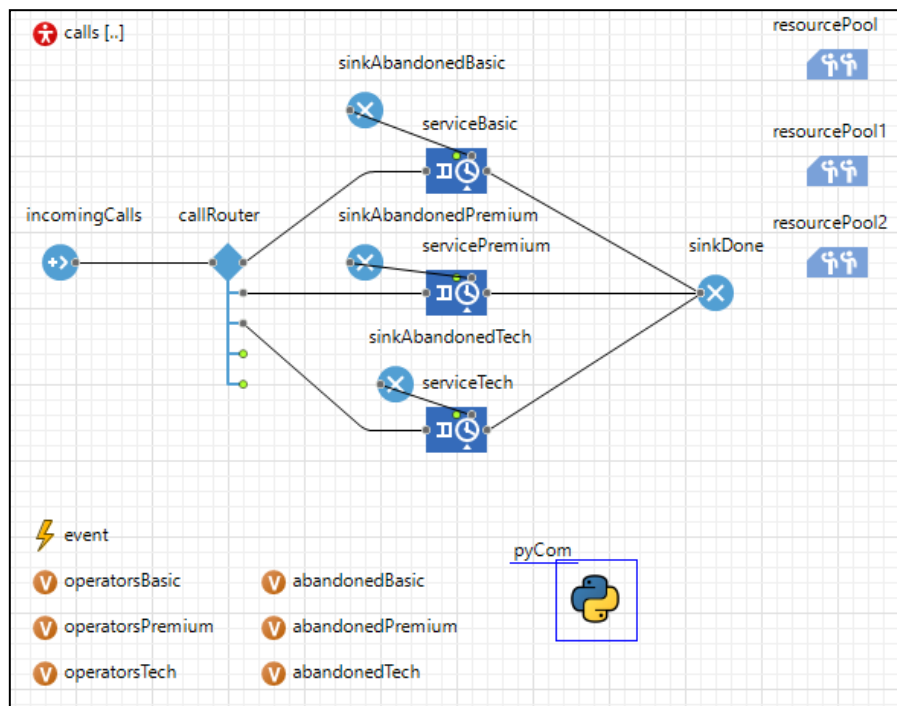


Рис. 1. Модель системы в AnyLogic

Для использования в данной модели методов машинного обучения был написан код на языке программирования python, который представляет из себя набор функций для реализации методов обучения с подкреплением, а именно метода Q-Learning.

Для обучения агент использует девяти-мерный вектор в качестве входных данных. В данном векторе содержится информация о количестве людей в каждой очереди, о количестве операторов и количестве ушедших клиентов.

Агент может выбирать одно из семи действий, список которых представлен ниже:

- 1) Добавить базового оператора;
- 2) Убрать базового оператора;
- 3) Добавить премиум оператора;
- 4) Убрать премиум оператора;
- 5) Добавить технического оператора;
- 6) Убрать технического оператора;
- 7) Не предпринимать действий.

После выбора действия агент возвращает следующие данные:

- 1) Индекс выбранного действия;
- 2) Новые значения операторов после применения.

Новые значения операторов поступают в среду AnyLogic, меняя в ней соответствующие переменные и как следствие количество операторов, которые могут обрабатывать звонки.

Спустя время python-окружению передаются новое состояние системы, высчитывается награда для данного действия и данная информация заносится в Q-table, которая сохраняется отдельным файлом.

Награда для python агента вычисляется по формуле (1):

$$R(s, a, s') = -\alpha * A - \beta * Q - \gamma * O + * D, \quad (1)$$

где:

- s – это предыдущее состояние системы;
- s' – это новое состояние;
- a – это действие, совершаемое агентом;
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – это коэффициенты важности параметров;
- A – это изменение количества ушедших клиентов;
- Q – это изменение длины очереди;
- O – это текущее количество операторов;
- D – это изменение количества обслуженных клиентов.

Благодаря такой формуле агент постоянно стремится к обслуживанию максимального количества клиентов с минимальными затратами на содержание операторов, а штраф за необслуженных клиентов позволяет настроить насколько остро реагирует на потерю клиентов.

В итоге с помощью встроенных функций Anylogic было проведено 850 экспериментов для обучения агента, которые длились два часа модельного времени и имели следующее количество операторов в начале:

- три базовых оператора;
- один премиум оператор;
- два технических оператора;

В отличие от этапа обучения, где интервалы между звонками следовали стохастическому распределению, для валидации эффективности обученного агента были проведены эксперименты с детерминированными входными потоками, при которых поступает один звонок в одну минуту модельного времени, всего за один эксперимент поступает 120 звонков.

Результаты проведенных экспериментов показаны в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов

№	Входные параметры				Результаты работы			
	Наличие агента	Стартовое количество операторов			Обслуженные клиенты	Не обработанные звонки		
		Базовые	Премиум	Тех.		Базовые	Премиум	Тех.
1	False	1	1	1	38	58	8	10
2	False	3	1	2	74	29	9	1
3	False	5	5	5	106	4	0	0
4	True	1	1	1	97	5	2	6
5	True	3	1	2	104	7	1	0
6	True	5	5	5	89	20	1	1

Графическая интерпретация результатов показана на рисунке 2.

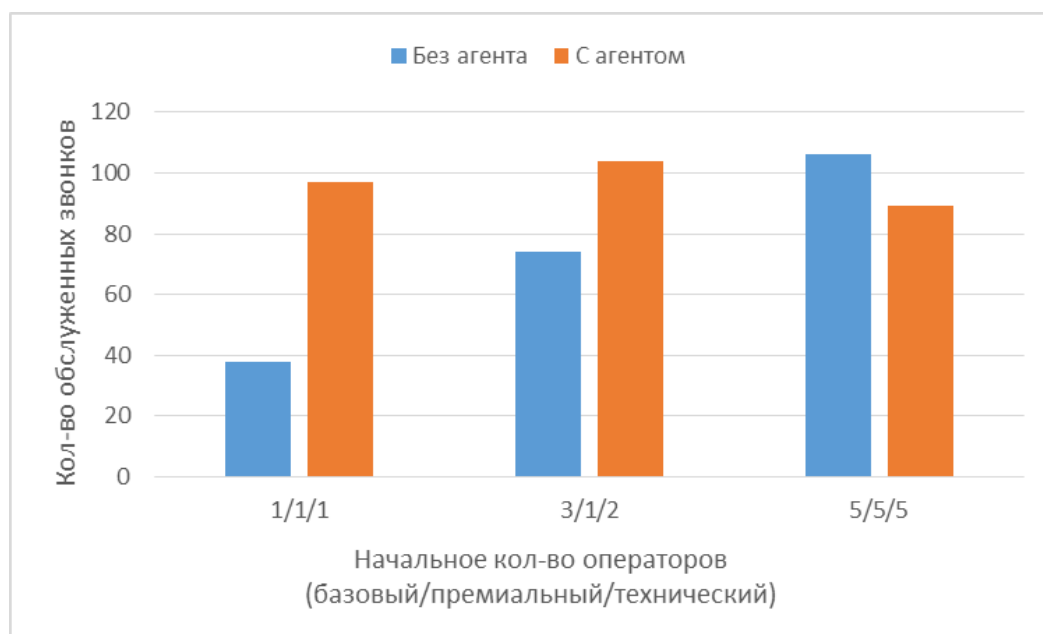


Рис. 2. Графическая интерпретация результатов

Из таблицы и графической интерпретации видно, что влияние агента позволило в большинстве случаев обслужить большее количество звонков, кроме эксперимента с количеством начальных операторов равным 5 для каждого, это связано с тем, что агент сосредоточился сначала на оптимизации количества операторов.

В результате была подтверждена работоспособность системы и библиотеки Pyplain, показав устойчивое и корректное взаимодействие между средами AnyLogic и Python, которое позволило агенту учиться регулировать количеством операторов во время работы модели, а сохранение Q-table в отдельном файле позволяет продолжать обучение при повторных запусках модели.

Разработанная система наглядно демонстрирует возможность создания интеллектуальной адаптивной системы на основе интеграции AnyLogic и методов машинного обучения, написанных на языке Python.

В качестве перспективного направления дальнейших исследований рассматривается внедрение нейросетевых архитектур в систему управления имитационными моделями AnyLogic через интерфейс Pyplain. Планируется сравнительный анализ эффективности deep reinforcement learning алгоритмов (Deep Q-Networks, Policy Gradient methods) относительно классического Q-learning в контексте адаптивного управления сложными динамическими системами.

Список литературы

1. Документация AnyLogic [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://anylogic.help/ru/> (дата обращения: 20.12.2025).
2. Using Python in AnyLogic Models [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://www.anylogic.ru/features/artificial-intelligence/pypeline/> (дата обращения: 23.12.2025).
3. Выстраиваем стабильное соединение для обучения с подкреплением на Python на моделях AnyLogic [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/823508/> (дата обращения: 23.12.2025).
4. Introducing Q-Learning [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://huggingface.co/learn/deep-rl-course/unit2/q-learning> (дата обращения: 25.12.2025).
5. Mnih V. et al. "Human-level control through deep reinforcement learning" // Nature. - 2015. - Vol. 518. - P. 529-533.
6. Padillo J.J. et al. "Integration of machine learning and simulation in AnyLogic" // Winter Simulation Conference. - 2021.
7. Borshchev A. "Simulation and Machine Learning: The Perfect Match" // AnyLogic Blog. - 2020.

А.В. Чубарь, к.т.н., доцент, Achubar@sfu-kras.ru
М.С. Загайнов, студент, michaelzagainoff@yandex.ru
Е.Б. Юрова, студент, ekaterinayurova205@yandex.ru
Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия

СИНТЕЗ ПИД-РЕГУЛЯТОРА МЕТОДОМ ЦИГЛЕРА-НИКОЛЬСА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕГО ПАРАМЕТРОВ В СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH

Аннотация: В работе исследуется процесс синтеза ПИД-регулятора для системы стабилизации ориентации искусственного спутника Земли с использованием среды SimInTech. Рассмотрена настройка параметров регулятора по методу Циглера-Никольса и выполнена их последующая оптимизация методом наискорейшего спуска. Проведено моделирование системы управления с различными конфигурациями регулятора и выполнено сравнение полученных результатов по критериям качества переходных процессов.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, метод Циглера-Никольса, оптимизация параметров, SimInTech, система управления, искусственный спутник Земли.

A.V. Chubar, Cand.Sc., associate professor, Achubar@sfu-kras.ru
M.S. Zagainov, student, michaelzagainoff@yandex.ru
E.B. Yurova, student, ekaterinayurova205@yandex.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

SYNTHESIS OF PID CONTROLLER USING ZIEGLER-NICHOLS METHOD AND OPTIMIZATION OF ITS PARAMETERS IN SIMINTECH SIMULATION ENVIRONMENT

Abstract: This paper investigates the process of PID controller synthesis for the orientation stabilization system of an artificial Earth satellite using the SimInTech environment. The tuning of controller parameters using the Ziegler-Nichols method is considered, followed by their optimization using the steepest descent method. Simulation of the control system with various controller configurations was performed, and the results were compared according to transient quality criteria.

Key words: PID controller, Ziegler-Nichols method, parameter optimization, SimInTech, control system, artificial Earth satellite.

Проектирование систем автоматического управления — важнейший этап создания технических устройств, для которого сегодня эффективно применяются среды моделирования, такие как SimInTech. Эта среда позволяет визуализировать схемы, объединять модели, отрабатывать алгоритмы и генерировать управляющие программы. Особенностью SimInTech является использование базы сигналов для обмена данными, что упрощает создание многоуровневых моделей и объектно-ориентированное проектирование.

Широкое применение ПИД-регуляторов обусловлено их универсальностью и эффективностью, однако их корректная настройка требует учета динамики объекта и методов оптимизации. Встроенные инструменты SimInTech автоматизируют синтез дискретных ПИД-регуляторов, адаптируя их к микропроцессорным системам. В данной работе исследуется процесс синтеза регулятора в этой среде и оцениваются методы его оптимизации на примере конкретной технической системы.

По заданной математической модели автономного объекта необходимо реализовать в среде SimInTech синтез ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса и реализовать оптимизацию параметров регулятора. Также необходимо осуществить реализацию регуляторов и произвести настройку их параметров, и, затем, сравнить полученные результаты.

В качестве объекта управления рассматривается система управления угловым положением искусственного спутника Земли (рис. 1).

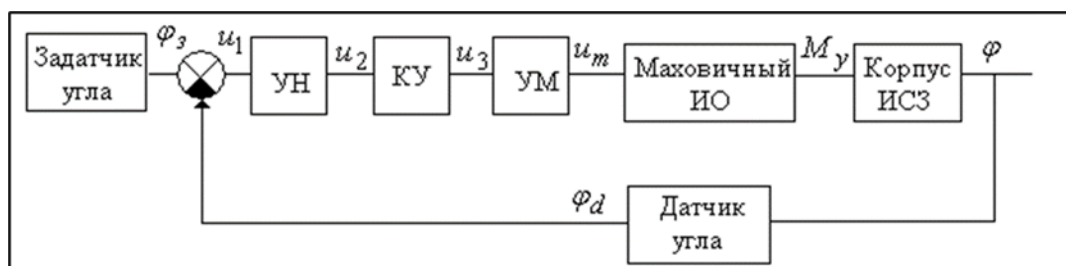


Рис. 1. Система управления угловым положением искусственного спутника Земли

В качестве исходной информации для построения математической модели используется структурное описание исследуемого объекта и его параметры. В рамках данной работы в качестве примера рассматривается система стабилизации ориентации корпуса искусственного спутника Земли, реализованная с использованием программного моделирования.

Соберём динамическую модель системы в среде SimInTech по дифференциальным уравнениям её элементов.

Рассмотрим корректирующее устройство:

$$T_{\text{кy}} \frac{du_3}{dt} + u_3 = k_{\text{кy}} \cdot \frac{du_2}{dt}$$

Воспользовавшись преобразованием Лапласа, получим передаточную функцию устройства:

$$W_1 = \frac{u_3}{u_2} = \frac{k_{ky} * p}{T_{ky} * p + 1} = \frac{0.05 * p}{6 * p + 1}$$

Аналогично преобразуем дифференциальные уравнения других элементов.

Передаточная функция маховичного исполнительного органа:

$$W_2 = \frac{M_y(p)}{\varphi(p)} = \frac{k_{uo} * k_{oc} * p}{T_{uo} * p + 1} = \frac{2 * 60 * p}{10 * p + 1}$$

Передаточная функция корпуса ИСЗ:

$$W_3 = \frac{1}{T_{ИСЗ} * p^2} = \frac{1}{2000 * p^2}$$

Также в системе присутствуют усилитель мощности и усилитель напряжения имеющие коэффициенты 20 и 2 соответственно. Соберём схему в среде SimInTech. На рис. 2 представлена структурная схема системы автоматического управления.

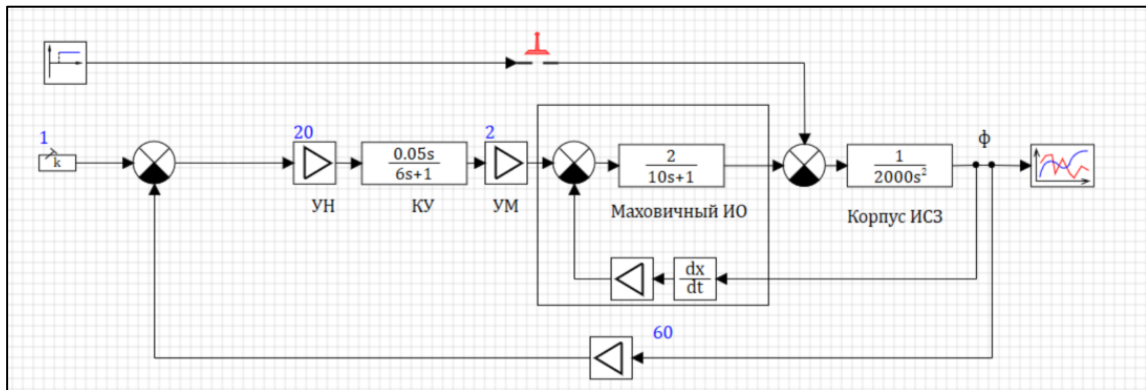


Рис. 2. Структурная схема САУ

Результат моделирования системы представлен на рис. 3.

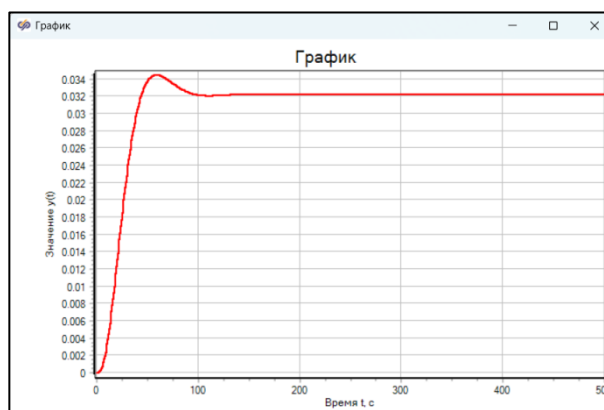


Рис. 3. Кривая регулирования

В схему, показанную на рис. 2, вставим субмодель реализующую ПИД-регулятор. Произведем настройку ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса. Для этого определим $K_p^* = 151.25$ — значение коэффициента пе-

редачи, при котором система находится на колебательной границе устойчивости и $T^* = 41.87$ с.— период установившихся в системе колебаний.

Тогда значения параметров ПИД-регулятора рассчитываются по формулам:

$$K_{\Pi} = 0.6 \cdot K_{\Pi}^*; K_{\text{и}} = 1.2 \cdot \frac{K_{\Pi}^*}{T^*} \text{ и } K_{\text{д}} = 0.075 \cdot K_{\Pi}^* \cdot T^*.$$

В результате получаем: $K_{\Pi} = 90.75$; $K_{\text{и}} = 4.335$ и $K_{\text{д}} = 474.963$. Кривая регулирования примет вид, показанный на рис. 5.

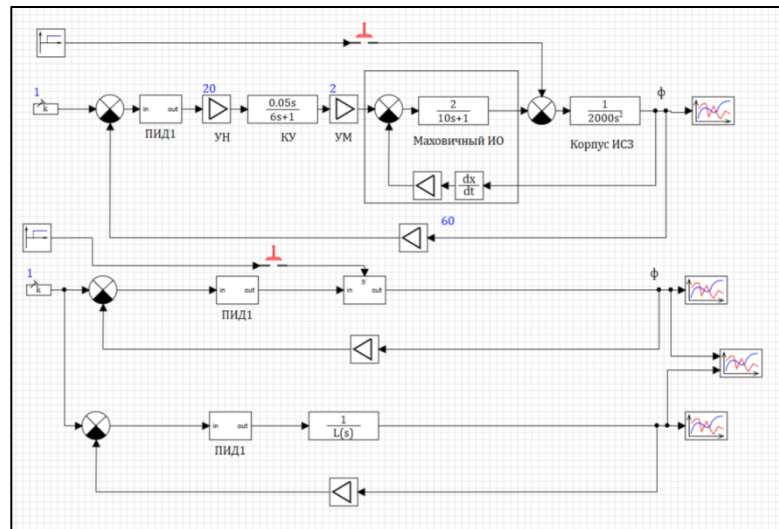


Рис. 4. Синтез ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса

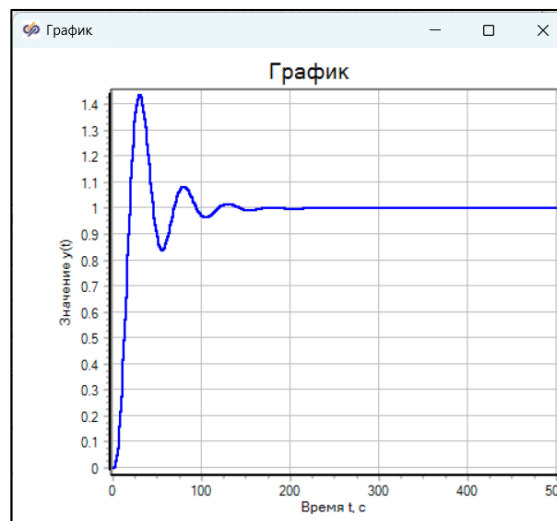


Рис. 5. Кривые регулирования схемы с ПИД-регулятором (красный — исходная схема; зелёный — субмодель; синий — схема с эквивалентной W_{rc})

Проведем оптимизацию параметров регулятора в SimInTech. Для этого соберем схему, показанную на рис. 6. Реализация дискретного ПИД-регулятора в модели предусматривает использование специализированного вычислительного модуля субмодели, в котором применяется встроенный компонент для расчета управляющего воздействия на основе трёхзвенной ар-

хитектуры коррекции. Интервал дискретизации установлен на уровне 0,001 с; для определения оптимальных параметров вычислительной схемы задействуется стандартная процедура поиска параметров среды SimInTech.

В качестве метода оптимизации применяется метод наискорейшего спуска. Значения коэффициентов — пропорциональной части, интегрирующей части и дифференцирующей части — определяются в качестве глобальных параметров системы и загружаются через блок ввода данных. Процедура поиска оптимальных значений параметров основана на использовании алгоритма последовательного приближения. После завершения поиска рассчитанный набор из трёх параметров корректирующего действия передаётся в блок записи результатов, из которого полученные значения направляются для обновления параметров дискретного управляющего модуля. В блоке поиска оптимальных параметров установлены следующие критерии: точность поиска составляет 0,001, стартовое значение параметра — 1, минимально допустимое значение параметра — 0.

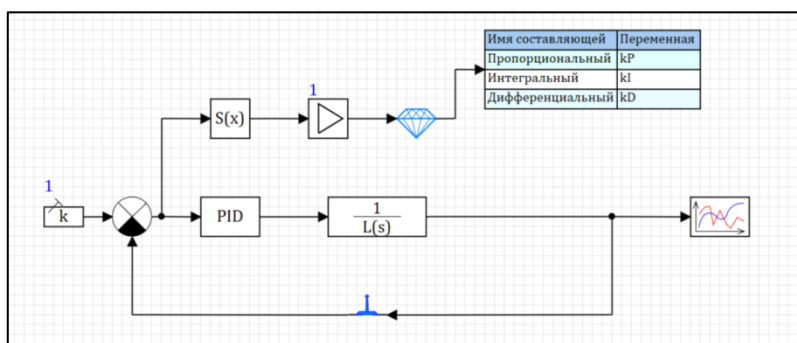
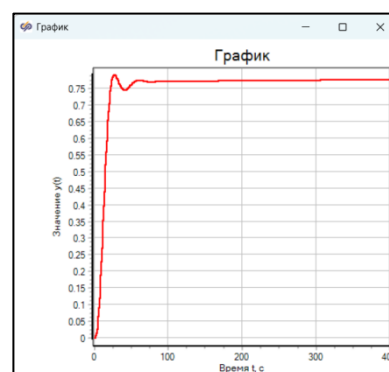


Рис. 6. Схема оптимизации параметров ПИД-регулятора

Результаты оптимизации параметров представлены на рис. 7-а.

Название	Имя	Формула	Значение
Тип регулятора	mode		PID
Начальные условия	y0		[0]
Пропорциональная со...	kp	kP	[100]
Интегральная составл...	ki	kI	[0.01]
Дифференциальная с...	kd	kD	[1000]
Постоянная времени д...	tdif		[0.001]

а



б

Рис. 7. Оптимизация, а - значения параметров ПИД-регулятора; б - кривая регулирования схемы с оптимизированными параметрами

Кривая регулирования схемы с оптимизированными параметрами показана на рис. 7-б.

Выводы. Использование пакета Simintech позволяет рационально и эффективно осуществлять настройку ПИД-регуляторов для автоматических систем.

Начальные параметры ПИД-регулятора были определены по методике Циглера-Никольса, после чего их характеристики были оптимизированы с помощью встроенных инструментов среды SimInTech. Моделирование системы с синтезированным дискретным ПИД-регулятором и последующая верификация подтвердили, что результаты соответствуют требуемым критериям качества переходных процессов.

Примененный подход показал высокую эффективность комбинирования классических методов синтеза регуляторов и современных инструментов цифрового моделирования для достижения оптимальных характеристик системы. Данная методология может быть успешно использована для синтеза и настройки дискретных ПИД-регуляторов при управлении различными техническими объектами в среде SimInTech.

Список литературы

1. Карташов Б.А., Козлов О.С., Шабает Е.А., Щекатуров А.М. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. М.: ДМК Пресс, 2017. 424 с.
2. Грищенко И.А., Чубарь А.В. Создание математической модели робота с дифференциальным приводом // Материалы II Междунар. науч.-практ. конференции «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего» / ООО «Западно-Сибирский научный центр». Кемерово, 2016. С. 35-37.
3. Мызникова В.А., Устищенко В.В., Чубарь А.В. Построение нечётких регуляторов для систем управления автономных объектов в среде SimInTech // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 1. С. 22-27.7. Официальный сайт RoboCup [Электронный ресурс]: режим доступа- <http://www.robocup.org>.

А.В. Чубарь, д.т.н., доцент, Achubar@sfu-kras.ru

М.А. Мутовин, магистрант, mutovinm@bk.ru

Д.А. Самохов, магистрант, samohov2003@mail.ru

С.А. Которженко, магистрант, skotorzhenko@mail.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СРЕДЕ SIMINTECH

Аннотация: В статье представлена разработка интеллектуальной системы управления промышленным роботом-манипулятором в среде динамического моделирования SimInTech. Рассматривается построение математической модели робота с 4 степенями свободы, решение задач прямой и обратной кинематики, моделирование динамики исполнительных приводов с применением ПИД-регуляторов и методов параметрической оптимизации. Особое внимание уделяется применению элементов искусственного интеллекта для адаптивного управления роботом и оптимизации траекторий движения. Система включает 3D-визуализацию работы робота в реальном времени.

Ключевые слова: промышленный робот, система управления, SimInTech, кинематика манипулятора, искусственный интеллект, оптимизация, ПИД-регулятор, 3D-визуализация.

A.V. Chubar, Cand.Sc., associate professor, Achubar@sfu-kras.ru

M.A. Mutovin, student, maximmutovin@mail.ru

D.A. Samohov, student, samohov2003@mail.ru

S.A. Kotorzhenko, student, skotorzhenko@mail.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR INDUSTRIAL ROBOT WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN SIMINTECH ENVIRONMENT

Abstract: The paper presents the development of an intelligent control system for an industrial robotic manipulator in the SimInTech dynamic modeling environment. The construction of a mathematical model of a robot with 4 degrees of freedom, solving direct and inverse kinematics problems, modeling the dynamics of actuators using PID controllers and parametric optimization methods are considered. Special attention is paid to the application of artificial intelligence elements for adaptive robot control and trajectory optimization. The system includes 3D visualization of the robot operation in real time.

Key words: industrial robot, control system, SimInTech, manipulator kinematics, artificial intelligence, optimization, PID controller, 3D visualization.

Современная промышленность характеризуется активным внедрением робототехнических систем в производственные процессы. Эффективность использования роботов напрямую зависит от качества системы управления, которая должна обеспечивать высокую точность позиционирования, быстродействие и адаптивность к изменяющимся условиям работы [1].

Разработка и тестирование систем управления роботами требует применения современных средств математического моделирования и симуляции.

В качестве объекта используется промышленный робот-манипулятор с 4 степенями свободы, имеющий конфигурацию с угловой системой координат (рисунок 1). Такая конструкция является одной из наиболее распространённых в промышленности благодаря оптимальному сочетанию простоты конструкции и функциональных возможностей [3].

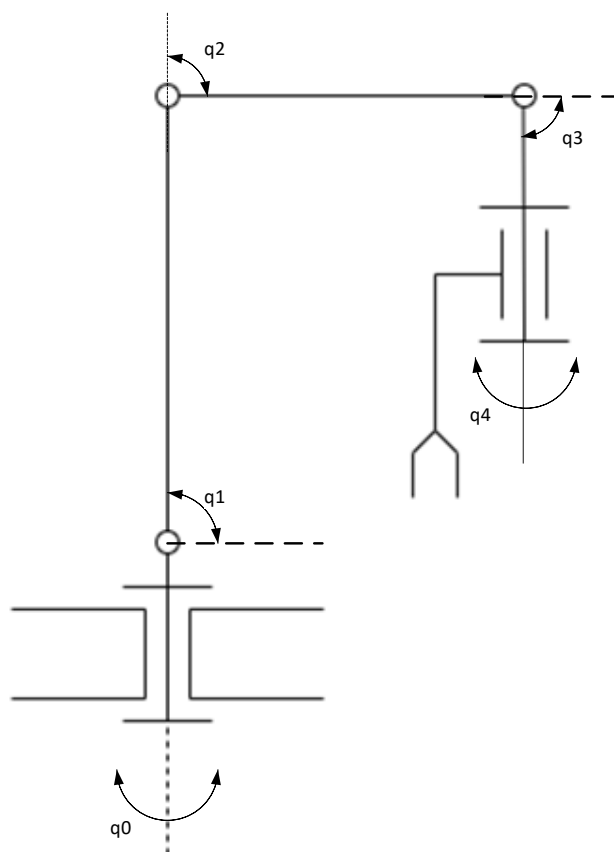


Рис. 1. Кинематическая схема робота-манипулятора

Для управления положением рабочего органа манипулятора необходимо решение двух взаимосвязанных задач кинематики [4].

Решение ОЗК реализовано геометрическим методом. На первом этапе рассматривается проекция манипулятора на плоскость XZ, для которой определяются углы q_1 и q_2 по формулам:

$$q_1 = \text{atan2}(s, r) - \text{atan2}(k_2, k_1), \quad (1)$$

$$q_2 = \arccos((r^2 + s^2 - L_1^2 - L_2^2) / (2 \cdot L_1 \cdot L_2)), \quad (2)$$

где $r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$, $s = -z + L_0$, L_1 и L_2 – длины звеньев манипулятора. Угол поворота основания q_0 определяется из проекции на плоскость XY: $q_0 = \text{atan2}(y, x)$. Реализация алгоритма в SimInTech выполнена с использованием блока программирования, что обеспечивает компактность схемы при сохранении читаемости кода.

Для каждого исполнительного механизма робота разработана система автоматического регулирования (САР), состоящая из двигателя постоянного тока, редуктора, датчика угловых перемещений и ПИД-регулятора [5]. Передаточная функция объекта управления определяется параметрами двигателя и нагрузки:

$$T_{\partial} = (J_{\partial} n m \cdot k_p^2 + J_n) / (\beta \cdot k_p^2), \quad (3)$$

$$k_{\partial} = k_{\partial} n m \cdot k_p / \beta, \quad (4)$$

где T_{∂} – постоянная времени, k_{∂} – коэффициент передачи, J_{∂} и J_n – моменты инерции двигателя и нагрузки, k_p – передаточное отношение редуктора, β – коэффициент вязкого трения.

Для оптимизации параметров ПИД-регулятора применён метод Циглера-Никольса, который позволил сократить время переходного процесса с 12 до 2,5 секунд при сохранении монотонности и достижении ошибки регулирования не более 0,1% [6] (см. рис. 2).

В разработанной системе управления применены элементы искусственного интеллекта для повышения эффективности работы робота-манипулятора. Интеллектуальные алгоритмы реализованы в адаптивной оптимизации траекторий движения и адаптивном управлении на основе нейронных сетей.

Для планирования оптимальных траекторий движения манипулятора реализован интеллектуальный модуль, основанный на комбинации детерминированных и стохастических алгоритмов [7]. На первом этапе система анализирует текущую конфигурацию робота (углы q_0, q_1, q_2, q_3) и целевую позицию рабочего органа. Затем применяется модифицированный алгоритм быстро исследующих случайных деревьев (RRT*, Rapidly-exploring Random Tree) для построения множества возможных траекторий в конфигурационном пространстве робота.

Критериями оптимизации траектории являются: минимизация времени перемещения, обеспечение плавности движения (ограничение ускорений и рывков), минимизация энергозатрат и соблюдение ограничений рабочей зоны. Для выбора оптимального решения используется функция стоимости $J(\tau)$:

$$J(\tau) = \alpha_1 \cdot T + \alpha_2 \cdot \int (||\ddot{q}||^2) dt + \alpha_3 \cdot E, \quad (5)$$

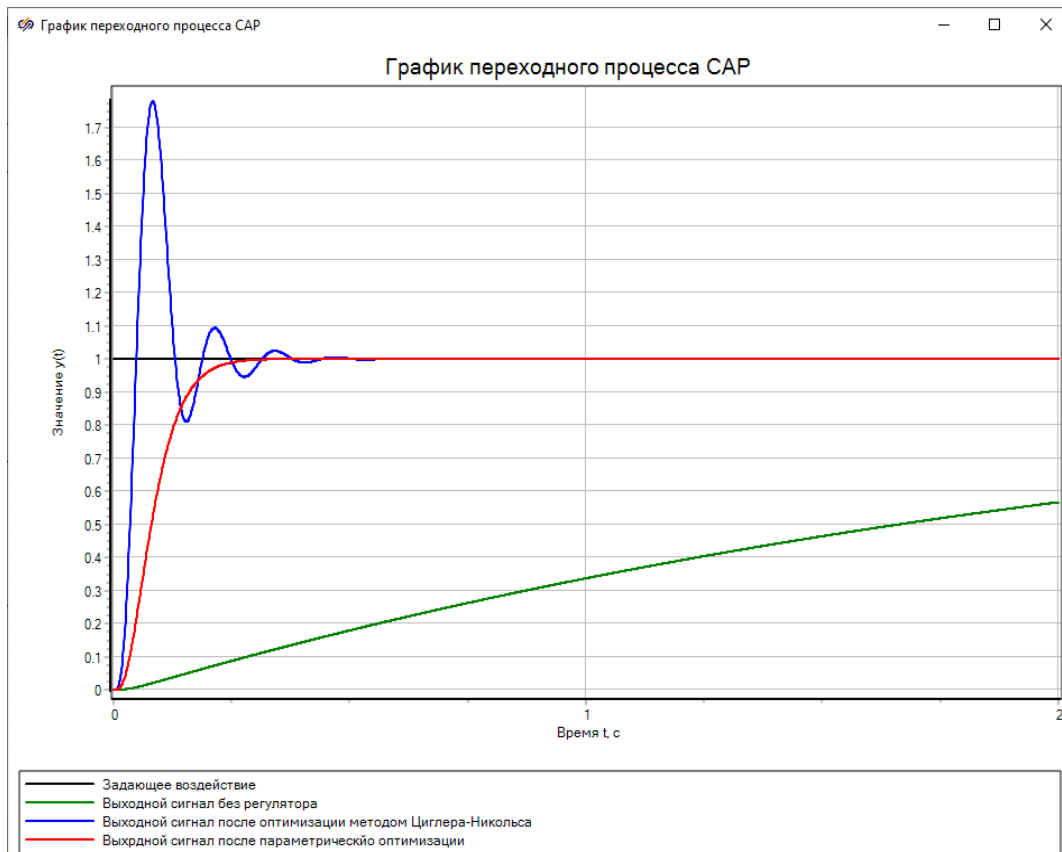


Рис. 2. Сравнение переходных процессов до и после оптимизации

где T – время выполнения траектории, $\|\ddot{\mathbf{q}}\|^2$ – квадрат нормы ускорений в сочленениях, E – энергетические затраты, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – весовые коэффициенты.

Для повышения эффективности планирования применяется метод обучения с подкреплением (Reinforcement Learning). Агент обучается на основе Q-learning алгоритма, где состоянием является текущая конфигурация робота и целевая точка, а действием – выбор направления движения в конфигурационном пространстве. Функция награды учитывает успешность достижения цели, плавность траектории и время выполнения. После каждого выполненного движения система обновляет Q-таблицу:

$$Q(s,a) \leftarrow Q(s,a) + \eta[r + \gamma \max_{a'} Q(s',a') - Q(s,a)],$$

где η – скорость обучения, r – награда, γ – коэффициент дисконтирования, s и s' – текущее и следующее состояния.

Для компенсации нелинейностей динамики робота-манипулятора и неопределённостей параметров системы разработан адаптивный регулятор на основе искусственной нейронной сети [8]. Архитектура регулятора представляет собой многослойную нейронную сеть прямого распространения с тремя скрытыми слоями по 20, 15 и 10 нейронов соответственно. В качестве функции активации используется гиперболический тангенс ($\tanh$) для скрытых слоев и линейная функция для выходного слоя.

Входными данными нейросети являются: текущие углы поворота сочленений $\mathbf{q} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$, их первые и вторые производные (угловые ско-

рости и ускорения), ошибка позиционирования $e = q_{\text{заданное}} - q_{\text{текущее}}$ и интеграл ошибки. Выходом является вектор управляющих воздействий $u = [u_0, u_1, u_2, u_3]^T$, подаваемых на входы усилителей двигателей.

Обучение нейронной сети осуществляется в режиме онлайн с использованием алгоритма обратного распространения ошибки с адаптивным шагом обучения. Целевая функция минимизации имеет вид:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \|e\|^2 + \lambda \cdot \|u\|^2, \quad (6)$$

где λ – коэффициент регуляризации, ограничивающий амплитуду управляющих воздействий.

Ключевым преимуществом нейросетевого регулятора является способность к адаптации в процессе работы. При изменении массы переносимого груза или износе механических компонентов (увеличение люфтов в сочленениях, изменение коэффициентов трения) нейронная сеть автоматически корректирует свои параметры. Реализован механизм обнаружения дрейфа параметров системы: если среднеквадратичная ошибка регулирования превышает пороговое значение (0,5%) в течение определённого времени, активируется режим интенсивного дообучения сети с повышенной скоростью обучения.

Для обеспечения устойчивости системы нейросетевой регулятор работает в комбинации с базовым ПИД-регулятором. Структура управления имеет вид:

$$u_{\text{итог}} = u_{\text{ПИД}} + u_{\text{НС}}, \quad (7)$$

где $u_{\text{ПИД}}$ обеспечивает базовую стабилизацию системы, а $u_{\text{НС}}$ компенсирует нелинейности и возмущения.

Важным компонентом системы является подсистема 3D-визуализации, реализованная средствами SimInTech. Визуализация позволяет в реальном времени наблюдать за работой робота, отслеживать положение рабочего органа и перемещаемых объектов (рис. 3).

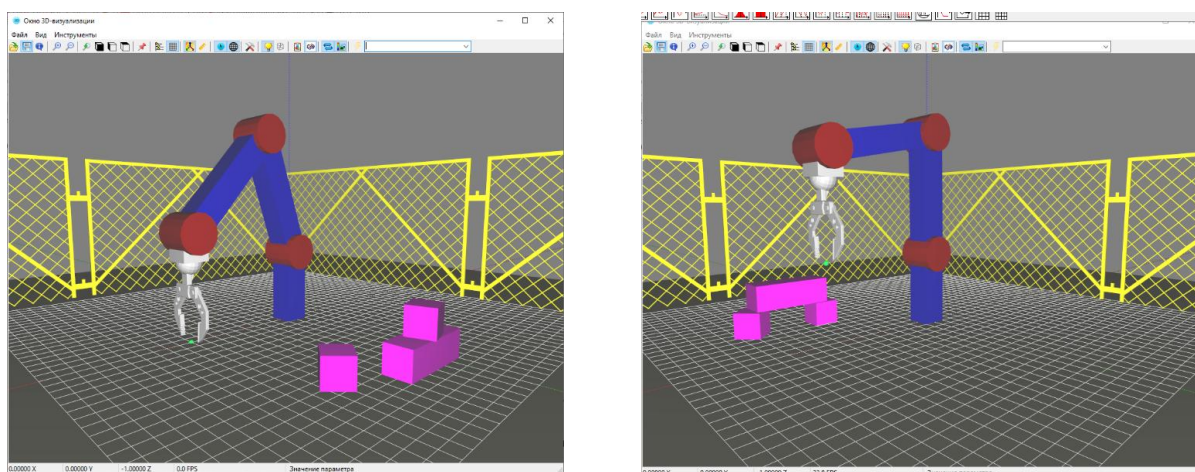


Рис. 3. 3D-визуализация работы робота-манипулятора: положение перемещаемых объектов до (слева) и после (справа) запуска управляющей программы

Визуализация синхронизирована с расчётом кинематики и динамики, что обеспечивает точное соответствие отображаемого положения робота его математической модели.

В работе представлена интеллектуальная система управления промышленным роботом-манипулятором, разработанная в среде SimInTech с применением методов искусственного интеллекта. Система включает полный комплекс подсистем: решение задач кинематики, моделирование динамики с оптимизированными ПИД-регуляторами, три режима управления и 3D-визуализацию.

Применение элементов искусственного интеллекта позволило существенно повысить адаптивность и автономность системы управления. Интеллектуальные алгоритмы оптимизации траекторий, компьютерного зрения и нейросетевого управления обеспечивают эффективную работу робота в изменяющихся условиях.

Список литературы

1. Юревич Е.И. Основы робототехники: учеб. пособие. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 304 с.
2. Титенок А.В. Основы робототехники: учебное пособие / А.В. Титенок. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 236 с.
3. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 386 с.
4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебник и практикум для вузов. – 3-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 440 с.
5. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID Control. – Research Triangle Park, NC: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2022. – 460 p.
6. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2023. – 280 с.
7. Первушин В.Ф., Тимофеев А.В. Нейросетевое управление манипуляционными роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23, № 11. – С. 573-582.
8. Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов. – М.: Высшая школа, 2020. – 264 с.
9. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – 5-е изд., стер. – М.: Машиностроение, 2021. – 408 с.

РОБОТИЗАЦИЯ В МОЛОЧНОМ ЖИВОТНОВОДСТВЕ: ЭВОЛЮЦИЯ ДОИЛЬНЫХ РОБОТОВ И ВЫЗОВЫ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация: В докладе рассматривается эволюция доильных роботов в молочном животноводстве — от зарождения концепции автоматизированного доения в 1970–1990-х годах до современного этапа массовой роботизации, когда к концу 2020 года в мире насчитывалось уже 60 тысяч таких устройств. Показано, как происходила смена сенсорных технологий: от контактных датчиков и механических сенсоров к лазерному сканированию, ультразвуковым дальномерам и оптическим системам машинного зрения. Проанализированы практические результаты внедрения робототехники, включающие снижение трудозатрат на 29 %, сокращение энергопотребления и расхода воды, а также повышение качества молока и надоев. Овещены ключевые технические вызовы, связанные с работой в неструктурированной среде доильного бокса: необходимость адаптации к непредсказуемым перемещениям животных, разработка алгоритмов управления манипулятором и динамической локализации объектов. В заключение обоснована актуальность создания унифицированной системы машинного зрения, способной надёжно функционировать в сложных условиях с учётом как технологических требований, так и биологических особенностей животных.

Ключевые слова: роботизация, автоматизированное доение, доильные роботы, системы машинного зрения, неструктурированная среда, локализация объектов.

D.V. Shilin, Ph.D., associate professor, shilindv@mpei.ru
MPEI, Moscow, Russia

ROBOTICS IN DAIRY FARMING: THE EVOLUTION OF MILKING ROBOTS AND THE CHALLENGES OF MODERN MACHINE VISION SYSTEMS

Abstract: This report examines the evolution of milking robots in dairy farming, from the early days of automated milking in the 1970s–1990s to the current stage of mass robotization, with 60,000 such devices in use worldwide by the end of 2020. It also explores the evolution of sensor technologies, from contact and mechanical sensors to laser scanning, ultrasonic rangefinders, and optical machine vision systems. The practical benefits of robotic implementation are analyzed, including a 29% reduction in labor costs, reduced energy and water consumption, and improved milk quality and yield. Key technical challenges associated with working in the unstructured environment of a milking

parlor are highlighted, including the need to adapt to unpredictable animal movements, the development of algorithms for manipulator control, and the dynamic localization of objects. In conclusion, the relevance of creating a unified machine vision system capable of reliably functioning in difficult conditions, taking into account both technological requirements and the biological characteristics of animals, is substantiated.

Key words: robotics, automated milking, milking robots, machine vision systems, unstructured environment, object localization.

Роботизация и автоматизация находят широкое применение в различных отраслях по всему миру, значительно повышая качество производимой продукции, эффективность и производительность производственных процессов. Эти достижения позволяют оптимизировать операции и снизить общие затраты, в конечном итоге трансформируя традиционные производственные парадигмы. Роботизированные системы применяются в молочном животноводстве для автоматизации процессов доения, кормления и уборки навоза. Это позволяет упростить не только рутинный труд, но и улучшить условия содержания животных [1-4].

История доильных роботов (ДР), также известных как автоматизированные системы добровольного доения (АСД), восходит к 1970-1990 годам, когда впервые возникла концепция полной автоматизации процесса доения, которая заключается в использовании сенсорных технологий, как правило копирующие когнитивные способности «видеть», в качестве обратной связи для управления положением рабочего органа манипулятора [5-7].

В конце прошлого столетия различные исследователи и коммерческие организации применяли различные методики и технологии для определения местоположения сосков. (Akerman, 1980) [8] и (Artmann и Schillingmann, 1990) [9] использовали датчики проводимости и механические контактные датчики соответственно, однако от этих методов быстро отказались, поскольку они могут причинить вред животному, а также спровоцировать нежелательное перемещение животного (Artmann, 1997) [10]. Помимо механических сенсоров были реализованы успешные попытки использовать обработку изображений с помощью методов лазерного сканирования (Montalescot, 1987) [11], ультразвуковых (УЗ) (Artmann и др., 1990, Artmann и Schillingmann, 1990) [12, 13] дальномеров и/или оптических датчиков (Torsius, 1988) [14].

Первые ДР с машинным зрением были установлены в 1992 году в Нидерландах компанией Lely Industries, что ознаменовало значительный прорыв в технологиях молочного животноводства [15, 16]. Было доказано, что роботизированные системы улучшают качество молока, увеличивают надои, повышают производительность животного и стада в целом [17]. Было установлено, что фермы с АСД использовали в среднем на 29% меньше труда, чем

фермы с традиционными системами доения (ТСД), чем подтвердили свою эффективность [18]. Помимо вышесказанного потребление электроэнергии и воды при доении также снижается по мере повышения уровня технологий. В различных конфигурациях и условиях эксплуатации АСД потребляет от 1,8 до 2,44 кВт энергии и от 25 до 36 л воды на 100 л произведенного молока. Для сравнения, доильный зал карусельного типа на 40 мест в ТДС потребляет около 3,88 кВт энергии и расходует около 52 л воды на 100 л произведенного молока [19, 20].

Появление серийных источников структурированного света, лазерных сканеров, времяпролетных и RGBD камер привело к настоящему прорыву к интеллектуальной роботизации в молочном животноводстве, что возобновило интерес к синтезу алгоритмов локализации и детектирования целевых объектов на вымени [21-30], а с развитием вычислительной техники исследователи все чаще синтезировали алгоритмы локализации и детектирования, которые строились на интеллектуальных методах обработки информации [31-34].

С начала XXI века внедрение ДР стремительно росло: к 2010 году около 10 тыс. ферм по всему миру использовали АСД, на конец 2020 года насчитывалось уже 60 тыс. роботов по всему миру, а за последние годы наблюдается рост продаж на 150% и продолжает расти по мере совершенствования и доступности технологий машинного зрения, интеллектуального управления и развития вычислительных систем [35]. На конец 2025 года основную долю мирового рынка занимают следующие доильные роботы: Astronaut A5 (Lely, Нидерланды), VMS (Delaval, Швеция), DairyRobot R9000 (Gea Farm Technologies, Германия), Gemini (BouMatic, США), RDS Futureline Elite (SAC, Дания), Merlin (FullWood, Великобритания), и другие [36]. Все эти ДР отличаются не только используемой СМЗ, но и кинематическими схемами и применяемыми силовыми двигателями.

За последние 10 лет зарубежные компании интегрировали манипуляторы и СМЗ в доильных залах роторного типа «Карусель» (GEA DairyProQ и DeLaval AMR соответственно) и традиционного типа «Параллель», что говорит о перспективах роботизации при модернизации таких систем и развития данной предметной области в целом.

Всех доильных роботов объединяют одинаковые технологические процессы автоматизированного доения, для выполнения которых необходимо перемещать рабочий орган манипулятора доильного робота по заданной программной траектории, в условиях неструктурированной среды в доильном боксе.

Под неструктурированной средой подразумеваются условия, когда рабочий орган манипулятора перемещается под животное в точку сканирования вымени огибая динамические препятствия и надевает доильные стаканы на целевые объекты. Все это происходит в условиях непредсказуемых пере-

мещениях животного. В таких условиях роботы должны адаптироваться к новым ситуациям, а не к заранее созданным наборам данных и правилам.

Это требует разработки алгоритмов управления положением рабочего органа манипулятора и следования заданным траекториям, а также алгоритмов локализации и детектирования целевых объектов на вымени животного, которые учитывают динамику окружающей среды, положение препятствий и изменяющихся условия.

Вышеописанная динамика предполагает использовать сложную систему обратных связей на базе сенсоров, благодаря которым возможно следить за перемещением животного и производить динамическую локализацию и детектирование целевых объектов. Повышение качественных показателей таких систем на прямую влияют на качественные показатели управления положением рабочего органа манипулятора. Из этого следует что ошибки работы в СМЗ могут привести к снижению точности позиционирования рабочего органа манипулятора и повышению динамической ошибки следования заданной траектории при программных перемещениях.

Ошибки работы в СМЗ связаны с программной и аппаратной частями, и могут зависеть от наличия агрессивной среды (химия, повышенная влажность, пыль и влага, которая может привести к загрязнению СМЗ) и непредсказуемых атак животного по рабочему органу манипулятора, что накладывает технические требования к реализации аппаратной части СМЗ. Современные коммерческие СМЗ доильных роботов имеют геометрические ограничения по параметрам детектируемых целевых объектов, что в свою очередь приводит к выбраковке животных. Исследования показывают, что существуют рекомендации по продолжительности подготовки вымени к дойке, которая не должна превышать 60 секунд, что является количественным отражением качественного показателя технологического процесса обслуживания животного [37, 38]. Стимуляция молокоотдачи должна произойти в течение этого времени, чтобы успеть подключить все ДС до распада гормона окситоцина.

Требования и рекомендации, продиктованные предметной частью использования СМЗ ДР, а также ограничения существующих СМЗ говорят об актуальной задаче обобщения технических характеристик и построения унифицированной СМЗ для доильных роботов, работающих в условиях неструктурированной среды.

Список литературы

1. Campilho R. D. S. G., Silva F. J. G. Industrial process improvement by automation and robotics //Machines. – 2023. – Т. 11. – №. 11. – С. 1011.

2. Zhang H. et al. Optimization and Efficiency Improvement of Robot-based Industrial Production Process //International Journal of New Developments in Engineering and Society. – 2024. – T. 8. – №. 2.
3. Kaur N., Sharma A. Robotics and automation in manufacturing processes //Intelligent Manufacturing. – CRC Press, 2025. – C. 97-109.
4. Ahmed W., Mahmoud A. Transforming Manufacturing With Robotics //Harnessing AI for Control Engineering. – IGI Global Scientific Publishing, 2025. – C. 63-80.
5. E. de Gelder, Design of digital position controllers for the motors of the cow-milking robot system, Rep. A88.027(455), Dept. of Electrical Engineering, Delft University of Technology, 1988.
6. C. Klomp, Design of a Cartesian setpoint controller for the inner loop controllers of the cow-milking robot system, Rep. A89.017(492), Dept. of Electrical Engineering, Delft University of Technology, 1989.
7. G. Honderd, W. Jongkind, C. Klomp, J. Dessing, and R. Paliwoda, An autonomous cow milking robot system, in Proc. Int. Symp. Advanced Computers for Dynamics and Design (AC&D), Tsuchiura, Japan, Sept. 6-8, 1989, pp. 53-58.
8. Akerman D. E. Milking method and apparatus: пат. 4223635 США. – 1980.
9. Artmann R., Schillingmann D. Entwicklungsstand von melkrobotern. – 1990.
10. Artmann R. Sensor systems for milking robots //Computers and electronics in agriculture. – 1997. – T. 17. – №. 1. – C. 19-40.
11. Montalescot J. Robotisation de la traite: Des travaux déjà bien avancés (robotic milking: research already has made good progress) //Revue Laitière Élevage. – 1987. – T. 30. – №. 3. – C. 101-103.
12. Artmann R. et al. Lokalisierung der Zitzenposition mittels Ultraschall-und Bildverarbeitungssystem //VDI/MEG. Kolloquium Landtechnik (Germany). no. 9. – 1990.
13. Artmann R., Schillingmann D. Entwicklungsstand von melkrobotern. – 1990.
14. Torsius, A. 1995. Milking apparatus. US Patent 4726322A. February 1988.
15. Greenaway B. Robots run amuck [robot invasion in farming] //Engineering & Technology. – 2010. – T. 5. – №. 3. – C. 36-40.
16. Geleynse B. Robotic milking: The future //Advances in Dairy Technology (2003). – 2003. – T. 15. – C. 367.
17. Laurs A., Priekulis J. Robotic milking of dairy cows //Agronomy Research. – 2008. – T. 6. – C. 241-247.
18. Bijl R., Kooistra S. R., Hogeveen H. The profitability of automatic milking on Dutch dairy farms //Journal of Dairy Science. – 2007. – T. 90. – №. 1. – C. 239-248.
19. Rasmussen J. B. Electricity and water consumption by milking. – 2005.
20. Calcante A., Tangorra F. M., Oberti R. Analysis of electric energy consumption of automatic milking systems in different configurations and operative conditions //Journal of Dairy Science. – 2016. – T. 99. – №. 5. – C. 4043-4047.
21. Zwervaegher I. et al. Objective measuring technique for teat dimensions of dairy cows //Biosystems Engineering. – 2011. – T. 110. – №. 2. – C. 206-212.
22. Hu Y. et al. YOLOv3 deep learning and solid-state LiDAR for teats detection //2021 3rd International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT). – IEEE, 2021. – C. 248-252.

23. Wang C. et al. Design of a teat cup attachment robot for automatic milking systems //Agriculture. – 2023. – Т. 13. – №. 6. – С. 1273.
24. Kortekaas M. P. Milking robot for attaching a teat cup //WO 2015/126241. – 2015.
25. Hu Y. et al. YOLOv3 deep learning and solid-state LiDAR for teats detection //2021 3rd International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT). – IEEE, 2021. – С. 248-252.
26. Hofman H. et al. Milking box with robotic attacher and vision system : пат. 9258975 США. – 2016.
27. Lars A., Mats N. Apparatus and method for recognising and determining the position of a part of an animal. WO Patent App. – PCT/SE1998/000,744, 1998.
28. Akhloufi M. A. 3D vision system for intelligent milking robot automation //Intelligent robots and computer vision XXXI: algorithms and techniques. – SPIE, 2014. – Т. 9025. – С. 168-177.
29. Pal A. et al. Algorithm design for teat detection system methodology using TOF, RGBD and thermal imaging in next generation milking robot system //2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). – IEEE, 2017. – С. 895-896.
30. Azouz A. B. et al. Development of a teat sensing system for robotic milking by combining thermal imaging and stereovision technique //Computers and Electronics in Agriculture. – 2015. – Т. 110. – С. 162-170.
31. Lu Z. et al. Automatic teat detection for rotary milking system based on deep learning algorithms //Computers and Electronics in Agriculture. – 2021. – Т. 189. – С. 106391.
32. Rastogi A., Ryuh B. S. Teat detection algorithm: YOLO vs. Haar-cascade //Journal of Mechanical Science and Technology. – 2019. – Т. 33. – №. 4. – С. 1869-1874.
33. Wang C. et al. Design of a teat cup attachment robot for automatic milking systems //Agriculture. – 2023. – Т. 13. – №. 6. – С. 1273.
34. Rastogi A., Pal A., Ryuh B. S. Real-time teat detection using haar cascade classifier in smart automatic milking system //2017 7th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE). – IEEE, 2017. – С. 74-79.
35. Андрейчук О. А. Роботизированная технология доения в России и за рубежом //Научный журнал молодых ученых. – 2019. – №. 4 (17). – С. 44-48.
36. Шевченко А. В., Мещеряков Р. В., Мигачев А. Н. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника //Проблемы управления. – 2019. – №. 5. – С. 3-18.
37. Ведищев С. М. Механизация доения коров //Тамбов: изд-во ТГТУ.-2006.- 160 с. – 2006.
38. Курак А. С. и др. Повышение полноценности реализации рефлекса молокоотдачи у коров на различных стадиях лактации //Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. – 2020. – №. 23 (2). – С. 108-115.

АДАПТАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОСЕТЕВОГО ЭВОЛЮЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОРЕЖИМНЫМ ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ НА ОСНОВЕ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Аннотация: Рассматривается проблема оптимального управления многорежимным подвижным объектом как гибридной системой с переключениями. Задача поиска глобального экстремума функционала, определённого на множестве допустимых траекторий движения объекта управления (ОУ), исследуется как задача структурно-параметрического синтеза. Для её решения разработан оригинальный эволюционно-генетический алгоритм (ЭГА) синтеза оптимального управления, позволяющий учитывать вариации параметров ОУ путем обучения нейросетевого эс-тиматора целевой функции (функционала), характеризующего качество управления. С его помощью обеспечивается эффективная генерация исходных приближений решения в виде начальной популяции ЭГА при произвольных значениях параметров объекта управления из заданного диапазона. Для адаптации параметров ЭГА предложен вспомогательный алгоритм обучения с подкреплением на основе модели «многоорукого бандита».

Ключевые слова: нейронная сеть, эволюционные вычисления, генетический алгоритм, оптимизация управления, многорежимный подвижный объект, обучение с подкреплением.

K.I. Yrenko, Ph.D., associate-professor, ki-yurenko@yandex.ru
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

ADAPTATION OF PARAMETERS OF A NEURAL NETWORK EVOLUTIONARY GENETIC ALGORITHM FOR SYNTHESIZING OPTIMAL CONTROL OF A MULTI-MODE VEHICLE BASED ON REINFORCEMENT LEARNING

Abstract: The problem of optimal control of a multimode moving object as a hybrid switching system is considered. The task of searching for the global extremum of the functional defined on the set of permissible trajectories of the control object is studied as a problem of structural-parametric synthesis. To solve this problem, an original evolutionary genetic algorithm (EGA) for the synthesis of optimal control has been developed,

which allows taking into account variations in object parameters by training a neural network estimator of the target function (functional) that characterizes the quality of control. It enables the efficient generation of initial solution approximations in the form of an initial population of EGAs for arbitrary values of the control object parameters within a specified range. To adapt the EGA parameters proposed an auxiliary reinforcement learning algorithm based on the multi-armed bandit model.

Key words: neural network, evolutionary computation, genetic algorithm, control optimization, multi-mode moving object, reinforcement learning.

Проблема синтеза оптимального управления многорежимными подвижными объектами, представляемыми в современной теории автоматического управления моделями гибридного типа (например, логико-динамическими), обусловлена сложностью их описания: на нижнем (нетерминальном) уровне динамика (физика процессов) в различных режимах работы моделируется на основе обыкновенных дифференциальных уравнений с разрывными правыми частями – дифференциальными включениями, а на верхнем, логико-функциональном (терминальном) уровне осуществляется выбор стратегии управления и ее реализация путем задания логики переключения режимов и заданных терминальных условий, ограничений и т.д. [1-3]. При этом, в общем случае, стратегия управления заранее неизвестна и должна быть определена в процессе решения задачи.

В последние годы большую популярность приобрели так называемые метаэвристические алгоритмы [4], применение которых предполагает переход от исходных задач оптимального управления к задачам параметрического синтеза, рассматриваемых как задачи нелинейного программирования, путем дискретизации и замены исходных дифференциальных уравнений конечными разностями [5]. Однако, применительно к многорежимным подвижным объектам (МПО), например, железнодорожному и автомобильному транспорту, беспилотным летательным аппаратам и др., осуществляющим движение на относительно большие расстояния, это приводит к задачам большой размерности, решение которых неэффективно, в том числе из-за того что рассматриваемые объекты управления (ОУ) относятся к числу ОУ с «широкой базой» [1], т.е. переключение режимов управления осуществляется в конечном числе точек вдоль траектории движения. В связи с вышесказанным, в настоящей работе предлагается альтернативный подход, предполагающий редукцию исходной задачи оптимального управления к задаче структурно-параметрического синтеза и её решение на основе оригинального нейросетевого эволюционно-генетического вычислительного алгоритма.

Постановка задачи, учитывающая специфику многорежимных объектов управления и методика преобразования исходной задачи оптимального управления к задаче структурно-параметрического синтеза (СПС), предложенные

автором, представлены в [6-11]. Структурная схема разработанного алгоритма показана на рис. 1. Он реализуется как мультистартовый – цикл решения базовой задачи СПС повторяется до достижения условий окончания – выполнения проверки сходимости и повторяемости. Алгоритм включает формирование начальной популяции с последующим итерационным повторением процедур структурного синтеза, реализуемого на основе оператора кроссовера генетического алгоритма и параметрического синтеза как процедуры локальной оптимизации.

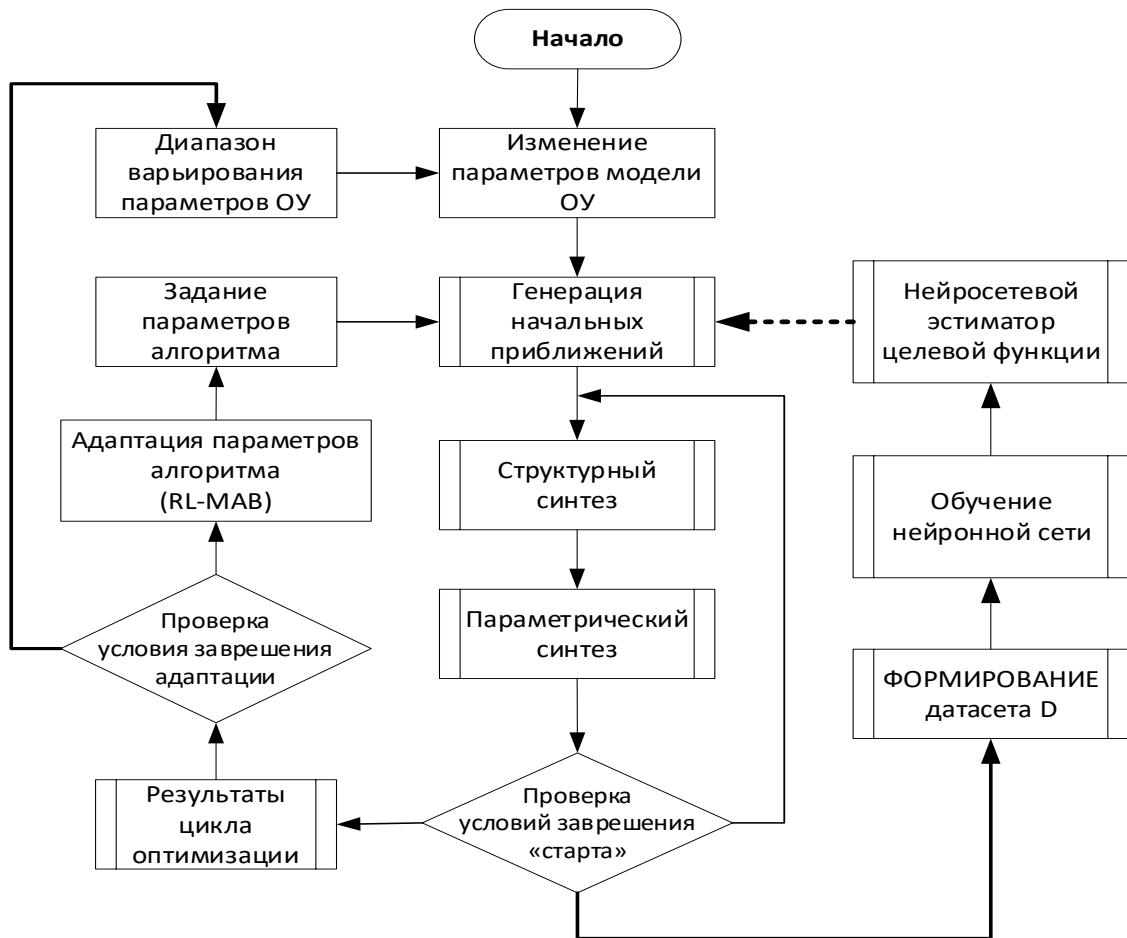


Рис. 1. Структурная схема нейросетевого эволюционно-генетического алгоритма с адаптацией параметров на основе обучения с подкреплением

При практическом использовании алгоритм должен обеспечивать вычисления управления в режиме реального времени для различных параметров ОУ, которые в процессе его эксплуатации могут изменять в широком диапазоне. Для оптимизации вычислительных ресурсов реализован контур *обучения с учителем*, предполагающий на предварительном этапе решение базовой задачи оптимизации для ряда выбранных значений параметров из заданного диапазона с формированием обучающей выборки. После обучения нейронная сеть выступает в качестве эстиматора целевой функции и исполь-

зуюемся в процессе генерации начальных приближений. При этом выбор действий носит вероятностный характер, но определяется оценками эстиматора. Это позволяет существенно улучшить качество начальных популяций по сравнению с базовой моделью МППР. Структура нейронной сети эстиматора (НСЭ), основанной на архитектуре «многослойный персептрон» (MPL), показана на рис. 2.

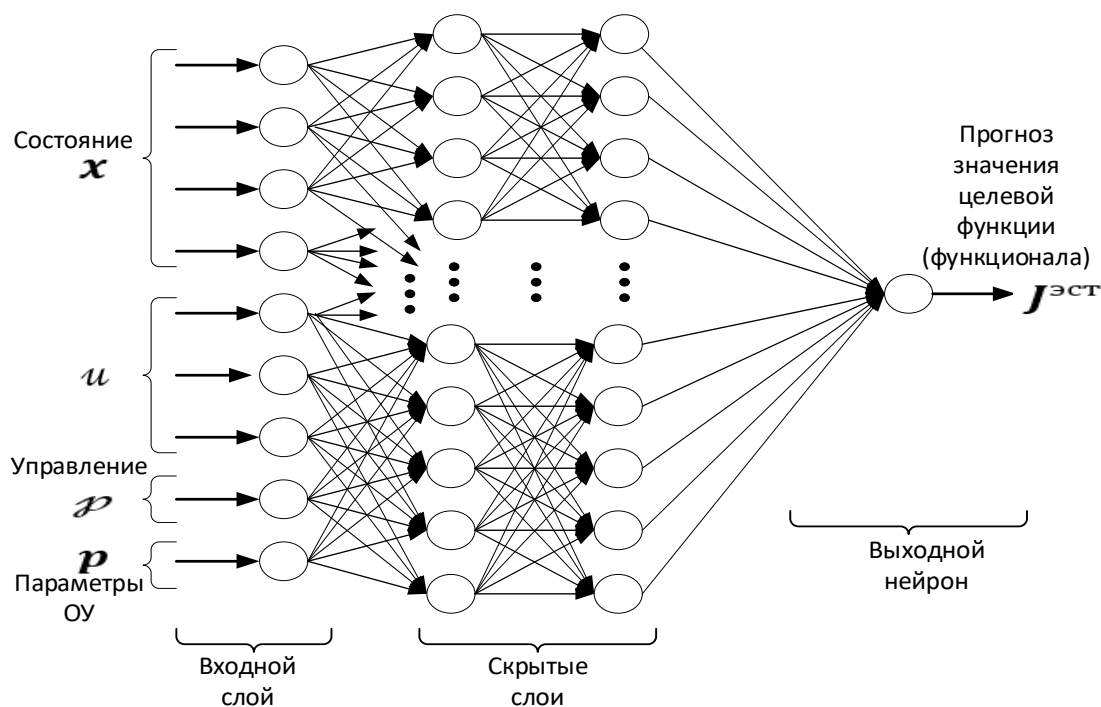


Рис. 2. Архитектура нейросетевого эстиматора целевой функции

Известно, что параметры эволюционных алгоритмов, в частности, размер популяции решений, оказывают существенное влияние на качество получаемых результатов. Их выбор и настройка требуют существенных затрат времени, что обычно осуществляется методом проб и ошибок. При различных размерностях задачи, в данном случае – числе шагов варьирования режимов, определяемым числом точек дискретизации (зависит от длины траектории движения МПО), оптимальное значение такого параметра может отличаться и существенно влиять как на сходимость вычислительной процедуры, так и на объем затрачиваемых ресурсов, выражающихся чаще всего в числе обращений к имитационной модели ОУ для вычисления значения целевой функции. Для автоматической адаптации указанного параметра ЭГА разработан вспомогательный алгоритм, основанный на применении метода обучения с подкреплением по модели «многорукого бандита» RL-MAB [12], рис. 3. Результат каждого цикла решения базовой задачи СПС определяется полученным решением – значением функционала J и затраченных ресурсов (число вычислений целевой функции N). Поскольку по условиям ис-

ходной задачи J требуется минимизировать, вводится сопряженный функционал $J' \rightarrow \max$. Также в процессе анализа результатов определяются лучшее на текущий момент значение $J'^* = \max(J')$ и $N^* = \min_{J'(N^*)=J'^*} N$. Блок форми-

рования «наград» вычисляет:
$$Rew = \begin{cases} +R^+, \text{ если } J' > J'^*; \\ -R^- \cdot J'^*/J', \text{ если } J' < J'^*; \\ +R^= \cdot N^*/N, \text{ если } J' = J'^*, \end{cases}$$

где $R^+ > R^- > R^=$ - заданные константы. Блок суммирования и усреднения наград определяет число реализаций n_i и среднюю награду по n_i – реализаций $\langle (n_i, \bar{Rew}_i) | i=1:|A| \rangle$ для каждого параметра $a \in A = \{a_i\}_{i=1}^{|A|}$ из дискретного множества допустимых.

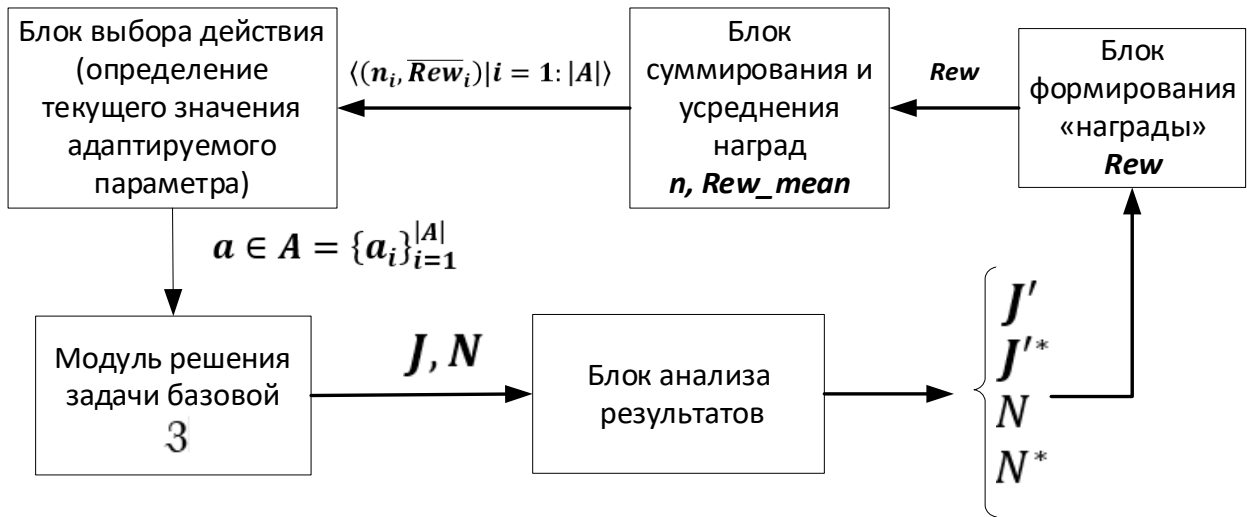


Рис. 3. Схема алгоритма адаптации на основе модели RL-MAB

После этого блок выбора действий, – «агент» в терминологии RL, осуществляет выбор «действия» a , для чего используется метод верхнего доверительного интервала UCB:

$$a \doteq \operatorname{argmax}_{i \in (1:|A|)} \left[\bar{Rew}_i + c \sqrt{\frac{\ln \left(\sum_{i=1}^{|A|} n_i \right)}{n_i}} \right], \quad c - \text{константа.}$$

Закключение. Разработанный гибридный алгоритм структурно-параметрического синтеза оптимизации управления многорежимного подвижного объекта, объединяющий технологию эволюционных вычислений, контуры адаптации параметров на основе метода обучения с подкреплением и обучения с учителем нейросетевого эстиматора целевой функции позволяет реализовать процесс вычислений онлайн с автоматической адаптацией одного из ключевых параметров – размера исходной популяции решений, существенно влияющей как на качество получаемых результатов, так и на требуемые вычислительные затраты, что сокращает время его настройки по сравне-

нию с использованием метода проб и ошибок. Сокращение вычислительных затрат (в ряде случаев – до 50 %) достигается также за счет предварительного обучения нейросетевого эстиматора построенного на архитектуре нейронной сети прямого распространения типа «многослоный персептрон», позволяющего использовать на этапе генерации начальных решений марковский процесс принятия решений с выбором действия на основе оценок эстиматора вместо ранее использующегося стационарного равномерного распределения. Дальнейшее совершенствование вычислительного алгоритма может быть связано с исследованием применения современных архитектур сверточных и рекуррентных нейронных сетей, а также методов глубокого обучения с подкреплением.

Список литературы

1. Петров Б.Н., Александров А.Д., Андреев В.П. и др. Многорежимные и нестационарные системы автоматического управления; под ред. акад. Б.Н. Петрова. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
2. Васильев С.Н., Маликов А.И. О некоторых результатах по устойчивости переключаемых и гибридных систем. Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН. Казань: Фолиант, 2011. – Т.1,2. – С. 23-81.
3. Бортакровский А.С. Оптимизация переключающих систем. – М.: Изд-во МАИ, 2016. – 120 с.
4. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации: монография / Л. А. Гладков, Ю. А. Кравченко, В. В. Курейчик, С. И. Родзин. – Чебоксары: Среда, 2024. – 228 с.
5. Пантелеев А.В. Метаэвристические алгоритмы оптимизации законов управления динамическими системами. – М.: Факториал. 2020.–564 с.
6. Юренко К.И. Расчет энергооптимальных режимов движения поезда методом динамического программирования // Известия вузов. Электромеханика. №3. 2013. – С. 78-82.
7. Юренко К.И. Принцип максимума Л.С. Понтрягина в задаче оптимального управления движением поезда // Вестник ВЭЛНИИ №1-2(79). - 2018. - С. 147-161.
8. Юренко К.И. Мультиагентный эволюционный алгоритм синтеза оптимально-терминального управления переключающими системами на примере электроподвижного состава железных дорог // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2024» («ИС & ИТ-2024»). Научное издание в 2-х т. Т.1. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2024. – С. 190-204.
9. Юренко К.И. Применение метода машинного обучения при решении задачи опти-мально-терминального управления многорежимным подвижным объектом // Информатизация и связь. – 2024. – № 5. – С. 60-71.
10. Юренко К.И. Использование метода машинного обучения в задаче синтеза оптимального терминального управления многорежимным подвижным объек-

том // Известия номер 322 (военно-техническое направление). Часть 3. Балашиха: ВА РВСН им. Петра Великого. – 2024. – С. 770-787.

11. Юренко К.И. Нейросетевой эволюционно-генетический алгоритм структурно-параметрического синтеза оптимального управления многорежимным подвижным объектом // Труды XXIV Всероссийского научно-технического конгресса «Интел-лектуальные системы и информационные технологии – 2025» («ИС & ИТ-2025»). Научное издание. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2025. – С. 53-62.

12. Саттон Р.С., Барто Э.Дж. Обучение с подкреплением: Введение. 2-е изд. / пер. с англ. А. А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 552 с.

Секция 7

ПРАВОВЫЕ И СОЦИО- ГУМАНИТАРНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И РОБОТОТЕХНИКИ

М.В. Алексеев, аспирант, maris.sabirov@yandex.ru
Ю.А. Маглинец, к.т.н, заведующий кафедрой «СИИ», maglinets@yandex.ru
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН

Аннотация: Феномен распространения информации в Интернет активно изучается социологами, но, так как интернет-технологии развиваются стремительно, исследования быстро теряют актуальность и исследователи выступают в роли догоняющих. Предлагается построить архитектуру платформы для проведения исследований. Для проектирования архитектуры предполагается использовать идеи, изложенные Дж. Клиром в книге “Системология. Автоматизация решения системных задач”.

Ключевые слова: информационные волны, архитектура распределённой исследовательской платформы.

M.V. Alekseev, graduate student, maris.sabirov@yandex.ru
Yu.A. Maglinets, PhD, head of the department «AIS» maglinets@yandex.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

SYSTEM ARCHITECTURE FOR INFORMATION WAVE RESEARCH

Abstract: The phenomenon of information dissemination on the Internet is being actively studied by sociologists, but as Internet technologies are developing rapidly, research is rapidly losing relevance and researchers are playing the role of catching up. It is proposed to build a platform architecture for conducting research. For the design of architecture, it is supposed to use the ideas outlined by George J. Klir in the book “Architecture of systems problem solving”.

Key words: information waves, architecture of distributed research platform.

Введение

Интернет - неотъемлемая часть мира, агрессивно развивающееся пространство, оказывающее значительное влияние на современный мир. Информация в Интернет распространяется акторами / субъектами, преследующими разные, зачастую противоположные цели.

Интернет, как среда распространения информации, анизотропен. Активное развитие рекомендательных алгоритмов приводит к появлению раз-

личных феноменов, в частности, таких, как образование «информационных пузырей».

В качестве примера можно изучить след, который остался в сети Интернет от сообщения, сделанного в конце апреля 2025 года доктором филологических наук, главным научным сотрудником Института русского языка имени В. В. Виноградова РАН Марией Каленчук. Она сообщила, что *“все глаголы на "ить" в последние 100 лет начали движение от того ударения, которое у них было на окончании, к ударению на основу слова”* и сделала предположение, что в слове “звонит” ударение, скорее всего, со временем тоже изменится. После выхода этого сообщения в “эфир” начался информационный шум и активное обсуждение. Даже в ноябре 2025 г., на момент написания доклада, когда остались только “остывшие”, относительно нейтральные следы, видно, как искажается посыл исходного сообщения (рис. 1).

 **В Госдуме призвали сохранить ударение в слове «звонит» на...**
[absatz.media](#) > [news/116568-v-gosdume-prizvali-...](#)
Так он прокомментировал прогнозы сотрудников **Института** русского языка имени **Виноградова**, которые уверены, что **ударение в слове** неминуемо **изменит** положение и все будут говорить с акцентом на первом слоге.

а)

 **"Попытка защитить чиновника": филолог Малыгина объяснила...**
[mk.ru](#) > [social/2025/04/24/popytka-zashhitit-...](#)
В апреле 2025 года доктор филологических наук, главный научный сотрудник **Института** русского языка им. **Виноградова** РАН Мария Каленчук **заявила**, что в будущем **ударение в слове «звонит» изменится** и будет падать на первый слог.

б)

 Вечерний Санкт-Петербург
<https://vecherka-spb.ru> > 2025/04/24 > [gendirektor-pfk...](#) ⋮
Гендиректор ПФКИ раскритиковал идею изменить ...
24 апр. 2025 г. — Виноградова РАН Марии Каленчук. По ее прогнозу, **ударение в слове «звонит» однажды изменится** и будет падать на первый слог. Она подчеркнула ...

в)

Рис.1. Образцы трансформации акцентов и смыслов

Небольшие смещения акцентов в сообщениях значительно меняют смысл исходного. Большинство людей, встретив первое сообщение по теме, не ищет исходное, и мнение человека формируется первым встреченным сообщением. Фактически, производятся манипуляции мнением общества.

Исследование информационных волн

Исследование информационных волн – методологическое направление в сетевом анализе, изучающее основные принципы распространения информации в социальных сетях и интернет-медиа.

Активную работу в данном направлении ведёт Г.В. Градосельская и её коллеги. В статье “Теоретические основы исследования информационных волн в социальных сетях” [1] выделяют 3 подхода к анализу распространения информации:

- Распространение информации как социальный процесс: события и волны;
- Сетевой подход к информационным всплескам: эффект «эхо-камеры»;
- Математический подход к распространению информации: исследовании каскадов.

Анализ социальных сетей

Анализ социальных сетей (Social network analysis (SNA)) - методологический подход к изучению структуры и динамики отношений в социальных сетях. Он предполагает визуализацию связей между людьми, группами, организациями и анализ этих связей с помощью теории графов.

Для выполнения типовых задач анализа социальных сетей разработаны программные инструменты, например: Gephi, SocNetV, Netlytic, UCINET (UCI Network), Sentinel Visualizer.

Но потребности в инструментарии для решения исследовательских задач значительно шире. Например, в [2] представлены результаты применения теории перколяции для анализа и моделирования процессов в социальных сетях.

Мониторинг и прогнозирование распространения деструктивной информации

Особую актуальность обрело направление мониторинга и прогнозирования распространения деструктивной информации. Такими задачами занимаются, в частности, в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Так, авторы [3] применяют метрику самоподобия для формирования контент-функции, используя показатель Хёрста для принятия решения о целесообразности экстраполяции динамики распространения выбранного сообщения.

Технологии и процесс распространения информации постоянно эволюционируют. В связи с этим, результаты исследований быстро теряют актуальность. В этой гонке технологий исследователи находятся в роли догоняющих.

Гипотеза исследования

Идея работы заключается в том, чтобы построить архитектуру и прототип платформы, которая позволит проводить исследования распространения информации в Интернет. В её основу легли идеи, изложенные Дж. Клиром в книге “Системология. Автоматизация решения системных задач” [4] (рис. 2).

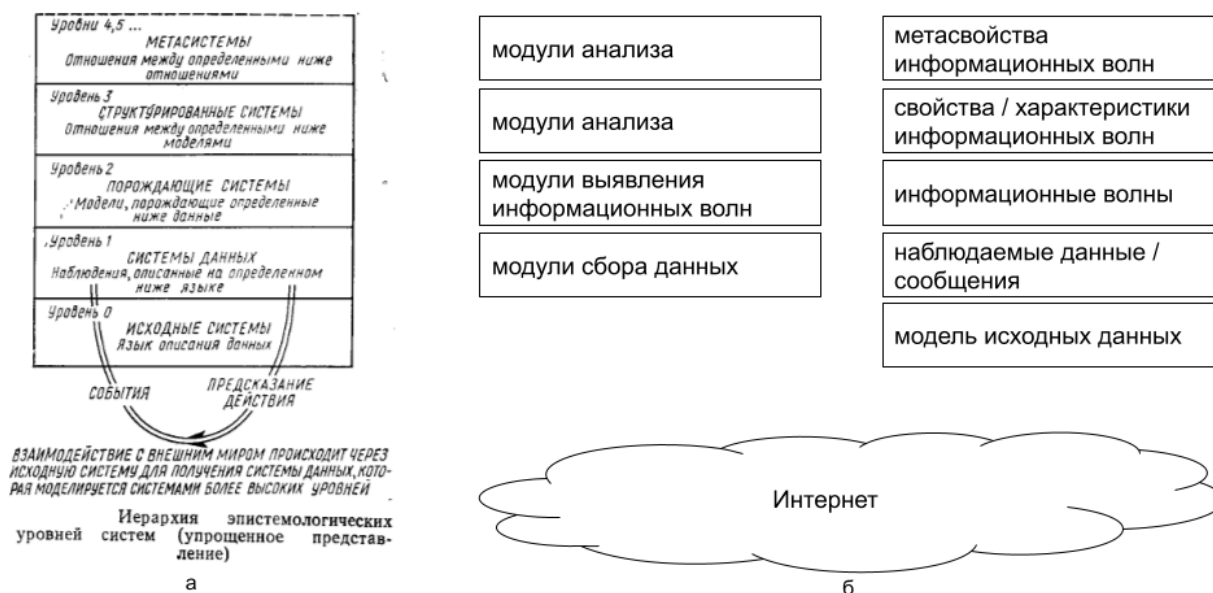


Рис.2. Сопоставление эпистемологических уровней по Клиру (а) и иерархии архитектуры системы для исследования информационных волн (б)

Платформа должна быть:

- Гибкой - интернет-технологии быстро меняются, архитектура системы должна позволять адаптироваться под новые условия среды и новые задачи.
- Распределённой - существующие централизованные решения дороги, что мешает им стать дешёвыми для массового применения.
- Прозрачной - важно получать не просто ответ, но и видеть решение, понимать, как оно получилось и “откуда растут уши”.

Основная гипотеза заключается в том, что процессы исследований можно “технологизировать” и реализовать в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Для этого потребуется:

1. Подобрать инструменты, которые позволят “машинными методами” (без участия человека) проследить распространение информационной волны, всю цепочку, начиная с появления сообщения в области видимости, прослеживая преобразования и перепубликации, переводы на другие языки и дальнейшие ветки, комментарии. Впоследствии, каждому тексту / элементу волны можно сопоставить эмоциональную оценку.

2. Машинными методами построить модель Интернета с точки зрения того, каким образом те или иные авторы и акторы участвуют в распространении информации, как реагируют на те или иные сообщения.

3. “Обернуть” использованные методы таким образом, что их будет просто стыковать друг с другом и заменять друг другом по необходимости, образуя различные конфигурации и функциональность “машины” для исследования.

Платформа должна быть:

- Гибкой - интернет-технологии быстро меняются, архитектура системы должна позволять адаптироваться под новые условия среды и новые задачи.

- Распределённой - существующие централизованные решения дороги, что мешает им стать дешёвыми для массового применения.

- Прозрачной - важно получать не просто ответ, но и видеть решение, понимать, как оно получилось и “откуда растут уши”, в чём заключается первопричина.

Построение структуры модели данных

Интернет, как объект исследования, имеет структуру и топологию, которая постоянно эволюционирует. Поведение акторов нелинейно зависит от времени (от времени суток, дня недели, сезона и так далее).

Модель распространения информации в Интернет, как объект исследования, определяется следующим набором сущностей:

- сообщение (уникальный идентификатор, текст, оценка эмоциональной окраски, метаданные (автор, время публикации, источник, ресурс, язык));
- производное сообщение;
- комментарий;
- информационная волна - динамическая совокупность сообщения, его производных сообщений и комментариев.

С одной стороны, Интернет является частью параметрического множества, на котором будут наблюдаться информационные волны. С другой стороны, наблюдение за участием акторов Интернет в распространении информации, их отношением и влиянием на те или иные сообщения позволяет оценивать эти элементы.

Методика сбора данных и идентификации связей между сообщениями

Методика сбора данных включает в себя:

- инструментарий наблюдения, то есть методы сбора данных о появлении сообщений;
- инструментарий идентификации информационной волны, то есть методы сравнения текстов, позволяющие определить “родственность” двух и более сообщений;

- алгоритмы и порядок применения выбранных инструментов;
- способ хранения результатов;
- рекомендации к адаптации альтернативных инструментов (методов) для встраивания их в процесс сбора данных.

Методика исследования характеристик информационных волн

Методика исследования характеристик информационных волн включает в себя набор методов и алгоритмов извлечения содержательных характеристик:

- инструментарий оценки информационных волн, включая эмоциональную и тональную оценку текстов;
- инструментарий кластерного анализа для классификации информационных волн;
- рекомендации по адаптации альтернативных методов анализа данных для включения их в набор инструментария определения характеристик информационных волн.

Проектирование архитектуры системы

Платформа для исследований должна быть адаптивной и гибкой, позволяющей легко перестраиваться в соответствии с развитием Интернет и интернет-технологий, платформа должна позволять подключать новые инструменты в форме модулей (рис. 3).

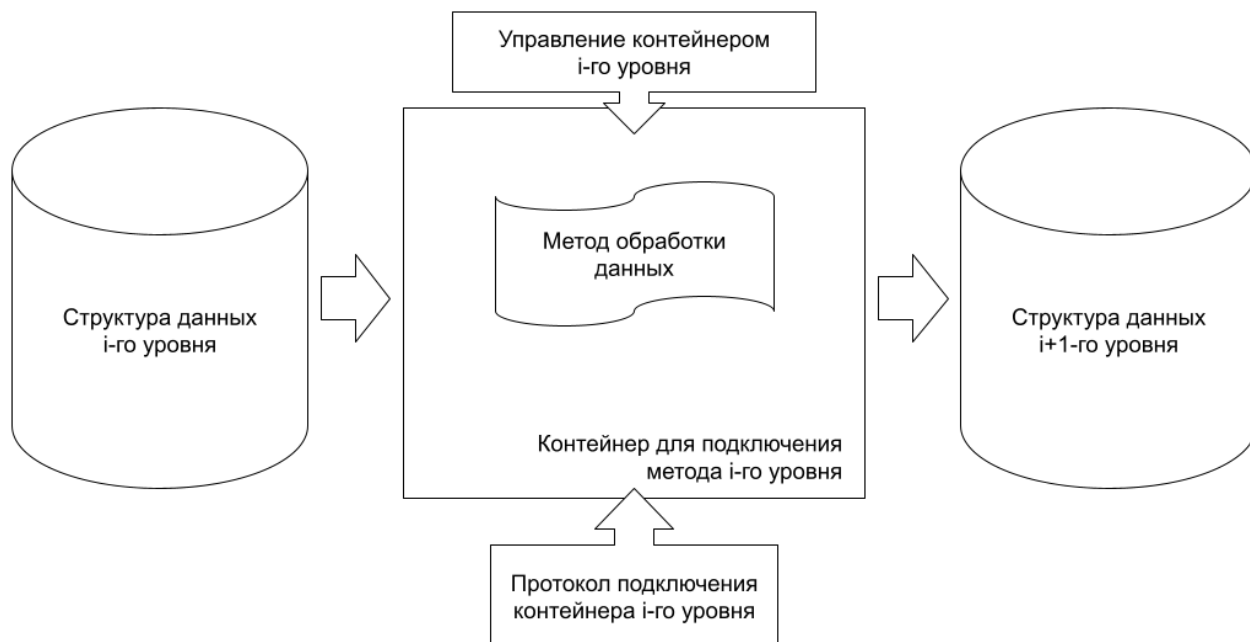


Рис.3. Модуль i -го уровня иерархии в общем виде

Архитектурные требования:

- иерархическая обработка данных - базовый уровень представляет собой инструментарий сбора данных; последующие - инструментарий обработки и анализа данных;

- модульность - необходимо иметь возможность расширения набора доступных инструментов;

- открытость и прозрачность - пользователю должны быть доступны результаты всех этапов обработки данных;

- управляемость - необходимо иметь возможность настройки сценариев работы системы.

Кроме того, желательно построить систему в виде распределённой системы независимых взаимодействующих агентов.

Архитектура платформы определяет решение ключевых вопросов:

1. Модель распределённого хранения данных об информационных волнах в Интернет, разработанная на основе:

- требований к модели распределённого хранения исходных данных об информационных волнах и результатов исследований волн;

- концепции структуры данных для распределённого сбора, обработки и хранения данных для информационных волн в Интернет.

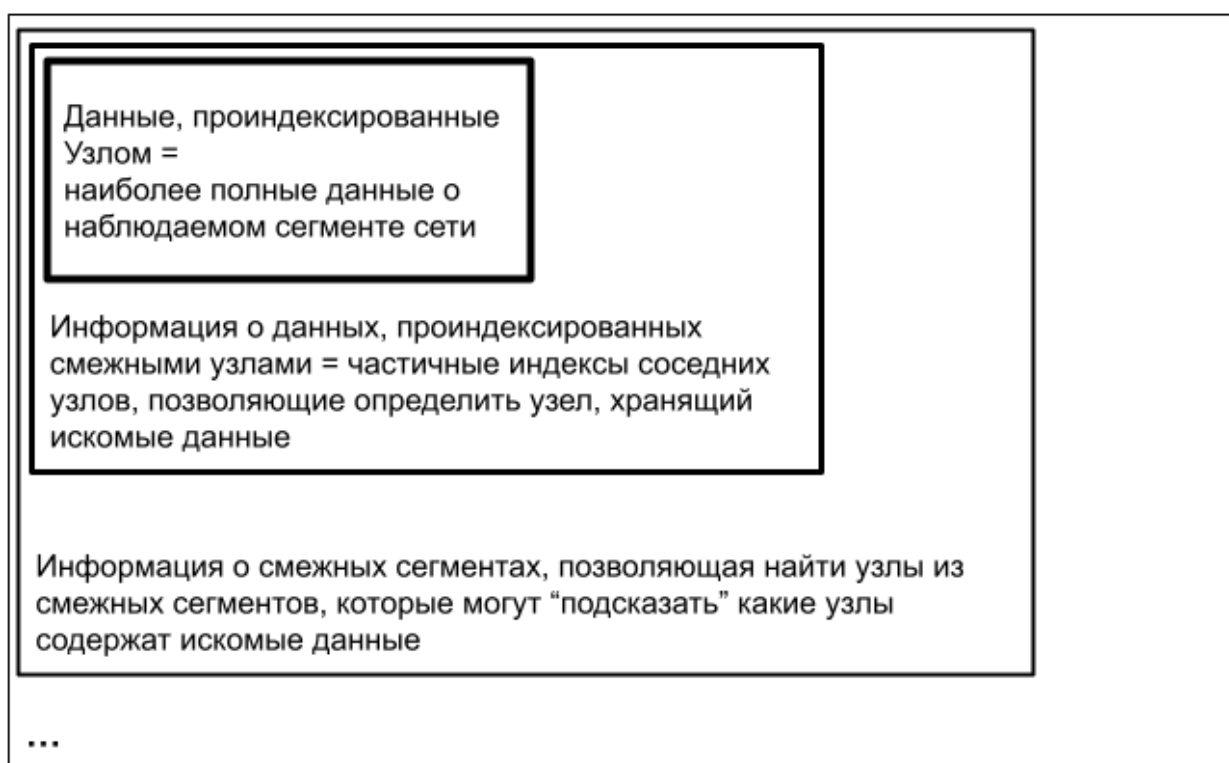


Рис.4. Концепция модели данных узла, обеспечивающей возможность поиска данных в распределённой системе узлов

2. Модель распределённой обработки данных об информационных волнах в Интернет (рис. 4) определена, исходя из:

- требований к распределённой обработке данных об информационных волнах в Интернет;
- конструктивных требований к агентам и модулям;
- требований к протоколам взаимодействия.

Резюме

В тезисах доклада поставлена проблема исследования информационных волн. Проведён анализ литературных источников, показывающий актуальность данной тематики и интерес исследователей к решению данной проблемы. Сформулирована гипотеза исследования, заключающаяся в том, что существует потенциальная возможность машинными методами осуществить моделирование процесса распространения информации в сети Интернет и осуществлять анализ полученной информации в автоматическом режиме, с учётом различных аспектов трансформации информации и её смыслов, в том числе – эмоциональной окраски, что может принести практическую пользу исследователям, работающим в различных сферах человеческой деятельности. Приведены архитектурно-значимые требования к проектируемой системе, представлены начальные версии архитектуры, коррелирующие с идеями Дж. Клира.

Список литературы

1. Градосельская Г.В., Щеглова Т.Е. Теоретические основы исследования информационных волн в социальных сетях // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019. М: ИПУ РАН, 2019, С. 1196–1199.
2. Жуков Д.О., Хватова Т.Ю., Залыцман А.Д. Моделирование стохастической динамики изменения состояний узлов и перколяционных переходов в социальных сетях с учетом самоорганизации и наличия памяти // Информатика и ее применения, 2021, Т. 15, № 1, С. 102—110.
3. Тельбух В.В., Десятых А.В., Захарчук И.И., Пирухин В.А. Метод прогнозирования динамики распространения деструктивной информации в социальных интернет-сервисах на основе контент-анализа // Известия Тульского Государственного Университета. технические науки, № 1, 2023, С. 379-386.
4. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. - М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.

Ю.А. Гриценко, студент специалитета, Yunagritsenko@yandex.ru
Н.О. Молчанова, студент специалитета, molchanovannoo@mail.ru
С.В. Князева, ассистент, knyazevasv@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРИНЯТИЯ ЭКСПЕРТНЫХ РЕШЕНИЙ В СУДЕ

Аннотация: В статье рассматривается практическая реализация системы судебно-криминалистической аналитики, предназначенной для автоматизации поддержки принятия экспертных решений в сфере киберпреступности. Представленная система решает задачу классификации данных путем интеграции судебной практики, таксономии кибератак MITRE ATT&CK и экспертных рекомендаций. Описаны ключевые компоненты архитектуры: алгоритмы сбора и обработки данных, модель базы знаний и формула интеллектуального взвешивания для генерации обоснованных рекомендаций. Обсуждаются достигнутые преимущества в скорости и консистентности анализа, а также юридические и этические аспекты внедрения подобных систем в правосудие.

Ключевые слова: киберпреступность, судебно-криминалистическая аналитика, MITRE ATT&CK, классификация данных, автоматизация решений, взвешенные рекомендации.

Yu.A. Gritsenko, student, Yunagritsenko@yandex.ru
N.O. Molchanova, student, molchanovannoo@mail.ru
S.V. Knyazeva, assistant, knyazevasv@bmstu.ru
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

SOLVING THE DATA CLASSIFICATION PROBLEM FOR AUTOMATING EXPERT DECISION-MAKING IN COURT

Abstract: The article examines the practical implementation of a forensic analytics system designed to automate expert decision support in cybercrime. The presented system solves the data classification problem by integrating judicial practice, the MITRE ATT&CK cyberattack taxonomy, and expert recommendations. The key components of the architecture are described: data collection and processing algorithms, a knowledge base model, and an intellectual weighting formula for generating evidence-based recommendations. The achieved advantages in analysis speed and consistency are discussed, along with the legal and ethical aspects of implementing such systems in the judiciary.

Key words: cybercrime, forensic analytics, MITRE ATT&CK, data classification, decision automation, weighted recommendations.

В условиях цифровой трансформации правосудия киберпреступность представляет собой комплексный вызов, требующий интеграции юридической экспертизы и технологических решений. Ежегодный рост количества дел, связанных с компьютерными преступлениями, составляет 15–20%, при этом каждое третье дело требует специальных технических знаний, которые часто отсутствуют у традиционных юридических специалистов. Система правосудия сталкивается с рядом системных проблем: перегруженностью судов, увеличившимся на 40% сроком рассмотрения дел о киберпреступлениях за последние три года, дефицитом сертифицированных цифровых криминалистов, а также существенной субъективностью в квалификации преступлений, где расхождения в применении статей Уголовного кодекса достигают 30% в различных регионах. В этом контексте ключевым тезисом является не замена судьи искусственным интеллектом, а создание интеллектуального ассистента, способного трансформировать неструктурированные данные в систему взвешенных рекомендаций, — своего рода «цифрового коллеги», обладающего феноменальной памятью на прецеденты.

Практический кейс реализации такой системы демонстрирует архитектуру судебно-криминалистической аналитики, основанную на сборе и классификации данных из разнородных источников. Архитектура системы может быть визуализирована как трехуровневая диаграмма, где нижний уровень представляет источники данных, средний — модули обработки, а верхний — интерфейс принятия решений. Важнейшим компонентом является парсинг судебной практики, осуществляемый с помощью специализированного программного модуля, который автоматически собирает решения судов по ключевым статьям Уголовного кодекса Российской Федерации, включая статьи 272, 273, 274 и 159.6 [1,2]. Алгоритм парсинга построен по принципу конвейера: начальный этап включает веб-скрапинг с соблюдением задержек и правил файла robots.txt, далее следует этап семантического анализа текста с выделением ключевых сущностей, и завершающий этап — нормализация и категоризация данных. Технической особенностью данного модуля является использование вежливого веб-скрапинга, подразумевающего соблюдение правил и задержек при обращении к сайту, что обеспечивает этическую корректность и устойчивость системы к блокировкам. Например, дело №А40–12345/2024 автоматически классифицируется как «Компьютерное мошенничество» на основе анализа текста решения и ссылки на соответствующую статью законодательства (см. табл. 1).

Таблица 1. Фрагмент таблицы базы данных судебных решений

№	Номер дела	Дата решения	Суд	Категория	Описание
1	A40-123456/2023	2023-12-15	Арбитражный суд города Москвы	Компьютерные преступления	Несанкционированный доступ к информации
2	A41-789012/2023	2023-11-20	Арбитражный суд Московской области	Вредоносное ПО	Распространение вредоносного программного обеспечения
3	1-234/2023	2023-09-10	Московский городской суд	Компьютерное мошенничество	Дело по ст. 159 УК РФ
4	2-567/2023	2023-09-05	Санкт-Петербургский городской суд	Фишинг и социальная инженерия	Кража персональных данных
5	A43-345678/2024	2024-02-24	Арбитражный суд Нижегородской области	Конфиденциальные данные	Нарушение защиты персональных данных

Параллельно система интегрирует международный стандарт описания кибератак MITRE ATT&CK, который служит универсальным языком коммуникации между юристами и техническими специалистами [3]. Процесс интеграции иллюстрируется алгоритмической схемой сопоставления, где этапы включают загрузку таксономии, маппинг ключевых терминов на юридические конструкции и установление семантических связей. Такие техники, как T1566.001 (целевой фишинг с вложением) и T1055 (инъекция кода в процессы), а также тактика TA0001 (первоначальный доступ) становятся семантическими единицами, позволяющими формализовать описание инцидентов. Создание связей между этими техниками и судебными решениями осуществляется через структурированную базу знаний, включающую таблицы `technique_court_decision`, `technique_source_article` и `technique_recommendation`. Диаграмма отношений «сущность-связь» наглядно демонстрирует, как техники, судебные решения, статьи и рекомендации образуют сеть с множественными ребрами, где каждое ребро имеет вес и атрибуты релевантности. Пример семантической цепочки иллюстрирует, как техника фишинга связывается с двенадцатью судебными решениями, включая конкретное дело, квалифицированное по статье 159.6 УК РФ, и сопровождается рекомендацией по анализу заголовков электронной почты и исследованию вложений. Дополнительно база данных содержит специализированные таблицы для экспертных

рекомендаций, классификации преступлений, анализа доказательств и учета прецедентов, формируя целостную экосистему знаний.

Алгоритм взвешивания, реализованный на основе формулы интеллектуальной оценки, преобразует собранные данные в количественные показатели значимости [4]. Алгоритм отображает последовательность шагов: вычисление релевантности, подсчет частоты встречаемости, применение логарифмического преобразования и линейной комбинации. Формула сочетает экспертно оценённую релевантность техники конкретному делу и логарифмированное количество связанных судебных решений, что предотвращает доминирование часто встречающихся техник и обеспечивает баланс между частотой и значимостью. Практический расчёт для техники T1566.001, имеющей двенадцать связанных дел со средней релевантностью 0.85, демонстрирует итоговый вес 0.845, указывающий на высокую важность данной техники для квалификации компьютерных преступлений. Такой подход позволяет системе предоставлять судье обоснованные выводы, подкреплённые историческими данными (см. табл. 2).

Таблица 2. Распределение весов техник MITRE по судебным делам

Техника (ID)	Название техники	Количество дел	Средняя релевантность	Итоговый вес
T1566.001	Spearphishing Attachment	12	0.85	0.845
T1055	Process Injection	8	0.72	0.732
T1003	OS Credential Dumping	6	0.69	0.701
T1059.001	PowerShell Execution	5	0.65	0.674

Автоматизация экспертных решений раскрывается через несколько сценариев использования, реализованных в текущей версии системы. На данном этапе разработки фокус сделан на создании устойчивого ядра, обрабатывающего данные и устанавливающего семантические связи, в то время как расширенные интерфейсы визуализации и интерактивные схемы остаются областью для будущих модификаций. При квалификации преступлений система уже способна идентифицировать соответствующие техники MITRE, предлагать статьи Уголовного кодекса с указанием количества прецедентов и находить похожие судебные решения, что существенно ускоряет и стандартизирует процесс. Взаимодействие пользователя с системой осуществляется через консольный интерфейс, который, несмотря на свою текстовую природу, реализует полный цикл обработки запроса: от ввода описания инцидента через анализ и сопоставление к выдаче ранжированного списка рекомендаций [5].

В части формирования рекомендаций по сбору доказательств система строит логические цепочки, извлекая связанные данные из таблиц базы знаний. Хотя текущая реализация представляет эти цепочки в виде структурированного текстового вывода, лежащая в их основе модель данных концептуально соответствует направленному ациклическому графу, где узлами являются техники, рекомендации и следственные действия. Это создает прочный фундамент для будущей модификации, в рамках которой станет возможным визуальное отображение этих связей в виде интерактивных диаграмм, предоставляющих следовательно наглядный чек-лист.

Оценка сложности дела уже сейчас выполняется на основе вычислимых метрик, включающих количество и вес задействованных техник, наличие прецедентов и необходимых экспертиз. Эти метрики позволяют системе формировать текстовый прогноз сроков расследования и помогать в распределении ресурсов. Накопление таких оценок по множеству дел создает массив данных, который в перспективе может быть использован для построения гистограмм распределения дел по уровням сложности, что станет мощным инструментом для аналитики и управления судебной нагрузкой. Таким образом, текущая система представляет собой полностью работоспособное ядро, архитектура которого сознательно спроектирована с учетом возможностей для последующего обогащения пользовательского интерфейса и аналитического функционала.

Эффективность системы проявляется в измеряемых преимуществах, таких как сокращение времени поиска прецедентов с нескольких часов до минут, мгновенный подбор статей УК РФ, автоматическое формирование рекомендаций, а также снижение расхождений в квалификации на 25%. График сравнительного анализа времени обработки дел до и после внедрения системы демонстрирует значительное сокращение временных затрат на всех этапах. Образовательная функция системы обеспечивает непрерывное обучение новых судей и анализ трендов судебной практики, что может быть визуализировано через диаграммы временных рядов, показывающие эволюцию применения статей УК РФ. Однако система имеет и критические ограничения, включая проблему качества данных, обусловленную неполной цифровизацией судебных решений, что решается использованием демо-данных для начального обучения и постепенным наполнением базы. Вопрос юридической ответственности алгоритма нивелируется чётким позиционированием системы как инструмента поддержки принятия решений, где окончательный вердикт остаётся за судьёй. Риски смещений в исторических данных минимизируются регулярным аудитом связей и механизмами переоценки прецедентов, что может быть отображено в виде циклической диаграммы процесса контроля качества данных.

Юридические и этические аспекты использования системы включают соответствие принципу состязательности через обеспечение равного доступа к аналитическим инструментам для всех сторон процесса, право на обжало-

вание рекомендаций и сохранение человеческого контроля над принятием решений. Схема архитектуры системы подчеркивает наличие модуля логирования и объяснения решений, который генерирует трассируемые отчеты о том, как были получены те или иные рекомендации. Этические рамки предполагают прозрачность алгоритма, регулярный аудит на предмет смещений в данных и анонимизацию персональных данных в судебных решениях перед их загрузкой в систему. Таким образом, представленная система судебно-криминалистической аналитики демонстрирует практическую реализацию классификации данных как основы для интеллектуальных помощников, усиливающих человеческую экспертизу в условиях цифровой трансформации правосудия. Интеграция алгоритмических схем и визуальных диаграмм в описание системы не только проясняет её архитектуру и принципы работы, но и предоставляет исследователям и практикам инструментарий для анализа, воспроизведения и дальнейшего развития данной методики.

Список литературы

1. Уголовный кодекс РФ [Электронный ресурс]: режим доступа - https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_10699/.
2. Постановление Пленума Верховного Суда РФ [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://www.vsrp.ru/documents/own/31913/>.
3. MITRE ATT&CK® Framework Official Documentation [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://attack.mitre.org/>.
4. Sedgewick R. Algorithms in C++. Part 5: Graph Algorithms – Addison-Wesley Professional, 2002. – 528 p.
5. Stroustrup B. The C++ Programming Language (4th ed.). – Addison-Wesley Professional, 2013. – 1366 p.

Я.А. Гросс, студент специалитета, yana.gross.05@mail.ru

Т.М. Волосатова, доцент, tamarav@bmstu.ru

С.В. Князева, ассистент, knyazevasv@bmstu.ru

МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СТЕГАНОГРАФИИ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ЗАЩИЩЁННЫХ НЕИЗВЛЕКАЕМЫХ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В ИЗОБРАЖЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ОХРАНЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

Аннотация: Исследование направлено на разработку устойчивого метода цифровых водяных знаков для защиты авторских прав на изображения. Рассматривается проблема уязвимости классических методов к статистическому стегоанализу и различным видам обработки. Предлагается двухуровневая система: «ядро», скрытно встроенное в изображение с помощью стеганографии. механизм визуализации, который при обнаружении «ядра» динамически накладывает видимый водяной знак на изображении.

Ключевые слова: цифровые водяные знаки, стеганография, защита авторских прав, LSB-метод, DCT-преобразование, стегоанализ

Y. A. Gross, student, yana.gross.05@mail.ru

T.M. Volosatova, associate professor, tamarav@bmstu.ru

S.V. Knyazeva, assistant, knyazevasv@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

APPLYING STEGANOGRAPHY METHODS TO EMBED SECURE, IRREMOVABLE DIGITAL WATERMARKS INTO IMAGES FOR INTELLECTUAL PROPERTY PROTECTION

Abstract: The research is devoted to develop a robust digital watermarking method for image copyright protection. It addresses the vulnerability of classical methods to statistical steganalysis and various types of processing. A two-tier system is proposed: a hidden kernel covertly embedded in the image using steganography. Visualization mechanism applies dynamically a visible watermark to the image upon detection of the kernel.

Key words: digital watermarking, steganography, copyright protection, LSB method, DCT transform, steganalysis

В цифровую эпоху, где контент стремительно растет, защита интеллектуальной собственности становится критически важной. Легкость копирования и распространения цифровых произведений требует надежных механизмов для подтверждения авторства и борьбы с незаконным использованием. Цифровые водяные знаки (ЦВЗ) являются ключевым инструментом для решения этой проблемы, обеспечивая скрытое внедрение идентификационной информации в медиафайлы.

Однако современные стеганографические методы, такие как LSB-замещение, уязвимы к стегоанализу. Методы, такие как хи-квадрат или RS-анализ, эффективно выявляют факт внедрения сообщения через обнаружение статистических аномалий в младших битах изображения. Это ставит под угрозу долговременную скрытность и устойчивость ЦВЗ.

Цель этого исследования заключается в создании метода внедрения цифрового водяного знака, который останется невидимым для человеческого глаза и будет устойчив к попыткам его обнаружения и удаления. Пользователь получает изображение, содержащее конфиденциальную информацию, такую как фамилия и инициалы автора, которая не может быть удалена без повреждения изображения. Это связано с тем, что невозможно определить, какие именно изменения необходимо внести для удаления информации, так как алгоритм распределения битов является псевдослучайным. При этом скрытый идентификатор должен быть легко и быстро обнаружен с помощью специального детектора, который использует секретный ключ для точного определения местоположения информации.

Видимый водяной знак при публикации изображения реализуется на уровне платформы, где происходит загрузка. Процесс включает несколько этапов:

- после загрузки изображения сервис или платформа (например, социальная сеть или фотохостинг) автоматически активирует детектор;
- детектор сканирует изображение в поисках специального «ядра» водяного знака, используя известный ему ключ;
- если водяной знак обнаружен и успешно распознан, система динамически добавляет поверх изображения видимую графическую часть водяного знака, такую как логотип, имя автора или знак копирайта. Для пользователя это выглядит как загрузка «чистой» картинки, которая на сайте автоматически отображается уже с водяным знаком. При этом скрытая информация остаётся в изображении, что делает удаление видимого водяного знака невозможным.

Традиционно анализ методов стеганографии для внедрения цифровых водяных знаков начинается с пространственной области. Основной метод - замена наименее значимого бита (LSB). Он использует минимальное влияние младших битов цветовых каналов на восприятие изображения. При внедрении данные заменяют биты сообщения. Максимальный

объём сообщения зависит от размера изображения: (Ширина × Высота × 3) / 8 байт.

Но LSB уязвим к сжатию с потерями, изменению размеров и цветокоррекции. Его легко обнаружить статистическими методами (хи-квадрат, RS-анализ) [1]. Усовершенствованные варианты (использование синего канала, случайный порядок внедрения, кодирование ± 1) помогают скрыть данные, но не решают проблему [2].

Методы частотной области, такие как алгоритм Коха на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП), работают со спектральными коэффициентами блоков. Они внедряют данные в средние частоты, что делает их устойчивыми к сжатию и искажениям. Однако эти методы требуют много вычислительных ресурсов.

Блочные методы работают с группами пикселей (например, 3×3 или 4×4). Они несут один бит через управление битом чётности. Это повышает устойчивость к локальным искажениям и статистическому анализу. Но ёмкость таких методов ниже, чем у других. Например, для изображения 1000×1000 пикселей и блока 4×4 ёмкость составляет около 62,5 КБ. Для надёжного извлечения данных нужно точно знать параметры разбиения [1].

В настоящее время цифровые водяные знаки, в особенности основанные на спектральных методах, широко применяются в различных сферах для защиты авторских прав и отслеживания цифрового контента. Их использование особенно заметно в системах видеохостинга, где каждый зритель получает уникальную версию видео с невидимыми идентификаторами, привязанными к пользователю, сессии или устройству [3]. Эти идентификаторы позволяют точно определить источник утечки при несанкционированном распространении. Такая технология востребована в крупных стриминговых сервисах, образовательных и корпоративных системах для защиты конфиденциальной информации. Развитие методов направлено на повышение устойчивости идентификаторов, уменьшение вычислительной нагрузки и обеспечение совместимости с различными устройствами и форматами доставки [4].

Основная концепция предлагаемой системы заключается в разделении водяного знака на два компонента: неудалимое стеганографическое ядро, скрытое в изображении, и механизм его визуализации, активируемый внешним детектором. В результате злоумышленник, просматривая файл с изображением, не замечает видимого знака, но при загрузке этого изображения на ресурс с работающим детектором, скрытое ядро будет обнаружено и преобразовано в видимую маркировку. Для практической реализации этой концепции необходимо объединить невидимое, устойчивое стеганографическое ядро, неотличимое от данных изображения, с модулем визуализации.

В рамках исследования был проведён эксперимент по сравнению двух методов стеганографии, в ходе которого данные скрывались в изображениях формата WebP. На подготовительном этапе исходное изображение, пред-

ставленное в формате JPEG, было преобразовано в WebP с сохранением максимально качества.

Первый эксперимент был основан на методе LSB-замещения. На языке C++ были разработаны программы для внедрения текстового сообщения в младшие биты пикселей изображения и для его последующего извлечения. Модификация младших битов цветовых каналов не привела к визуальным изменениям, а значение цвета изменилось не более чем на $1/255$ ($\approx 0.392\%$), что ниже порога восприятия [5]. Однако последующие испытания показали, что метод имеет фундаментальную уязвимость. Любая коррекция насыщенности/резкости или сжатие с потерями, неизбежное при загрузке в интернет, уничтожает LSB-слой, что приводит к потере данных или восстановлению шума. Это делает метод непригодным для практической защиты информации.

Второй эксперимент был посвящён более устойчивому подходу - спектральному методу, основанному на дискретном косинусном преобразовании (DCT). В ходе реализации этого метода использовалось блочное дискретное косинусное преобразование и последующая модификация выбранных коэффициентов в частотной области. Основная задача заключалась в выборе оптимального частотного диапазона для достижения баланса между визуальной незаметностью внедрения и устойчивостью к преобразованиям изображения. Изменения были внесены только в среднечастотные компоненты, что позволило сохранить визуальное качество контейнера и также повысило стойкость к сжатию с потерями.

Обратное преобразование и последующее кодирование осуществляются с использованием оптимизированных процедур для минимизации накопленных артефактов. Этот подход продемонстрировал значительное превосходство над пространственными методами в тестах на устойчивость [5]. Визуально изображения остались неотличимыми, так как метод учитывает особенности человеческого зрения, более чувствительного к перепадам яркости и низким частотам, чем к плавным изменениям цветности. Для Y-канала (компонента яркости) изменения не вносятся, что обеспечивает 0% искажений. Для U-канала (компонент цветности) применяется избирательное модифицирование среднечастотных коэффициентов с амплитудой возмущения примерно 0,007 единиц, что приводит к относительному искажению $(0,007 / 128) \times 100\% \approx 0,0055\%$. Для V-канала (второй цветностной компоненты), что дополнительно снижает совокупный уровень искажений. Этот подход обеспечивает невозможность визуального обнаружения внедрённых данных при сохранении структурной целостности изображения.

Вопрос о возможности скрытия информации в изображениях требует более тщательного анализа. Данный параметр зависит от количества блоков, на которые разделяется контейнер. Важно учитывать, что увеличение объема внедряемых данных приводит к усилению визуальных искажений. Это подтверждается экспериментально полученным графиком зависимости пикового

отношения сигнала к шуму (PSNR) от объема встраиваемого сообщения (рис. 1).

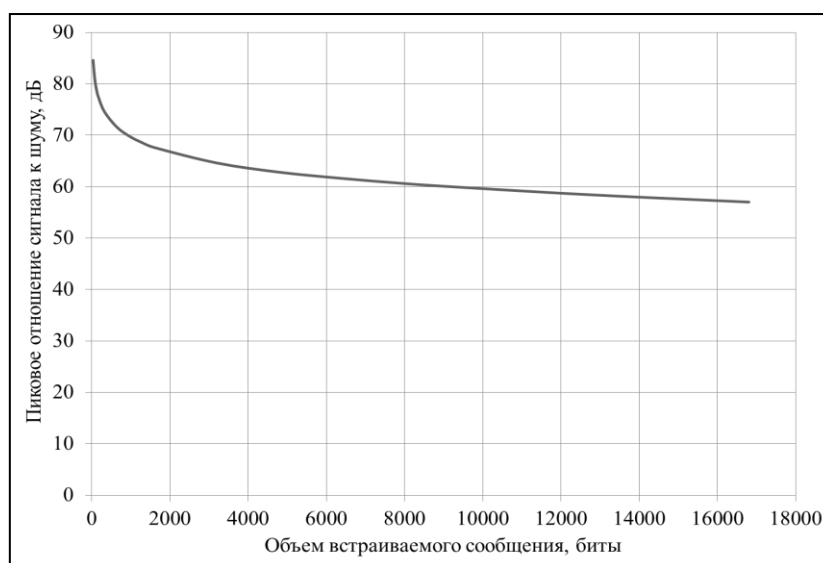


Рис. 1. График зависимости пикового отношения сигнала к шуму от объема встраиваемого сообщения

В задачах скрытой стеганографии, где приоритетным аспектом является обеспечение незаметности внедренной информации, рекомендуется ограничивать объем передаваемых данных в пределах 20-30% от теоретически допустимой емкости. Данное значение находится в диапазоне от 400 до 600 символов, что является оптимальным для задач, связанных с внедрением цифровых водяных знаков (ЦВЗ).

Проведённый сравнительный анализ показывает, что применение метода дискретного косинусного преобразования (DCT) значительно сокращает количество заметных дефектов изображения примерно в 220 раз относительно метода замены младшего значащего бита (LSB). Последний демонстрирует гораздо больший уровень искажений — порядка 0,4%. Преимуществом спектрального подхода стало подтверждение его стойкости в условиях испытаний: в отличие от метода LSB, внесённые данные сохраняются после стандартного редактирования и лёгкого сжатия изображений. Причина заключается в том, что манипуляции в частотной области оказываются менее восприимчивыми к обычным операциям обработки, ориентированным преимущественно на пространственные характеристики изображения.

Необходимо подчеркнуть, что существующие технологии позволяют выявить наличие скрытых данных, даже если вносимые изменения совершенно незаметны человеческому глазу. Хотя методы стеганографии, основанные на DCT и включающие YUV-модификации, характеризуются значительной устойчивостью, они всё ещё подвержены некоторым способам выявления, таким как анализ гистограмм коэффициентов DCT исходных и повторно сжатых изображений. Современные инструменты обнаружения ак-

тивно задействуют машинное обучение, среди которых выделяются сверточные нейронные сети, способные эффективно фиксировать следы вмешательства в средние частоты. Такие решения показывают эффективность около 70-80% при работе с простыми версиями DCT-стеганографии. Вместе с тем, внедрение улучшенных алгоритмов снижает шансы обнаружения до уровня 40-60%, поскольку адаптация уровней квантования и случайный выбор точек для внесения изменений делают процесс идентификации заметно сложнее.

Цель текущего этапа исследований достигнута не полностью. Экспериментальное сопоставление простого метода замещения младших бит (LSB) и спектральных техник на основе преобразования DCT подтвердило ожидания. Метод LSB показал свою полную несостоятельность перед любыми видами обработки, приводящей к потере данных. Напротив, использование DCT-трансформации обеспечило создание устойчивого ядра, сохраняющегося после потерь при сжатии, небольших геометрических деформаций и коррекции цвета, сохраняя признаки естественного шума изображения.

Полученные результаты подтверждают потенциал многоуровневого подхода к защите данных, подходящего для широкого практического применения. Например, такую систему можно встроить в сервисы хостинга видео, фотостоки и соцсети для автоматизированного мониторинга контента. Применение динамического наложения видимых водянистых знаков непосредственно при показе материала устраняет эстетический ущерб оригинальному изображению, одновременно обеспечивая надёжную защиту авторских прав путём сохранения скрытого уникального идентификатора. Следующие шаги развития включают адаптацию методики для видеоконтента и повышение её сопротивляемости целенаправленным атакам с использованием технологий машинного обучения.

Список литературы

1. Скрывать не скрывая. Еще раз о LSB-стеганографии, хи-квадрате и... сингулярности? [Электронный ресурс]: режим доступа – <https://habr.com/ru/articles/422593/>.
2. Цифровые водяные знаки. Стеганография [Электронный ресурс]: режим доступа – <https://habr.com/ru/sandbox/16609/>.
3. Защищает ли Netflix свой контент? [Электронный ресурс]: режим доступа – <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/565432/>.
4. Forensic Watermarking: 4 Types, Implementation & Challenges Explained [Электронный ресурс]: режим доступа – <https://www.vdocipher.com/blog/forensic-watermarking/>.
5. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. – М.: СОЛОН-Пресс, 2023. – 262 с.

НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ

Аннотация: В статье актуализируется тема расширения приложения методов искусственного интеллекта в деятельности правоохранительных органов России. Приводится краткое описание трех направлений, где интенсификация внедрения различных технологий искусственного интеллекта принесет очевидный эффект. Обсуждается вопрос нехватки кадров, которые должны заниматься внедрением и использованием интеллектуальных решений. В качестве варианта разрешения этой проблемы предлагается рассмотреть вопрос подготовки инженеров по знаниям на базе ведомственных высших учебных заведений.

Ключевые слова: правоохранительная деятельность, министерство внутренних дел, искусственный интеллект, инженер по знаниям, подготовка кадров.

V.V. Lopuhov, Senior lecturer, vlad1963-63@mail.ru

V.A. Uglev, Ph.D, docent, uglev-v@yandex.ru

Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia Federation

SOME AREAS OF THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE ACTIVITIES OF LAW ENFORCEMENT AGENCIES

Abstract: The article highlights the topic of expanding the application of artificial intelligence methods in the activities of Russian law enforcement agencies. A brief description is given of three areas where the intensification of the introduction of various artificial intelligence technologies will have an obvious effect. The issue of the shortage of personnel who should be involved in the implementation and use of intelligent solutions is being discussed. As a solution to this problem, it is proposed to consider the issue of training knowledge engineers on the basis of departmental higher education institutions.

Key words: law enforcement, Ministry of Internal Affairs, artificial intelligence, knowledge engineer, personnel training.

Повсеместная цифровизация и автоматизация процессов деятельности граждан, производственных и эксплуатационных функций предприятий и организаций привели к тому, что количество информации, циркулирующей в стране, лавинообразно растет. Накапливаются и хранятся огромные массивы данных, представляющие самостоятельную ценность для обработки [1]. Эти процессы требуют совершенствования методологии сбора таких данных, систематизации, хранения и анализа, привлекая методы искусственного интеллекта. Если в различных отраслях народного хозяйства эти процессы идут уже давно, то в деятельности подразделений органов внутренних дел для этих целей искусственный интеллект (ИИ) активно внедряется не так давно.

Приходится констатировать, что по ряду объективных и субъективных причин Министерство внутренних дел (МВД) России не является передовым ведомством по разработке и внедрению новых, перспективных методик обработки и анализа информации. Вместе с тем, разумное использование достижений технического прогресса в повседневной оперативно-служебной деятельности подразделений должно существенно повысить результативность их работы [2]. В данной статье рассмотрены такие возможности в интересах основной функции МВД России – борьбы с преступностью, т.е. охраны общественного порядка и безопасности, предотвращения, раскрытия и расследования преступлений. В этой деятельности следует выделить ряд крупных направлений. Приведем только три из них.

Первое направление

Использование ИИ в системах идентификации различных объектов оперативного интереса – людей, транспортных средств, животных, недвижимости и др., построение маршрутов их передвижения, соблюдения лицами запретов и ограничений, выявление и фиксация противоправных действий для формирования доказательственной базы при привлечении к ответственности, установление сторожевого контроля и т.д. Тематика идентификации по изображению лица, а также автомобилей достаточно глубоко проработана [3], широко используется заинтересованными подразделениями МВД России, особенно в Москве, и имеет высокие результаты [4].

Требуется дальнейшей разработки автоматизированные системы идентификации по функционально-динамическим характеристикам человека, не связанным с изображением лица – походки, осанки, привычек движения, выявления в толпе лиц, осуществляющих террористические замыслы, и другое противоправное поведение. То есть интеллектуальные системы видеонаблюдения должны заменить опытного постового, сотрудника патрульно-постовой службы, который навскидку, интуитивно распознает преступника среди прохожих [5]. Такие работы активно ведутся, особенно Департаментом

информационных технологий Правительства Москвы, однако требуемой эффективности пока еще не получено.

Идентификация человека по распространенным биометрическим признакам — папиллярным узорам пальцев и ладоней (дактилоскопия), следам обуви (бутоскопия), запаховым следам (одорология), ДНК также глубоко отработаны, для этих процессов используются автоматизированные системы, в которые активно внедряются технологии ИИ.

Вместе с тем, считаем необходимым отметить недостаточное внимание политики развития МВД России идентификации человека по голосу. Голосовой отпечаток человека — это такой же идентификационный признак, как и другие. Заключение эксперта-криминалиста о принадлежности голоса конкретному лицу признается допустимым доказательством судом. Получение голосового отпечатка не требует физического контакта с заподозренным лицом. Использование ИИ существенно повышает вероятность распознавания фигуранта по голосовому отпечатку в соответствующей базе данных голосов [6].

Захлестнувшая страну волна телефонных мошенничеств приобрела масштабы национальной катастрофы, с использованием голосовой связи мошенники ежедневно совершают сотни тысяч покушений на совершение тяжких преступлений, фиксируются из которых только удавшиеся. При этом использование ИИ на стороне сотового оператора может позволить автоматически формировать базу данных голосов неустановленных лиц, совершивших тяжкие преступления, которая позволит в последствии идентифицировать их и привлекать к ответственности.

При всей привлекательности данного способа идентификации, он пока еще не получил распространения и связано это, на наш взгляд, с субъективными, не техническими, а организационными причинами.

Во-первых, требуют проработки правовые основания формирования такой базы данных.

Во-вторых, необходимо определить подразделение, которое будет этим заниматься.

Сегодня, экспертно-криминалистические подразделения, в состав которых входят фоноскопические отделения и отделы выполняют экспертизы и экспертные исследования, производят только экспертизу. Формирование баз данных в их функции не входит. Информационные центры возможно использовать для хранения базы данных голосов, но кто будет формировать ее и проводить идентификацию? Ни в функции следователей, ни оперуполномоченных, работающих по преступлению, эта задача не входит. Подразделения оперативно-розыскной информации еще в 2011 году проводили эксперименты по формированию базы данных голосов при отработке доставленных в территориальные отделы органов внутренних дел, идентификации преступников по голосу с наложением другой, имеющейся информации по преступ-

лению и заподозренных лицах, были получены перспективные результаты. Однако, в 2020 году данные подразделения были реорганизованы.

Таким образом, назрела необходимость проработки указанного способа идентификации, с использованием ИИ его возможно поднять на новый уровень.

Второе направление

Следующее направление – использование ИИ для информационно-аналитического обеспечения оперативно-розыскных мероприятий и следственных действий при раскрытии и расследовании преступлений [2]. Информационно-аналитическая работа требует проведения большого объема работы по поиску нужной, значимой для уголовного дела информации. Поиск производится оперуполномоченным сотрудником, осуществляющим оперативное сопровождение уголовного дела и следователем, его расследующим, по очень большому массиву разнородной, формализованной и неформализованной информации, содержащейся в ведомственных, вневедомственных источниках, интернет-сайтах и социальных сетях. Из этого массива нужно сделать выборки интересующей информации и сформировать ее в аналитическую справку, которая пишется в свободной форме и представляет в наглядном виде информацию по решаемой задаче.

В настоящее время это делается в основном вручную, с большими трудозатратами, качество аналитической справки зависит от квалификации аналитика. Сотрудники, способные выполнять такую работу, высоко ценятся в оперативных и следственных подразделениях. Использование ИИ позволит существенно повысить скорость и качество выполнения такой информационно-аналитической деятельности.

Третье направление

Использование ИИ актуально и для выявления преступлений в финансовой и банковской сфере. Данные технологии (включая анализа больших данных) позволяют автоматически выявлять преступные транзакции, многоступенчатые переводы, обнаруживать признаки легализации преступных доходов и т.д. [7].

Данной деятельностью занимаются банковские структуры, однако основные функции банков — это извлечение прибыли, а не борьба с преступностью, поэтому рассчитывать только на возможности банков не следует. Поэтому в деятельность подразделений по борьбе с экономическими преступлениями и коррупцией и следователей, расследующих экономические уголовные дела, необходимо внедрять ИИ, анализ больших данных и машинное обучение.

Таких направлений в правоохранительной деятельности МВД можно выделить много. Этот краткий обзор показывает общую постановку задачи на внедрение методов ИИ, которым занимается Министерство в ближайшие годы. Приоритетными направлениями здесь являются:

- системы технического зрения и технология глубокого обучения на базе искусственных нейронных сетей (раздел Machine Learning);
- интеллектуальный анализ данных, включая Data Visualization и Graph Visualization (раздел Data Mining);
- экспертные системы и онтологии (раздел символьного ИИ).

Все эти подходы предполагают, что в рядах правоохранительных органов не достаточным будет обеспечение слаженной работы специалистов по анализу данных и программистов с работниками практических служб (следователей, оперативных работников, экспертов-криминалистов, дознавателей и т.д.). Потребуется привлечение специалистов в области методологии искусственного интеллекта – инженеров по знаниям [8].

В нашей стране подготовку инженеров по знаниям (Knowledge Engineer) целенаправленно не ведет ни одно учебное заведение [9]. Существующие профессии Data Analyst и Data Engineer носят прикладной характер и ориентированы на работу с большими данными или средствами Machine Learning. Даже самая близкая, по сути, специальность 45.03.04 «Интеллектуальные системы в гуманитарной сфере» (РГГУ) [10], не в полной мере отвечает запросу рынка на инженеров по знаниям. Для сферы правоохранительной привлечение такого рода специалистов крайне востребовано.

Почему именно специалисты по инженерии знаний так ценны при проведении оперативно-розыскных мероприятий и иных задач работников МВД? Дело в том, что обработать большие массивы данных (извлечь из них информацию) можно только тогда, когда имеется система, для которой корректно сформирована архитектура базы данных, базы знаний и интеллектуального решателя [11]. Каждая задача в области борьбы с преступностью имеет свою специфику, а задач таких много. Одной из ведущих компетенций инженера по знаниям является контекстнезависимость [8]. Это значит, что он может быстро и результативно переключаться на разные области знаний при решении задач извлечения, структурирования и формализации знаний. Здесь не следует путать работу инженера по знаниям со специалистом по Data Engineer или Data Scientist. Методология работы с данными и знаниями различна. Поэтому необходим не только профстандарт по работе инженеров по знаниям как полноценной профессии в области ИИ, но и соответствующие программы подготовки специалистов (федеральные государственные образовательные стандарты).

Расширение точек приложения технологий ИИ в деятельности органов внутренних дел происходит в условиях дефицита кадров по ИИ. Они нужны во всех отраслях и не имеют высокой мотивации для того, чтобы пополнить ряды МВД. Созданием условий работы здесь для инженеров по знаниям не обойтись, т.к. задачи МВД России имеют значительную специфику (от юридической до технологической).

Разумным выходом в сложившейся ситуации представляется подготовка собственных специалистов, по аналогии с тем, как готовят аналитиков с уклоном в сферу информационной безопасности (специальность 10.05.05 [12]). Для инженеров по знаниям такой сценарий вполне реалистичен, т.к. выпускники не ведомственных учебных заведений в этой сфере деятельности нарасхват в коммерческих структурах. А собственные специалисты будут ещё и подготовлены к специфическим условиям работы в органах внутреннего правопорядка.

Список литературы

1. Чуранов В. Как формируется новый рынок промышленных данных и кто на нем будет зарабатывать // Монокль, 2025 [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://monocle.ru/2025/05/29/kolonka-tsifra/>.
2. Лопухов В. В. Информационно-аналитическое обеспечение как неотъемлемая часть процесса раскрытия преступлений на примере организации работы подразделений ГУ МВД России по г. Москве // Информационные технологии в деятельности органов внутренних дел. – 2023. – С. 215-221.
3. Смирнов И. А. Некоторые перспективы использования системы распознавания лица для пресечения административных правонарушений // Безопасность дорожного движения. – 2025. – №2. – С. 25-30.
4. Можаяева С.Ю., Можаяев С.А. О некоторых вопросах использования биометрической идентификации в целях выявления преступлений и правонарушений поднадзорных лиц // Вестник Воронежского института МВД России. – 2024. – №. 2. – С. 223-227.
5. Таганова А. А., Бурцев А. О. Современные методы выявления лиц, вынашивающих преступные замыслы // Прикладная юридическая психология. – 2018. – №. 2. – С. 34-38.
6. Галяшина Е. И. Языковые приемы телефонного мошенничества и способы его распознавания // Правовой альманах. – 2025. – №. 1 (41). – С. 19-26.
7. Гольченко Р. Ю., Минзянова Д. Ф., Миролубов С. Л. Актуальные вопросы раскрытия и расследования преступлений в цифровом пространстве // Научный компонент. – 2024. – №. 3 (23). – С. 5-17.
8. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 382 с.

9. Углев В.А. Инженер по знаниям как ключевая профессия шестого технологического уклада в сфере информационных технологий // Преподавание информационных технологий в Российской Федерации: Материалы XVIII Всероссийской конференции. - М.: МФТИ, 2020. - С. 165-167.

10. ФГОС специальности 45.03.04 «Интеллектуальные системы в гуманитарной сфере», утвержденный приказом N 324 Минобра РФ от 24.04.2018 (ред. от 08.02.2021). – <https://fgos.ru/fgos/fgos-45-03-04-intellektualnye-sistemy-v-gumanitarnoy-sfere-324/>.

11. Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. Инженерия знаний. – СПб.: Лань, 2016. – 324 с.

12. Приказ Минобрнауки №1457 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – специалитет по специальности 10.05.03 «Информационная безопасность автоматизированных систем» от 26.11.2020. – 32 с.

ФИЛОСОФСКИЙ ВЗГЛЯД НА ПРАВОСУБЪЕКТНОСТЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СФЕРЕ ПРАВОПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация: Исследование посвящено вопросу правосубъектности искусственного интеллекта в сфере правоприменения. Рассматриваются взгляды различных авторов на данный вопрос. Подчеркивается опасность дегуманизации права при появлении «электронных» судей. Делается вывод о недопустимости наделения вычислительной машины правосубъектностью в сфере правоприменения.

Ключевые слова: правосубъектность, искусственный интеллект, правоприменение, электронное лицо

P.N. Makovskaya, Advocate's intern, rostov.niks7@yandex.ru
Rostov regional Collegium of advocates "Business and Law"
Rostov-on-Don, Russia

A PHILOSOPHICAL VIEW ON THE LEGAL SUBJECTIVITY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE FIELD OF LAW ENFORCEMENT

Abstract: The study is devoted to the issue of the legal personality of artificial intelligence in the field of law enforcement. The views of various authors on this issue are considered. The danger of dehumanization of law in the emergence of «electronic» judges is emphasized. It is concluded that it is unacceptable to endow a computer with legal personality in the field of law enforcement.

Keywords: legal personality, artificial intelligence, law enforcement, electronic person

Возрастающие вычислительные возможности искусственного интеллекта (ИИ) и впечатляющий практический опыт его использования вызывает неизбежную постановку вопроса о тех границах, за которыми мы не можем допустить деятельность ИИ.

В самом деле, если в нынешнее время ИИ в статусе помощника юриста-человека способен самостоятельно вести дела любой сложности (быстро анализируя при этом огромный массив документов и находя оптимальные решения), то не следует ли предположить появление в недалеком будущем полностью автономных средств ИИ, наделенных правосубъектностью? Если

идти по этому пути дальше, то можем ли мы допустить автономных робота-судью и, соответственно, робота-адвоката, робота-прокурора и т.д., функционирующих в пространстве роботизированной «электронной юриспруденции»?

Вопросы правосубъектности ИИ рассматривали многие ученые: Т.А.Полякова и Г.Г. Камалова [1], Д.С. Милинчук [2], Н.В. Мишина [3], В.И.Павлов [4], Е.М. Терехов [5] и другие. Наиболее подробно концепция ИИ как правосубъектного лица проработана П.М. Морхатом [6 - 8]. В известных работах рассматривалась теоретическая возможность наделения ИИ правосубъектностью в таких сферах, как толкование права (Е.М. Терехов), интеллектуальная деятельность (П.М. Морхат) и некоторых других.

Термин ИИ (artificial intelligence) впервые был сформулирован молодым американским математиком Джоном Маккарти в 1956 году на семинаре в Дартмудском колледже.

В контексте настоящего исследования важно обратить внимание на высказывание Джона Маккарти о том, как именно он видит сущность ИИ: «пока мы не можем в целом определить, какие вычислительные процедуры мы хотим называть интеллектуальными. Мы понимаем некоторые механизмы интеллекта и не понимаем остальные. Поэтому под интеллектом в пределах этой науки понимается только вычислительная составляющая способности достигать целей в мире» [9].

Российская Национальная Стратегия развития ИИ на период до 2030 года [10] использует следующее определение ИИ: «комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые с результатами интеллектуальной деятельности человека или превосходящие их».

Следует упомянуть, что на сегодняшний день действующая Стратегия не допускает делегирование системам ИИ «ответственного нравственного выбора (в том числе принятие любых решений, способных оказать влияние на жизнь или здоровье человека), а также делегирование ответственности за последствия принятия решений» [10]. В данный момент развития ИИ «ответственность за все последствия работы систем ИИ несет физическое или юридическое лицо, признаваемое субъектом ответственности в соответствии с законодательством Российской Федерации».

С.А. Соменков в своей работе [11] отмечает, что на сегодняшний день с точки зрения гражданского права система, оснащенная ИИ - это вещь, правовой статус которой пока детально не урегулирован законодательно и не ограничен оборот, но в связи с возможностью автономного функционирования ИИ эта вещь способна причинить не только имущественный вред, но и вред здоровью и жизни человека [11].

В связи с этим, С.А. Соменков предлагает всегда рассматривать ИИ как источник повышенной опасности: «чем ИИ становится «умнее», тем он ста-

новится опаснее, так как моральных ограничений у него нет» [11]. В таком контексте у такой вещи всегда есть «хозяин», который несет конечную ответственность за последствия использования системы ИИ, будь то создатель нейросети, ее разработчик или пользователь, давший ИИ определенное задание.

Применительно к сфере права интеллектуальной собственности правосубъектность ИИ системно исследовал П.М. Морхат [6 - 8]. Он полагает, что решением проблемы с правосубъектностью ИИ может быть введение института электронного лица. При этом П.М. Морхат говорит, что правосубъектность включает в себя следующие требования или атрибуты: «лицо может быть субъектом права; бытие субъектом права влечёт за собой способность осуществлять права и выполнять обязанности; осуществление права требует осознанности и выбора» [7].

Автор настоящей работы считает, что наделение ИИ правосубъектностью в любом виде (аватар, электронное лицо или виртуальное юридическое лицо) приведет к разрушению устоявшейся системы как обычаев делового оборота, так и принятых в государстве обычаев и нормативов работы с обращениями физических лиц.

Но при этом гораздо более серьезным (по сравнению с техническим вопросом обеспечения деликтоспособности ИИ, и иными рассмотренными выше аспектами) представляется вопрос дегуманизации права при появлении «электронных» судей.

Так, С.И. Имгрунт в работе [12] было отмечено, что рассмотрение даже типичных дел не может быть доверено судье-автомату. При вынесении решения судья обязан руководствоваться не только нормами действующего законодательства (которые, действительно, вместе с примерами судебной практики доступны для ИИ в цифровом виде), но и учитывать разнообразные обстоятельства, движимый при вынесении решений не только правовыми, но и моральными принципами.

Вынесение решения не может осуществляться электронным устройством, поскольку в противном случае из системы правосудия будет неизбежно устранен такой основополагающий компонент его гуманистического фундамента, как судебное усмотрение [12].

Недопустимость делегирования ИИ решений нравственных проблем, неизбежных в вопросе правоприменения, усугубляется низкой эффективностью алгоритмов по обработке плохоформализуемых данных, к числу которых относятся любые проявления чувственно-эмоциональной сферы человека [13]. Взволнованные речи участников судебных слушаний способен воспринять только человек – судья.

Таким образом, философский взгляд на проблему правосубъектности искусственного интеллекта возвращает нас к гуманистическим основам бытия: несмотря на все фантастические возможности ИИ, за машиной мы всегда должны видеть человека, будь то создатель ИИ (отвечающий за свое де-

тище), либо человек в суде, чьи эмоции и чувства, к сожалению, недоступны и неинтересны алгоритмам ИИ.

Список литературы

1. Полякова Т.А., Камалова Г.Г. Право искусственного интеллекта и его место в системе информационного права // Правовое государство: теория и практика, 2021, № 3, стр. 133 – 145.
2. Милинчук Д.С. Искусственный интеллект в праве: тенденции, угрозы и перспективы права на современном этапе развития общества // Имущественные отношения в Российской Федерации, 2021, № 7, стр. 70 – 76.
3. Мишина Н.В. Право искусственного интеллекта как новая сфера правового регулирования или новая отрасль права // Евразийский союз ученых, 2020, № 3-5, стр. 62-65.
4. Павлов В.И. Правосубъектность роботов как электронных лиц и возможные модели их юридической ответственности // Право.by, 2023, № 6, стр. 74 – 84.
5. Терехов Е.М. Искусственный интеллект в официальном толковании права: за или против? // Legal Bulletin, 2025, № 2, стр. 9-17.
6. Морхат П.М. Искусственный интеллект: правовой взгляд. Научная монография / РОО «Институт государственно - конфессиональных отношений и права». - М.: Буки Веди, 2017, 257 с.
7. Морхат П.М. Юнит искусственного интеллекта как электронное лицо // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Юриспруденция, 2018, № 2, стр. 61 – 73.
8. Морхат П.М. Правосубъектность юнита искусственного интеллекта: некоторые гражданско – правовые подходы // Вестник Костромского государственного университета, 2018, № 3, стр. 280 – 283.
9. McCarthy J. What is artificial intelligence? // <https://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/whatisai.html>.
10. Национальная Стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года (в редакции Указа Президента Российской Федерации от 15.02.2024 № 124).
11. Соменков С.А. Искусственный интеллект: от объекта к субъекту? // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА), 2019, № 2, стр. 75 – 85.
12. Имгрунт С.И. Правовое регулирование в условиях цифровизации: проблемы и перспективы // Северо – Кавказский юридический вестник, 2022, № 2, стр. 129 – 134.
13. Zehlike M., et al. Beyond incompatibility: Trade-offs between mutually exclusive fairness criteria in machine learning and law // Artificial intelligence, 2025, № 340.

Секция 8

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ФИЛОСОФСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И РОБОТОТЕХНИКИ

Т.А. Беляева, к.т.н., советник при ректоре, tag@rggu.ru
МГТУ СТАНКИН, г. Москва, Россия

В.А. Углев, к.т.н., эксперт, uglev.va@rggu.ru, uglev-v@yandex.ru
Институт наследия и современного общества РГГУ, г. Москва, Россия

БАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЭПОХИ НОВЫХ «ГЕОГРАФИЧЕСКИХ» ОТКРЫТИЙ

Аннотация: В статье актуализируется комплексный взгляд на такую науку, как искусственный интеллект (ИИ). Отмечается тенденция неравномерности развития этой области знаний и её потенциал для развития человечества. С целью проиллюстрировать сложившуюся ситуацию приводится аналогия с эпохой великих географических открытий, рассматриваются её предпосылки и следствия, проводятся параллели с сегодняшним днём. Указывается исключительная важность необходимости в массовом образовании в области ИИ, включая необходимость появления новых профессий.

Ключевые слова: искусственный интеллект, эпоха великих географических открытий, цифровую навигационная грамотность, ИИ-грамотность.

T.A. Belyaeva, Ph.D., Advisor to the Rector, tag@rggu.ru
MSTU STANKIN, Moscow, Russia

V.A. Uglev, Ph.D, expert, uglev.va@rggu.ru, uglev-v@yandex.ru
Institute of Heritage and Modern Society of RSUH, Moscow, Russia

THE BASIC TECHNOLOGY OF THE NEW ERA "GEOGRAPHICAL" DISCOVERIES

Annotation: The article updates a comprehensive view of such science as artificial intelligence (AI). There is a tendency of uneven development of this field of knowledge and its potential for the development of mankind. In order to illustrate the current situation, an analogy is given with the era of great geographical discoveries, its prerequisites and consequences are considered, and parallels are drawn with the present day. It points out the exceptional importance of the need for mass education in the field of AI, including the need for new professions.

Keywords: artificial intelligence, the age of great geographical discoveries, digital navigation literacy, AI literacy.

Введение

Технический прогресс всё больше довлеет над современным обществом. Многие базовые технологии, изменившие мир, так сильно вошли в

нашу жизнь, что изъять их уже не представляется возможности. Это и электричество, и сотовые телефоны, и интернет, и многое другое. Одной из таких технологий претендует стать искусственный интеллект (ИИ). И как всё новое, оно вызывает естественный оборонительный рефлекс: неприятие, тревогу и недоверие.

Обратившись к материалам недавней конференции «ИИ и цифровая реальность» (проходила в октябре 2025 года в Москве [1]) можно увидеть следующие заглавия пленарных докладов учёных РАН, докторов наук: «Доверенный искусственный интеллект и его регуляторика», «Искусственный интеллект в образовании: риски развития в ситуации неопределённости», «Искусственный интеллект как конкурент: сознание или его имитация?», «Генеративные модели искусственного интеллекта: мораль и логика» и пр. Это говорят специалисты. А в информационном пространстве обывателя убеждают, что генеративный интеллект – это новый шаг к развитию цивилизации [2]. Так ли это? Не столкнулись ли мы с очередным симулякром? И если есть надежда на «революцию» во главе с ИИ, то что это несёт? Попробуем порассуждать на эту тему.

Ожидания и реальность

Собственно ИИ отмечается как ключевая технология на текущем этапе развития прогресса. Не гуманитарное знание, и не техника, а именно ИИ. Но если погрузиться в тему, то станет очевидным, что как сам термин Artificial Intelligence, так и его содержание не сводятся к популярным ныне большим языковым моделям. Они намного шире [3]. На схеме с рис. 1. приведена классификация основных методов ИИ, которые условно делятся на восходящие (самообучающиеся на массивах данных) и нисходящие (формирующие базу экспертных знаний).



Рис. 1. Схема разделения методов ИИ на восходящий и нисходящий подходы [4]

Ниже, в таблице 1. приведены основные достоинства и недостатки этих методов.

Таблица 1. Характеристика методов ИИ

Подходы в ИИ	Достоинства	Недостатки
Восходящие методы	- Скорость обучения (не нужно долго формализовать); - Датасет можно собрать автоматически (например, из интернета); - Возможность автоматической генерации обратной связи в естественно-языковой форме; - Можно обойтись без экспертов; - Квалификация разработчика может быть минимальной (промт-инженер); - Имеются отработанные бесплатные сервисы и облачные платформы	- Невозможность гарантировать оптимальность решения; - Невозможность получить объяснение решений; - Генерация решений, которые могут не иметь аналогов в реальном мире; - Адаптивность решений под ожидания промт-инженера; - Галлюцинации, как побочный эффект; - Огромные вычислительные мощности; - Сложность формирования качественных датасетов; - Сложность обоснования ответственных за «плохие» решения; - Этические, правовые и этнические аспекты слабо проработаны
Нисходящие методы	- Оптимальность решений; - Объяснимость решений; - Низкая ресурсоёмкость по вычислительным мощностям; - Высокая предметная адаптация обратной связи; - Компактность описания знаний - Лёгкая интеграция в надсистемы (включая бортовые компьютеры) ; - Чёткое разделение ответственности за решения ИИ.	- Трудоёмкость составления баз знаний; - Трудоёмкость модификации баз знаний и отражения частных экспертных мнений; - Дороговизна привлечения экспертов; - Наличие в ответах субъективной составляющей (индивидуального опыта экспертов

Мы знаем, что широко освещаемые в прессе технологии ИИ и советующие учебные курсы для новичков ограничиваются рассмотрением искусственных нейронных сетей (большие языковые модели, свёрточные нейронные сети, рекомендательные системы и пр.). А вот про технологию экспертных систем, онтологий или декларативных языков стараются не говорить: уж очень затратные эти подходы с позиции времени и квалификации привлекаемых специалистов.

Итогом такого освещения темы ИИ стал эффект завышенных ожиданий: с одной стороны, всё громче звучат лозунги о повсеместном внедрении ИИ, а с другой стороны – успешность внедрения проектов с ИИ оправдывает себя в менее, чем 10 % проектов. Кривая хайпа Гартнера подтвер-

ждает эту тенденцию [5]. Но тогда возникает вопрос: а не тупиковый и это подход? Действительно ли ИИ является ключевой технологией нового уклада? Попробуем провести параллели из истории.

Эпоха новых географических открытий как метафора к ИИ

XV век. Португальские мореплаватели выходят в Атлантику на каравеллах – легких, маневренных кораблях с парусами, позволяющими идти против ветра. У них в руках – компас, астрольбия, напечатанные на станках Гуттенберга карты. Им тесно в существующем мире (ойкумене) [6]. Они верят, что за горизонтом – золотые города, пряности, новые миры.

Теперь перенесемся в XXI век. Ученые и инженеры запускают большие языковые модели типа ChatGPT. У них в руках – графические процессоры, терабайты кода, триллионы данных. Они тоже верят, что за горизонтом — новый мир: интеллектуальный, творческий, возможно, даже сознательный (General AI).

На первый взгляд – разные эпохи, разные технологии. Но если приглядеться глубже, мы увидим удивительное сходство.

Во-первых, это технологический фундамент. Раньше ни Колумб, ни современный разработчик ИИ не смогли бы ничего открыть в одиночку. Открытия возможны только тогда, когда сходятся несколько технологий. Для мореплавателей это были: компас (из Китая), паруса (из Арабского мира), рулевое колесо (из Европы) и печатный станок, который массово распространял карты и знания.

Для нас сейчас – это GPU, алгоритмы и данные, большие данные.

Во-вторых, экономические и социальные последствия. Открытие Америки изменило не только карту мира, но и саму структуру глобальной экономики. Золото, серебро, рабский труд – все это постепенно стало основой новой колониальной экономической системы. Но вместе с богатством пришли и катастрофы: демографический коллапс коренных народов, «культурное» насилие, неравенство в распределении благ как между метрополией и колониями, так и внутри общества.

Сегодня ИИ тоже создает новую экономику – экономику данных и алгоритмов. Он повышает производительность, открывает новые рынки, но одновременно усиливает цифровое неравенство (ставит под угрозу рабочие места и порождает этические дилеммы).

В-третьих, политическая трансформация. В XV–XVI веках технологическое преимущество превращалось в политическое господство: Испания и Португалия (позднее и Англия) делили мир так же, как сейчас его делят США и Китай. Только теперь страны соперничают не за колонии, а за лидерство в ИИ. Кто контролирует чипы, данные и стандарты – тот формирует правила XXI века. Технология снова становится инструментом геополитики.

В эпоху Великих географических открытий те, кто понимал основы навигации, как пользоваться компасом, читать карту, ориентироваться по звездам имели огромное преимущество. Например, в португальской нави-

гационной школе принца Генриха Мореплавателя юноши изучали астрономию, картографию и математику. Это они делали не для того, чтобы стать капитанами, а чтобы понимать язык нового мира.

Сегодня обучение ИИ в школах выполняет ту же функцию. Оно не ставит целью воспитать миллионы разработчиков-программистов, инженеров по знаниям или промпт-инженеров. Оно формирует цифровую навигационную грамотность: «как задавать вопросы ИИ-системам?», «как оценивать достоверность их ответов?», «как использовать ИИ как инструмент творчества и решения задач?». И главное: «как не терять ориентацию в мире, где граница между человеческим и машинным все больше стирается?».

В XV–XVI веках знание морских маршрутов, торговых правил и этикета общения с «новыми народами» становилось частью образования элиты. Сегодня ИИ-грамотность – это компонент цифрового гражданства. Ученик, который понимает, что генеративная модель не «думает», а предсказывает, что данные могут содержать предвзятость, и что авторство в эпоху генеративных сервисов требует новых этических рамок, – такой ученик менее уязвим для манипуляций, лучше защищен от дезинформации и способен критически оценивать технологии, формирующие его окружение.

И что с этим делать? (вместо заключения)

Есть устойчивое чувство, что эта аналогия не просто красивая метафора. Она напоминает нам: любой технологический прорыв — это не только возможность, но и ответственность. Эпоха Великих географических открытий дала нам глобализацию, но и колониализм. Эпоха ИИ может дать нам невиданное процветание или новую форму цифрового неравенства.

Важный аспект аналогии: в эпоху Открытий те, кто не умел читать карты или строить корабли, становились объектами эксплуатации — населением колоний, лишенным права на участие в определении своего будущего.

Сегодня существует реальный риск «цифрового колониализма», когда большинство людей остаются пассивными потребителями технологий, разработанных в нескольких технологических центрах (Силиконовая долина, Пекин и др.). Поэтому массовое обучение ИИ в школах (своеобразный ликбез) – это способ сделать более справедливым доступ к «картографии будущего». Неизбежно появление новых профессий в этой области наук (например, архитекторы систем ИИ, инженера по знаниям и пр.). Необходимо научить людей грамотно использовать ИИ, не доверять ему слепо, постоянно перепроверять его ответы, распознавать ошибки и галлюцинации в результатах работы генерационных моделей.

В противном случае мы рискуем вслепую искать ответы у нейронных сетей, которые эти ответы не содержат [7]. И никакой техникой объяснимого ИИ (XAI) [8] этого не добиться. А запреты ни к чему хорошему,

кроме как отставания от «конкурентов», ни приведут. Поэтому разумный баланс в понимании и использовании ИИ позволит снизить риски пойти тупиковым путем, попасть в технологическую зависимость, потерять «человечность» решений в наступающем новом дивном мире.

Список литературы

1. Искусственный интеллект и цифровая реальность. Программа пленарных докладов международной конференции. Москва, РАН, Научный совет по методологии искусственного интеллекта и когнитивных исследований, 22 октября 2025 г. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://phai.info/2025>.
2. Генеративный бум. Эксперты рассуждают о будущем ИИ. Как новые технологии изменяют бизнес? [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://lenta.ru/articles/2024/07/24/generativny/>.
3. Осипов Г. С. Лекции по искусственному интеллекту. – М.: Ленанд, 2025 – 272 с.
4. Углев В.А. Искусственный интеллект: нормативно-правовая база // Общество. Право. Современность: материалы научно-представительских мероприятий: в 4 ч. ЧЗ. - Красноярск: СибЮИ МВД России, 2025. - С. 92-94.
5. Gartner Hype Cycle Identifies Top AI Innovations in 2025 [Электронный ресурс]. – режим доступа: https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2025-08-05-gartner-hype-cycle-identifies-top-ai-innovations-in-2025?trk=public_post_comment-text.
6. Максаковский В.П. Историческая география мира: учебное пособие. – М.: Ленанд, 2016. – 624 с.
7. Гурова Т. Можно ли доверять решениям такого ИИ? // Монокль, 2025, №5. – С.84-92.
8. Arrieta A., Díaz-Rodríguez N., Del Ser et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. Information fusion, 2020, vol. 58, pp. 82-115.

А.А. Зинина, к.психол.н., zinnia_aa@nrcki.ru
старший научный сотрудник НИЦ Курчатовский институт,
МГЛУ, РГГУ, г. Москва, Россия

А.А. Котов, к.филол.н., kotov_aa@nrcki.ru
ведущий научный сотрудник НИЦ Курчатовский институт,
МГЛУ, г. Москва, Россия

В.Н. Мазурок, магистр психологии личности, vladislavamazurok10@gmail.com
РГГУ, г. Москва, Россия

ЛЮДЯМ НРАВЯТСЯ ПОХОЖИЕ? ДОВЕРИЕ К РОБОТАМ С ЭКСТРАВЕРТИРОВАННЫМ И ИНТРОВЕРТИРОВАННЫМ ПОВЕДЕНИЕМ

Аннотация: В исследовании оценивали влияние поведенческих характеристик социальных роботов (внешне экстравертный vs интровертный) на доверие к озвученной информации: участники взаимодействовали с двумя роботами F-2, демонстрировавшими контрастные невербальные паттерны. Достоверность фактов оценивали по шкале Лайкерта. Результаты показали значимое преимущество интровертированного робота. Качественный анализ показал, что интровертированное поведение ассоциировалось с вдумчивостью, объективностью и меньшим риском манипуляции, тогда как экстравертное у некоторых вызывало эффект перепреубеждения, а у других – восприятие большей уверенности и достоверности. Полученные данные подчёркивают значимость поведенческих характеристик социальных роботов и указывают на потенциальную эффективность интровертированного поведения в контекстах, требующих высокого доверия к информации.

Ключевые слова: робот-компаньон, невербальная коммуникация, человеко-машинное взаимодействие, доверие, экстравертированность, интровертированность.

A.A. Zinina, Ph.D, senior researcher, zinnia_aa@nrcki.ru
Kurhcatov Institute, Russian State University for the Humanities,
Moscow State Linguistic University, Moscow, Russia

A.A. Kotov, Ph.D., senior researcher, kotov_aa@nrcki.ru
Kurhcatov Institute, Russian State University for the Humanities,
Moscow State Linguistic University, Moscow, Russia

V.N. Mazurok, Master's in Personality Psychology, RSUH, Moscow, Russia

DO PEOPLE PREFER SIMILAR ONES? TRUST IN ROBOTS WITH EXTRAVERTED AND INTROVERTED BEHAVIOR

Abstract: The study assessed the influence of social robots' behavioral characteristics (externally extroverted vs. introverted) on trust in the information they voiced:

participants interacted with two F-2 robots that displayed contrasting nonverbal patterns. The veracity of the facts was rated on a Likert scale, and analysis revealed a significant advantage for the introverted robot. Qualitative analysis indicated that introverted behavior was associated with thoughtfulness, objectivity, and a lower perceived risk of manipulation, whereas extroverted behavior produced a persuasive effect for some participants and – for others – was perceived as greater confidence and credibility. The findings underscore the importance of social robots' behavioral characteristics and suggest the potential effectiveness of introverted behavior in contexts requiring high trust in information.

Key words: companion robot; nonverbal communication; human–robot interaction; trust; extraversion; introversion.

С развитием ИИ и робототехники социальные роботы рассматриваются как потенциальные участники бытовой и профессиональной среды, частично замещающие функции питомцев, медсестер, ассистентов и эмоциональных компаньонов, при этом ключевым показателем их приемлемости является доверие со стороны людей.

Одним из важных параметров доверия к роботам являются личностные черты пользователя [1, 2]. Так, исследования показывают, что экстраверсия связана с более позитивным отношением к социальным роботам, включая предпочтение меньшей дистанции при взаимодействии и более благоприятные впечатления о роботах [3–7]. В это время нейротизм отрицательно связан с отношением к социальным роботам [8]. В работе [9] также показали, что экстраверсия и открытость новому опыту являются важными факторами, влияющими на отношение участников к роботам.

С другой стороны, нельзя отрицать влияние поведенческих характеристик роботов на уровень доверия к ним со стороны пользователей. Исследования показывают, что роботы, обладающие внешними человеческими чертами, такими как выражение эмоциональных состояний и эмпатии, вызывают большее доверие у людей [10]. Отдельно было показано, что роботы с мимическими характеристиками, которые люди обычно ассоциируют с доверием (например, поднятые брови и уголки губ), вызывают большее доверие и меньшее психологическое сопротивление [11]. Было также показано, что роботы, демонстрирующие экстравертивные поведенческие паттерны, вызывают большее доверие, чем роботы с интровертным поведением, независимо от личностных характеристик реципиента [12]. В работе также показано, что испытуемые были более заинтересованы и впечатлены роботами-экстравертами, чем роботами-интровертами [13, 14].

В других исследованиях показан эффект сходства-притяжения: пользователи скорее предпочитают робота с типом поведения (интроверт/экстраверт) похожим на их собственный [8, 15]. Аналогичные наблюдения подтверждаются и другими исследованиями [16, 17]. Экстравертные участники с высокими ожиданиями относительно роботов склонны приписывать роботу экстраверсию, проецируя на него собственные черты [18].

Интроверты и экстраверты более высоко оценивают дружелюбие и вовлекающие стратегии робота, демонстрирующего соответствующую черту личности [19]. Интересно, что интроверты воспринимают меньшее социальное присутствие интровертированных роботов, но тем не менее предпочитают таких роботов в качестве компаньонов, оценивая их дружелюбие выше. Также было показано, что воспринимаемое наслаждение от взаимодействия с экстравертными роботами коррелирует с собственными экстравертными чертами участников [20].

В противоположность этому, другие исследования однозначно демонстрируют эффект притяжения по комплементарности. Эксперименты с робот-щенком Sony AIBO показали, что участники точно определяли экстраверсию или интроверсию робота по звуковым и двигательным сигналам, и предпочитали роботов, чьи черты дополняли их собственные [21]. Эта закономерность распространялась и на оценки интеллекта робота: «Интровертные люди считали экстравертного AIBO более умным, чем интровертного AIBO, тогда как экстравертные люди считали интровертного AIBO более умным, чем экстравертного AIBO» (там же с. 765).

Другая точка зрения утверждает, что предпочтение сходства или комплементарности зависит не только от психологических характеристик участника, но и от роли, которую принимает робот: «эффект притяжения по сходству» наблюдался «для экстравертных участников, когда робот выступал экскурсоводом, и эффект притяжения по комплементарности – для интровертных участников, когда робот был уборщиком» [22].

В целом, как показывает анализ литературы, доверие человека к социальным роботам зависит от множества факторов, включая характеристики как человека, так и робота, при этом результаты исследований часто противоречивы. Эти несоответствия могут объясняться различиями во внешности робота, поведенческих паттернах, контексте взаимодействия и характеристиках выборки. Настоящее исследование ставит целью оценить степень человеческого доверия к суждениям робота на основе экстравертных/интровертных поведенческих паттернов робота и собственных характеристик человека. При этом учитывается как самоидентификация как экстраверта или интроверта, так и психологические оценки черты с помощью тестов.

Метод. Для моделирования различных типов личности роботов исследователи меняют размах, темп и частоту движений [14]. В работе [23] разработали метод изменения восприятия экстраверсии виртуального агента путем изменения параметров создания языка, темпа жестов и движений. В недавней работе [24, 25] подтвердили связь между скоростью и амплитудой жестов с проявлением экстраверсии в поведении роботов. Для эксперимента поведенческие характеристики роботов-интровертов и экстравертов были разработаны с учетом предыдущих исследований в области социальной робототехники, а также с использованием мультимодального корпуса REC [26–28]. Для каждого робота было создано по 7 паттернов поведения для произнесения факта, и по 7 паттернов поведения после про-

изнесения факта – это невербальный паттерн, отмечающий конец высказывания и приглашающий человека оценить факт. В то время, когда один из роботов озвучивал факт, сопровождая его жестами, другой робот демонстрировал инактивное поведение – шаблоны этого поведения были одинаковыми для обоих роботов. В своём поведении роботы демонстрировали (а) для робота-экстраверта – амплитудные, направленные на человека жесты, приподнятые брови, улыбка и направленный на человека взгляд (рис. 1а); (б) для робота-интроверта – более спокойные, сдержанные, закрытые жесты, менее экспрессивное выражение лица, отсутствие зрительного контакта (рис. 1б).



(а)



(б)

Рис. 1. Робот с экстравертированными жестами и выражением лица (а) и робот с интровертированными жестами и выражением лица (б)

Процедура. В рамках эксперимента человек взаимодействовал с двумя роботами Ф-2. Роботы поочередно озвучивают некоторые факты, степень доверия к которым испытуемый должен был сразу же оценить по десятибалльной шкале Лайкерта: 1 – не верю этой информации, 10 – полностью уверен, что это правда (рис. 2). Всего было использовано 32 факта, в которые сложно поверить, например, *Если желтую канарейку кормить красным перцем, цвет ее перьев станет красным*. Утверждения предъявлялись каждому испытуемому в случайном порядке со случайным выбором робота, но с сохранением пропорции истинных и ложных утверждений в речи каждого робота (16 правдивых и 16 ложных фактов).

После эксперимента испытуемые заполняли анкету, в которой оценивали двух роботов по шкалам семантического дифференциала: привлекательность, доверие, комфортность взаимодействия и др. В анкете также был вопрос о самооценке экстраверсии и интроверсии у испытуемых. В качестве контрольного условия мы отдельно набрали группу испытуемых, которые оценивали экспериментальные факты онлайн – мы использовали Google Forms. Кроме этого, мы использовали опросник большой пятерки

Big Five Inventory-2 (BFI-2), который разработали К.Дж. Сото, О.П. Джон. В России этот опросник адаптирован [29].

Выборка. В исследовании участвовали 125 испытуемых. Из них 33 человека (средний возраст 30,2, 11 участников мужского пола) оценивали факты онлайн и не контактировали с социальными роботами, а 92 человека (средний возраст в группе 21,8 лет, 20 участников мужского пола) проходили эксперимент с участием социальных роботов.



Рис. 2. Экспериментальная ситуация

Результаты. Результаты Friedman ANOVA показывают, что различия между тремя условиями статистически значимы ($p < 0.001$) – рис. 3. Участники эксперимента в целом больше доверяют фактам, исходящим от роботов (интроверта и экстраверта), чем фактам, представленным онлайн без участия робота.

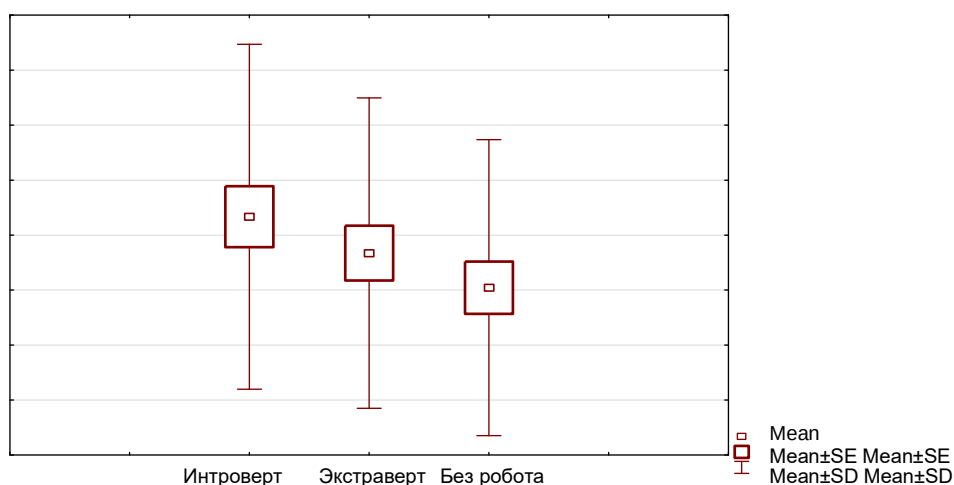


Рис. 3. Средние оценки доверия к фактам в трех группах

Согласно полученным данным, среднее доверие фактам от интровертированного робота составило 5,8 ($SD=1,5$, min 2,75; max 8,3), а фактам от экстравертированного робота – 5,3 ($SD=1,4$, min 2,5; max 7,8). Различие по этому параметру значимо (Mann-Whitney U-test, $p=0,002$) – см. рис. 4. Таким образом, наблюдается существенный сдвиг оценок доверия к фактам, озвученным интровертированным роботом. Тем не менее в опросе после

эксперимента 46 из 92 респондентов сказали, что доверяют двум роботам совершенно одинаково (50,0%). 26 из 92 респондентов сказали, что больше доверяют роботу-интроверту (28,3%) и 20 из 92 респондентов сказали, что больше доверяют роботу-экстраверту (21,7%). Следовательно, можно говорить о расхождении между имплицитными и эксплицитными оценками доверия к роботам.

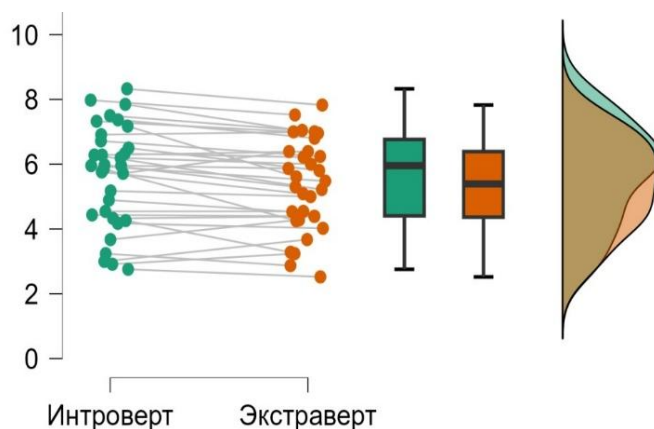


Рис. 4. Различия в восприятии фактов от роботов с разным типом поведения

Полученные данные также свидетельствуют, что существует прямая связь между предпочтением робота и доверием к нему (Spearman $r=0,21$, $p=0,044$). Более того, получено, что люди, которые оценивают себя скорее как интроверта, больше доверяют роботу с экстравертированным типом поведения, и наоборот, люди, причисляющие себя к экстравертам, больше доверяют роботу с интровертированным типом поведения (Wilks $\lambda=0,86297$, $F(2,43)=3,4139$, $p=0,04207$). Если человек считал себя интровертом, то он отмечал, что у интровертированного робота меньше правдивых фактов (Spearman $r=-0,31$, $p<0,001$). Если человек считал себя скорее экстравертом, то он чаще доверял роботу с интровертированными паттернами поведения (Spearman $r=0,23$, $p<0,01$). Данные **подтверждает гипотезу о комплементарности**.

Обсуждения результатов. Полученные данные указывают на преимущество доверия испытуемых к информации, исходящей от робота с интровертированным поведением. Интровертный коммуникативный профиль воспринимается как признак вдумчивости и объективности, что повышает доверительную оценку его суждений; напротив, экспрессивное экстравертное поведение иногда интерпретируется как инструмент социальной убеждающей стратегии и вызывает опасения по поводу манипуляции. Интровертированные проявления снижают видимую направленность на влияние – робот не выглядит чрезмерно настойчивым или артистичным – поэтому его высказывания кажутся менее предвзятыми и более надёжными. При этом в явных самоотчётах многие участники сообщали о сопоставимом уровне доверия к обоим роботам, тогда как поведенческие и имплицитные показатели достоверности оказались смещены в пользу интровертированного источника. Эти результаты имеют практическое значение для

проектирования роботов в задачах, требующих высокого уровня доверия к передаваемой информации.

Интересна взаимосвязь предпочтений и доверия к информации от робота. Ранее было показано, что испытуемые значимо чаще предпочитают робота с подчеркнуто позитивным поведением (выраженная улыбка, паттерны кокетства), однако менее доверяют ему [30]. В настоящем исследовании данный эффект не наблюдается, наоборот, появляется взаимосвязь между предпочтением робота и воспринимаемым доверием к информации от этого робота.

Данные подтверждают существование эффекта **комплементарности**: пользователи скорее предпочитают робота с типом поведения (интроверт/экстраверт) не похожим на их собственный. Интересно, что испытуемые не всегда четко могли описать различия между роботами с разным типом поведения.

Полученные результаты подчеркивают влияние поведенческих характеристик робота на формирование доверия и требуют дальнейшего изучения для оптимизации взаимодействия человека и машины.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт»

Список литературы

1. Kabacińska K, Dosso J.A., Vu K., Prescott T.J., Robillard J.M.. Influence of user personality traits and attitudes on interactions with social robots: systematic review // *Collabra Psychol.* 2025. V. 11, № 1.
2. Riedl R. Is trust in artificial intelligence systems related to user personality? Review of empirical evidence and future research directions // *Electronic Markets.* 2022. V. 32, № 4. P. 2021–2051.
3. Elson J. S., Derrick D., Ligon G. Examining trust and reliance in collaborations between humans and automated agents // *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences.* 2018. P. 430–439.
4. Elson J., Derrick D., Ligon G. Trusting a humanoid robot: exploring personality and trusting effects in a human-robot partnership // *HICSS.* 2020. P. 1–10.
5. Lyons J.B., Nam C.S., Jessup S.A., Vo T.Q., Wynne K.T. The role of individual differences as predictors of trust in autonomous security robots // *2020 IEEE International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS).* IEEE, 2020. P. 1–5.
6. Merritt S. M., Ilgen D. R. Not all trust is created equal: Dispositional and history-based trust in human-automation interactions // *Hum Factors.* SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2008. V. 50, № 2. P. 194–210.
7. Rossi A, Dautenhahn K, Koay KL, Walters ML. The impact of peoples' personal dispositions and personalities on their trust of robots in an emergency scenario // *Paladyn. Sciendo.* 2018. V. 9, № 1. P. 137–154.
8. Esteban P.G., Bagheri E., Elprama S.A., Jewell C.I.C, Cao H.L., De Beir A, и др. Should i be introvert or extrovert? a pairwise robot comparison assessing the

perception of personality-based social robot behaviors // *Int J Soc Robot*. 2022. V. 14, № 1. C. 115–125.

9. Morsunbul U. Human-robot interaction: How do personality traits affect attitudes towards robot? // *Journal of Human sciences*. 2019. T. 16, № 2. C. 499–504.

10. Cominelli L., Feri F., Garofalo R., Giannetti C., Meléndez-Jiménez M.A., Greco A., и др. Promises and trust in human–robot interaction // *Sci Rep*. Nature Publishing Group UK London, 2021. V. 11, № 1. P. 9687.

11. Ghazali A.S., Ham J., Barakova E.I., Markopoulos P. Effects of robot facial characteristics and gender in persuasive human-robot interaction // *Front Robot AI*. Frontiers Media SA, 2018. V. 5. P. 73.

12. Lim M.Y., Lopes J.D.A., Robb D.A., Wilson B.W., Moujahid M, De Pellegrin E, и др. We are all individuals: the role of robot personality and human traits in trustworthy interaction // 2022 31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). IEEE, 2022. P. 538–545.

13. Robert Jr L.P., Alahmad R., Esterwood C., Kim S., You S., Zhang Q., и др. A review of personality in human–robot interactions // *Foundations and Trends in Information Systems*. Now Publishers, Inc., 2020. V. 4, № 2. P. 107–212.

14. Heeyoung Kim, Kwak S. S., Myungsuk Kim. Personality design of sociable robots by control of gesture design factors // *RO-MAN 2008 - The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. IEEE, 2008. P. 494–499.

15. Aly A., Tapus A. A model for synthesizing a combined verbal and nonverbal behavior based on personality traits in human-robot interaction // 2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). IEEE, 2013. P. 325–332.

16. Luo L, Ogawa K, Peebles G, Ishiguro H. Towards a personality ai for robots: Potential colony capacity of a goal-shaped generative personality model when used for expressing personalities via non-verbal behaviour of humanoid robots // *Front Robot AI*. Frontiers Media SA, 2022. P. 9. C. 728776.

17. Andrist S., Mutlu B., Tapus A. Look Like Me // *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2015. P. 3603–3612.

18. de Graaf M., Allouch S., Klamer T. Sharing a life with Harvey: Exploring the acceptance of and relationship-building with a social robot // *Comput Human Behav*. 2015. V. 43. P. 1–14.

19. Park E., Jin D., del Pobil A. P. The Law of Attraction in Human-Robot Interaction // *Int J Adv Robot Syst*. 2012. V. 9, № 2.

20. Celiktutan O., Gunes H. Computational analysis of human-robot interactions through first-person vision: Personality and interaction experience // 2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). IEEE, 2015. P. 815–820.

21. Lee K.M., Peng W., Jin S.A., Yan C. Can robots manifest personality?: An empirical test of personality recognition, social responses, and social presence in human–robot interaction // *Journal of communication*. Oxford University Press, 2006. V. 56, № 4. P. 754–772.

22. Windhouwer D. The effects of the task context on the perceived personality of a Nao robot // *Proceedings of the 16th twente student conference on IT*. Vol. 4. Enschede, The Netherlands, 2012. V. 3.

23. Neff M., Wang Y., Abbott R., Walker M. Evaluating the Effect of Gesture and Language on Personality Perception in Conversational Agents // International Conference on Intelligent Virtual Agents. 2010. P. 222–235.
24. Wu J., Paeng E., Linder K., Valdesolo P., Boerkoel J. Trust and Cooperation in Human-Robot Decision Making. 2016. С.
25. Wu B., Liu C., Ishi C.T., Shi J., Ishiguro H. Extrovert or Introvert? GAN-Based Humanoid Upper-Body Gesture Generation for Different Impressions // Int J Soc Robot. Springer, 2025. V. 17, № 3. P. 457–472.
26. Котов А.А., Зинина А.А. Функциональная разметка коммуникативных действий в корпусе «REC» // Труды международной конференции «Корпусная лингвистика - 2015». СПб: СПбГУ, 2015. С. 287–295.
27. Котов А. А., Зинина А. А. Функциональный анализ невербального коммуникативного поведения // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. Вып. 14. М.: РГГУ, 2015. Т. 1. С. 299–310.
28. Зинина АА, Аринкин НА, Зайдельман ЛЯ, Котов АА. Разработка модели коммуникативного поведения робота ф-2 на основе мультимодального корпуса «REC» // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной международной конференции «Диалог» (Москва, 30 мая - 2 июня 2018 г.). 2018. Т. 17, № 24. С. 831–844.
29. Калугин АЮ, Щебетенко СА, Мишкевич АМ, Сото КД, Джон ОП. Психометрика русскоязычной версии Big Five Inventory-2 // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2021. Т. 18, № 1. С. 7–33.
30. Zinina A. A., Kotov A. A., Arinkin N. A. This Robot Smiles So Nicely, I Don't Trust Him – The Effect of Robot's Smiles on User's Trust // Literature, Language and Computing / ed. Eismont P., Khokhlova M., Koryshev M. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. P. 161–169.

РОБОТ ДЛЯ УЧАСТИЯ В СОРЕВНОВАНИЯХ ПО ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

Аннотация: в статье приводится краткое описание устройства подводного робота для робототехнических соревнований

Ключевые слова: робототехника, подводные роботы, образовательная робототехника

K.F. Zorkin, teacher of additional education, czork@mail.ru
Krasnoyarsk Regional Palace of Pioneers, Krasnoyarsk, Russia

A ROBOT FOR PARTICIPATION IN UNDERWATER ROBOTICS COMPETITIONS

Abstract: the article provides a brief description of the underwater robot device for robotic competitions

Keywords: robotics, underwater robots, educational robotics

Современная подводная робототехника активно развивается благодаря внедрению новых технологий и материалов, используемых в создании *телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов* (ТНПА). Эти аппараты находят широкое применение в различных сферах человеческой деятельности, начиная от научных исследований и заканчивая инспекциями гидротехнических сооружений и спасательными операциями. Создание учебных моделей таких аппаратов способствует развитию инженерных компетенций у молодежи, стимулируя интерес к технологиям и прикладной науке.

Одним из ярких примеров подобного подхода является разработка школьного коллектива учеников 5-6 классов города Красноярска телеуправляемого подводного аппарата «Подводный брат №7». Данный проект направлен на участие в ежегодных всероссийских соревнованиях по подводной робототехнике категории «Navigator», основной целью которых является проверка навигационных способностей, скорости реакций и качества выполнения поставленных задач.

Данная статья посвящена подробному рассмотрению конструктивных особенностей, функциональных возможностей и достоинств аппарата «Подводный брат №7», созданного учениками средней школы, изучающими осно-

вы робототехники, механики, радиоэлектроники и трехмерного моделирования.

Команда

Честнов Илья (6 класс) – капитан, схемотехник, ответственный за пайку всех элементов и функционирование ТНПА. Пилот №1. С прошлого учебного года стал изучать курс «Радиоэлектроника», чтобы применять знания для цели разработки ТНПА.

Жуков Тимофей (5 класс) – штурман, ответственный за безопасность и балластировку на соревнованиях, проектирование и адаптацию ТНПА. В данное время осваивает курс «3D моделирование и лазерные технологии».

Поляков Роман (5 класс) – пилот. Идейный вдохновитель, специалист по сбору и анализу данных. Новый участник команды. Генератор идей, ответственный за решение нетривиальных задач, дополнительные исследования, поиск информации.

Все члены команды являются учащимися Красноярского краевого Дворца пионеров и участвуют в различных робототехнических мероприятиях уже не первый год. Честнов Илья и Жуков Тимофей выступают в категории «Navigator» во второй раз. В прошлом году ТНПА был создан на основе двух роботов категории Scout. Команда стала лучшей на региональных соревнованиях в 2024 г. в Красноярске, но не набрала достаточно баллов для участия в национальном первенстве во Владивостоке.

Общая характеристика аппарата

Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат «Подводный брат №7» (Рис. 1) разработан и сконструирован в познавательных и соревновательных целях для участия в соревнованиях по подводной робототехнике категории «Navigator».

На ТНПА установлены 6 подводных движителей на основе бесколлекторных моторов для перемещения в толще воды (два вертикальных для погружения и всплытия, 4 горизонтальных для движения вперед/назад и осуществления поворотов), два сервомотора для управления манипулятором, которые позволяют осуществлять захват/сброс предметов клешнями и поворот манипулятора на 90 градусов.

Управление ТНПА осуществляется с помощью геймпада, являющегося аналогом PS2 Dualshock. Электроника для управления ТНПА поделена на две части: первая часть в специальном боксе «на берегу» обеспечивает прием и интерпретацию команд с геймпада, а также питание ТНПА по двум силовым кабелям (используется тип элементов питания 18650). Вторая часть в специальном герметичном боксе на борту робота получает команды «с берега» и осуществляет запуск движителей и сервомоторов. Связь между «берегом» и «бортом» осуществляется по интерфейсу RS485 с использованием сетевого кабеля. Для подключения периферии на берегу и борту используются две платы Arduino UNO.

На ТНПА установлена подводная камера, соединенная со специальным монитором, на который выводится изображение.

Основной задачей этого года для команды стало создание электронной начинки на основе Arduino UNO для нового ТНПА, подключение более мощных двигателей, создание более маневренного ТНПА, чем в прошлом году.

Для управления ТНПА к Arduino UNO был подключен игровой геймпад типа PS2, сделан манипулятор, который может сжимать/разжимать клешни и поворачиваться.

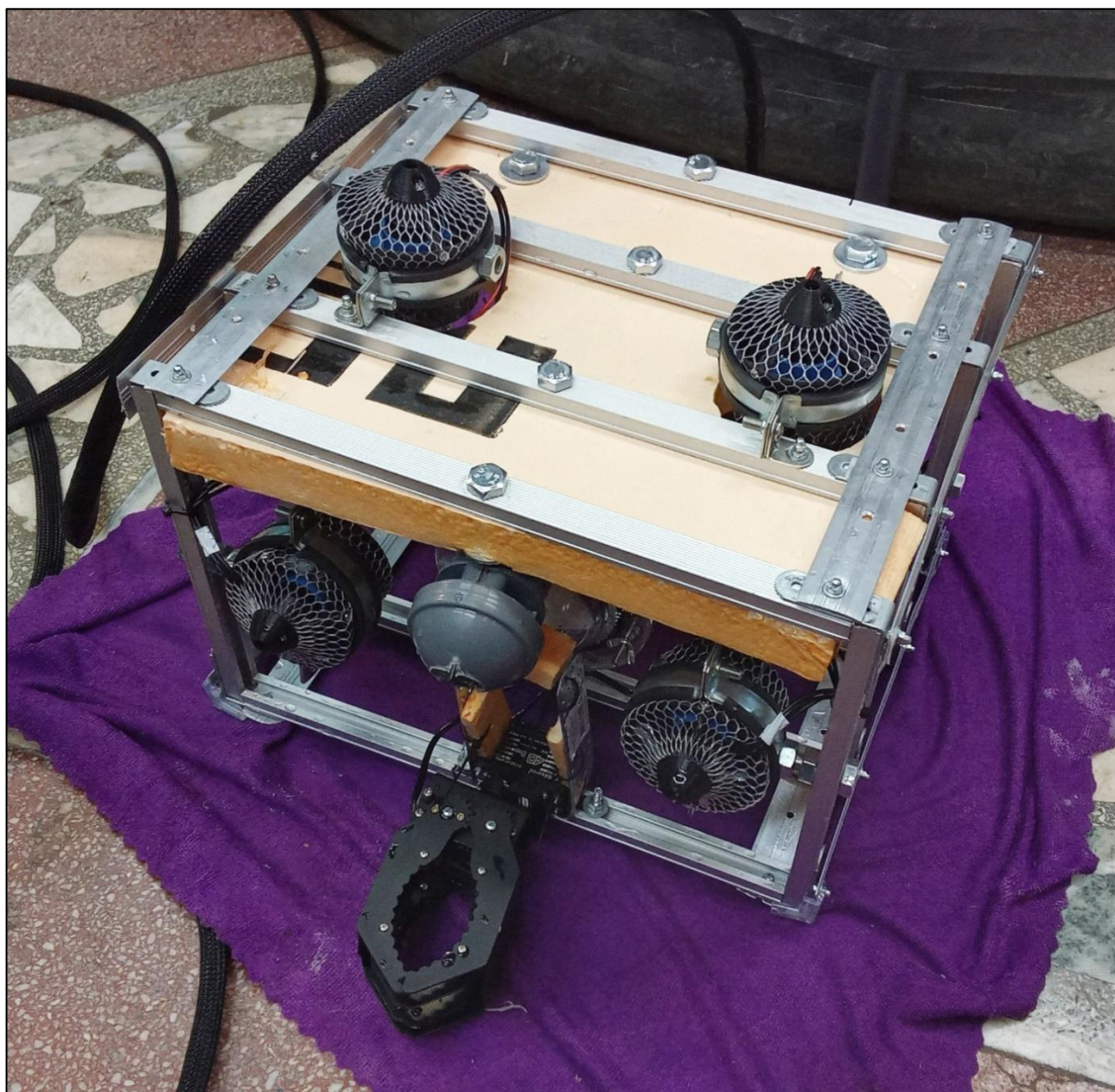


Рис. 1. Общий вид робота «Подводный брат №7»

Через камеру, согласно правилам, оператор робота смотрит на происходящее от «первого лица», понимает обстановку и направление движения робота. Одновременно на экране видно главное «оружие» робота – манипулятор. Поворачивая его, можно захватывать предметы под водой, а также сбрасывать из, если в этом есть надобность.

Аппарат «Подводный брат №7» имеет размеры 50×30×33 см и массу около 7 кг вместе с кабель-тросом длиной 19 метров. Основным материалом каркаса служит прочный алюминиевый профиль, обеспечивающий надежную защиту электронной начинки и подвижных частей от механических воздействий внешней среды. В качестве наполнителя для достижения нейтральной плавучести используется утеплительный материал пеноплекс, закрепленный внутри каркаса.

Компоненты аппарата

Аппарат оборудован следующим оборудованием:

Подруливающие движители: шесть электрических двигателей мощностью 350 KV и 500 KV, каждый из которых управляется отдельным контроллером BLHeli 50 A. Четыре горизонтальных мотора обеспечивают поступательные движения вперед и назад, а также развороты, тогда как два вертикальных отвечают за погружение и всплытие.

Манипулятор: оборудован двумя водонепроницаемыми сервомоторами, защищенными резиновыми уплотнителями и обработанными специальными водоотталкивающими средствами. Манипулятор способен сжимать и разжимать клешни, а также вращаться на угол до 90 градусов, что значительно упрощает выполнение ряда задач.

Система управления: построена на платформе Arduino UNO, состоящей из двух модулей — наземного блока и бортового модуля, взаимодействующих друг с другом по интерфейсу RS485 через экранированный сетевой кабель. Наземный модуль принимает команды с геймпада модели PS2 DualShock, осуществляя передачу сигнала и подачу питания на двигательную установку.

Энергоснабжение: реализуется через аккумуляторные батареи форм-фактора 18650, установленные в специальные контейнеры с защитой и системой балансировки напряжения. Аккумуляторы обладают достаточной ёмкостью для продолжительной работы аппарата под водой.

Видовая система: основана на камере марки «Практик Мурена» с углом обзора 130 градусов, установленной на верхней стороне аппарата. Сигнал с камеры поступает на специальный TFT монитор 960х480, установленный возле оператора, что позволяет вести наблюдение в режиме реального времени.

Функциональные возможности аппарата

Основными функциями аппарата являются:

Погружение и всплытие: обеспечивается работой вертикальных двигателей, расположенных сверху и снизу аппарата.

Передвижение и маневры: обеспечиваются четырьмя горизонтально расположенными двигателями, которые создают тягу и ускоряют перемещение аппарата в нужном направлении.

Захват и сброс объектов: осуществляются манипулятором, оснащённым сервомоторами, способным надёжно удерживать объекты небольшой массы.

Регулировка ориентации: возможна благодаря встроенным датчикам наклона и программного обеспечения, управляющего положением аппарата относительно горизонта.

Преимущества конструкции

Создание аппарата «Подводный брат №7» основывалось на ряде важных принципов, которые позволили достичь превосходства над конкурирующими моделями:

1. Использование стандартных комплектующих: Все ключевые элементы конструкции изготовлены из серийных деталей, широко применяемых в любительской робототехнике, что сокращает затраты на производство и обслуживание аппарата.

2. Модульность конструкции: Модульная архитектура позволяет легко заменить вышедшие из строя компоненты, модернизировать существующие системы и интегрировать новые функциональные блоки.

3. Минимальное гидродинамическое сопротивление: Простая форма корпуса аппарата минимизирует сопротивление жидкости, увеличивая эффективность энергопотребления и скорость реагирования на управляющие сигналы.

4. Водостойкость и защита электронных компонентов: Электронные схемы размещены в специально разработанных герметичных контейнерах, предотвращающих повреждение аппаратуры при контакте с водой.

5. Широкий спектр рабочих режимов: Аппарат способен функционировать в различных режимах работы, варьируя мощность двигателей и интенсивность освещения, что увеличивает универсальность и приспособленность к различным условиям эксплуатации.

Обучение и образование

Разработка и эксплуатация аппарата «Подводный брат №7» оказали значительное влияние на формирование научно-технических компетенций учащихся. Проект позволил школьникам освоить принципы построения сложных электромеханических систем, познакомиться с методами программирования микроконтроллеров и научиться разбираться в тонкостях создания эффективной электрической цепи.

Особенно полезным оказался опыт самостоятельной пайки электронных схем, освоения приёмов герметизации узлов и расчёта необходимых нагрузок на механизмы аппарата. Учебный процесс сопровождался теоретическим обоснованием принятых конструкторских решений, расчётами основных показателей и проведением тестовых испытаний отдельных узлов и механизмов.

Перспективы развития

В этом году продолжается работа над созданием нового аппарата. Среди направлений дальнейшей оптимизации выделяются следующие:

- развитие алгоритмов автоматического управления движением аппарата;
- улучшение энергобаланса и увеличение длительности автономного плавания;
- увеличение грузоподъемности манипулятора и расширения спектра возможных задач;
- повышение стойкости к воздействию морской соли и иных коррозионных агентов.

Таким образом, аппарат «Подводный брат №7» является примером успешной интеграции научного подхода и современных инженерных решений в рамках школьной образовательной программы. Дальнейшее совершенствование аппарата позволит расширить его потенциал и повысить конкурентоспособность в будущих соревнованиях.

Заключение

Аппарат «Подводный брат №7» успешно сочетает доступность бюджетных решений с качеством промышленного оборудования, предлагая оптимальное соотношение цены и производительности. Его конструкционная простота, высокая ремонтпригодность и отличная эргономика управления делают его привлекательным инструментом для начинающих исследователей подводного мира и любителей подводной техники.

Реализация проекта стала ярким событием в образовательном процессе учащихся, вызвав огромный интерес к техническим дисциплинам и разработке высокотехнологичных изделий. Полученные знания и навыки открывают участникам путь к дальнейшему профессиональному росту и формированию устойчивого интереса к науке и технике.

Т.Ф. Крейденко, к.г.н., доцент, kreydenko_tf@pfur.ru
РУДН им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия
Центр научно-методологического сопровождения
стратегического планирования, РЭУ им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Россия

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И СОВРЕМЕННОЕ ШКОЛЬНОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Аннотация: Статья посвящена анализу опыта применения технологий искусственного интеллекта на уроках с учетом его возможностей и рисков. Обобщен опыт и определены возможные изменения методики преподавания географии в школьном курсе при применении технологий искусственного интеллекта.

Ключевые слова: искусственный интеллект, методика преподавания, школьное образование

T.F. Kreydenko, PhD in Geography, Associate Professor, kreydenko_tf@pfur.ru
RUDN-University, Moscow, Russia
Center for Scientific and Methodological Support
of Strategic Planning,
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MODERN SCHOOL GEOGRAPHICAL EDUCATION

Abstract: This article analyzes the experience of using artificial intelligence technologies in the classroom, taking into account its potential and risks. This experience is summarized and potential changes to geography teaching methods in school settings are identified when using artificial intelligence technologies.

Key words: artificial intelligence, teaching methods, school education

Искусственный интеллект в образовании – свершившийся факт. Объем мирового рынка ИИ в образовании в 2024 году уже оценивался в диапазоне от 2,21 до 5,88 млрд долларов США с перспективой его роста до более 32 млрд долларов США [1, 2]. Одновременно с этим растет и оборот школ, обучающихся взаимодействию с ИИ и его применению в работе. Только в России за первое полугодие 2025 года он достиг почти 572 млн рублей, к концу года имея все шансы превысить 1,1 млрд рублей.

География – одна из самых технологичных наук в образовании. Известный специалист в области географического образования Дэвид Ламберт (University College London, Великобритания) отмечает, что география

в образовании имеет репутацию дисциплины, которая одной из первых осваивает технологии. С помощью современных технологических решений не уроке уже можно не только строить карты, но и проводить глубокий пространственный анализ. И преимущества использования технологий ИИ, связанные в том числе с созданием эффективной учебной среды на уроках географии существенны.

В тоже время неконтролируемое и неуправляемое использование технологий ИИ на уроках географии имеет серьезные риски в части ухудшения качества самого образования. Одной из самой популярной технологий ИИ в школе является генеративный технологии ИИ.

Критическое ограничение личного взаимодействия учителя и ученика, что приводит к снижению живого общения между учителем и учениками, затрудняет передачу эмоционального опыта, мотивацию учащихся и развитие коммуникативных навыков. Одна из главных задач школьного курса географии – формирование эмоциональной привязанности к своей стране просто не сможет быть решена.

При использовании технологий ИИ могут возникнуть серьезные проблемы с качеством материалов. Информация, предоставляемая искусственным интеллектом, очень часто содержит неточности и ошибки. (рис. 1)

Нижегородская область



Республика Карелия



Владимирская область



Рис. 1. Туристические логотипы регионов России, сгенерированные нейросетью в рамках выполнения студенческих проектов

А в условиях идеализации ответов, полученных с помощью технологии искусственного интеллекта, и отсутствии критического мышления со стороны учеников, ошибочное знание может стать единственно доступным.

Задача школьного образованияна со учить работать с искусственным интеллектом: формировать навыки корректных и глубоких формулировок. Работа с ИИ должна развивать критическое мышление - ребенок должен уметь находить ошибки в продуктах, созданных с помощью ИИ, объяснять правильные алгоритмы для обучения ИИ в рассматриваемых темах. Все это невозможно без возвращения в школьный курс географии серьезной, фундаментальной науки (причем не только географии, но и педагогики).

Необходимо серьезно переосмыслить не только как, но и чему мы должны учить ребенка. Федеральная рабочая программа по географии уже дано перегружена абсолютно негеографической информацией (например, изучение содержания документов стратегического планирования, в том числе – Стратегии развития чёрной и цветной металлургии России до 2030 года, Энергетической стратегии России на период до 2035 года и так далее). А в профессиональных группах учителей географии уже накопился огромный объем методических материалов, созданных с помощью ИИ. Материалы (в том числе, презентации к урокам), как правило, очень поверхностные, а часто и с грубыми ошибками (например, см. рис.2).



Рис. 2. Карта, созданная с помощью Giga.chat, в материалах к уроку «Климатообразующие факторы России»

Еще один риск некорректного использования ИИ - возникновение ситуация дезориентации и перегрузки информацией. Искусственный интеллект способен выдавать большие объемы информации, что может вызвать путаницу у учеников и потребовать дополнительной помощи преподавателя для структурирования полученных сведений. Кроме того, очень высока угроза утраты интереса к предмету. Стандартизация уроков с использованием шаблонов и автоматических рекомендаций может сделать обучение менее увлекательным для учащихся. А автоматизированные системы тестирования могут давать неверную оценку успеваемости, поскольку учитывают лишь формальные показатели, игнорируя индивидуальные способности и предпочтения учеников.

Не случайно эксперты образовательного фонда Education Endowment Foundation (Великобритания) еще в 2019 г. подчеркивали, что использование любых технологических решений должно основываться на принципах эффективной педагогики. Перед внедрением новых технологий важно оценить как они в реальность могут улучшить процесс преподавания и обучения.

Но и игнорировать возможности ИИ при подготовке и проведении уроков неверно. Необходимо демонстрировать и возможности ИИ в решении прикладных задач в своих дисциплинах (например, прогнозирование погоды модулем GraphCast, который обучался на массиве данных с 1979

по 2017 гг., или сбор пространственных данных картографами и геоинформатиками).

Также есть смысл практиковать задания, направленные на поиск ошибок в иллюстративном и текстовом материале, сгенерированном ИИ. Но для этого требуется, чтобы учитель географии был не только квалифицированным учителем предметником, умел использовать ИИ на своих уроках, но и достаточно глубоко разбирался в том, что так искусственный интеллект, в принципе.

В создавшейся ситуации очень важным представляется осуществить следующие действия:

1. усилить контроль за качеством подготовки специалистов, работающих в образовательных учреждениях;
2. сориентировать содержания курсов учебных дисциплин на реальные научные и практические достижения;
3. разработать банк методических рекомендаций для проведения уроков по предметам с использованием искусственного интеллекта (с конкретными заданиями);
4. повысить уровень цифровой грамотности, не только ученика, но и учителя.

Проблема использования технологий ИИ – проблема не просто международная, а глобальная, в рамках которой поиск решений становится задачей национальной системы образования многих стран мира. Рекомендации Министерства образования США, сформулированные в докладе об искусственном интеллекте в образовании (2023 г.), содержат важные мысли и для современного российского образования: важным критерием применения ИИ в образовательных целях должен быть фокус на человеке, а не технологиях, образовательные потребности обучающихся должны быть поставлены выше нашего восторга, вызванного новыми возможностями искусственного интеллекта [1, 2, 3]. Развитие технологии ИИ должно учитывать не только когнитивные способности учащихся, но и весь набор его человеческих качеств.

Список литературы

1. AI In Education Market [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/artificial-intelligence-ai-education-market-report>
2. AI In Education Market [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/ai-in-education-market-200371366>
3. Artificial Intelligence (AI) and the Future of Teaching and Learning: Insights and Recommendations [Электронный ресурс]: режим доступа - https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc2114121/m2/1/high_res_d/ai-report.pdf

И.Н. Литовченко, ВНС, litovira@rambler.ru
В.С. Лютикова, магистр техники и технологий, nikki.valo16@gmail.com
ТОО «Национальный научный центр сейсмологических наблюдений
и исследований», МЧС РК г. Алматы, Республика Казахстан

ФИЛОСОФСКИЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В СЕЙСМОЛОГИИ

Аннотация: В работе рассматриваются философские вопросы применения искусственного интеллекта (ИИ) и распознавания образов в сейсмологии. Влияние ИИ на технический прогресс и развитие науки с каждым годом растет. В сейсмологии применяются методы и программы с ИИ. Например, распознавание образов в прикладных задачах сейсмологии и других научных исследованиях, занимают ведущие позиции. Предлагаемая работа посвящена сложным проблемам применения ИИ, их решениям: практической реализации алгоритмов распознавания образов.

Ключевые слова: философские вопросы, искусственный интеллект, сейсмология, распознавание образов, рои землетрясений.

PHILOSOPHICAL ISSUES OF APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND PATTERN RECOGNITION IN SEISMOLOGY

I.N. Litovchenko, Leading Researcher, litovira@rambler.ru
V.S. Lyutikova, magistr, nikki.valo16@gmail.com
LLP Institute of Seismology, Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan,
Almaty, Kazakhstan

Abstract: This paper examines philosophical issues related to the application of artificial intelligence (AI) and pattern recognition in seismology. The influence of AI on technological progress and scientific development is growing every year. AI-based methods and programs are used in seismology. For example, pattern recognition occupies a leading position in applied seismological problems and other scientific research. This paper examines complex problems of AI application and their solutions: the practical implementation of pattern recognition algorithms.

Keywords: philosophical issues, artificial intelligence, seismology, pattern recognition, earthquake swarms.

Вопросы этического аспекта внедрения Искусственного Интеллекта (ИИ) всё чаще привлекают внимание специалистов в разных областях науки, особенно в последнее время. Технологии нового поколения, обладающие возможностью не просто упрощать, но и полностью автоматизировать человеческую деятельность во всех жизненных сферах, базируются на технологиях ИИ. Философские размышления об искусственном интеллекте связаны с изучением способности машин к "пониманию" – эта тема интересует разработчиков ИИ, экспертов по познанию и учёных. Решения этих вопросов напрямую зависят от интерпретации понятий "интеллект" и "осознанность", а также от определения типов "машин", которые обсуждаются [1].

Технология распознавания образов, являясь частью ИИ, прочно входит в нашу жизнь, например, система идентификации людей по лицу при использовании общественного транспорта функционирует благодаря ей. Существует множество ситуаций, когда машинное обучение помогает людям, беря на себя сложные и требующие времени задачи. В научных изысканиях функцию анализа данных и принятия решений можно доверить интеллектуальной системе, способной проводить логический анализ и обеспечивать взаимодействие с пользователем [2]. Например, распознавание образов используется для обнаружения роев землетрясений в сейсмических данных. В зонах повышенной сейсмической активности происходит распознавание роев землетрясений посредством интеллектуальных методов кластеризации. Для анализа сейсмической активности в районах с высокой вероятностью землетрясений используется интеллектуальный метод кластеризации для выявления роев земных толчков.

Определены параметры идентификации таких роев и реализован соответствующий алгоритм. Это позволяет программе автоматически обнаруживать рои землетрясений и определять их положение во времени и пространстве, а также создавать каталоги этих роев, используемые при создании карт [11-15]. Данная разработка направлена на решение сложных вопросов, связанных с практическими аспектами применения алгоритмов распознавания образов, обработки речи, искусственного интеллекта, а также выявлением ограничений текущих программ в данной сфере. Особое внимание уделяется принципам разработки алгоритмов для задач, которые легко разрешаются людьми, но представляют трудности для математических моделей и компьютерных систем [3]. Характер научно-технической революции в последнее время, особенно в области информационных технологий, а также практические успехи, сделанные в области искусственного интеллекта, уже дали положительный ответ на вопрос о возможности создания мыслящих систем. Информатика далеко ушла от обычных Фоннеймановских компьютеров и жестко заданных алгоритмов. Уже сегодня широкое применение нашли вычислительные системы с использованием аппарата нейронных сетей, позволяющих с успехом заменить интуицию высококвалифицированных специалистов; экспертные системы производственного типа способны строить умозаключения, которые превосходят все

ожидания; системы автоматизированного управления вполне справляются с такими сверхсложными задачами, как выбор оптимальной траектории в режиме реального времени; опытные образцы боевых роботов американской армии способны ориентироваться в пространстве. Похоже, создание искусственного интеллекта соразмерно человеческому – дело времени [4].

Что касается практического использования и интеграции технологий распознавания образов, то стоит отметить следующее. Первые системы распознавания, базировавшиеся на статистических методах, требовали значительного объема подготовительных работ перед тем, как приступить к разработке основных правил обработки информации. Важную роль в таких системах играли специалисты, проводившие предварительный анализ данных, выявляющие наиболее явные закономерности и формулирующие интуитивные предположения о выборе оптимальной модели распознавания. Если развитие алгоритмических подходов приведет даже к некоторому снижению потребности в ручной обработке данных, то эта область распознавания образов достигнет своей ключевой цели [5]. В окружающем мире очевидно, что когнитивные способности человека и самосознание тесно связаны с умением идентифицировать закономерности. Соответственно, будущее развитие исследований в области искусственного интеллекта напрямую зависит от глубокого изучения базовых принципов распознавания образов. Эта технология уже активно внедряется в различные сферы жизни и стала неотъемлемой частью компетенций современных специалистов. Например, в здравоохранении она позволяет медикам проводить более эффективную диагностику заболеваний, а в промышленности – предсказывать дефекты продукции. Даже системы идентификации по биометрическим данным используют методы распознавания образов в своей основе. Без развития этой области невозможно представить создание систем искусственного интеллекта нового поколения, которые смогут взаимодействовать с людьми более естественно, используя человеческий язык и речь.

Близость к задачам автоматизации и робототехнике, где искусственные системы управления опираются на распознавание образов, обусловила первоначальный интерес к этой сфере со стороны экспертов разных направлений – от кибернетики и нейрофизиологии до психологии, математики и экономики [5]. Авторы этого исследования, также участвовали в научных работах по сейсмологии, используя алгоритмы распознавания образов для анализа роев землетрясений в сейсмических данных [6]. В результате применения метода графической кластеризации нам удалось идентифицировать и отобразить эти рои в изучаемом регионе [6]. С помощью техники графической кластеризации удалось идентифицировать и отобразить группы роев землетрясений в сейсмоактивном регионе [6]. Подход к выявлению паттернов в этих группах демонстрирует потенциал использования для анализа сейсмической активности в различных зонах [7, 15].

Вопросы, касающиеся философии искусственного интеллекта, обсуждались ранее в работах [9, 10]. Возникает вопрос о том, способен ли искусственный интеллект оказать поддержку в научных исследованиях. Сегодняшний ответ – безусловно да. Искусственный интеллект и технологии распознавания образов прочно укрепили свои позиции во всех сферах жизни. Это говорит о том, что развитие инструментов и методов искусственного интеллекта ускоряет технологический прогресс и заменяет традиционные подходы. Современные технологии претерпели значительные изменения: мобильные устройства теперь оснащены сложными системами искусственного интеллекта, которые способны выполнять широкий спектр задач, включая обработку данных и взаимодействие с пользователем, а также анализ поступающей информации. Практически все современные средства связи, включая спутниковую связь, интегрируют интеллектуальных помощников. Исходя из этого, можно утверждать, что мы находимся на пороге повсеместного использования искусственного интеллекта практически во всех аспектах повседневной деятельности. Нейронные сети создают произведения искусства, дают ответы на непростые вопросы и демонстрируют зачатки самостоятельного мышления. Таким образом, концепции, связанные с искусственным интеллектом и распознаванием образов, получили не только теоретическое обоснование, но и широкое применение на практике сегодня, и эта тенденция будет усиливаться в будущем [11-15].

Работа выполнена в лаборатории геодинамических и сейсмических процессов в рамках ПЦФ BR24992763 «Оценка сейсмической опасности территорий областей и городов Казахстана на современной научно-методической основе». Источник финансирования Министерство образования и науки Казахстан.

Список литературы

1. Философия искусственного интеллекта//Электронный ресурс.-[режим доступа]: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
2. Петрунин Ю. Ю., Рязанов М.А., Савельев А. В. Философия искусственного интеллекта в концепциях нейронаук. – 1-е. – М.: МАКС Пресс, 2010. — С. 84.
3. В чем суть Искусственного Интеллекта?//Электронный ресурс. – [режим доступа]: <http://www.poligant.net/blog/v-chem-sut-iskusstvennogo-intellekta>
4. Распознавание образов и искусственный интеллект//Электронный ресурс. – [режим доступа]: <http://ocrai.narod.ru/>
5. Таханов Р.С. философские аспекты математической теории распознавания образов. Что такое распознавание образов // Электронный ресурс. – [режим доступа]:<http://takhanov.narod.ru/ref.pdf>
6. Литовченко И.Н., Амиров Н.Б., Лютикова В.С. распознавание образов роев землетрясений и их численные характеристики // Труды Международной научно-практической конференции, посвященной к 115-летию член-корр. АН КазССР А.Ж.Машанова и 100-летию Академика АН КазССР Ж.С.Ержанова

«инновационные технологии в геопространственной цифровой инженерии» – Алматы: 2022. – С.549-555.

7. Лютикова В.С., Литовченко И.Н. Обучающий алгоритм распознавания образов при решении практических задач // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: Литера-Принт, 2019. – С.231-237.

8. Литовченко И.Н., Лютикова В.С. Распознавание роев землетрясений // Первый Национальный конгресс по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейроинформатике: Девятая международная конференция по когнитивной науке. Сборник научных трудов. В двух частях. –Москва, 2021. – С. 282-285.

9. Литовченко И.Н. Поможет ли в исследованиях Искусственный интеллект? // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: Литера-Принт, 2020. – С.223-226.

10. Литовченко И.Н. Философские аспекты применения искусственного интеллекта // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: Литера-Принт, 2021. – С. 254-258.

11. Лютикова В.С., Литовченко И.Н. Образовательный аспект применения искусственного интеллекта в сейсмологических исследованиях// Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: Литера-Принт, 2024. – С. 314-318.

12. Литовченко И.Н., Лютикова В.С. Современный этап активизации роев землетрясений в регионе северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий, и термодинамические параметры роев землетрясений // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле: Материалы VI Всероссийской тектонофизической конференции, приуроченной к 300-летию Российской академии наук. Т. 7. – М.: РАН, 2024. – С. 204-207.

13. Лютикова В.С., Литовченко И.Н. Искусственный интеллект в задачах сейсмологии, алгоритмы и методы распознавания образов роев (на примере сейсмичности Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий) // In the worlds of science and education: Материалы международного научно-практического журнала. – Алматы, 2025. – С.21-25. DOI 10.24412/3007-8946-2025-15-21-25

14. Лютикова В.С., Литовченко И.Н. Современные методы исследования роевой активности региона Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий // Endless light in science: Материалы международного научно-практического журнала. – Астана. 2025. – С. 226-229. DOI 10.24412/3007-8946-2025-31-226-229

15. Лютикова В.С. Литовченко И.Н. Рои землетрясений: распознавание и характеристики // In the world of science and education: Материалы международного научно-практического журнала. – Алматы. 2025. DOI 10.24412/3007-8946-2025-15-14-18.

СТОМАТОЛОГИЧЕСКИЙ СИМУЛЯТОР НА БАЗЕ РОБОТА ROBO-C

Аннотация: В статье рассматривается стоматологический тренажер на базе антропоморфного робота Robo-C, который представляет собой уникальное сочетание передовых технологий и человеческой мимики, что позволяет ему общаться с людьми и выражать эмоции. Представлен анализ современных методов симуляционного обучения в стоматологии и обоснована необходимость перехода от статических манекенов к динамическим роботизированным системам. Описаны компоненты, которые были внедрены в систему управления Robo-C: Smart-челюсть, Smart зуб. Изложен процесс сбора и анализа данных, полученных с Smart-челюсти и Smart зуба. Стоматологический симулятор, представленный в статье, позволяет применять новые технологии в обучении стоматологов, что значительно может повысить безопасность перехода от учебной среды к работе с реальными пациентами.

Ключевые слова: симулятор, Smart-челюсть, Smart-зуб, Robo-C

S.A. Storozhev, associate professor, sastorozhev@pstu.ru
E.S. Alekseev, student, aes1901@yandex.ru
PNRPU, Perm, Russia

DENTAL SIMULATOR BASED ON THE ROBO-C ROBOT

Abstract: The article discusses a dental simulator based on the anthropomorphic robot Robo-C, which is a unique combination of advanced technologies and human facial expressions, which allows it to communicate with people and express emotions. An analysis of modern methods of simulation training in dentistry is presented and the need for a transition from static dummies to dynamic robotic systems is substantiated. The components that were implemented in the Robo-C control system are described: Smart jaw, Smart tooth. The process of collecting and analyzing data obtained from the Smart Jaw and Smart Tooth is described. The stomatological simulator presented in the article makes it possible to apply new technologies in dental training, which can significantly increase the safety of the transition from a learning environment to working with real patients.

Key words: simulator, Smart-jaw, Smart-tooth, Robo-C

Современное стоматологическое образование сталкивается с фундаментальным противоречием: необходимостью обеспечения максимально безопасной и эффективной подготовки будущих врачей. Традиционный путь формирования навыков будущего врача, основанный на последовательном переходе от работы на манекенах к клинической практике, имеет существенные ограничения. Статические манекены, являясь основным инструментом доклинической подготовки, не способны воспроизвести ключевые аспекты реального клинического приема: анатомические и биомеханические свойства реального человека, произвольные физиологические реакции пациента, а главное – необходимость проведения процедур в условиях коммуникативного взаимодействия и управления психоэмоциональным состоянием как пациента, так и самого оператора.

Растущие каждый год требования к качеству подготовки и минимизации рисков послужили причиной активному развитию симуляционного обучения, которое за последние годы стала неотъемлемой частью образовательного процесса. Симуляторы позволяют студентам получать практический опыт, который раньше был доступен только в реальных условиях.

Симуляционное обучение в стоматологии основано на использовании специализированных систем, воспроизводящих клинические процедуры. Эти тренажеры обеспечивают формирование базовых мануальных навыков в доклинический период, что создаёт необходимый фундамент для последующей работы с пациентами. Эффективность симуляторов обусловлена их специфическими техническими характеристиками [1]:

1. Реалистичность: Тренажеры в стоматологии стараются максимально приблизиться к реальным условиям работы врача-стоматолога.

2. Интерактивность: Симуляторы в стоматологии обеспечивают интерактивное взаимодействие между студентом и системой. Они могут имитировать различные стоматологические процедуры, такие как удаление зуба, лечение кариеса, пломбирование и другие. Студенты получают обратную связь после выполнения задания.

3. Безопасность: Симуляторы в стоматологии представляют безопасную среду для обучения. Студенты могут тренироваться на моделях без риска нанесения вреда пациентам.

4. Повторяемость: Тренажеры в стоматологии позволяют студентам отрабатывать навыки столько раз, сколько им потребуется для достижения хороших результатов.

5. Обратная связь: Симуляторы в стоматологии предоставляют обратную связь о действиях студента. Тренажер анализирует, как выполнил процедуру студент и может выдать ему рекомендации.

Подобные симуляторы нового поколения способны не только имитировать анатомические структуры, но и моделировать сложные поведенческие паттерны пациента, создавая адаптивную, приближенную к реальности обучающую среду [2]. Это позволяет формировать у студентов все нужные навыки для дальнейшей работы с пациентами.

Симулятор созданный на основе Robo-C представленный на рисунке 1-а (внешний вид робота), создавался с целью реализовать вышеупомянутые технические характеристики, а также сделать для студентов удобный тренажер. На рисунке 2-б показано внутреннее устройство робота. С помощью этого симулятора студенты смогут получить навыки, необходимые для работы с реальными пациентами.

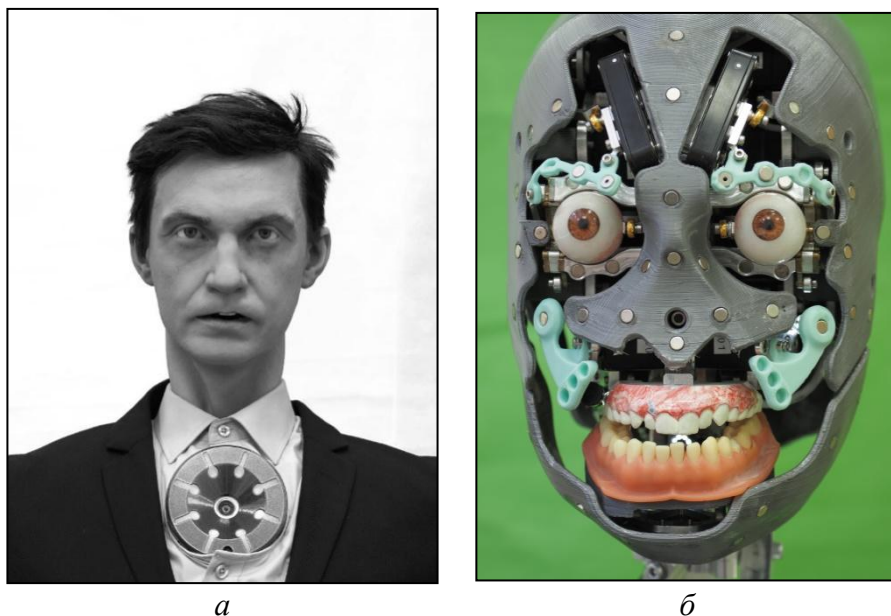


Рис.1. Robo-C

Робот **Robo-C** — человекоподобный андроид, способный общаться с людьми и реалистично выражать эмоции. Его ключевые особенности:

1. Адаптивная внешность: Может выглядеть как любой человек, независимо от пола, возраста и национальности.
2. Реалистичная мимика: Воспроизводит более 600 вариантов микромимики за счёт движения глаз, бровей, губ и мышц лица.
3. Жестикуляция: Подвижные руки имитируют человеческие жесты.
4. Интеллектуальное общение: Отвечает на вопросы, ведёт свободные и запрограммированные беседы, запоминает и узнаёт людей при повторной встрече.

Таким образом, Robo-C представляет собой передовое сочетание антропоморфного дизайна, эмоционального выражения и социального взаимодействия.

Исходная система управления Robo-C имеет микрофон, динамики, сервоприводы, которые взаимодействуют между собой с помощью лингвистических баз данных [3].

Модернизированная система представляет собой наличие Smart-зуба и Smart-Челюсти. Smart-челюсть включает в себя камеры и датчик температуры. При отработке препарирования твердых тканей зуба — будь то лечение кариеса, препарирование под искусственную коронку или эндодонтический доступ — в работу вступают микротермопары, встроенные в дентин на критическом расстоянии от пульпарной камеры. Они непрерывно

мониторят температуру в зоне препарирования. При превышении порогового значения, чревато термическим ожогом пульпы, система фиксирует ошибку. Smart-зуб включает в себя датчик давления или специальный гель. В ходе процедуры удаления зуба датчики давления, распределенные в области лунки и периодонтальной связки, регистрируют в реальном времени векторы и величину прикладываемых сил. Система анализирует показания с датчиков и сравнивает с эталонным алгоритмом, что позволяет выявить избыточное давление или вращательный момент, способный привести к травме. Если студент выполняет процедуру «Препарирование под коронку», то в корне зуба находится специальный гель и датчик, программа определяет правильно ли дошел студент до эталонной границы. Если студент не дошел до требуемой границы, то программа фиксирует ошибку. Сигнал с датчиков находящихся в Smart-челюсти и smart-зубах попадает в лингвобазу, при превышении предельных значений, робот имитирует боль пациента.

Камеры в Smart-челюсти включаются при начале лечения определенного зуба. Камера посылает информацию в нейросеть, где анализируется лечение. Пример распознавания правильности лечения представлен на рисунке 2. В случае неправильного лечения, данные отправляются в лингвистическую базу [4-5].

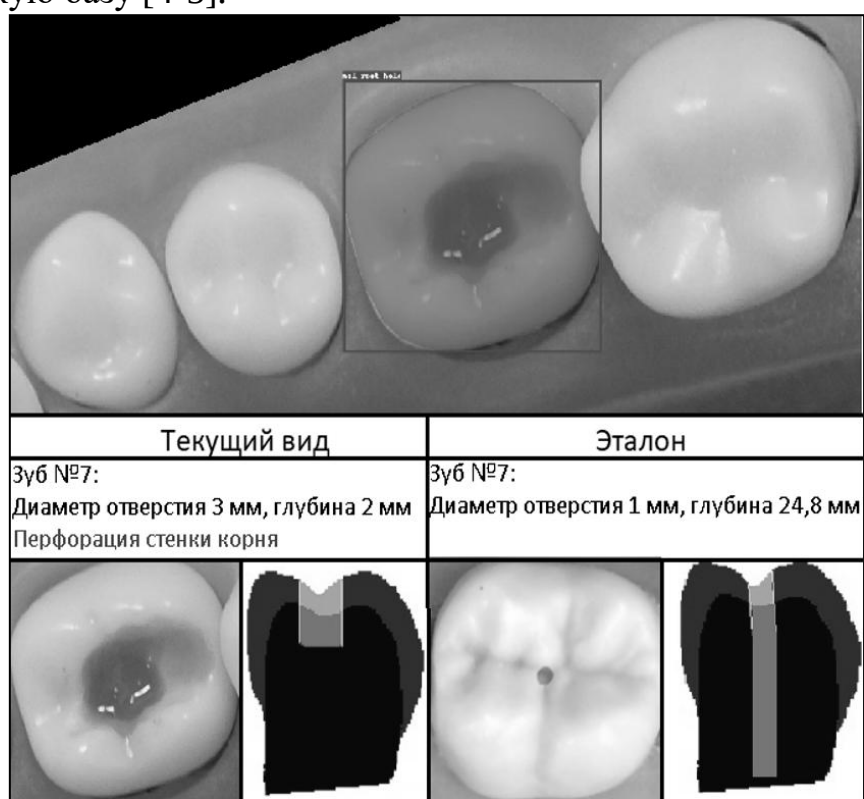


Рис. 2. Обработка фотографии с помощью нейросети

Тренажер использует 4 кейса: лечение кариеса, препарирование зуба под коронку, удаление зуба, эндодонтическое лечение. Каждый кейс предусматривает использование определенной Smart-челюсти и Smart-зуба.

Выводы. Разработана система управления стоматологического симулятора на базе Robo-C. Система включает в себя распознавание речи и воспроизведение фраз, Smart-челюсть и Smart-зуб. С помощью Smart-челюсти и Smart-зуба система получает данные и обрабатывает их с помощью нейросети. Нейросеть оценивает качество лечения. Также уделено внимание коммуникации между симулятором и человеком. Разработанный симулятор позволяет лучше подготовить студентов к работе с реальным пациентом.

Симулятор находится в эксплуатации 2-ой год в тестовом режиме. Суммарно тренажер попробовали 100 студентов. Студенты были разделены на 2 группы. Первая группа выполняла задания и оценивалась врачом-экспертом, чье заключение считалось эталонным. Вторая группа выполняла идентичные задания, но оценивалась программой. Далее результаты сравнивались и в случае расхождения результатов, программа корректировалась.

Список литературы

1. Янушевич О.О., Ташкинов А.А., Минаева Н.В. и др. Стоматологический антропоморфный робот. Новая эра в имитации врачебных манипуляций и клинического приема // Cathedra-Кафедра. Стоматологическое образование. 2021. № 78. С. 64–67.
2. Тимофеев М.Е. и др. Медицинские симуляторы: история развития, классификация, результаты применения, организация симуляционного образования // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2015. – №. 2 (85). – С. 53-59.
3. Южаков А.А., Арутюнов С.Д., Асташина Н.Б. и др. Разработка антропоморфного стоматологического симулятора на базе робота Robo-C // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 13-22.
4. Kokoulin A.N., Kokoulin R.A. (2022) The Hierarchical Approach for Image Processing in Objects Recognition System: Proc. of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, IEConRus 2022, St. Petersburg, 25–28 января 2022 года. St. Petersburg, 2022, pp. 340-344.
5. Кокоулин А.Н., Южаков А.А. Двухступенная схема обнаружения объектов в подсистеме машинного зрения сервисных роботов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 49. – С. 176-199.

ЛОГИКА СУБЪЕКТОВ И НЕЙРОСЕТЕЙ: ДВА ЭКСПЕРИМЕНТА

Аннотация: Констатируется фундаментальная важность понимания логики, которой руководствуются субъекты. Приведены результаты двух авторских экспериментов по решению логических задач школьниками и нейросетями. Приведены примеры принципиальных проблем понимания нейросетями описания ситуаций. Намечены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: логика, нейросети, проблемы понимания.

LOGIC OF SUBJECTS AND OF NEURAL NETWORKS: TWO EXPERIMENTS

V.A. Filimonov, Ph.D., professor, filimonov-v-a@yandex.ru
Sobolev Institute of Mathematics, Novosibirsk, Russia

Abstract: The fundamental importance of understanding the logic that guides the subjects is stated. The results of two author's experiments on solving logical problems by schoolchildren and so by neural networks are presented. Examples of fundamental problems of understanding by neural networks of describing situations are given. The directions of further research are outlined.

Key words: logic, neural networks, problems of understanding.

Распространение и доступность систем искусственного интеллекта делает актуальным исследование их возможностей и ограничений. В настоящей статье исследуется процесс решения некоторых логических задач школьниками и нейросетями. Понимание логики представляется фундаментально важной способностью. При этом, конечно, не стоит ограничиваться классической формальной логикой. Для эффективного взаимодействия с любым субъектом (и/или объектом) необходимо решить рефлексивную задачу: определить логику (алгоритмы), которой этот субъект руководствуется [1]. Таких логик (алгоритмов) может быть несколько [2-4]. Часто они учитываются при решении прикладных задач о наличии или отсутствии причинно-следственных связей [5, 6].

Нами были проведены эксперименты по решению двух логических задач школьниками Омска и Владивостока, а также двумя нейросетями. Эксперимент во Владивостоке был выполнен в 2024 г. коллективом под

руководством д.пед.н. профессора В.С. Чернявской в рамках исследования академической успешности в математике школьников и студентов. Эксперимент в Омске, в котором участвовали учащиеся Гимназии № 19, был выполнен под руководством автора статьи.

Идея эксперимента была подсказана проектом нейрофизиолога и филолога Натальи Романовой, которая создала эффективный курс русского языка «Идеальная грамотность» [7] как ответ на вопрос: «*Почему одни слова правильно пишут даже двоечники, а в других ошибаются даже отличники?*». Мы задались аналогичным вопросом относительно логики.

Для эксперимента была выбрана известная задача Эйнштейна «5 домов» [8]. В связи с тем, что этот пример предназначался для школьников России, условия задачи пришлось скорректировать. В оригинальной формулировке задачи и всех различных её вариантах обитатели домов – исключительно мужчины, причём подверженные вредным привычкам: все, как один, курящие, а некоторые в некоторых вариантах даже употребляют алкоголь. В нашем варианте обитатели имеют различные унисекс-имена, включая европейские, а также якутское и азиатское, изучают различные учебные предметы и любят различные фрукты. Также был приближен к нашей реальности состав домашних любимцев, поскольку в оригинале в нём фигурировала зебра, а аквариумные рыбки и улитки считались животными. В связи с устойчивой связью в русскоязычном сообществе понятия «*жёлтый дом*» с одним из вариантов лечебного учреждения, цвет этого дома в задаче изменён.

Требуется на основе имеющихся фактов определить для всех обитателей домов, кто в каком доме живёт, какие предметы изучает, какие фрукты любит и какие в этих домах домашние любимцы.

Во избежание неопределённости мы будем считать, что дома стоят рядом и пронумерованы подряд от 1 до 5 слева направо для того, кто решает эту задачу, нарисовал схему и смотрит на неё. Факт «*Дом А стоит сразу справа от дома В*» интерпретируется как «*Номер дома А на единицу меньше номера дома В*».

Постановка задачи включает Таблицу 1 с компонентами задачи (объектами и субъектами), указанными в алфавитном порядке, и список фактов (утверждений) относительно этих компонентов.

Таблица 1. Компоненты задачи «5 домов»

Цвет дома	Белый	Зелёный	Красный	Оранжевый	Синий
Имя	Айаан	Гленн	Мишель	Нур	Саша
Предмет	Биология	Литература	Математика	Физика	Химия
Фрукты	Апельсины	Бананы	Вишни	Сливы	Яблоки
Любимцы	Ёжик	Кошка	Собака	Хомяк	Черепаха

Известны 14 фактов.

1. Айаан живёт в доме красного цвета.
2. У Нура есть ёжик
3. В зелёном доме изучают литературу.
4. Мишель изучает химию
5. Зелёный дом стоит сразу справа от белого дома.
6. Тот, кто любит бананы, держит хомяка
7. В оранжевом доме любят яблоки
8. Человек, проживающий в центральном доме, учит физику
9. Саша проживает в первом доме.
10. Сосед того, кто любит сливы, держит кошку
11. В доме по соседству с тем, в котором собака, любят яблоки
12. Тот, кто любит вишни, изучает биологию
13. Гленн любит апельсины
14. Саша живёт рядом с синим домом

Поскольку в решении этой задачи участвовали школьники 5–8 классов, им предварительно предлагалась простая похожая задача про трёх поросят. С этой задачей все школьники справлялись быстро.

Три поросёнка живут в разных домах. Вот имена и материал дома: Наф-Наф, Ниф-Ниф, Нуф-Нуф; Дерево, Кирпич, Солома

1. Дом в центре – деревянный.
2. У соседа Нуф-Нуфа дом из соломы
3. Дом №3 - кирпичный.
4. Ниф-Ниф живёт в первом доме.

Определите, кто в каком доме живёт (заполните таблицу).

По результатам решения задачи «5 домов» была составлена Таблица 2, в которой приведено решение задачи, а также указана сложность каждого компонента. Сложность оценивалась в баллах от самого простого (1 балл) до самого сложного (3 балла). Добавим, что полностью всю задачу смогли решить только несколько групп по 3 человека, которые сформировались самостоятельно.

Таблица 2. Решение задачи и сложность компонента

№ дома	1	2	3	4	5
Цвет дома	Оранжевый 1	Синий 1	Красный 1	Зелёный 3	Белый 3
Имя	Саша 1	Мишель 3	Айаан 1	Гленн 3	Нур 1
Предмет	Математика 1	Химия 3	Физика 1	Литература 1	Биология 1
Фрукты	Яблоки 1	Сливы 2	Бананы 2	Апельсины 1	Вишни 1
Любимцы	Кошка 2	Собака 2	Хомяк 2	Черепаша 2	Ёжик 1

Задача «5 домов» была также предложена для решения двум нейросетям: GigaChat (Сбербанк) и Aigatal. Обе нейросети паразитируют на англоязычных ресурсах, но Aigatal использует две нейросети: Perplexity и ChatGPT-4o, поэтому её результаты лучше. Обе нейросети не справились с задачей, а GigaChat ещё биологию превратила в физкультуру.

Этим нейросетям была также предложена детективная задача по рассказу [9], ранее рассмотренная автором статьи в [10]. Ниже приведена формулировка задачи, в которой имена изменены, чтобы нейросети не нашли рассказ с ответом.

Есть четыре человека: Борис, Петр, Макс, Фёдор.

Из них несколько человек были в автомобиле. Надо определить все возможные варианты из двух, трёх и четырёх человек.

У них сложные отношения между собой.

Борис так боялся Петра, что никогда бы не остался с ним один на один.

Петр не доверял трусу Максy столь глубоко, что трудно поверить, чтобы он когда-либо пошел с ним на убийство.

Петр никогда не позволяет себе оказаться между Борисом и Фёдором; он стал возражать, когда попытались оставить его с ними одного.

Макс удрал, едва завидев Бориса. Разумеется, он бы ни за что не помог Борису совершить убийство, если только его некому было защитить.

Фёдор так боится своих друзей, что у него правило: никогда ни с кем из них не оставаться один на один.

Какие есть варианты?

Нейросети не смогли найти вариант, предложенный автором рассказа, и предложили дополнительные варианты, противоречащие условиям.

Нейросети плохо воспринимают информацию об отношении субъектов и объектов, такие как пространственные (по соседству, рядом, около) и личностные (наедине, «связи внутри группы не поддаются на доверие»).

В Таблице 3 представлена «упаковка» вариантов с помощью карты Карно [10]. Знаки «+» и «-» означают соответственно присутствие либо отсутствие данного человека (Б, П, М, Ф) в данном варианте. В ячейках указано, является ли комбинация возможной (1), либо невозможной (0).

Таблица 3. Результаты анализа в формате карты Карно

Участники	-Б-П	-Б+П	+Б-П	+Б+П
-М-Ф	0	0	0	0
-М+Ф	0	0	0	0
+М-Ф	0	0	0	0
+М+Ф	0	0	1 (решение автора [9])	0

Дальнейшие исследования связаны с использованием теории катастроф [11], изучением возможностей и ограничений гибридного субъекта (коллективы людей и систем ИИ) [12] и логикой квантовой кибернетики, включающей корень квадратный из оператора отрицания.

Результаты можно сформулировать следующим образом.

1. Компоненты логических задач могут быть квалифицированы по сложности решения как для людей, так и нейросетей.

2. Нейросети способны решать логические задачи. Эти решения необходимо проверять. Часто ошибки нейросетей обусловлены паразитированием на англоязычных ресурсах.

3. Существуют понятия, которые систематически вызывают ошибки людей и нейросетей. К таким понятиям, в частности, относятся отношения между объектами/субъектами.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института математики СО РАН, проект FWNF-2022-0016.

Список литературы

1. Смаллиан Р. Вовеки неразрешимое. Путь к Гёделю через занимательные загадки. – М.: «Канон+» РООИ «Реабилитация», 2013. – 303 с.
2. Жалдак Н. Н. Обучение дошкольников логике естественного языка как методу научного познания // Педагогика и психология современного образования : монография / Г. В. Юдин, С. В. Красовская, Т. Н. Васягина [и др.]; гл. ред. Ж. В. Мурзина; Чувашский республиканский институт образования. – Чебоксары: Среда, 2023. – С. 167-178. URL : [https:// phsreda.com/e-publications/e-publication-10549.pdf](https://phsreda.com/e-publications/e-publication-10549.pdf)
3. Лобанов В.И. Русская вероятностная логика. – М.: «Русская Правда», 2009. –320 с.
4. Тарасов В.К. Прагматическая логика. – М.: ООО Издательство «Добрая книга», 2018. – 288 с.
5. Тарасенко Ф.П. Моделирование и феномен человека. Ч. I. Моделирование – инфраструктура взаимодействия человека с реальностью. – М.: Научные технологии, 2012.–137 с.
6. Перл Дж., Маккензи Д. Думай «почему?». Причина и следствие как ключ к мышлению. – М.: АСТ, 2023.–464 с.
7. Романова Н. Идеальная грамотность.–СПб.: Питер, 2017. –208 с.
8. Загадка Эйнштейна [Электронный ресурс]: режим доступа- [https:// ru.wikipedia.org/wiki/Загадка_Эйнштейна](https://ru.wikipedia.org/wiki/Загадка_Эйнштейна)
9. Рис Д.Г Символическая логика убийства (пер. с англ. В. Постников) [Электронный ресурс]: режим доступа- https://royallib.com/book/ris_dgon/simvolicheskaya_logika_ubiystva.html

10. Филимонов В.А. Элементы логики для школьников и студентов с использованием метода Ильи Франка: схема, таблица решений и карта Карно [Электронный ресурс]: режим доступа- <https://www.researchgate.net/publication/338422860>.DOI:10.13140/RG.2.2.14986.00963

11. Филимонов В.А., Чернявская В.С. Катастрофы субъективных оценок и их модели: к вопросу инструментализации диагностики эффекта «зловещей долины» // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, № 2, Т. 13, 2021, с. 119-124.

12. Filimonov V. A. The Study of a Collective Personality for Designing of an Educational Process. In: J. Sib. Fed. Univ. Humanit. soc. sci., 2025, 18(11), 2309–2314. EDN: SHWEEC

Секция 1

Робототехнические системы и комплексы, мехатроника 4

Горобцов А.С., Данилевич В.М. (Волгоград), Климов К.В., Данилов В.А. (Москва)

Перспективы создания коммерческих образцов роботов - собак 5

Городилов А.В., Кононова А.И. (Москва)

Применение робота-манипулятора для контроля качества изделий 10

Добрынин Д.А. (Москва)

Подход к сканированию ближней зоны шагающего робота 15

Исхаков А.Р., Маликов Р.Ф. (Уфа)

Моделирование динамики трехзвенного робота-манипулятора заданного уравнениями Лагранжа 2-го рода 21

Найданова И.Е., Губанков А.С. (Владивосток)

Разработка метода стабилизации положения малого автономного надводного судна 28

Чернышёв В.В., Петров Д.С., Оборин С.Д. (Волгоград)

Колёсно-шагающий движитель автомобиля повышенной проходимости..... 35

Секция 2

Специальная робототехника 42

Варга В.В., Архипов А.Е. (Санкт-Петербург)

Разработка алгоритма трехмерной реконструкции на основе лазерной структурированной подсветки 43

Василенко Р.П., Коноплин А.Ю., Даць Н.С. (Владивосток)

Подход к применению АНПА, оснащенных многозвенными манипуляторами, для выполнения грузоподъемных работ 48

Коноплин А.Ю., Юрманов А.П., Фомина А.Ю., Копылов Д.В. (Владивосток)

Разработка метода автоматической стыковки НПА к объекту работ с использованием телескопических опор 53

Красавин Н.А., Коноплин А.Ю., Копылов Д.Е., Калентьева Е.Е. (Владивосток)

Подход к решению обратной задачи динамики подводного многозвенового манипулятора 59

<i>Крючков Б.И., Усов В.М., Бубеев Ю.А. (Звездный городок), Иванов А.В. (Москва)</i> Возможность распознавания состояния работоспособности космонавтов по речи с использованием искусственных нейросетей в условиях до- и послепо- летных экспериментов	65
<i>Леонтьев Н.А., Меркулов С.И., Зимин И.И. (Железногорск)</i> Анализ принципов роботизированной сборки повышенной точности и мето- дов повышения технологичности серийных малых космических аппаратов	71
<i>Меркулов С.И., Зимин И.И., Курепин Р.С. (Железногорск)</i> Принципы разработки конструкции малых космических аппаратов серийной роботизированной сборки	77
<i>Чубарь А.В., Потёмкин А.Д., Голубев Е.А., Редкоус Г.Л. (Красноярск)</i> Моделирование движения беспилотного летательного объекта «Дирижабль»	83

Секция 3

Инженерия знаний и базы знаний..... 89

<i>Боржигон Е.В., Углев В.А. (Железногорск)</i> Разработка баз знаний для сервиса оценки результативности деятельности научно-педагогических работников	90
<i>Дьяченко Я.В. (Железногорск)</i> Сравнительный анализ методологических подходов к семиотическому пред- ставлению и анализу учебных планов на примере специальности “информа- ционная безопасность”	97
<i>Воронков А.Е., Зуев А.В. (Владивосток)</i> Анализ точности калибровки магнитометра, установленного на беспилотном летательном аппарате, при различных сценариях вращения датчика	104
<i>Грибова В.В., Жданов Д.В., Помников Е.Е. (Владивосток)</i> Онтологическая модель для класса задач расчета нагрузок на строительный объект	111
<i>Иванова В.В. (Санкт-Петербург)</i> Исследование методов композиции изображений МРТ с целью их разметки для диагностики рассеянного склероза.....	119
<i>Котов А.А., Носовец З.А., Филатов А.А. (Москва)</i> Система вывода и коммуникативного поведения робота на основе переме- щения в семантическом графе	124
<i>Малов И.А., Малова М.Ю., Мурашов М.В., Моисеев А.А. (Москва)</i> Гибридный метод извлечения правил и временных привычек для рекоменда- тельной настройки KNX-систем	131

Секция 4

Модели и методы анализа данных в интеллектуальных системах

..... 136

Белкина М.А., Шкаберина Г.Ш. (Красноярск)

Сравнение стандартного и ускоренного k-means для кластеризации пациентов с диабетом по биомедицинским показателям 137

Евдокимова Е.А., Альсова О.К. (Новосибирск)

Интерактивный модуль на базе R/Shiny для освоения методов первичного анализа временных рядов 143

Захаров Е.И. (Москва)

Обзор практики применения нейросетей для определения механических свойств материалов на основе инструментального индентирования 150

Краснолобов Д.С. (Таганрог), Углев В.А. (Москва)

Проблемы разработки приложения для анализа траектории перемещения взгляда по изображениям, полученным в результате когнитивной визуализации данных 156

Кушнер Э.И., Товбис Е.М. (Красноярск)

Интеллектуальный модуль наложения трека на карту для спортивного ориентирования 164

Кузнецов М.В., Барков А.В., Шангина Е.А., Углев В.А. (Железногорск)

Расширение возможностей сервиса визуализации графовых структур 170

Матвеев А.В., Нартова А.В., Окунев А.Г. (Новосибирск)

Облачный сервис DLgram для автоматического анализа изображений микроскопии 177

Макаренко К.В. (Красноярск)

Применение методов искусственного интеллекта в автоматизации диагностики системных ошибок 182

Смирнов Г.А. (Железногорск)

Библиотека логики отрисовки когнитивных карт диагностики знаний 188

Секция 5

Алгоритмы и системы искусственного интеллекта 195

Аксенов К.А. (Екатеринбург), Чжоу Цихан (Чжэнчжоу), Ван Цзинь (Паньцзинь), Сунь Лина (Харбин)

Разработка прототипа интеллектуальной системы для задачи идентификации гриба 196

Гуськов П.О., Брежнев Р.В. (Красноярск)

Разработка модели интеллектуальной фильтрации и ранжирования спутниковых снимков на основе метаданных и показателей качества 204

Котыга М.М. (Москва)

Адаптивный контекстно-зависимый прунинг как метод повышения энерго-эффективности и пропускной способности больших языковых моделей 209

Макарова Е.А., Парамонова А.К. (Уфа)

Построение агент-ориентированной модели сектора домохозяйств на основе динамической модели макроэкономического кругооборота 214

Максимов П.Н., Синьковский Ф.К., Максимов В.Н. (Железнодорожск)

Применение нейронных сетей для моделирования нелинейных процессов 220

Морев К.И. (Таганрог)

Системная интеграция алгоритмов компьютерного зрения для задач интеллектуальной видеоаналитики 226

Потапов С.А. (Санкт-Петербург)

Обзор архитектурных моделей многоагентных систем с большими языковыми моделями 233

Симахин Д.Е., Аксенов К.А. (Екатеринбург)

Исследование методов отбора данных для обучения моделей few-shot классификации текстов на примере SetFit 240

Шашкин С.Е. (Красноярск)

Прогнозирование отказов насосных агрегатов с применением рекуррентных нейросетей (LSTM/GRU) в диспетчерской нефтегазовой инфраструктуре 247

Шкурят Д.Е. (Санкт-Петербург)

Нейронные сети с механизмом внимания в задачах бинарной классификации 254

Секция 6

Управление роботами и интеллектуальная автоматизация 259

Горин В.А., Губанков А.С., Юхимец Д.А. (Владивосток)

Подход к построению системы для навигации БПЛА внутри помещения 260

Знаменский Р.С., Гаврилов А.В. (Новосибирск)

Анализ работы алгоритма ICP для SLAM 266

Лебедев А.В. (Владивосток)

Разработка метода формирования траекторий движения робототехнических объектов при ограниченном ресурсе управления 272

Новикова Д.А., Толоконников Г.И., Рого Г.Э., Суханов Ю.В. (Петрозаводск)

Автоматизация процессов выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой 278

<i>Самаке Б.А. (Бамако), Чубарь А.В., Ченцов С.В. (Красноярск)</i> Моделирование системы автоматического управления теплообменником дробилки	285
<i>Филиппов Т.Е., Филиппова М.Е., Тарасьев А.А., Аксенова Е.К., Аксенов К.А. (Екатеринбург)</i> Система интеллектуальной автоматизации управления ресурсами на основе Q-learning	290
<i>Чубарь А.В., Загайнов М.С., Юрова Е.Б. (Красноярск)</i> Синтез ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса и оптимизация его па- раметров в среде моделирования SimInTech	296
<i>Чубарь А.В., Мутовин М.А., Самохов Д.А., Которженко С.А. (Красноярск)</i> Интеллектуальная система управления промышленным роботом с примене- нием методов искусственного интеллекта в среде SimInTech	302
<i>Шилин Д.В. (Москва)</i> Роботизация в молочном животноводстве: эволюция доильных роботов и вызовы современных систем машинного зрения	308
<i>Юренко К.И. (Новочеркасск)</i> Адаптация параметров нейросетевого эволюционно-генетического алгорит- ма синтеза оптимального управления многорежимным подвижным объектом на основе обучения с подкреплением	314

Секция 7

Правовые и социогуманитарные аспекты применения искусствен- ного интеллекта и робототехники

321

<i>Алексеев М.В., Маглинец Ю.А. (Красноярск)</i> Архитектура системы для исследования информационных волн	322
<i>Гриценко Ю.А., Молчанова Н.О., Князева С.В. (Москва)</i> Решение задачи классификации данных для автоматизации принятия экс- пертных решений в суде	330
<i>Гросс Я.А., Волосатова Т.М., Князева С.В. (Москва)</i> Применение методов стеганографии для внедрения защищённых неизвле- каемых цифровых водяных знаков в изображения с целью охраны интеллек- туальной собственности	336
<i>Лопухов В.В., Углев В.А. (Москва)</i> Некоторые направления использования искусственного интеллекта в дея- тельности подразделений органов внутренних дел	342
<i>Маковская П.Н. (Ростов-на-Дону)</i> Философский взгляд на правосубъектность искусственного интеллекта в сфере правоприменения	349

Секция 8

Образовательные и философские аспекты применения искусственного интеллекта и робототехники 353

Беляева Т.А., Углев В.А. (Москва)

Базовая технология эпохи новых «географических» открытий 354

Зинина А.А., Котов А.А., Мазурок В.Н. (Москва)

Людам нравятся похожие? Доверие к роботам с экстравертированным и интровертированным поведением 360

Зорькин К.Ф. (Красноярск)

Робот для участия в соревнованиях по подводной робототехнике 369

Крейденко Т.Ф. (Москва)

Искусственный интеллект и современное школьное географическое образование 375

Литовченко И.Н., Лютикова В.С. (Алматы)

Философские вопросы применения искусственного интеллекта и распознавания образов в сейсмологии 379

Сторожев С.А., Алексеев Е.С. (Пермь)

Стоматологический симулятор на базе робота ROBO-C 384

Филимонов В.А. (Новосибирск)

Логика субъектов и нейросетей: два эксперимента 389