

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

# **РОБОТОТЕХНИКА И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ**

Материалы XVI Всероссийской  
научно-технической конференции  
с международным участием

г. Железногорск, 30 ноября 2024 г.

Электронное издание

Под научной редакцией В.А. Углева

Железногорск 2024

УДК 004.896(08)  
ББК 32.816я43  
P584

**P584 Робототехника и искусственный интеллект:** материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Железногорск, 30 ноября 2024 г.) / под науч. ред. В.А. Углева. – Электрон. дан. (10,8 Мб). – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2024. – 327 с.

ISBN 978-5-907878-27-3

Сборник включает тексты докладов участников конференции по различным вопросам робототехники и искусственного интеллекта.

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

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

**УДК 004.896(08)**  
**ББК 32.816я43**

ISBN 978-5-907878-27-3

© Коллектив авторов, 2024

Электронное научное издание

ISBN 978-5-907878-27-3



# СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

|   |            |
|---|------------|
| <i>Секция 1</i><br><b>Робототехнические системы и комплексы, мехатроника .....</b>  | <b>4</b>   |
| <i>Секция 2</i><br><b>Специальная робототехника .....</b>   | <b>32</b>  |
| <i>Секция 3</i><br><b>Инженерия знаний и базы знаний .....</b>  | <b>62</b>  |
| <i>Секция 4</i><br><b>Модели и методы анализа данных в интеллектуальных системах<br/>.....</b>                            | <b>109</b> |
| <i>Секция 5</i><br><b>Алгоритмы и системы искусственного интеллекта .....</b>   | <b>141</b> |
| <i>Секция 6</i><br><b>Управление роботами и интеллектуальная автоматизация .....</b>                                      | <b>195</b> |
| <i>Секция 7</i><br><b>Образовательные и социогуманитарные аспекты искусственного<br/>интеллекта и робототехники .....</b> | <b>291</b> |
| <b>Содержание .....</b>   | <b>323</b> |

*Секция 1*

**РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ  
СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ,  
МЕХАТРОНИКА**

А.С. Горобцов, д.т.н., профессор, vm@vstu.ru  
П.С. Тарасов, ст.п., tarasradio@mail.ru  
В.М. Данилевич, аспирант, vlad-danilevich.90@inbox.ru  
ВолгГТУ, г. Волгоград, Россия

## СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ЗООМОРФНЫХ РОБОТОВ С ПОДАТЛИВЫМИ ЗВЕНЬЯМИ

*Аннотация:* Рассматриваются методы машинного обучения с использованием математической модели объекта в форме дифференциально – алгебраических уравнений. Уравнения такого типа описывают, например, управляемое движение многомерных робототехнических систем, в частности, антропоморфных и зооморфных роботов, задача управления которыми актуальна. Машинное обучение, сводится к задаче параметрической оптимизации в пространстве параметров вырожденной системы линейных алгебраических уравнений. Приведены примеры для синтеза управляемого движения для двуногих и четырехногих роботов.

*Ключевые слова:* машинное обучение, оптимальное управление, робототехника, шагающие роботы, экзоскелетоны.

A.S. Gorobtsov, Ph.D., professor, vm@vstu.ru  
P.S. Tarasov, Se.L., tarasradio@mail.ru  
V.M. Danilevich, postgraduate student, vlad-danilevich.90@inbox.ru  
VSTU, Volgograd, Russia

## CONTROL SYNTHESIS OF ZOOMORPHIC ROBOTS WITH COMPLIANT LINKS

*Abstract:* Machine learning with approximation of solutions based on differential algebraic equations Machine learning methods using a mathematical model of an object in the form of differential algebraic equations are considered. Equations of this type describe, for example, the controlled movement of multidimensional robotic systems, in particular, anthropomorphic and zoomorphic robots, the task of controlling which is relevant. Machine learning is reduced to the problem of parametric optimization in the parameter space of a degenerate system of linear algebraic equations. Examples for the synthesis of controlled motion for two-legged and four-legged robots are given.

*Keywords:* machine learning, variational methods, optimal control, robotics, walking robots, exoskeletons.

Рассматривается синтез управления многомерными нелинейными системами на основе метода обобщенной задачи динамического уравнивания [1- 3]. Метод сводится к задаче параметрической оптимизации в пространстве параметров вырожденной системы линейных уравнений, которая получается из уравнений динамики системы. Результатом решения задачи синтеза являются силы (моменты) в приводах. Поскольку управление по силам является неустойчивым, то предлагаются методы стабилизации управляемого движения, в частности, метод добавочных программных сил.

На рис. 1 показаны результаты моделирования пространственного управляемого движения одномерной цепочки из 25 тел, связанных 24 приводами (модель змеи). Программное движение – перемещение правого конца системы из исходного горизонтального положения в желаемое положение с определенным смещением по двум координатам по заданному закону. Программное положение внутренних звеньев системы характеризуется медленным уводом (дрейфом) – рис. 1а, при этом точка, для которой задается программное движение (голова) неподвижна. Управление дрейфом может быть достигнуто за счет компенсирующих программных движений выбранных точек системы, после достижения конечного программного положения. Таким образом можно реализовать динамическую компенсацию увода.

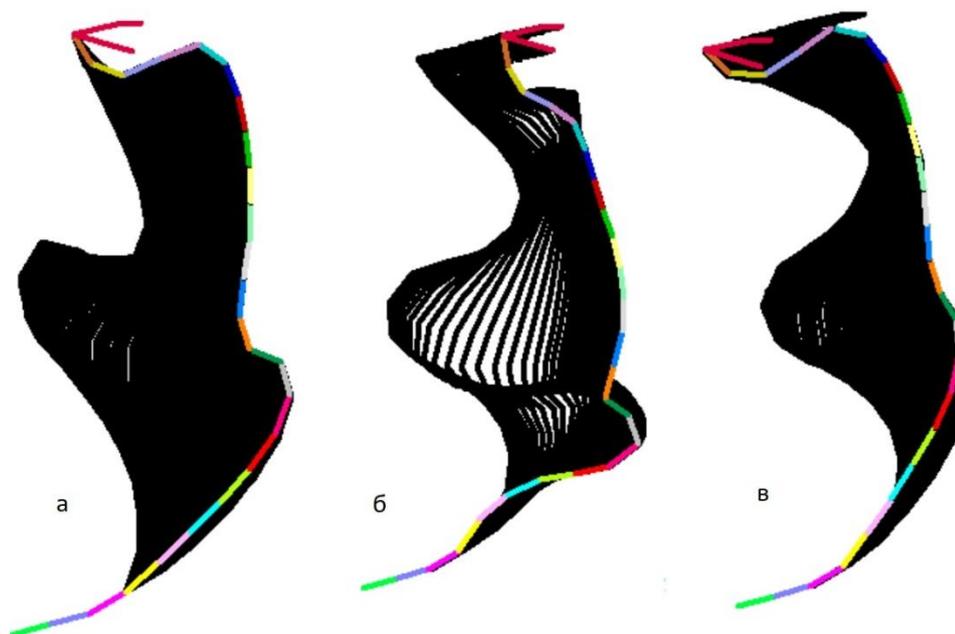


Рис. 1. Кинограмма компенсации увода за счет движения головы: а - без компенсации, б - движение головы вперед, в - движение головы назад

На рис. 1б и 1в показаны результаты моделирования компенсации увода движением головы в горизонтальном направлении на 0.1 м за 0.1 с. Общее время движения системы 0.4 с. Как видно из рисунка, движение головы назад почти в два раза уменьшает смещение увода.

Компенсацию дрейфа можно реализовать также за счёт изменения реакций в опоре. Рассматриваемая система учитывает шесть реакций в нижней опоре. Изменение самих реакций или приложение корректирующих сил при условии неизменности реакций позволяет влиять на движение звеньев. Рассматривается приложение сил, поскольку такой метод допускает более простую программную реализацию. На рис. 2 показана программная реакция в опоре системы по направлению X и ее интерполяция сплайном. Интерполяцию реакции будем считать программной реакцией.

Приложим к верхнему звену (голове) некоторые, зависящие от времени силы и рассчитаем управляемое движение при условии выполнения закона изменения реакций, представленных на рис. 2.

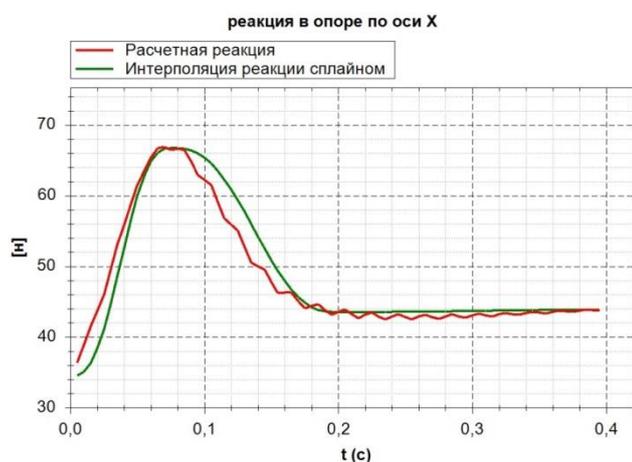


Рис. 2. Программные реакции в опоре

Отметим, что реакции, представленные на рис. 2, получены из расчета управляемого движения. При расчете управляемого движения с компенсацией эти реакции вводятся как дополнительные условия, для чего используются их интерполяции сплайнами - рис. 2. Расчет движения с компенсацией увода соответствует системе с дополнительными тремя условиями на реакции сил по осям x и z и реакции момента относительно оси y. Все реакции являются внешними силами и моментами и их изменение определяет ускорение центра масс системы и изменение кинетического момента.

Поскольку, в нашем случае все 6 реакций являются неизменными, то любая сила или момент, приложенные в произвольной точке системы будут вызывать изменение ускорения в соответствующем направлении. На рис. 3 показано изменение ускорения ц.м. системы при действии корректирующей силы в горизонтальном направлении, величиной 8 Н в интервале времени от 0.05 до 0.25 с. Изменение ускорения в этом интервале соответствует массе движущихся тел системы.

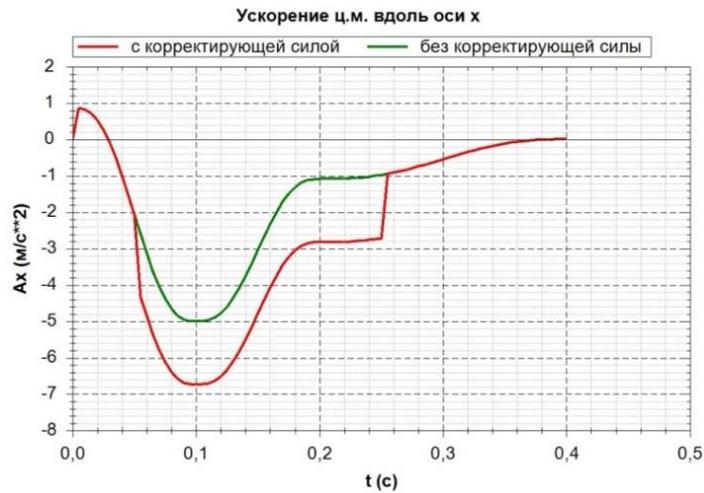


Рис. 3. Ускорение ц.м. системы

После окончания действия корректирующей силы ускорение возвращается к прежнему значению, которое определяется программными уравнениями связей. Действие показанной корректирующей силы приводит к изменению движения всей системы – рис. 4.

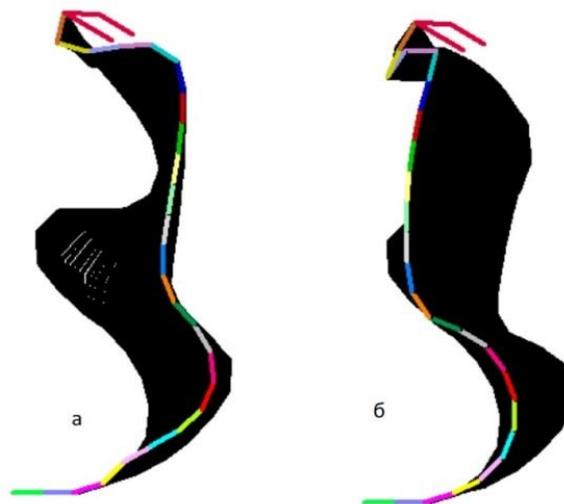


Рис. 4. Кинограмма движения системы – а без корректирующей силы, с корректирующей силой

Корректирующие силы по разным осям изменяют ускорения системы независимо друг от друга и только в направлении действия силы. Влияние корректирующих сил на поступательные ускорения ц.м. не зависит от точки приложения сил на звене и от звена. На кинетический момент системы влияют и силы, и моменты. Изменение кинетического момента зависит также от точки приложения сил. Однако изменение точек приложения корректирующих сил меняет взаимное движение звеньев системы. Корректирующие силы дают удобный способ коррекции движения управляемой системы и могут быть основой методов машинного обучения.

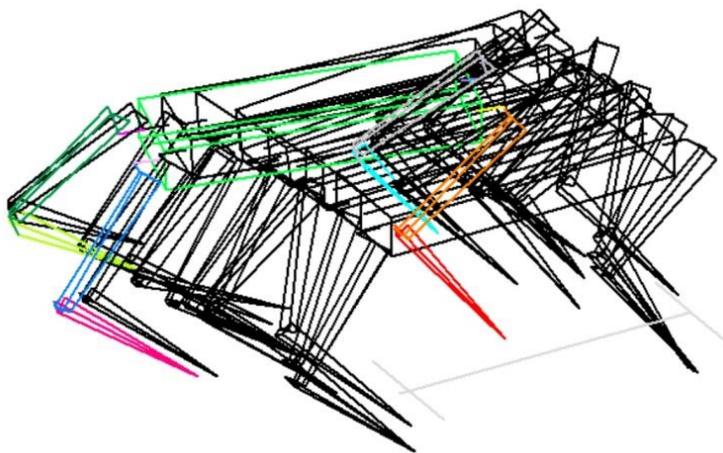


Рис. 5. Кинограмма перемещения робота – собаки при боковом возмущающем импульсе

Предложенный метод позволяет синтезировать управляемое движение различных многомерных систем. На рис. 5 показаны результаты моделирования управляемого движения робота собаки при действии бокового импульсного возмущения. Метод также применим для систем, с существенной упругостью звеньев. В рассмотренных примерах часть приводов может быть заменена упругими связями и управляемое движение будет учитывать упругие деформации.

### 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; 22(22):8920. – 14 p. <https://doi.org/10.3390/s22228920>.
2. Горобцов А.С. Обобщенная задача динамического уравнивания и перспективные направления ее применения / А.С. Горобцов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2023. - № 3 (756). - 14-24. - DOI: 10.18698/0536-1044-2023-3-14-24.
3. Горобцов А.С. Управление движением робота-собаки методом обратной задачи / А.С. Горобцов, Е.Н. Рыжов, Н.В. Чигиринская, О.К. Чесноков // Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2024. - № 4 (287). - С. 49-54. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-4-287-49-54.
4. Горобцов А.С. Управление локомоцией робота-андроида методом обобщенной задачи динамического уравнивания в невырожденном случае / А.С. Горобцов, Е.Н. Рыжов, П.С. Тарасов // Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2024. - № 4 (287). - С. 44-49. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-4-287-44-49.

**А.А. Кацурин**, к.т.н., доцент, katsurin@mail.ru  
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия  
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия  
**А.В. Моисеенко**, студент, moiseenko.avi@dvfu.ru  
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

## СИСТЕМА СОГЛАСОВАННОЙ РАБОТЫ ДВУХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

*Аннотация:* В докладе рассматривается система согласованной работы двух манипуляционных мобильных роботов, представляющих собой две роботизированные платформы, каждая из которых оснащена многозвенным манипулятором и системой технического зрения. Для определения позиции и ориентации объекта работ в трехмерном пространстве использовались ArUco-маркеры, помещенные на него. Предложенная система в автоматическом режиме обеспечивает точное позиционирование манипуляторов над объектом, захват его в рассчитанных точках и дальнейшее перемещение по неровной поверхности. Результаты выполненного моделирования в среде CoppeliaSim подтвердили работоспособность и эффективность системы.

*Ключевые слова:* мобильный робот, групповое управление, манипулятор, система технического зрения

**A.A. Katsurin**, Ph.D., PhD in Technical Sciences, Assistant Professor, katsurin@mail.ru  
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia  
Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia  
**A.V. Moiseenko**, student, moiseenko.avi@dvfu.ru  
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

## SYSTEM OF COORDINATED WORK OF TWO MANIPULATION MOBILE ROBOTS

*Abstract:* The paper considers a system of coordinated operation of two mobile manipulation robots, which are two robotic platforms, each of which is equipped with a multi-link manipulator and a vision system. ArUco markers placed on the object were used to determine the position and orientation of the work object in three-dimensional space. The proposed system automatically ensures the precise positioning of the manipulators over the object, capturing it at the calculated points and further moving along an uneven surface. The results of the simulation performed in the CoppeliaSim environment confirmed the operability and efficiency of the system.

*Key words:* mobile robot, group control, manipulator, vision system

На сегодняшний день активно расширяются области как выполнения научных исследований, так и использования различных робототехнических систем. Одним из направлений развития является эксплуатация манипуляционных мобильных роботов [1–3] в условиях неопределенной местности. В настоящее время обычно решение задач в таких условиях выполняется в полуавтоматическом режиме с участием оператора, который опирается на получаемое изображение рабочей зоны. Для корректировки положения камеры используются системы технического зрения с возможностью изменения ориентации оптических осей [4, 5]. При полуавтоматическом управлении манипуляционных мобильных роботов многие проблемы управления и навигации уже имеют соответствующие решения. Также решены уже многие проблемы при групповом управлении несколькими мобильными роботами [6-9].

Однако при согласованной работе нескольких мобильных роботов в условиях неопределенной местности в автоматическом режиме неизбежно будут возникать погрешности при определении координат объекта работ и передаче данных об этом объекте между роботами из-за специфики работы их навигационных систем и систем технического зрения.

Таким образом, разработка системы согласованной работы двух манипуляционных мобильных роботов для работы в автоматическом режиме и выполнения различных манипуляций с объектами при функционировании в условиях неровной местности является актуальной.

На рисунке 1 представлена обобщенная схема предлагаемой системы из двух манипуляционных мобильных роботов.

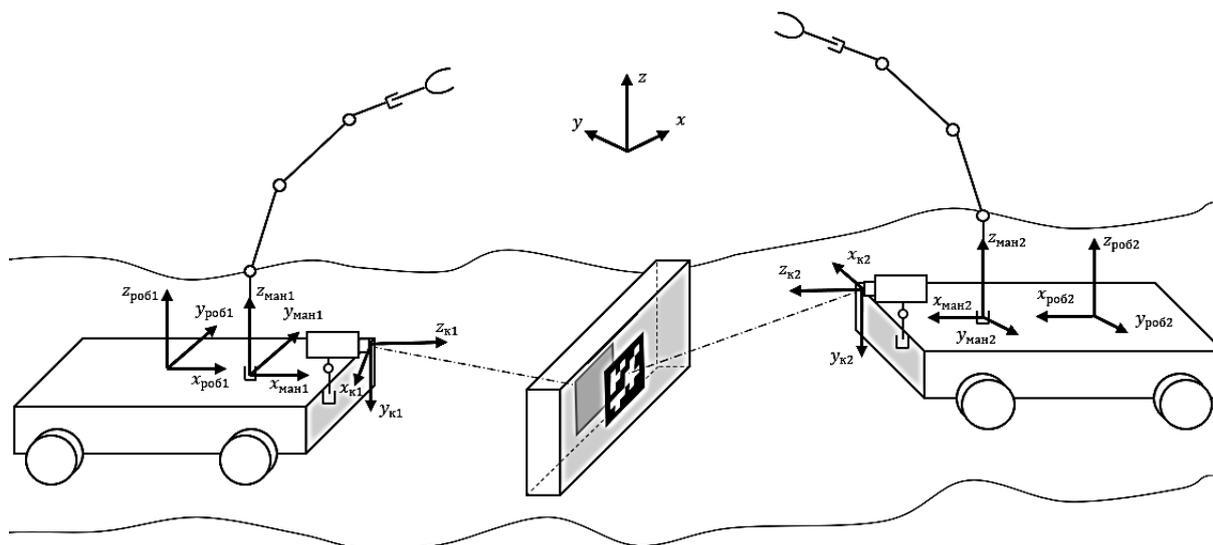


Рис. 1. Схема согласованной работы двух манипуляционных мобильных роботов

В данной системе используются две роботизированные платформы, каждая из которых оснащена многозвенным манипулятором и подвижной системой технического зрения (СТЗ), способной поворачиваться относительно двух взаимно перпендикулярных осей. На объекте работ с двух сторон

размещены различные ArUco-маркеры для определения положения и ориентации объекта и навигации в целом.

Перед работой с маркерами была реализована калибровка СТЗ при помощи специальной калибровочной доски для получения значений без учета искажения линзы СТЗ.

Работа системы строится по следующему алгоритму. Сначала выполняется локализация объекта работ по цвету подвижными системами технического зрения роботов. Поиск осуществляется с помощью побитовой маски, диапазон которой соответствует цвету объекта. Повороты приводов СТЗ определяются исходя из того, сколько пикселей находится слева или справа относительно центра для привода, выполняющего ориентацию СТЗ по курсу, либо же сверху или снизу для привода по дифференту.

Это необходимо для быстрого нахождения ArUco-маркеров, так как при попадании хотя бы малой части объекта в рабочую область СТЗ, она в свою очередь начинает доворачиваться до него, и в последствии обнаруживает метку. При этом на объекте находятся две метки по обе стороны с уникальными идентификаторами.

После нахождения маркеров в алгоритме учтены различные сценарии работы системы.

1. При движении платформ с разных сторон объекта их СТЗ обнаруживают свои уникальные метки. Далее строится маршрут до объекта для каждого мобильного робота.

2. Только одна СТЗ обнаруживает маркер. В отличие от первой ситуации, на основе полученных данных с этого одного ArUco-маркера, рассчитывается путь для обоих роботов до объекта. В результате при движении платформ в сторону объекта, в определенный момент СТЗ, ранее не обнаружившая метку, сможет идентифицировать второй маркер, что позволяет обновить данные о позиции объекта.

3. При движении роботов с одной стороны объекта каждый из них своей СТЗ распознает одну и ту же метку. При этом тот робот, который ближе к объекту, продолжает движение. А другой, в свою очередь, начинает движение в объезд к противоположной стороне объекта.

Важно уточнить, что передвижение колесной платформы без дифференциального привода происходит за счет двух ПИД-регуляторов по ошибке углового положения и расстояния до желаемой точки. Для первого берется ошибка по углу вокруг вертикальной оси в абсолютной системе координат. Для второго же используется ошибка расстояния между центром платформы и целевой точкой.

Далее последовательно происходит уточнение позиции маркера и маршрута. Данные действия производятся в цикле, вплоть до подъезда мобильных роботов к объекту.

Также в алгоритме предусмотрено условие потери маркера. Подобная ситуация может возникнуть, при совершении платформой резкого движения

в процессе работы. В таком случае робот ориентируется на последние полученные данные.

Для каждого привода СТЗ реализован ПИД-регулятор на основе ошибки по углам курса и дифферента, что позволяет следить за меткой, в независимости от малых отклонений платформы от путевых точек.

Перед тем как приступить к захвату объекта, происходит сопоставление данных о положении объекта и дальнейшее усреднение полученных значений положения и ориентации.

Следующий этап – это позиционирование манипуляторов над объектом на основе рассчитанных параметров точек захвата. После этого происходит захват объекта и его поднятие на высоту. Затем мобильные роботы начинают двигаться в заданную точку уже с объектом. При этом во время движения объект находится в зафиксированном положении, даже при небольшом отклонении хотя бы одной из платформ от параллельного движения относительно другой, которое может возникнуть вследствие неровной поверхности. Управление манипуляторами осуществляется на основе решенных прямой и обратной задач кинематики.

Работоспособность и эффективность системы была исследована в среде компьютерного моделирования CoppeliaSim. Модель системы и рабочая сцена представлены на рисунке 2.

На данном рисунке цифрой 1 обозначены манипуляционные мобильные роботы, цифрой 2 – их СТЗ, цифрой 3 – ArUco-маркер (на противоположной стороне прикреплен еще один, но с другим id), а цифрой 4 – объект работ. Также на изображении сцены видно, что эксперименты проводятся на неровной местности.

На рисунке 3 показаны заключительные этапы работы системы.

Выполненное моделирование показало, что разработанная система обеспечивает достаточную точность при выполнении манипуляционных операций в автоматическом режиме, путем уточнения данных об объекте вплоть до подъезда к нему, а также их сверки с последующим усреднением. Ошибка по найденному положению объекта для первого робота составила 2 мм, а для второго 28 мм, что является допустимым при заданных размерах роботизированных платформ (размеры колесной платформы – длина 350 мм, ширина 300 мм; длины звеньев манипулятора – 210; 250; 200 и 220 мм). При этом сохраняется правильность позиционирования манипуляторов.

Таким образом в ходе выполнения работы была разработана система согласованной работы двух манипуляционных мобильных роботов, представляющих собой две роботизированные платформы, каждая из которых оснащена многозвенным манипулятором и подвижной СТЗ. Был использован эффективный метод обнаружения камерами объекта с помощью ArUco-маркеров, помещенных на него. Это позволило определить положение и ориентацию объекта в трехмерном пространстве.

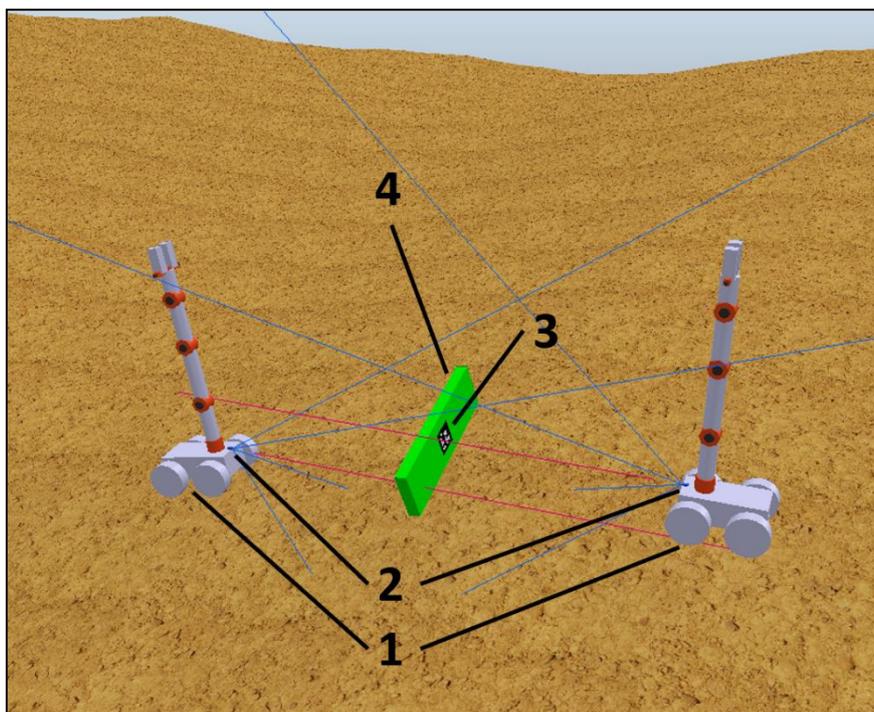
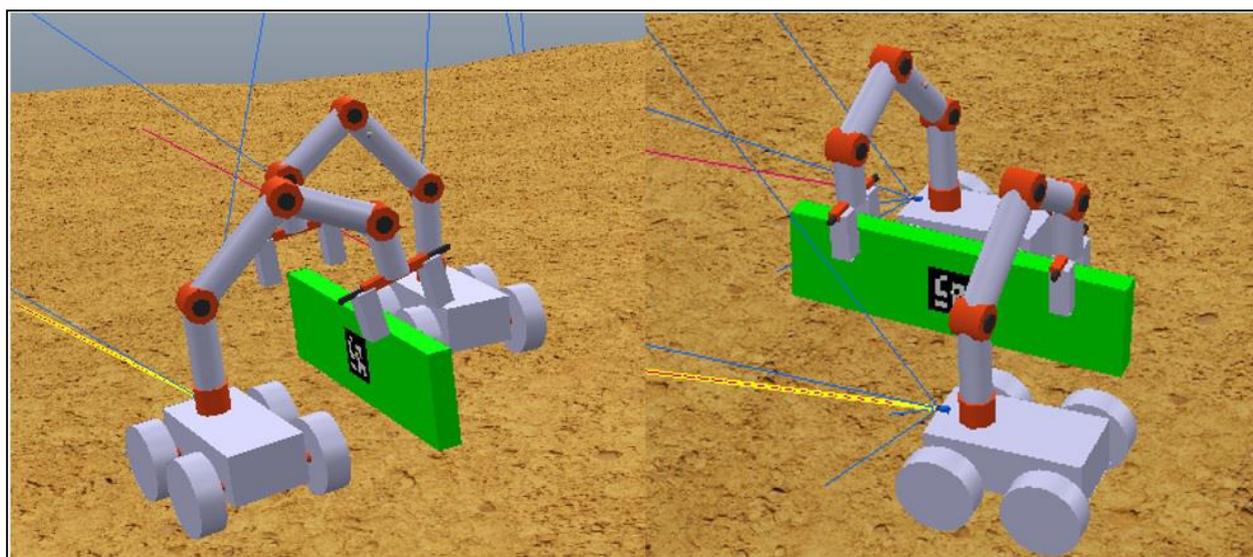


Рис. 2. Модель системы в среде моделирования CoppeliaSim



*а) позиционирование манипуляторов над объектом*

*б) захват объекта*

Рис. 3. Процесс работы системы

Предложенная система обеспечивает точное позиционирование манипуляторов над объектом, и в точках его захвата, а также дальнейшее выполнение манипуляционных операций в автоматическом режиме при движении по неровной поверхности.

Полученные в ходе проведения моделирования в среде CoppeliaSim результаты полностью подтвердили работоспособность и эффективность предложенной системы.

## Список литературы

1. Lee D., Spong M. W. Passive bilateral control of teleoperators under constant time-delay // Proc.16 IFAC World Congress. Prague, Czech Rep. 2005. File 03009.pdf. pp.109–114.
2. Zhang Q., Song B., Cai B., Sun Y. Design of Coordination System for Composite Mobile Robot Platform Oriented to Nuclear Fusion Vessel. J. of Fusion Energy, 2021, N 40(2), pp. 22–23.
3. Wu Y., Balatti P., Lorenzini M., Zhao F., Kim W., Ajoudani A. A teleoperation interface for loco-manipulation control of mobile collaborative robotic assistant // IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, N 4(4), pp. 3593–3600.
4. Филаретов В. Ф., Кацурин А. А. Метод полуавтоматического позиционного управления манипулятором с помощью телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси // Мехатроника, автоматизация, управление. - № 9. - 2008. - С. 15–22.
5. Katsurin A. System of Telecontrol by the Mobile Robot with Movable Camera. Applied Mechanics and Materials, 2014, Vol. 643, pp. 9–13.
6. Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Собольников С. А., Суханов А. Н. О научных задачах выполнения транспортных операций группой мобильных роботов // Экстремальная робототехника. - № 1. - 2016. - С. 25–29.
7. Mendiburu F. J., Morais M. R. A., Lima A. M. N. Behavior coordination in multi-robot systems // Proc. IEEE Intern. Conf. on Automatica (ICA-ACCA). 2016. pp. 1–6.
8. Меркулов В. И. Синтез согласованного управления группой объектов // Динамика сложных систем – XXI век. - Т. 10, - № 2. - 2016. - С. 23–27
9. Abel Garcia Barrientos, Joel Lara Lopez, Eduardo Steed Espinoza, Jose Hoyo, Guillermo Valencia Palomo, Object Transportation Using a Cooperative Mobile Multi-Robot System // IEEE Latin America Transactions, 2016, Vol. 14, Issue 3, pp. 1184–1190.

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СО СКОЛЬЗЯЩИМ РЕЖИМОМ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА

*Аннотация:* Проведено исследование системы с переменной структурой, функционирующей в скользящем режиме и разработанной для робастного управления робототехническими объектами, в условиях существенного влияния ограничений управляющего сигнала. Проанализированы особенности поведения системы при управлении динамическим объектом второго порядка общего вида. Сформулированы новые условия существования скользящего режима с учетом ограничений. Определены диапазоны параметров объекта и управляющего устройства, гарантирующие устойчивое существование скользящего режима и высокое качество управления при любых начальных отклонениях регулируемых координат от заданных значений.

*Ключевые слова:* система управления, система с переменной структурой, робототехнический объект, робастность, скользящий режим

A.V. Lebedev, Ph.D., lebedev@dvo.ru  
Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, Russia

## THE DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE SYSTEM WITH SLIDING MODE FOR THE NON-STATIONARY ROBOTIC OBJECT UNDER CONTROL SIGNAL SATURATION

*Abstract:* The research of the variable structure system with sliding mode for the robust control of the robotic object in conditions of significant influence of control signal saturation is carried out. The features of system behaviour when controlling a dynamic second-order object of general type are analyzed. The new conditions of sliding mode existence are formulated taking into account the saturation. The ranges of object and control device parameters are determined which guarantee stable existence of sliding mode and high control quality at any initial deviations of the controlled coordinates from the given values.

*Key words:* control system, variable structure system, robotic object, robustness, sliding mode

Характерной особенностью многих сложных робототехнических и мехатронных объектов (манипуляционных роботов, необитаемых подводных аппаратов и т.д.) является существенная нелинейность, неопределенность и нестационарность их математических моделей. Это может быть обусловлено, например, влиянием присоединенных масс и моментов инерции жидкости, коэффициентов вязкого трения при движении подводного аппарата в водной среде, изменением конфигурации манипулятора при выполнении различных технологических операций и другими факторами.

В этих условиях одним из наиболее эффективных средств обеспечения неизменно высокого качества управления является применение систем с переменной структурой (СПС) [1], в которых за счет реализации специально организованного скользящего режима [2-4] достигается робастность по отношению к изменяющимся параметрам объекта и внешним воздействиям со стороны окружающей среды.

Однако известные условия существования этого режима справедливы лишь при отсутствии ограничений на управляющие сигналы. Указанные ограничения, всегда имеющие место в реальных системах управления (СУ), оказывают существенное влияние на поведение СПС. В частности, как показано в [5], даже при выполнении классических условий существования устойчивый скользящий режим, а значит, отсутствие колебаний и, тем более, монотонный характер переходного процесса в СПС в ряде случаев не могут быть обеспечены при определенных комбинациях начальных условий и параметров объекта управления (ОУ). Как следствие, не гарантируется робастность СУ и значительно снижается качество ее функционирования.

В указанной работе определены новые условия, обеспечивающие существование скользящего режима с учетом ограничений, но лишь для частного случая управления объектом, динамика которого описывается дифференциальным уравнением второго порядка, содержащим только производные выходной координаты. Очевидно, это ограничивает область применения полученных в ней результатов.

В связи с этим целью статьи является разработка и исследование системы с переменной структурой при наличии ограничений управляющих сигналов и определение модифицированных условий существования скользящего режима и соотношений для параметров ОУ и управляющего устройства, обеспечивающих при любых начальных отклонениях регулируемых координат робастность и высокие показатели качества при управлении динамическим объектом второго порядка общего вида.

Решение этих задач будем искать в рамках подхода, заключающегося в построении децентрализованных СУ робототехническими объектами на базе полученных методом декомпозиции упрощенных математических моделей. При этом каждый канал управления рассматривается как сепаратная подсистема второго порядка, для которой строится СПС, обеспечивающая робастность по отношению к изменяющимся параметрам объекта.

В целом ряде практически важных случаев (движение подводного аппарата с ненулевой плавучестью в вязкой среде по одной из пространственных координат, динамика электропривода отдельной степени подвижности манипуляционного робота и т.д.) поведение объекта управления в каждом канале такой децентрализованной СПС описывается дифференциальным уравнением второго порядка общего вида:

$$d^2x/dt^2 + a(dx/dt) + bx = ku, \quad (1)$$

где  $a > 0$ ,  $b > 0$ ,  $k > 0$  – параметры объекта, которые могут принимать любые значения внутри заданных диапазонов,  $x = x(t)$  – выходной сигнал объекта управления,  $u = u(t)$  – управляющее воздействие.

В качестве цели управления примем обеспечение асимптотической устойчивости состояния  $x = 0$ ,  $dx/dt = 0$  при движении системы из начального состояния  $x = x_0$ ,  $dx/dt = 0$ . Практически это означает плавную остановку СУ в положении равновесия без перерегулирования.

Как известно [1], при отсутствии ограничений на управляющий сигнал  $u$  поставленная цель может быть достигнута при любых значениях  $a$ ,  $b$  и  $k$  из заданных диапазонов путем формирования в классе СПС закона управления вида  $u = -k_u x \text{sign}(sx)$ , где  $s = dx/dt + k_s x$  – линейная комбинация переменной  $x$  и ее производной,  $k_u$  и  $k_s$  – коэффициенты управляющего устройства. При этом за счет определенных ограничений, накладываемых на величины  $k_u$  и  $k_s$ , должно быть обеспечено выполнение условия существования скользящего режима  $s(ds/dt) < 0$ .

Для решения поставленной в работе задачи исследуем влияние ограничений на процессы в СПС. Следуя предложенной в [5] методике и учитывая приведенное выше выражение для  $u$ , определим ограниченное по модулю величиной  $u_m$  управляющее воздействие:

$$u = -k_u x \text{sign}(sx), \quad \text{если } |x| \leq u_m / k_u, \quad (2)$$

$$u = -u_m \text{sign } s, \quad \text{если } |x| > u_m / k_u. \quad (3)$$

Построим фазовый портрет СПС в координатах  $x$  и  $y = dx/dt$ , получив предварительно уравнения фазовых траекторий системы (1)-(3) в области (I) фазовой плоскости, где  $u$  определяется выражением (2), и в области (II), где  $u$  определяется выражением (3). При этом учтем, что указанные области разделены прямыми переключения  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $y$  и  $s$  с уравнениями  $x = -u_m/k_u$ ,  $x = u_m/k_u$ ,  $x = 0$  и  $s = 0$  (т.е.  $y = -k_s x$ ), соответственно.

Рассмотрим область (I) фазовой плоскости, в которой ограничения управляющего сигнала не влияют на поведение системы, и, как следствие, может быть реализована классическая СПС. При этом примем, что в области (Ia) имеет место неравенство  $sx < 0$ , а в области (Ib) – неравенство  $sx > 0$ .

Как известно, выполнение условия существования скользящего режима  $s(ds/dt) < 0$  в малой окрестности прямой  $s = 0$  при построении СПС может быть обеспечено в случае реализации фазовых портретов с особыми точками типа «седло» и «устойчивый фокус» в областях (Ia) и (Ib), соответственно.

На основании анализа дифференциальных уравнений СУ в указанных областях выпишем требуемые для формирования указанной комбинации фазовых портретов соотношения между параметрами ОУ и управляющего устройства (при различных значениях коэффициентов  $a$  и  $b$ ):

$$k_u > (a^2/4 - b)/k \quad \text{при } 0 < b \leq a^2/8, \quad (4)$$

$$k_u > b/k \quad \text{при } b > a^2/8. \quad (5)$$

В дальнейшем ограничимся рассмотрением достаточно широкого класса объектов, параметры которых удовлетворяют следующему условию:

$$b \leq a^2/4. \quad (6)$$

Важно отметить, что при выполнении соотношения (6) правые части обоих неравенств (4) и (5), а значит, и требуемое значение  $k_u$ , не превышают значения  $a^2/4k$ . При  $b > a^2/4$  правая часть неравенства (5), а значит, и требуемое значение  $k_u$ , превышает значение  $a^2/4k$ . В то же время область фазовой плоскости, в которой ограничения управляющего сигнала не влияют на работу СПС, тем больше, чем меньше величина  $k_u$ . С этой точки зрения вариант построения системы, при котором справедливо соотношение (6), и коэффициент  $k_u$  может иметь меньшее значение, является предпочтительным.

Более того, как будет показано далее, существование скользящего режима на всей прямой переключения  $y = -k_s x$ , в том числе и в области (II), где на поведение СУ оказывают влияние ограничения управляющего сигнала, возможно обеспечить именно при выполнении соотношения (6).

Условие существования скользящего режима обеспечивается выбором  $k_u$  и  $k_s$  согласно неравенству  $k_s < |\mu_2|$ , где  $\mu_2 = -(a + \sqrt{a^2 - 4b + 4kk_u})/2$  – коэффициент наклона асимптоты гиперболических фазовых траекторий.

Теперь рассмотрим область (IIIa) фазовой плоскости, в которой сигнал  $u$  определяется выражением (3), и при этом  $s < 0$ . В этой области уравнение (1) и дифференциальное уравнение фазовых траекторий будут иметь следующий вид (здесь  $d = ku_m$  – вспомогательный коэффициент):

$$d^2x/dt^2 + a(dx/dt) + bx = d, \quad (7)$$

$$dy/dx = (-bx - ay + d)/y. \quad (8)$$

Как было отмечено, решение уравнения (8), определяющее фазовые траектории в области (IIIa), будем искать для соотношения (6) параметров объекта. В этом случае оно имеет следующий вид:

$$(y - \lambda_2(x - d/b))^{r+1} - C(y - \lambda_1(x - d/b))^{r-1} = 0, \quad (9)$$

где  $\lambda_1 = -(a - \sqrt{a^2 - 4b})/2$ ,  $\lambda_2 = -(a + \sqrt{a^2 - 4b})/2$  – корни характеристического уравнения, соответствующего (7), которые в данном случае являются действительными отрицательными числами, причем  $|\lambda_2| > |\lambda_1|$ ,  $C$  – постоянная интегрирования,  $r = (\lambda_2 + \lambda_1)/(\lambda_2 - \lambda_1)$  – вспомогательный коэффициент.

Таким образом, фазовый портрет СПС представляет собой в области (IIIa) совокупность параболических фазовых траекторий (9) и прямолинейных

траекторий  $m_1$  и  $m_2$  с уравнениями  $y = \lambda_1(x - d/b)$  и  $y = \lambda_2(x - d/b)$ . При этом особая точка типа «устойчивый узел» имеет координаты  $x_{d1} = d/b$ ,  $y_{d1} = 0$ .

Фазовый портрет системы в области (IIb), где  $s > 0$ , имеет аналогичный вид с координатами особой точки  $x_{d2} = -d/b$ ,  $y_{d2} = 0$  и прямолинейными траекториями  $n_1$  и  $n_2$  с уравнениями  $y = \lambda_1(x + d/b)$  и  $y = \lambda_2(x + d/b)$ . Нетрудно показать, что выполняется неравенство  $d/b > u_m/k_u$ , т.е. обе особые точки находятся в области (II). В целом фазовый портрет показан на рис. 1.

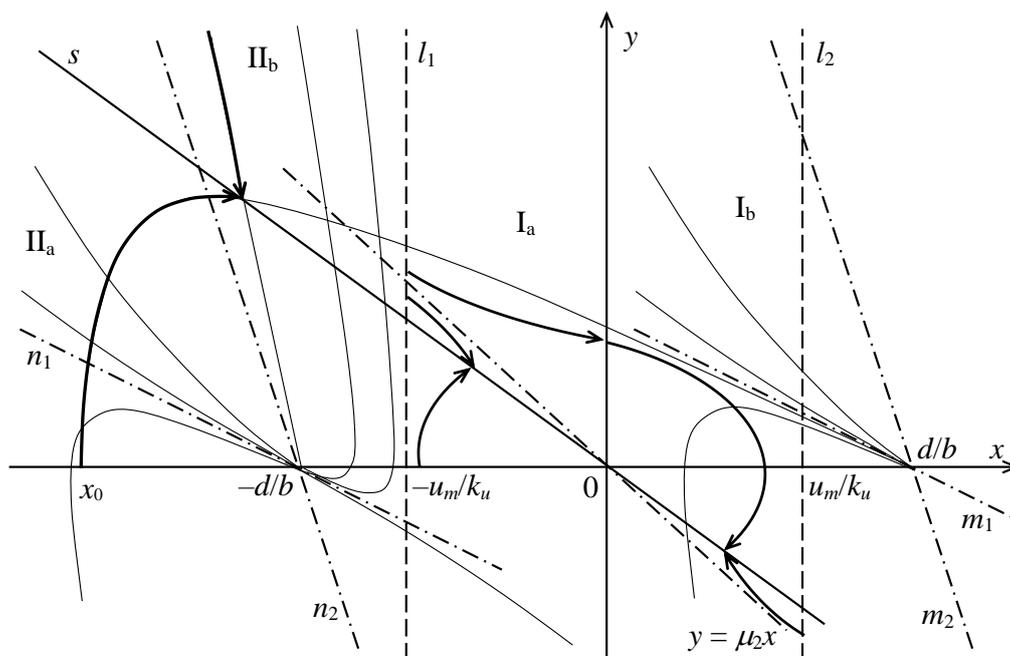


Рис. 1. Фазовый портрет СПС с ограничением управляющего сигнала

Как показывает анализ полученного с учетом неравенства (6) фазового портрета, при условии  $|\lambda_1| < k_s < |\lambda_2|$  обеспечивается такое расположение параболических фазовых траекторий в областях (IIa) и (IIb), при котором в малой окрестности прямой переключения  $s$  они во всей области (II) направлены либо к этой прямой, либо сразу к одной из вертикальных прямых переключения  $l_1$  или  $l_2$ . То есть, несмотря на наличие ограничений, при сколь угодно больших значениях  $x_0$  на прямой переключения  $s$  реализуется устойчивый скользящий режим, причем он возникает сразу после попадания изображающей точки из любого начального положения на эту прямую.

С учетом выражений для  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  указанное условие принимает вид:

$$(a - \sqrt{a^2 - 4b})/2 < k_s < (a + \sqrt{a^2 - 4b})/2. \quad (10)$$

В случае нарушения любого из неравенств (10) скользящий режим в области (II) существует только на некотором отрезке прямой переключения  $s$  вблизи области (I), причем переходный процесс в СУ может происходить с перерегулированием. При этом в достаточно большом диапазоне значений выходной координаты ОУ уже не обеспечивается свойство робастности СПС.

Важно отметить, что при установленных соотношениях параметров СУ выполняется неравенство  $|\lambda_2| < |\mu_2|$ . Следовательно, полученное ограничение сверху значения  $k_s$  является более сильным по сравнению с известным неравенством  $k_s < |\mu_2|$ . Поэтому неравенство (10) в совокупности с выражением (6) является, по сути, новым условием существования скользящего режима в СПС с ограничением управляющего сигнала. Необходимость выполнения этого условия, в свою очередь, приводит к некоторому снижению быстродействия системы под влиянием ограничений.

Результаты проведенного численного моделирования подтвердили справедливость полученных теоретических выводов.

Таким образом, в статье проанализированы особенности поведения СПС с ограничениями управляющих сигналов, работающей в скользящем режиме, при различных значениях коэффициентов закона управления. Определены модифицированные условия существования скользящего режима, при которых он реализуется на всей прямой переключения при любых начальных отклонениях, и свойство робастности СПС сохраняется при выходе исполнительных элементов на ограничения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании СУ сложными робототехническими объектами различного вида и назначения.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема №FWFW-2022-0002).*

## Список литературы

1. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 336 с.
2. Sugiki A., Furuta K., Ohata A., Nita H. Nonlinear Variable Structure Adaptive Control // Proceedings of American Control Conference, Portland, OR, 2014. – pp. 1298-1303.
3. Lai C.K., Shyu K.K. A Novel Motor Drive Design for Incremental Motion System via Sliding-Mode Control Method // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 2. – № 52. – 2005. – pp. 499-507.
4. Rubagotti M., Ferrara A. Second Order Sliding Mode Control of a Perturbed Double Integrator with State Constraints // Proceedings of American Control Conference, Baltimore, MD, 2010. – pp. 985-990.
5. Лебедев А.В. Синтез адаптивной СПС для нестационарного робототехнического объекта при наличии ограничений управляющего сигнала // Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект». – Красноярск. – 2016. – С. 41-46.

**С.Ш. Осман**, магистрант, saadallahsherwan5@gmail.com  
**К.А. Аксенов** к.т.н., доцент k.a.aksenov@urfu.ru  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

## ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОХОЖДЕНИЯ СИГНАЛОВ ПО ПЕТЛЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ РОБОТА

*Аннотация:* для экспериментальных исследований и практических задач широко применяются роботы манипуляторы, построенные с использованием микроконтроллеров. Для роботов и плат управления на этих контроллерах существуют библиотеки, позволяющие быстро разработать программное обеспечение. Был разработан стенд, позволяющий измерить время исполнения команды роботом на базе различных контроллеров, и с помощью него произведены измерения времени исполнения команды. Приведена схема стенда и результаты измерений, имеющие практическое значение для разработки роботов.

*Ключевые слова:* микроконтроллер, манипулятор, сигнал, обратная связь.

**S.Sh. Osman**, Master's student, saadallahsherwan5@gmail.com  
**K.A. Aksenov**, PhD, Associate Professor k.a.aksenov@urfu.ru  
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

## MEASUREMENT OF SIGNAL DELAY IN A FEEDBACK LOOP OF THE ROBOT

*Abstract:* Robotic manipulators are widely used for experiential research and practical tasks. Those robots are usually built with microcontrollers. Programming libraries that speed up software development for these robots and controller boards are available. The installation was built to measure the delay of execution of the command with different controllers, and with this installation, the test measurements were carried out. The installation plan and measurement method are both given, as well as some measurement results that have practical uses in robotic design.

*Key words:* microcontroller, manipulator, signal, feedback.

Роботы чаще всего строятся с использованием микроконтроллеров, так как роботы имеют большое количество компонентов, которые должны согласованно выполнять действия [1]. Программирование таких действий в микроконтроллере разгружает компьютеры или операторов от необходимости посылать сигналы на каждый компонент [2]. Простой робот, имеющий менее 20 компонентов, может использовать один контроллер, а сложные роботы используют множество ведомых контроллеров в каждом модуле, которые управляются центральным контроллером. В отдельных случаях цепь управления может быть еще длиннее, до трех или четырех уровней глубины. В таком случае время исполнения команды может сильно зависеть от быстродействия контроллеров и программного обеспечения, используемого для управления.

Но при выборе контроллера и расчете быстродействия нельзя ориентироваться только на характеристики контроллера. Робот — это сложная система, и разработка программного обеспечения на языках низкого уровня для такой системы является непрактичной, хотя это помогло бы получить производительность, ограниченную только возможностями контроллера. Поэтому на быстродействие системы в целом влияет и быстродействие библиотек для языков высокого уровня, и быстродействие контроллера, и сигнальные характеристики контроллера, а также быстродействие устройств робота.

Учесть сразу все эти факторы с помощью математической или даже имитационной модели [3-4] или агентного подхода [4-5] очень сложно, так как факторов много, поэтому был проведен натурный эксперимент, в котором было измерено время исполнения команды путем прохождения сигналом полного пути из прикладной программы до исполнения, фиксации и обратно.

Стенд состоит из серводвигателя робота, кнопки и монтажной платы. Серводвигатель установлен таким образом, что при повороте якоря происходит нажатие на кнопку. Соединения на плате позволяют подключать к стенду различные контроллеры только с помощью двух управляющих контактов, один из которых управляет двигателем, а второй является вводом для сигнала с кнопки. Такая конфигурация позволяет подключить практически любой контроллер к такому стенду, при условии, что контроллер может выдавать управляющие сигналы на серводвигатель. На (рис. 1) показан стенд с подключенным к нему контроллером типа Arduino Uno.

Стенд предназначен для работы с программой контроллера, которая получает команды от программы измерения на компьютере по USB-соединению. Сами программы зависят от архитектуры контроллера.

Для контроллера arduino на базе ATmega328p программа контроллера пишется на C++ с использованием библиотеки Servo, а программа измерения — на Python с использованием библиотеки Serial. Для контроллера управления роботом HiWonder на базе STM32 можно использовать библиотеку Harm, если двигатель заменить на двигатель HiWonder.

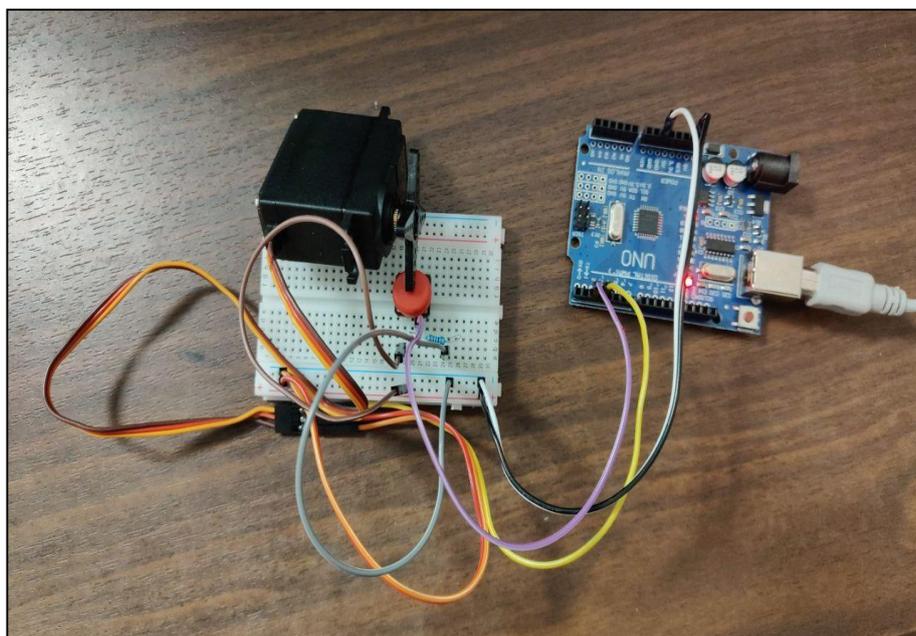


Рис. 1. стенд с подключенным контролером и USB-соединением

Программа измерений отправляет на двигатель команду поворота на 5 градусов — с 90 градусов до 95, и это приводит к нажатию на кнопку. Сигнал с кнопки принимается контроллером, и отправляется на программу измерения. Программа, таким образом, может оценить время от отправки команды поворота до получения сигнала от нажатия кнопки. Это время будет включать в себя задержку на передачу сигнала на контроллер, время обработки данных с USB, формирование импульсной последовательности библиотекой работы с серводвигателем, на выдачу сигнала на управляющий контакт, электрическую и механическую работу серводвигателя, задержку обработки сигнала с кнопки, формирование ответной команды на контроллере и обработку её в управляющей программе. Таким образом можно оценить задержку с учетом всех этапов прохождения сигнала. Были проведены измерения, которые показали реальное время задержки при использовании контроллера Arduino Uno. Она составила 210 миллисекунд.

Для того, чтобы оценить вклад механических компонентов и библиотеки серводвигателя в эту задержку, была запущена тестовая программа, которая вместо выдачи команды на двигатель выдавала сигнал на вход контроллера. В таком режиме задержка составила 100 миллисекунд.

Данный результат является ожидаемым, так как библиотека, используемая для работы с контроллером Serial является очень низкоуровневым инструментом, а быстродействие компьютера и USB соединения достаточно высокое. С другой стороны, производительность контроллера Atmega328P является очень низкой, и формирование команд серводвигателя на контроллере занимает длительное время. Механические компоненты тоже вносят задержку, но она должна мало зависеть от типа контроллера. Влияние может

оказать скорость установления сигнала на выходе контроллера, но на данном стенде измерить это отдельно затруднительно.

Можно сделать вывод, что предлагаемая методика измерения и измерительный стенд позволяют собрать полезные данные, которые зависят от производительности контроллера и позволяют без значительной обработки использовать их в проектировании роботов и других электронно-механических устройств. В частности, можно ожидать, что задержка в 100 миллисекунд будет накапливаться на каждом каскаде управления, если он будет состоять из контроллеров типа Arduino Uno. К недостаткам методики измерения следует отнести невозможность отделить разные этапы задержки на сервоприводе. Однако для проектирования робота большее значение имеет задержка на сервоприводе в целом.

## Список литературы

1. Булгаков А.С., Алейников А.Ю., Худасова О.Г. Метод Д-Х как способ упрощения управления мехатронным устройством // Информационные технологии и инжиниринг : Сборник материалов международной молодежной научно-практической конференции, Белгород, 25 апреля 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 2024. – С. 166-169. EDN: FVBRIL
2. Городилов А.В., Кононова А.И. Влияние числового формата координат на работу робота-манипулятора // Естественные и технические науки. – 2023. – № 7(182). – С. 111-113. <https://doi.org/10.25633/ETN.2023.07.07>
3. Guizzi G., Vespoli S., Grassi A., Carmela Santillo L. Simulation-based performance assessment of a new job-shop dispatching rule for the semi-heterarchical industry 4.0 architecture. In Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC), Orlando, USA, 14–18 December 2020; pp. 1664–1675, <https://doi.org/10.1109/WSC48552.2020.9383981>
4. Antonova A.S., Aksyonov K.A., Aksyonova O.P. An imitation and heuristic method for scheduling with subcontracted resources. Mathematics 2021, 9(17), 2098; <https://doi.org/10.3390/math9172098>.
5. Skobelev P., Zhilyaev A., Larukhin V., Grachev S., Simonova E. Ontology-based open multi-agent systems for adaptive resource management. In Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Valletta, Malta, 22–24 February 2020; pp. 127–135, <https://doi.org/10.5220/0008896301270135>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИНЕТОСТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ СЕРВИСНЫМИ РОБОТАМИ

*Аннотация:* В статье рассматриваются основные подходы, используемые для создания системы, позволяющей спрогнозировать результат движения мобильного робота, такие как кинетостатическая модель динамики, условия безопасности движения на основе выводов модели, алгоритмы обработки показаний ультразвуковых датчиков, методы комплексирования показаний с датчиками на иных физических принципах (например, лазерных). Рассмотрены схемы объединения изложенных выше решений в единую систему алгоритмов принятия решений и управления потоками данных.

*Ключевые слова:* мобильный робот, прогнозирование движений, динамика робота, синергии движений

A.V. Plotnikov, junior researcher, plotnikov.workmail@yandex.ru  
KIAM RAS, Moscow, Russia

## THE USE OF KINETOSTATIC ANALYSIS IN THE CONTROL SYSTEM OF MOBILE SERVICE ROBOTS

*Abstract:* The article discusses the main techniques used to create a system that allows you to predict the result of the movement of a mobile robot, such as a kinetostatic dynamics model, traffic safety conditions based on the conclusions of the model, algorithms for processing ultrasonic sensor readings, methods for combining readings with sensors based on other physical principles (for example, laser). The schemes of combining the solutions described above into a single system of algorithms and data flows are considered.

*Key words:* mobile robot, motion prediction, robot dynamics, motion synergy

Для выполнения движений, связанных с манипулированием каким-либо объектом необходимо, чтобы конструкция робота была способна выполнить движение и управляющий компьютер сгенерировал управляющие сигналы для приводов робота.

Для минимизации опасности потери устойчивости возникла необходимость разработать алгоритмы управления, которые бы минимизировали возможность опрокидывания. Для этого следует определить максимальные до-

пустимые массы и перемещения манипулятора, которые не приводят к потере устойчивости и опрокидыванию робота, а также максимальный угол наклона, на который робот может забраться без падения.

Математическая модель захвата сервисным роботом объекта рассматривается на примере сервисного робота, состоящего из гусеничной платформы и трехстепенного манипулятора (рис. 1).

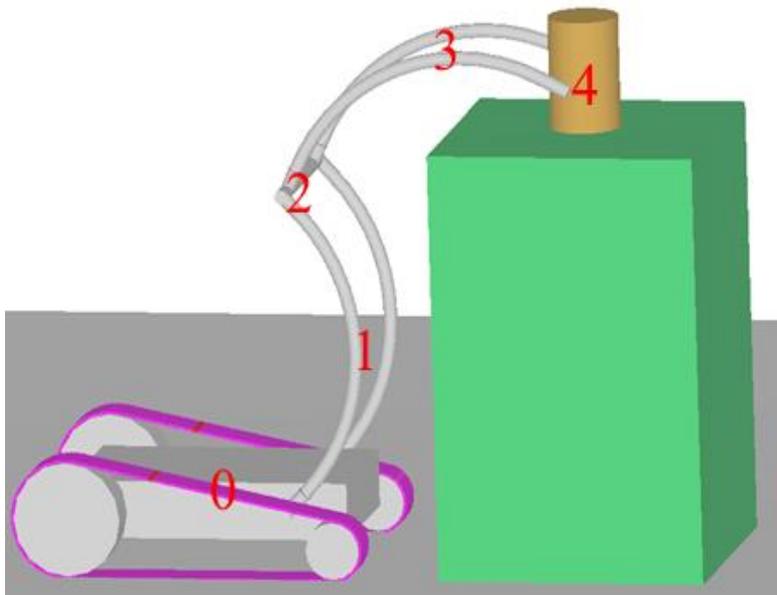


Рис. 1. Виртуальная модель робота и её составные элементы

0 – транспортная платформа, 1 – нижние звенья манипулятора, 2 – приводы верхних звеньев манипулятора, 3 – верхние звенья манипулятора, 4 – захватное устройство и объект манипулирования

Кинестатический анализ проводится в несколько этапов. Сначала, исходя из параметров виртуальной модели робота и предполагаемого движения  $Xt$ , определяются ускорения элементов робота  $a_i(t)$ , силы  $F^i(t)$  и моменты  $M^i(t)$  инерции. Далее, начиная с верхнего звена и заканчивая транспортной платформой, записываются уравнения равенства сил и моментов, действующих на звенья. Таким образом, получается набор из линейных уравнений равенства моментов, исходя из которых возможно определить моменты в приводах, необходимые для осуществления требуемого движения. На следующем этапе рассматриваются уравнения моментов реакции опор относительно передней  $M_{nf}(t)$  и задней  $M_{nb}(t)$  (относительно движения робота) опорных точек робота. Для мобильных роботов известен критерий устойчивости, предложенный [1-3] для шагающих аппаратов. Похожие критерии устойчивости применяются также для колесных и гусеничных машин [4]. Предлагается использовать схожий критерий, основанный на том, что силы реакции опор должны быть направлены против вектора сил гравитации (рис. 2), что в правой системе координат соответствует  $M_{nf}(t) > 0$  и  $M_{nb}(t) < 0$

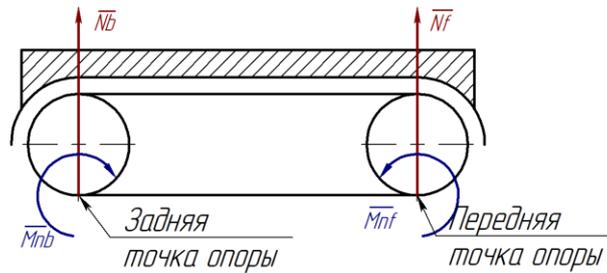


Рис. 2. Силы и моменты реакции опор

Для определения допустимого движения транспортной платформы робота в процессе захвата (рис. 3) необходимо согласование с алгоритмами навигации и картографирования. При создании алгоритма навигации мобильного робота, для обеспечения требований по безопасности, следует уделять внимание алгоритму определения и обхода препятствий.

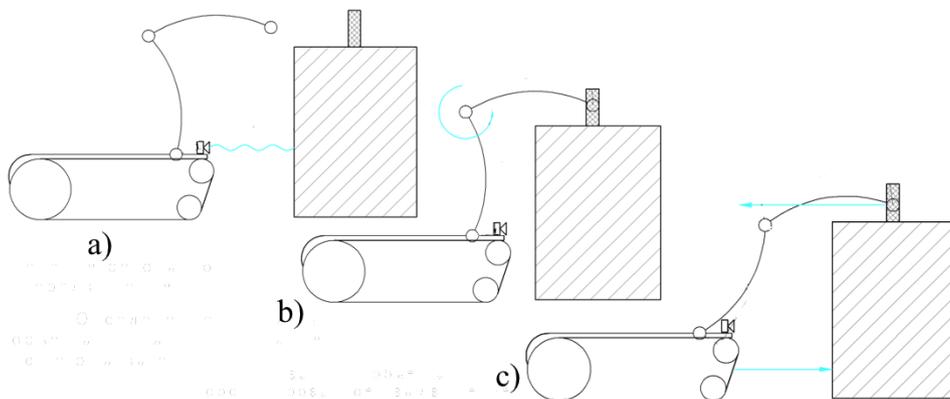


Рис. 3. Стратегия захвата объекта мобильным роботом

- а) определение допустимых перемещений по показаниям датчиков
- б) выполнение пробного движения для оценки массы объекта
- в) захват объекта манипулирования с дополнительным движением транспортной платформы

Исследования и построение различных SLAM алгоритмов ведутся достаточно давно и успешно. Можно отметить разработки в рамках ROS (Robot Operating System) [5], а также более ранние алгоритмы определения и обхода препятствий по данным от сонаров [6-8] или от лидара [9]. Лидар в силу особенностей работы позволяет относительно легко строить поточечную карту ближайшего окружения робота [10]. Ультразвуковые датчики измеряют расстояния достаточно точно, но имеют очень низкое угловое разрешение. В тоже время их малая стоимость и простота дают существенные преимущества по сравнению с лидарами. Исходя из вышеизложенного, был составлен алгоритм определения препятствий в ближайшем операционном пространстве робота по показаниям набора ультразвуковых дальномеров.

Алгоритм состоит из двух основных частей: функции создания укрупнённых точек (пятен), аппроксимирующих препятствия, функции удаления

точек, аппроксимирующих препятствия. Алгоритм создания точек, аппроксимирующих препятствия (рис. 4), равномерно создает точки на внешней границе диаграммы направленности сонара.

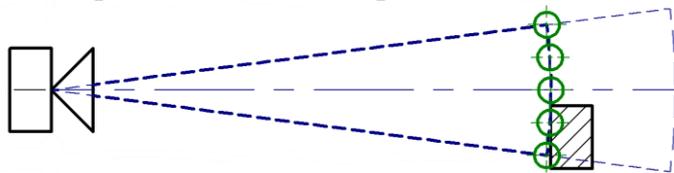


Рис. 4. Создание точек-препятствий

Алгоритм удаления пятен (рис.5) убирает ранее созданные точки (рис.5, т.4), которые в результате последующих перемещений оказались внутри диаграммы направленности. При этом во избежание закливания создания-удаления точек и повышения стабильности работы алгоритма, точки, находящиеся вблизи границы диаграммы направленности (рис.5, т.2), не удаляются.

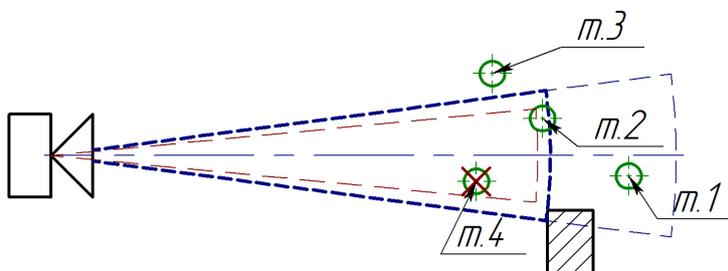


Рис. 5. Удаление точек-препятствий

В рамках проведенных экспериментов на виртуальной модели робота, была показана принципиальная возможность определения препятствий с использованием данного алгоритма (рис. 6).

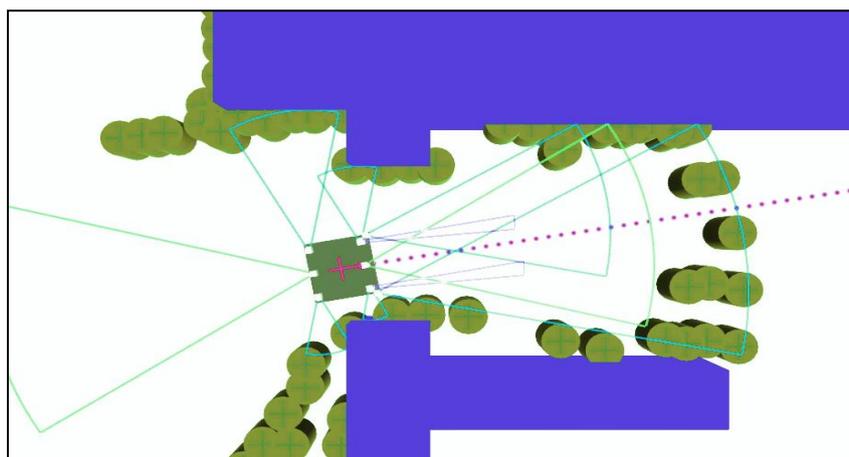


Рис. 6. Симуляция работы алгоритма картографирования

Описанные выше подходы необходимо внести в структуру алгоритмов управления и формирования потоков данных мобильного сервисного робота (рис. 7).



Рис. 7. Схема алгоритмов и потоков данных мобильного робота

Для улучшения качества управления возможно использовать математическую динамическую модель робота для предсказания результатов движения и генерации управляющего сигнала. Для этого необходимо внести в схему блок оценки реализуемости и коррекции планируемых движений (рис.8).

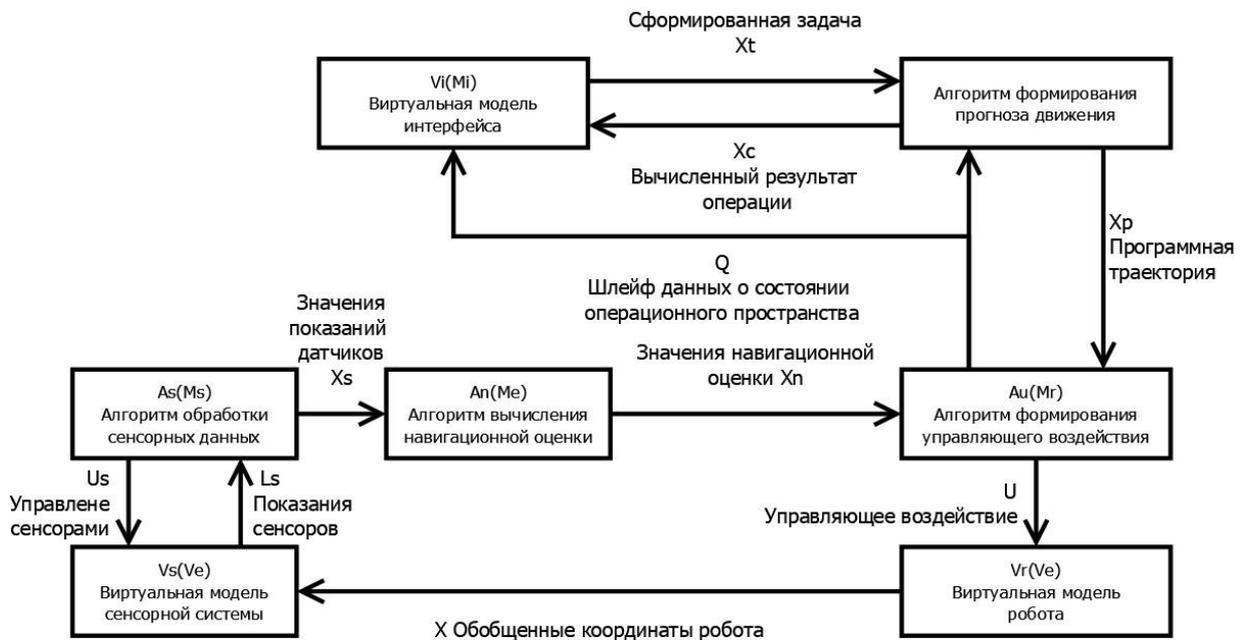


Рис. 8. Схема алгоритмов и потоков данных мобильного робота с внесенным блоком оценки реализуемости программных движений

Работу блока оценки можно охарактеризовать следующим образом:

- при соответствии желаемой траектории условиям, программная траектория формируется без изменений;
- при несоответствии условию отсутствия опрокидывания, движение модифицируется добавлением соответственного ускорения транспортной платформы;
- при превышении требуемых моментов предельно допустимых моментов приводов манипулятора, движение модифицируется путем уменьшения скоростей выполнения движения  $q'(t)$ ;

- оценивается степень превышения необходимого момента по сравнению с предельно допустимым, исходя из чего вычисляется необходимое уменьшение  $q'(t)$ ;

- при несоответствии измененной программной траектории критериям повторно, движение считается неосуществимым.

Таким образом, основываясь на уравнениях кинестатики, возможно сформировать систему управления, которая бы обеспечивала увеличение запаса устойчивости при выполнении операций захвата мобильным роботом.

## Список литературы

1. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. 312 с.

2. Голубев Ю.Ф., Пряничников В.Е., Павловский В.Е. Динамика шагающего робота, управляемого оператором. // В кн.: Исследование робототехнических систем. М.: Наука, 1982, с.78-86.,

3. Охоцимский Д.Е. Методика моделирования робота, перемещающегося в пространственной среде / Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Пряничников В.Е. //Изв. АН СССР, сер. Техническая кибернетика. - 1980. - № 1. - С. 46-54.

4. Основы теории и расчета трактора и автомобиля/ В.А. Скотников, А.А. Машенский, А.С. Солонский. Под ред. В.А. Скотникова. – М.: Агропромиздат, 1986. – 383 с., ил.

5. Mingachev, Eldar & Lavrenov, Roman & Tsoy, Tatyana & Matsuno, Fumitoshi & Svinin, Mikhail & Suthakorn, Jackrit & Magid, Evgeni. (2020). Comparison of ROS-Based Monocular Visual SLAM Methods: DSO, LDSO, ORB-SLAM2 and DynaSLAM. 10.1007/978-3-030-60337-3\_22.

6. И.А.Баранов, В.И. Денисов, К.И. Кий, К.Б.Кирсанов, А.А. Кирильченко, Б.М. Левинский, В.Е.Пряничников, В.Г. Шагалов. Адаптивное управление гусеничного робота в задаче мобильного патрулирования. – Информационно-измерительные и управляющие системы, 2006 т. 4, № 1-3, с.91-98

7. В.Е. Пряничников. Дистанционные сенсоры в составе систем управления движением мобильных роботов. – Информационно-измерительные и управляющие системы, М.: Радиотехника, №1, 2008, с.5-18

8. Давыдов О.И. Управление движением мобильного робота по данным ультразвуковых сенсоров / Давыдов О.И., Пряничников В.Е. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – М.: Радиотехника, 2015, т.13 № 7. - С.57-67.

9. Давыдов О.И., Платонов А.К. Сеть Пассфреймов - комбинированная модель операционной среды мобильного робота // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. No 15. 28 с. <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-15>

10. Давыдов О.И., Платонов А.К. Метод определения позиции и ориентации мобильного робота с лазерным сканером // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. No 45. 20 с. <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-45>

## *Секция 2*

# **СПЕЦИАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА**

УДК: 62-529.4

**В.В. Бочарова**, к.т.н., bocharova@msun.ru

**О.В. Кожевников**, аспирант, o.kozhevnikof@yandex.ru

**Д.Г. Кравченко**, студент, 89242489714@mail.ru

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, г. Москва, Россия

## ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫЙ НЕОБИТАЕМЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ «IV2AN»

*Аннотация:* Подводная робототехника является одной из ключевых областей развития современных технологий, активно применяемых в научных исследованиях, промышленности и спасательных операциях. В статье представлен процесс проектирования аппарата «IV2AN», с акцентом на инженерные решения и применение современных технологий. В создании данного аппарата участвовал клуб подводной робототехники города Владивосток, который базируется в научно-технологическом центре Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского. Подробно описаны конструктивные решения, примененные при сборке робота, а также описаны результаты проведенных испытаний.

*Ключевые слова:* ТНПА, подводный робот, сборка, конструкция

**V.V. Bocharova**, candidate of technical sciences, bocharova@msun.ru

**O.V. Koztchnikov**, graduate student, o.kozhevnikof@yandex.ru

**D.G. Kravchenko**, student, 89242489714@mail.ru

Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy, Moscow, Russia

## UNDERWATER REMOTE-CONTROLLED VEHICLE «IV2AN»

*Abstract:* Underwater robotics is one of the key areas of development of modern technologies, actively used in scientific research, industry and rescue operations. The article presents the design process of the IV2AN device, with an emphasis on engineering solutions and the use of modern technologies. The underwater robotics club of Vladivostok, which is based in the scientific and technological center of Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, participated in the creation of this device. The design solutions used in the assembly of the robot are described in detail, as well as the results of the tests.

*Key words:* ROV, underwater robot, assembly, design

## Введение

Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА) – это подводный робот, пилотируемый человеком на расстоянии. Такие аппараты создаются с целью восстановления морской флоры, забора проб воды в акваториях, осмотра подводных объектов, а также чистка днища судна, который находится в рейде. Подводных роботов для большей эффективности в зависимости от миссии оснащают различным оборудованием, например, дополнительный манипулятор, пробоотборник, лазер и др. Подводных роботов существует большое разнообразие по габаритам, мощности, точности и прочим характеристикам.

К достоинствам ТНПА в первую очередь нужно отнести безопасность пилота, так как человек управляет подводным аппаратом на расстоянии, находясь в безопасном месте (на берегу, на борту судна). Также стоит отметить, что аппарат может находиться в воде до 48 часов, что позволяет выполнять долгосрочные задачи.

Клуб подводной робототехники «MSU Robotics» на базе Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского города Владивосток уже больше 10 лет проектирует аппараты, постоянно пробуя новые решения в конструкции, электронике или программной части. В начале 2024-го года клуб спроектировал и собрал полностью новый аппарат «IV2AN» (рис.1). Студенты и наставники «MSU Robotics» акцентировали внимание на мощности и модульности аппарата.

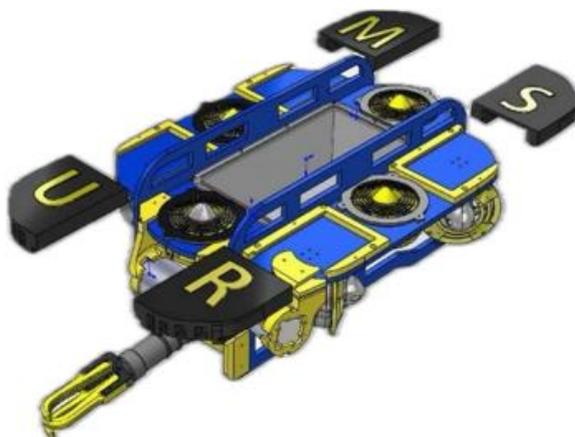


Рис.1. Конструкция ТНПА

### Создание телеуправляемого необитаемого подводного аппарата «IV2AN»

Создание ТНПА требует специалистов в области IT-технологий, микропроцессорной техники, механики.

Одним из важнейших аспектов проектирования ТНПА является создание прочной и функциональной конструкции, способной выдерживать дав-

ление воды на больших глубинах и обеспечивать устойчивость аппарата. В проекте «IV2AN» команда MSU Robotics использовала модульный подход (рис. 1) к созданию корпуса, что позволило оптимизировать как процесс сборки, так и транспортировку аппарата.

Основным материалом для создания рамы аппарата стал полипропилен, который отличается высокой прочностью, устойчивостью к коррозии и легкостью обработки. Рама состоит из трех пластин – одной горизонтальной и двух вертикальных, что обеспечило необходимую жесткость конструкции и улучшило гидродинамические свойства аппарата. Размеры пластин (основная – 530 x 415 мм, боковые – 475 x 263 мм) были выбраны на основе анализа гидродинамических нагрузок и доступного объема для размещения электронных компонентов.

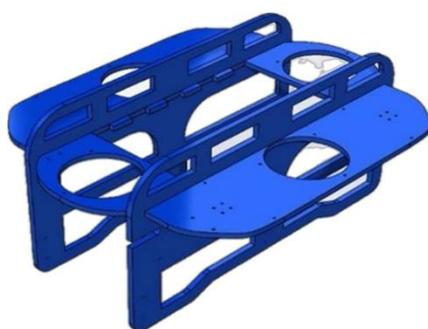


Рис. 2 – Каркас подводного аппарата

Также одно из особенностей ТНПА «IV2AN» – модульность, т.е. каждый наружный компонент (манипулятор, камера, движитель и пр.) подключен к аппарату через герметичный разъем, что позволяет его отсоединить и поставить на это место новую периферию или произвести обслуживание и ремонт используемой на данный момент техники (рис. 2-б).

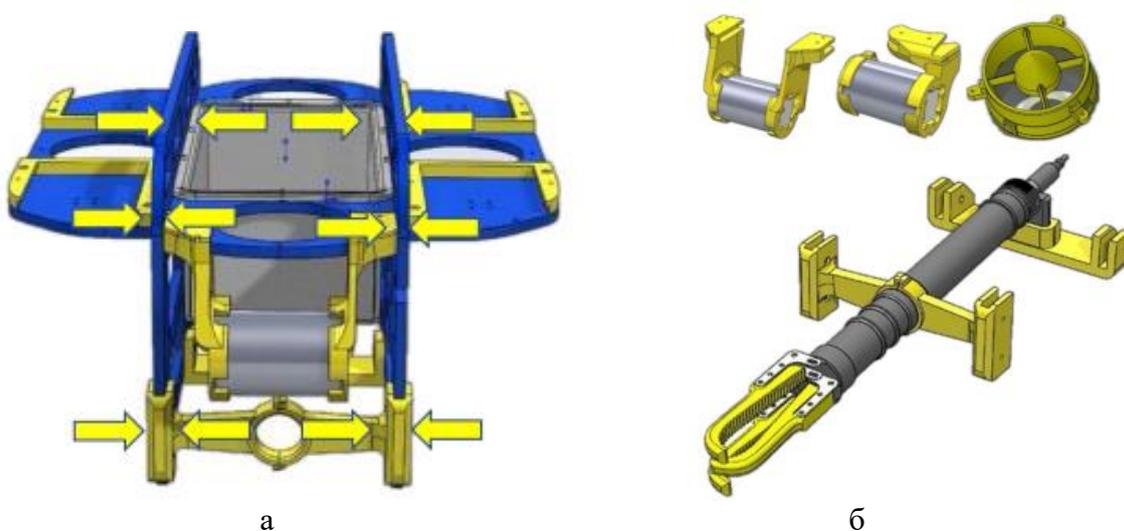


Рис.3. Рама аппарата (а) и крепления внешних элементов ТНПА (б)

Вся электроника собрана на двух текстолитовых платах. Произведя моделирование компоновки и электроники внутри аппарата (рис.4-а), удалось добиться оптимального расположения и эффективного использования полезного объема блока электроники (рис. 4-б).

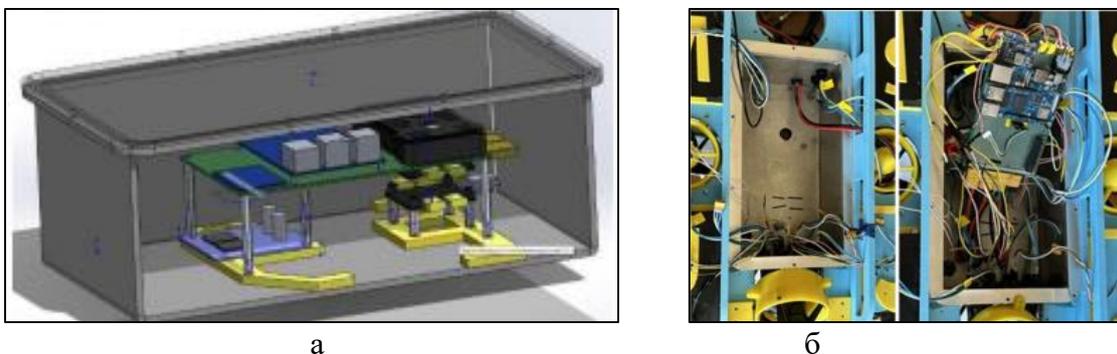


Рис. 4. Внутренняя расстановка электроники (а) и установка электрики (б)

Внешняя электроника аппарата представляет собой: манипулятор, камеру и восемь движителей (рис. 2-б). Манипулятором осуществляются захват, перемещение и вращение подводного объекта. Цифровая камера соединена с сервоприводом, за счёт чего пилот может вращать камеру, тем самым изменять угол обзора (рис.5). Восемь движителей разбиты на две группы, к первой относятся вертикальные, а к второй – горизонтальные (). С таким количеством движителей аппарат может двигаться равномерно, быстро, а также поднимать и перевозить тяжёлые предметы. Важно отметить, что использованы программные регуляторы стабилизации ТНПА по крену и дифференту, благодаря этому аппарат сохраняет горизонтальное положение в динамике.

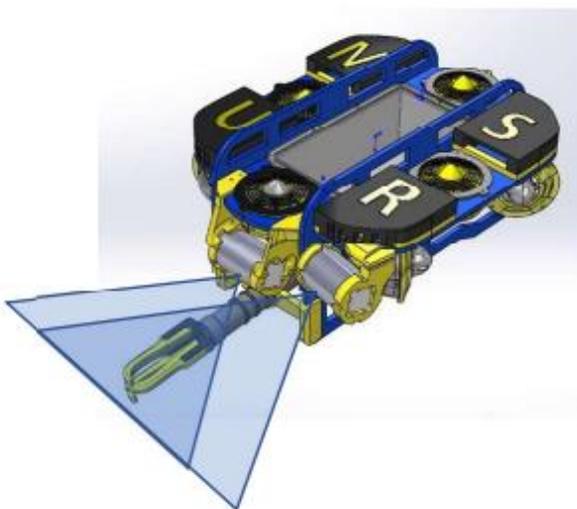


Рис. 5. Угол обзора камер

ТНПА «IV2AN» проходил все испытания в бассейне МГУ им. адм. Г.Н. Невельского (рис. 6), где выполнял задачи на глубине 4 метров: поднимал и перемещал различные тяжёлые и габаритные грузы, выполнял мелкие операции, к примеру вращение вентиля и присоединение карабина к кольцу, производил осмотр подводной части пирса.

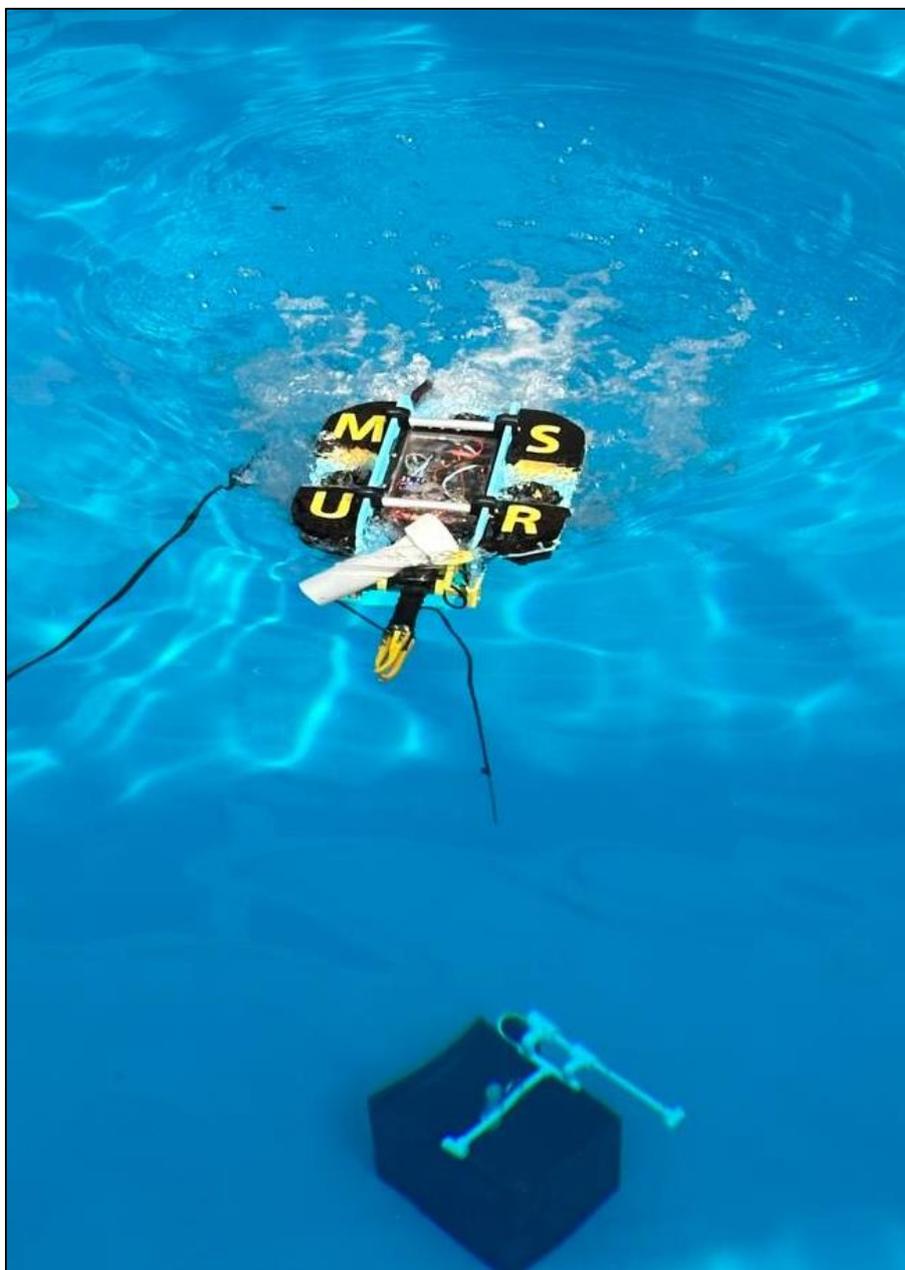


Рис. 6. Тестирование ТНПА

Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат «IV2AN», созданный клубом подводной робототехники «MSU Robotics» на базе морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского города Владивостока показал хорошие результаты в процессе выполнения тестовых задач.

## Заключение

Подводя итоги, стоит указать что телеуправляемые необитаемые аппараты несут большую пользу в водной среде, ими решают множество задач с разными целями вроде транспортировки подводных датчиков, осмотр объекта на морском дне, установка и запуск подводного оборудования. Их можно создавать или модифицировать под определённые задачи.

Разработка телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) "IV.2.AN" продемонстрировала возможности применения современных технологий для повышения надежности и функциональности подводных систем.

## Список литературы

1. Пашеева Т.Ю. О современных технологиях чистки судов // Техническая эксплуатация водного транспорта: Проблемы и пути развития: Материалы Второй международной научно-технической конференции. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2020. – С. 59-62.

2. Подводные роботизированные аппараты: как появились и развивались? // Официальный сайт ООО «Смартдайв» [Электронный ресурс]: режим доступа – [https://смартдайв.рф/blog/rov\\_history](https://смартдайв.рф/blog/rov_history)

3. Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат // Официальный сайт РУВИКИ [Электронный ресурс]: режим доступа – [https://ru.ruwiki.ru/wiki/Телеуправляемый\\_необитаемый\\_подводный\\_аппарат](https://ru.ruwiki.ru/wiki/Телеуправляемый_необитаемый_подводный_аппарат)

4. Официальный сайт ЦПИ РГО [Электронный ресурс]: режим доступа – <https://dev.urc-rgs.ru/about/mission>

5. Телеуправляемые подводные аппараты. Общие сведения // Официальный сайт АО «Тетис Про» [Электронный ресурс]: режим доступа – <https://www.tetis-pro.ru/faq/8028/>

**В.А. Довженко**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, V.Dovzhenko@gctc.ru  
**Б.И. Крючков**, д.т.н., начальник лаборатории, B.Kryuchkov@gctc.ru  
**И.Н. Куликов**, к.в.н., ведущий научный сотрудник, I.Kulikov@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

## **КОГНИТИВНЫЕ КАРТЫ В СОСТАВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ УПРАВЛЕНИИ ЧЕЛОВЕКОМ И МАШИНОЙ**

*Аннотация:* Проблемы повышения безопасности в сложных условиях навигации и позиционирования автономных мобильных роботов (АМР) стимулирует разработку совместных систем управления, допускающих переход управления из автоматического в ручной режим для предотвращения коллизий с объектами внешней среды. Дополнительно к оперативно получаемым данным от бортовых систем разведки и картографирования АМР предлагается включать в состав интеллектуального операторского интерфейса семантический контент когнитивных карт с образным представлением и вербальным описанием маршрутов. Исходной базой такого описания служит предварительная маршрутизация местности с помощью графоаналитических методов планирования перемещения подвижных объектов, селекции безопасных маршрутов по заданным критериям и спецификация локаций контроля, маркированных визуальными ориентирами (маяками). Использование когнитивных карт при визуальной навигации АМР служит целям репродукции априорных знаний о маршрутах для подготовки и принятия решения человеком на переход в ручное управление АМР для предотвращения коллизий.

*Ключевые слова:* автономные мобильные роботы, навигация и позиционирование, предотвращение коллизий, системы совместного управления, интеллектуальный интерфейс, когнитивная карта

**V.A. Dovzhenko**, Ph.D., As.Prof., Leading Researcher, v.dovzhenko@gctc.ru  
**B.I. Kryuchkov**, Doctor of Technical Sciences, Head of the laboratory, b.kryuvhkopv@gctc.ru  
**I.N. Kulikov**, Ph.D., Leading Researcher, i.kulikov@gctc.ru  
**V.M. Usov**, MD, Professor, Chief Researcher, v.usov@gctc.ru  
Federal State Organization Yu.A.Gagarin Reseach&Test Cosmonaut Center,  
the Star City, Moscow Region, Russia

# COGNITIVE MAPS AS PART OF AN INTELLECTUAL INTERFACE FOR VISUAL NAVIGATION OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS IN HUMAN-MACHINE JOINT CONTROL

*Abstract:* The problems of improving safety in complex of navigation and positioning conditions of Autonomous Mobile Robots (AMR) stimulate the development of joint control systems that allow the transition of control from automatic to manual mode to prevent collisions with objects of the external environment. In addition to the operationally obtained data from on-board s reconnaissance and mapping systems, it is proposed to include semantic content of Cognitive Maps with a imagery representation and a verbal description of the routes in the intelligent operator interface. The initial basis for such a description is the preliminary routing of the terrain using graphoanalytic calculations methods for planning the movement of moving objects, selection of safe routes according to specified criteria and specification of control locations marked with visual landmarks (beacons). The use of cognitive maps in the visual navigation mode of an AMR serves the purpose of reproducing a priori knowledge about routes for preparation and a decision making by an operator to switch to manual control mode of the AMR to prevent collisions.

*Keywords:* Autonomous mobile robots, navigation and positioning, collision avoidance, human-machine joint control systems, intelligent interface, cognitive map.

Впечатляющие успехи в области робототехники нашли отражение в расширении возможности адаптации автономных мобильных роботов (АМР) к экстремальной среде и их способности перемещения по предписанным маршрутам при наличии ограничений получения сигналов от глобальных систем навигации [1-4]. В то же время, учитывая сложность стоящих проблем обеспечения надежности, по мнению большинства специалистов, целесообразно рассматривать человека как резервирующее звено при эксплуатации АМР [5]. Один из возможных подходов к человеко-ориентированному распределению функций при эксплуатации АМР заключается в реализации способа совместного управления АМР, при котором предусмотрены как автоматические режимы управления и навигации, так и ручное управление человеком-оператором. Для этого должны быть предусмотрены средства информационного обеспечения, позволяющие оператору при необходимости осуществить экстренное вмешательство в управление АМР с переводом управления роботом в ручной режим.

При оценке роли оператора в обеспечении безопасности целесообразно опираться на способности человека к ведению пространственной ориентировки по визуально опознаваемым ориентирам. Ввиду возможных коллизий АМР на маршруте в сложных условиях внешней среды перед оператором стоит задача выявлять возможные проблемные ситуации, оперативно распо-

знавать и идентифицировать вероятные отклонения позиционирования АМР от заданного пути.

В дополнение к широко распространенному методу позиционирования с помощью глобальных систем спутниковой навигации (ГССН) в настоящее время активно изучаются методы автоматической навигации на базе бортовых измерительных систем для одновременной картографии и разведки пути [1, 2] и способы визуально-образной навигации [6-8], которые позволяют органично сочетать возможности распознавания и идентификации объектов внешней среды (на базе технологий компьютерного зрения) и зрительных способностей человека по опознаванию навигационных ориентиров. В тех случаях, когда человек может надежно опознать навигационные ориентиры по маршруту перемещения АМР, у него появляется возможность контролировать правильность выполнения АМР функций навигации и позиционирования и точность выхода на заданные ориентиры (маяки) [6-8].

Обоснование человеко-ориентированного способа построения навигации и управления АМР, в частности, при визуальной локальной навигации, составило одно из ключевых направлений настоящей работы.

Необходимость создания для оператора, включенного в контур контроля автоматической навигации и управления АМР, адекватных условий реагирования на осложнение текущей обстановки повышает актуальность построения интеллектуального человеко-машинного интерфейса с использованием образно-графических и вербальных форм представления информации [9]. Этим целям при визуальной навигации в среде с препятствиями отвечает визуально-графическое представление пространственных знаний оператора о маршрутах АМР с помощью когнитивной карты [10-12]. Применение когнитивных карт для навигации мобильных аппаратов составляет одно из многочисленных областей применения этой технологии [13].

В этой связи в составе интерфейса важно предусмотреть доступные в интерактивном режиме структурированные данные о маршрутах, а также иллюстративные графические, вербальные и инструментальные данные для надежного распознавания ориентиров с заранее известными координатами.

Благодаря визуально-образной и семантической разметке маршрута перемещения АМР у оператора актуализируются ментальные репрезентации (мысленные образы) о пространственных соотношениях АМР с теми объектами, сближение с которыми ведет к возрастанию риска коллизий в среде с препятствиями.

Опора на ментальные репрезентации, как части ментального опыта оператора, может способствовать надежности принятия решения в оперативном режиме контроля текущей ситуации, что служит аргументом в пользу целесообразности включения в состав человеко-машинного интерфейса контента когнитивных навигационных карт.

Предлагаемый подход исходит из предпосылки о наличии предварительного этапа маршрутизации в среде с препятствиями, на базе которого

происходит формирование навигационного образа и образа действий по критериям безопасности.

Для предварительного этапа формирования контента когнитивных карт может быть применен аппарат построения дорожной карты на базе графо-аналитических моделей [4, 14-16], дополненный оценками экспертов предпочтительных маршрутов АМР. Семантическое наполнение когнитивных карт включает описание характерных визуально распознаваемых ориентиров и спецификацию атрибутов отрезков маршрута между контрольными точками на маршруте (протяженность, наличие препятствий, близость опасных объектов и образований, условия освещенности и т.д.). Тем самым, для формирования ментальных репрезентаций оператора экспертным путем строятся диаграммы, отображающие связи объектов и позволяющие показать их взаимовлияние, важное для принятия решений, как часть онтологии предметной области.

При таком построении интерфейса проявляется двойственный характер использования на практике концепции когнитивных карт, совмещающей методы когнитивных наук и формализованные процедуры математического моделирования для построения графа знаний. С психологической точки зрения принимается во внимание визуальное представление ментальной модели человека о пространственной организации внешней среды, а в рамках математических подходов с помощью компьютерного моделирования создается графовая модель специального вида, отражающая причинно-следственные связи между объектами.

Значимость человеко-ориентированного подхода для совместного управления АМР определяется тем, что уровень планирования (целеполагания) и приоритетная возможность вмешательства в выбор навигационного маршрута и/или прекращения движения должны оставаться в ведении оператора при возможно полном использовании инструментальных бортовых средств для сбора навигационной информации об окружающей среде, автоматического уклонения от столкновений в реальном масштабе времени и для ее представления оператору в доступной для восприятия форме. Построение на этой основе картины движения с помощью технологий искусственного интеллекта (ИИ) предшествует принятию решения на исполнение действий по выбору маневра на маршруте, предустановленном на стадии планирования маршрута АМР. За оператором закрепляется функция целеполагания, планирование и предписание прохождения АМР конкретного маршрута, контроля правильности выбора маневров на маршруте, учета доступных ресурсов для предстоящей миссии.

Органичное сочетание возможностей естественного и искусственного интеллекта составляет одно из базовых условий обеспечения когнитивной деятельности оператора путем построения интеллектуального интерфейса, обеспечивающего согласование уровней управления АМР, а именно, глобального целеполагания (планирования операции с использованием графо-

аналитических алгоритмов) и локального (тактического, в контексте текущей ситуации) позиционирования с использованием бортовых инструментов разведки и картографирования мобильных роботов [15].

Включение контента когнитивной карты в состав операторского интеллектуального интерфейса правомерно рассматривать как одно из возможных направлений применения ИИ для навигации и управления АМР.

## Список литературы

1. Тачков А.А. Принципы построения систем автономного управления движением наземных робототехнических комплексов специального назначения / Тачков А.А., Козов А.В. Яковлев Д.С., Бузлов Н.А., Курочкин С.Ю. // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. – Т.10. – № 2.– С. 121-132. DOI: 10.31776/RTSJ.10205.
2. Лопота А.В., Спасский Б.А. Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. – Т. 8. – №1. –С.5-17. DOI: <https://doi.org/10.31776/RTSJ.8101>.
3. Евдокимова Т.С. Система позиционирования и идентификации мобильной робототехнической платформы в ограниченном и открытом пространстве / Т.С. Евдокимова, А.А. Синодкин, Л.О. Федосова, М.И. Тюриков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. – № 2 (121) – С.16-25.
4. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. 2018. – №01. – С.15-58. DOI:10.24108/MATHM.0118.0000098.
5. Спасский Б.А. Совместное управление роботами, автономное и от человека-оператора // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. – №1(14). – С. 69-76.
6. Карпова И.П. К вопросу о представлении маршрута мобильного робота на основе визуальных ориентиров. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. – №18(2). – С.81-89. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.18.81-89>.
7. Степанов Д.Н. Когнитивная навигация мобильных роботов с использованием естественных визуальных ориентиров / Д.Н. Степанов, Е.Ю. Смирнова, В.В. Горюнов // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. – №1(10). – С. 62-66.
8. Першина Ж.С. Методы визуальной навигации мобильного робота и построения картографических моделей внешней среды / Першина Ж.С., Каздорф С.Я., Лопота А.В. // Автометрия. 2019. – Т. 55, – № 2. – С. 92-102. DOI: 10.15372/AUT20190210.
9. Спасский Б.А. Обзор современных интерфейсных систем операторов мобильных наземных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. – № 4 (13). – С. 21-31.
10. Кобринский Б. А. Образные представления специалиста и проблема их отражения в интеллектуальных системах // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for

Intelligent Systems (OSTIS-2012): II Междунар. научн. - техн. конф.– Минск: БГУ-ИР, 2012. – С. 53-62.

11. Пестун М.В. Когнитивная навигация и алгоритм построения текстового описания маршрута в удобном для человека виде // Программные продукты и системы. 2015. – № 1. – С.28-33. DOI:10.15827/0236-235x.109.028-033.

12. Чапля Т.В. Когнитивная карта – чувственно-образное представление о пространстве // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. – Т. 5. – С.138-144. DOI:10.33764/2618-981X-2019-5-138-144.

13. Peer M., Brunec I.K., Newcombe N.S., Epstein R.A. (2020). Structuring Knowledge with Cognitive Maps and Cognitive Graphs // Trends in cognitive sciences. 25(1): 37-54. DOI: 10.1016/j.tics.2020.10.004.

14. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения. // Труды ИСП РАН, 2016. – Т. 28. – Вып. 4. – С.241-294. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14.

15. Савельев А.И. Алгоритм планирования локальных траекторий движения наземного робототехнического средства с учетом глобального маршрута / А.И. Савельев, К.В. Камынин, А.А. Ерашов, Е.О. Черских // Робототехника и техническая кибернетика. 2023. – Т. 11. – № 3. – С. 188-196. DOI 10.31776/RTCJ.11304

16. Микишанина Е.А., Платонов П.С. Алгоритмизация управления мобильным колесным роботом в среде с препятствиями методом потенциальных полей. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. – №25 (2). – С. 93-100. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.25.93-100>.

## МОДИФИКАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОДВОДНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РУЛЯ

*Аннотация:* В работе рассмотрен подход к численному математическому моделированию гидродинамики подводного робота с использованием аналитической модели руля. Описаны проблемные вопросы моделирования рулевой поверхности подводного робота в процессе его проектирования с использованием численных гидродинамических моделей. Представлена аналитическая модель гидродинамического руля в общем виде и предложен алгоритм организации расчета на гидродинамической модели. Приведены результаты использования представленного алгоритма организации расчета на примере модификации гидродинамической модели биоподобного подводного робота.

*Ключевые слова:* гидродинамическое моделирование, численное моделирование, гидродинамические руль

D.K. Serov, engineer, d.serov@rtc.ru  
CRI RTC, Saint-Petersburg, Russia

## MODIFICATION OF THE UNDERWATER ROBOT'S HYDRODYNAMIC MODEL USING AN ANALITICAL MODEL OF THE RUDDER

*Abstract:* The paper proposes an approach to numerical mathematical simulation of underwater robot's hydrodynamics using an analytical model of the rudder. The problematic issues of studying the steering surface of an underwater robot in the process of its design using computational fluid dynamics models are described. An analytical model of a hydrodynamic rudder is presented. An algorithm for organizing the calculation on a hydrodynamic model is proposed. The results of using the presented calculation algorithm for modifying the hydrodynamic model of a biomorphical underwater robot are given.

*Key words:* hydrodynamics simulation, numerical simulation, rudder

В настоящее время подводная робототехника находит активное применение для выполнения технологических операций и исследовательских миссий в экстремальной для человека среде [1]. Ключевым этапом проектирования подводных роботов является синтез системы управления их движением и ее отработка, представляющая собой нетривиальную задачу, осложняемую как дороговизной проведения натурных испытаний, так и сложностью мате-

математического моделирования динамики подводных роботов в условиях нестационарной водной среды, в особенности для сложных биоморфных конструкций.

Для математического моделирования гидродинамики жидкости существует различные способы, однако принципиально их можно разделить на 2 основных подхода: использование уравнений Навье-Стокса [2] для описания динамики отдельных частиц жидкости и аналитических уравнений, описывающих воздействие жидкой среды на объект управления упрощенно, в виде нелинейных зависимостей для сил и моментов в проекции на оси связанной с роботом системы координат [3].

Использование уравнений Навье-Стокса позволяет наиболее точно воспроизводить гидродинамические эффекты, возникающие в процессе движения робота в жидкости, однако с вычислительной точки зрения является ресурсозатратным, в результате чего проведение вычислительных экспериментов на моделях данного рода занимает в разы больше времени, чем проведение аналогичных физических экспериментов. Принципиальным ограничением данных моделей также является и сложность их масштабирования, в результате чего добавление дополнительных движущихся элементов в конструкцию робота, например, рулевых поверхностей, будет приводить к еще большему увеличению вычислительной сложности моделирования. При этом в случае, если на этапе проектирования подводного робота необходимо выбрать оптимальные размеры рулевой поверхности, подбор параметров руля на гидродинамической модели представляет собой нетривиальную задачу в связи с тем, что сетку вокруг рулевой поверхности необходимо перестраивать для каждого типового профиля и геометрических размеров руля вручную.

В связи с этим нами был предложен подход, согласно которому рулевая поверхность в гидродинамической модели робота моделируется упрощенно, в виде аналитических зависимостей, характеризующих силовое воздействие со стороны жидкости на робота. Полученные силовые воздействия добавляются в уравнения динамики твердого тела, в соответствии с чем осуществляется деформация расчетной сетки и моделируется движение робота в водной среде и связанное с ним изменение скорости движения отдельных частиц жидкости.

Для расчета силовых воздействий, создаваемых гидродинамическим рулем, рассмотрим расчетную схему, представленную на рисунке 1.

Обозначения, используемые на рисунке 1:  $\alpha$  – угол поворота руля;  $v_x$  – скорость набегающего потока в продольном направлении;  $l_0$  – расстояние от оси баллера до точки приложения гидродинамических сил;  $l_F$  – расстояние от переднего края руля до точки приложения гидродинамических сил;  $F_z, F_x$  – проекции гидродинамических сил, действующих на руль в связанной с рулем системе координат;  $F_n, F_\tau$  –

нормальная и тангенциальная составляющие гидродинамических сил, действующих на руль.

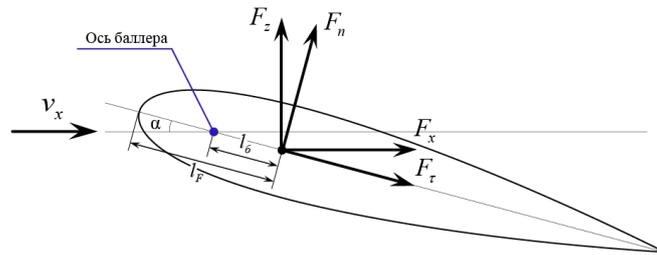


Рис. 1. Расчетная схема гидродинамического руля

Несмотря на то, что силы  $F_n$  и  $F_\tau$  носят более физический характер, для расчета гидродинамического момента, возникающего на руле, используют проекции сил на оси связанной с аппаратом СК [3], которые могут быть найдены как

$$\begin{cases} F_z = \frac{1}{2} C_{zp} \rho S_p v_x |v_x|, \\ F_x = F_z \cdot \epsilon_p, \\ C_{zp} = \frac{2\pi\lambda_p}{2 + \sqrt{\lambda_p^2 + 4}} \cdot \alpha, \\ \epsilon_p = \epsilon_{pmax} \left( \frac{\alpha}{\alpha_{кр}} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где  $C_{zp}$  – коэффициент гидродинамического сопротивления руля,  $\rho$  – плотность жидкости,  $S_p$  – площадь сечения руля,  $\lambda_p$  – относительное удлинение руля,  $\epsilon_p$  – коэффициент обратного качества руля,  $\lambda_{кр}$  – максимальный угол перекладки руля, после которого наступает кризис обтекания руля,  $\epsilon_{pmax}$  – максимальное значение коэффициента обратного качества на рабочем интервале руля, которое может быть найдено по эмпирическим зависимостям [4]

В таком случае, моменты, развиваемые гидродинамическими силами, в проекции на оси связанной с роботом системы координат могут быть найдены как

$$\begin{cases} M_x = F_z \cdot (h_F + 0.5 \cdot h_R), \\ M_Y = F_z \cdot \left( \frac{l_R}{2} - \Delta l_0 \right) - (F_z \cdot \cos(\lambda) + F_x \cdot \sin(\lambda)) \cdot (l_F - l_0), \\ M_z = -F_x \cdot (h_F + 0.5 \cdot h_R), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Delta l_6$  – смещение оси баллера относительно носа робота,  $h_F$  – высота приложения гидродинамических сил относительно вершины руля,  $h_R, l_R$  – высота и длина робота соответственно (при его симметричности).

Алгоритм расчета гидродинамики подводного робота с учетом аналитических уравнений рулевой поверхности представлен на рисунке 2.

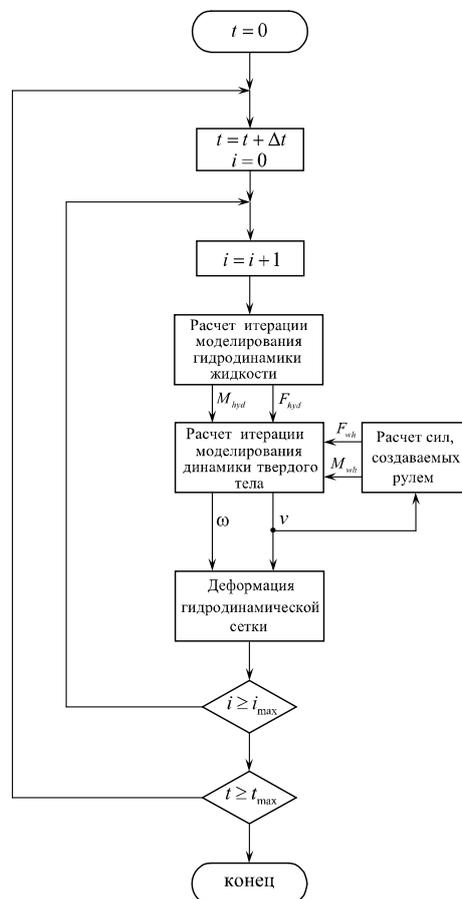


Рис. 2. Алгоритм расчета гидродинамики аппарата с использованием уравнений рулевой поверхности

Обозначения, используемые на рис. 2:  $M_{hyd}, F_{hyd}$  – моменты и силы, создаваемые жидкостью;  $F_{wh}, M_{wh}$  – силы и моменты, создаваемые гидродинамическим рулем;  $\omega, v$  – вектор угловых и линейных скоростей движения робота;  $i, t$  – номер итерации и время расчета;  $\Delta t$  – дискретность расчета.

Таким образом, на каждой итерации гидродинамического моделирования методом сеток рассчитываются скорости движения частиц жидкости в узлах сетки, определяются силы и моменты гидродинамических сил, воздействующие на подводного робота, а также на основании продольной скорости движения робота рассчитываются силы и моменты, создаваемые рулевой поверхностью. Далее в соответствии с рассчитанными исходя из уравнений динамики твердого тела в соответствии со скоростью движения робота осуществляется деформация расчетной сетки, после чего алгоритм последовательно повторяется. За счет этого силы и моменты, создаваемые за счет

наличия рулевой поверхности, учитывается в модели упрощенно, однако это позволяет в кратчайшие сроки изменить параметры гидродинамического руля без перестраивания гидродинамической сетки, что в значительной степени ускоряет процесс проектирования конструкции и системы управления подводного робота.

В качестве примера практического применения предложенного метода рассмотрим процесс модификации гидродинамической модели биоморфного подводного робота с ундуляторным типом плавания, представленной на рисунке 3.

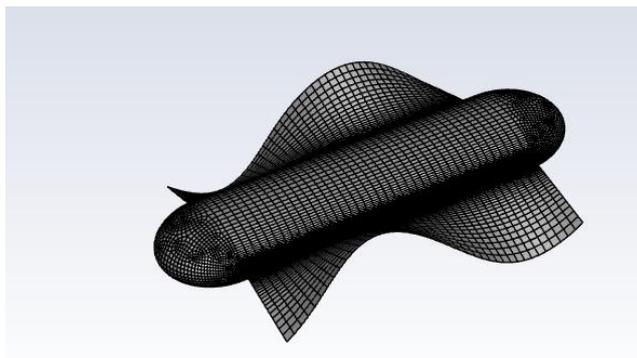


Рис. 3. Гидродинамическая модель робота с ундуляторным типом плавания

Данная конструкция позволяет роботу осуществлять движение в продольном направлении путем создания синусоидальной набегающей волны на правом и левом плавниковых движителях. Данная конструкция также позволяет роботу управлять углом курса путем изменения частоты колебаний на движителях, тем самым обеспечивая разность движущих сил набегающей волны.

Тем не менее, в ходе проведения гидродинамического моделирования было установлено, что данная конструкция является неустойчивой по курсу, в результате чего в процессе движения в продольном направлении робот начинает уходить в неуправляемый занос, что не позволяет ему не только эффективно управлять углом курса, но и осуществлять линейное движение по прямой траектории.

Для обеспечения управляемости конструкции по углу курса было принято решение добавить в носовую часть робота виртуальный руль, управление углом поворота которого осуществляется при помощи ПД-регулятора.

В результате с некоторой статической ошибкой, обусловленной низкой эффективностью гидродинамического руля при малых углах поворота удалось добиться управляемого движения предложенной конструкции биоподобного подводного робота, как показано на рисунке 4.

Тем не менее, в связи с наличием продольной гидродинамической силы, обусловленной поворотом руля и воздействующей на робота в поперечном направлении, наблюдается его боковое движение с малой скоростью.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм расчета гидродинамики с использованием виртуального руля позволяет учитывать эффекты, возникающие при использовании реального гидродинамического руля. Дальнейшим направлением исследований в данном направлении является валидация предложенной модели виртуального руля путем сравнения полученных результатов с результатами численного моделирования путем задания отдельной гидродинамической деформируемой сетки для моделирования рулевой поверхности.

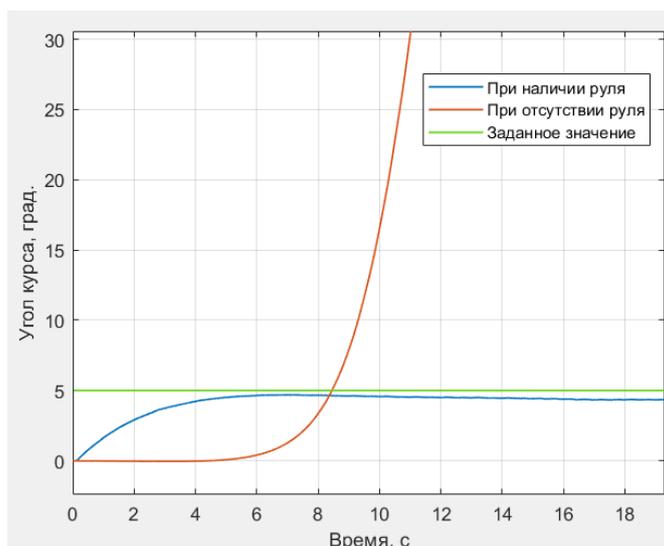


Рис. 4. Графики изменения угла курса подводного робота при наличии и отсутствия гидродинамического руля

*Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России на 2024 год № 075-00697-24-01 от 03.04.2024 FNRG-2022-0008 1021051101732-4-1.2.1;2.2.2 «Исследование методов и разработка технологий создания отладочно-моделирующих комплексов для функционального и поведенческого моделирования РТК и групп РТК».*

## Список литературы

1. Инзариев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В. и др. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, 2018. – 368 с.
2. Ламб Г. Гидродинамика / М: ОГИЗ, 1947 – 929 с.
3. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control / NJ: Wiley, 2021. – 736 с.
4. Васильев А.В. Управляемость судов / М: Судостроение, 1989. – 329 с.
5. Соболев В.Г. Управляемость корабля и автоматизация судовождения / М: Судостроение, 1976. – 475 с.

## ПОДХОД К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИКИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПОДВОДНОГО МАНИПУЛЯТОРА

*Аннотация:* В работе рассмотрен подход к математическому моделированию динамики подводного манипулятора с учетом особенностей совместного моделирования гидравлической системы и динамики манипулятора. Описан способ составления основных уравнений гидродинамики последовательного манипулятора с использованием уравнений Ньютона-Эйлера. Предложен метод расчета, позволяющий реализовать гидравлическую систему манипулятора встроенными методами программы для моделирования с учетом инерционных, гидравлических и гравитационных сил, оказывающих воздействие на звенья манипулятора. Приведены результаты математического моделирования и их анализ.

*Ключевые слова:* гидравлический манипулятор, подводный манипулятор, динамическая модель манипулятора

D.K. Serov, engineer, d.serov@rtc.ru  
CRI RTC, Saint-Petersburg, Russia

## AN APPROACH TO MATHEMATICAL DYNAMICS SIMULATION OF HYDRAULIC UNDERWATER MANIPULATOR

*Abstract:* The paper proposes an approach to mathematical modeling of the underwater manipulator dynamics considering the features of collaborative modeling of the hydraulic system and the manipulator dynamics. A method for compiling the main equations of the hydrodynamics of a sequential manipulator using the Newton-Euler equations is described. A calculation method that allows the implementation of the manipulator hydraulic system using built-in methods of the modeling program taking into account the inertial, hydraulic and gravitational forces affecting the manipulator links is proposed. The results of mathematical modeling and their analysis are presented.

*Key words:* hydraulic manipulator, underwater manipulator, dynamic manipulator model

В настоящее время активное развитие получила подводная робототехника для выполнения технологических операций в опасной для человека среде [1]. Наибольшее распространение для выполнения глубоководных работ получили телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), поз-

воляющие исследовать области, в том числе и недоступные для людей. При этом эффективность ТНПА рабочего класса во многом связана с эффективностью работы манипуляционного оборудования, установленного на нем.

В связи с этим одной из ключевых задач при проектировании манипуляционной системы является разработка системы управления, проводимая на математических моделях. С учетом значительных величин гидростатического давления на большой глубине, для управления манипулятором применяются, как правило, гидравлические приводы [2], что ведет к существенным отличиям в подходе к математическому моделированию данных манипуляторов по сравнению с классическими промышленными манипуляторами, оснащенными электроприводами. Обусловлено это, как правило, взаимным влиянием отдельных гидроприводов манипулятора друг на друга в связи с тем, что питаются они от одной магистрали, как показано на рисунке 1.

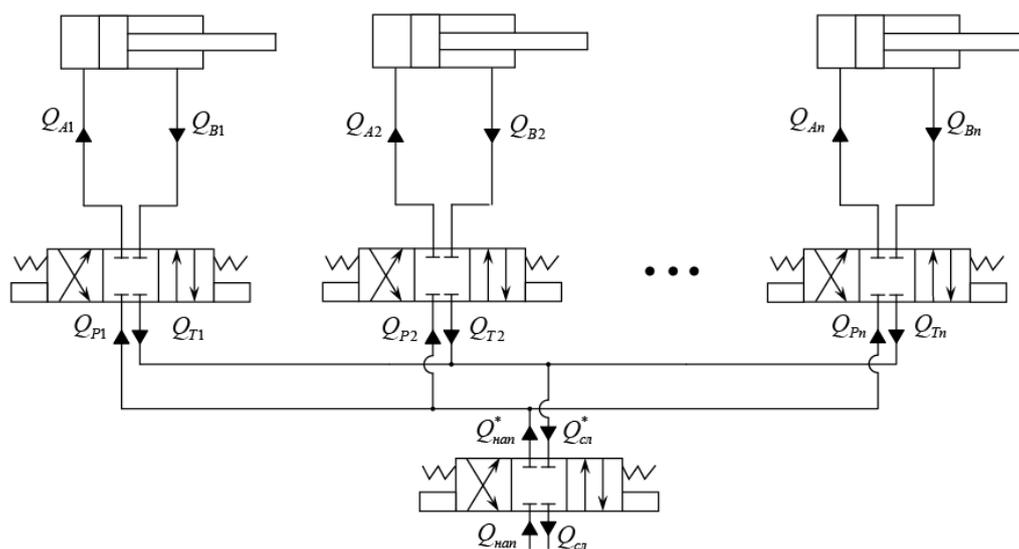


Рис. 1. Пример гидравлической системы гидроприводов, питающихся от одной магистрали

Обозначения, используемые на рис. 1:  $Q_A, Q_B$  – объемный расход соответствующих магистралей гидропривода;  $Q_{P1}, Q_{T1}$  – объемный расход на входе и выходе гидропривода;  $Q_{нап}, Q_{сл}$  – объемный расход напорной и сливной магистралей гидропривода.

Таким образом, в процессе разработки динамической модели гидравлического манипулятора нельзя рассматривать каждый привод отдельно, а необходимо моделировать всю гидравлическую систему. В связи с чем, в данной работе был предложен подход к моделированию динамики манипулятора, отличающийся от классического способа, предполагающего использование уравнений Лагранжа 2 рода для каждого из звеньев [3]

Предложенный подход к моделированию динамики манипулятора представлен на рисунке 2.

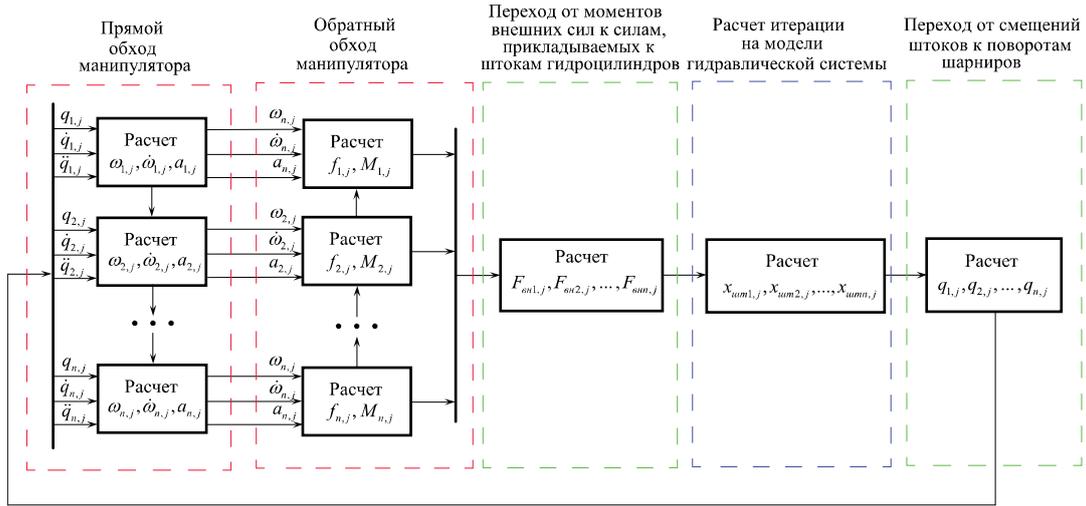


Рис. 2. Схема моделирования динамики гидравлического подводного манипулятора

Обозначения, используемые на рис. 2:  $\omega$  – вектор угловой скорости вращения центра масс соответствующего звена,  $a$  – вектор линейной скорости передвижения центра масс соответствующего звена,  $f$  – вектор сил, приложенных к центру масс соответствующего звена,  $M$  – вектор моментов сил, приложенных к центру масс соответствующего звена,  $F_{\text{вн}}$  – скалярное значение проекции внешней силы на шток соответствующего гидроцилиндра,  $x_{\text{шт}}$  – смещение штока соответствующего гидроцилиндра,  $q$  – значение обобщенной координаты соответствующего шарнира,  $i$  – номер звена,  $j$  – номер такта моделирования.

Так, прямой обход манипулятора осуществляется с использованием метода Ньютона-Эйлера [4], предполагающего последовательный анализ динамики манипулятора, представленного в виде жестко связанных звеньев как

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{array}{l} \left[ \begin{array}{c} \omega_x^{i+1} \\ \omega_y^{i+1} \\ \omega_z^{i+1} \end{array} \right] = (T_{i,i+1})^{-1} \left( \left[ \begin{array}{c} \omega_x^i \\ \omega_y^i \\ \omega_z^i \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_{i+1} \end{array} \right] \right) \\ \left[ \begin{array}{c} \dot{\omega}_x^{i+1} \\ \dot{\omega}_y^{i+1} \\ \dot{\omega}_z^{i+1} \end{array} \right] = (T_{i,i+1})^{-1} \left( \left[ \begin{array}{c} \dot{\omega}_x^i \\ \dot{\omega}_y^i \\ \dot{\omega}_z^i \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_{i+1} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_{i+1} \end{array} \right] \times \left( \left[ \begin{array}{c} \dot{\omega}_x^i \\ \dot{\omega}_y^i \\ \dot{\omega}_z^i \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_{i+1} \end{array} \right] \right) \right) \\ \left[ \begin{array}{c} a_x^{i+1} \\ a_y^{i+1} \\ a_z^{i+1} \end{array} \right] = (T_{i,i+1})^{-1} \left[ \begin{array}{c} a_x^i \\ a_y^i \\ a_z^i \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \dot{\omega}_x^{i+1} \\ \dot{\omega}_y^{i+1} \\ \dot{\omega}_z^{i+1} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} r_x^{i+1} \\ r_y^{i+1} \\ r_z^{i+1} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \omega_x^{i+1} \\ \omega_y^{i+1} \\ \omega_z^{i+1} \end{array} \right] \times \left( \left[ \begin{array}{c} \omega_x^{i+1} \\ \omega_y^{i+1} \\ \omega_z^{i+1} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} r_x^{i+1} \\ r_y^{i+1} \\ r_z^{i+1} \end{array} \right] \right) \\ \left[ \begin{array}{c} a_{cx}^{i+1} \\ a_{cy}^{i+1} \\ a_{cz}^{i+1} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} a_x^{i+1} \\ a_y^{i+1} \\ a_z^{i+1} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \dot{\omega}_x^{i+1} \\ \dot{\omega}_y^{i+1} \\ \dot{\omega}_z^{i+1} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} d_x^{i+1} \\ d_y^{i+1} \\ d_z^{i+1} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \omega_x^{i+1} \\ \omega_y^{i+1} \\ \omega_z^{i+1} \end{array} \right] \times \left( \left[ \begin{array}{c} d_x^{i+1} \\ d_y^{i+1} \\ d_z^{i+1} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} r_x^{i+1} \\ r_y^{i+1} \\ r_z^{i+1} \end{array} \right] \right) \end{array} \right. \quad (1)
 \end{array}$$

где  $\omega_{x,y,z}$  – проекции вектора угловой скорости звена на оси системы координат (СК), связанной с данным звеном;  $T_{i,j}$  – матрица перехода от  $i$ -ого к  $j$ -ому звену;  $a_{x,y,z}$  – проекции вектора линейной скорости конца звена на оси СК, связанной с соответствующим шарниром манипулятора;  $a_{cx,cy,cz}$  – проекции вектора линейной скорости центра масс звена на оси системы координат, связанной с данным звеном.  $r_{x,y,z}$  – проекции вектора, связывающего начало и конец соответствующего звена на оси СК, связанной с данным звеном;  $d_{x,y,z}$  – проекции вектора, связывающего конец и центр масс соответствующего звена на оси СК, связанной с данным звеном.

Обратный обход динамики манипулятора также осуществляется методом Ньютона-Эйлера, начиная от выходного звена и идя к первому в соответствии с формулами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} F_{qx}^i \\ F_{qy}^i \\ F_{qz}^i \end{bmatrix} = (T_{0,i})^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{ост}^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{hx}^i \\ F_{hy}^i \\ F_{hz}^i \end{bmatrix} + (T_{i,i+1}) \begin{bmatrix} F_{qx}^{i+1} \\ F_{qy}^{i+1} \\ F_{qz}^{i+1} \end{bmatrix} - m_i \begin{bmatrix} a_{cx}^i \\ a_{cy}^i \\ a_{cz}^i \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} M_{qx}^i \\ M_{qy}^i \\ M_{qz}^i \end{bmatrix} = (T_{i,i+1}) \begin{bmatrix} M_{qx}^{i+1} \\ M_{qy}^{i+1} \\ M_{qz}^{i+1} \end{bmatrix} + \left( (T_{i,i+1}) \begin{bmatrix} F_{qx}^{i+1} \\ F_{qy}^{i+1} \\ F_{qz}^{i+1} \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} d_x^i \\ d_y^i \\ d_z^i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{qx}^i \\ F_{qy}^i \\ F_{qz}^i \end{bmatrix} \times \\ \times \left( \begin{bmatrix} r_x^i \\ r_y^i \\ r_z^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x^i \\ d_y^i \\ d_z^i \end{bmatrix} \right) + I_i \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x^i \\ \dot{\omega}_y^i \\ \dot{\omega}_z^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_x^i \\ \omega_y^i \\ \omega_z^i \end{bmatrix} \times \left( I_i \begin{bmatrix} \omega_x^i \\ \omega_y^i \\ \omega_z^i \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} D_{mx}^i \\ D_{my}^i \\ D_{mz}^i \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $F_{qx,qy,qz}^i$  – проекции вектора сил, оказывающих воздействие на  $i$ -ое звено манипулятора;  $F_{ост}^i$  – скалярное значение остаточной плавучести  $i$ -ого звена манипулятора,  $F_{hx,hy,hz}^i$  – проекции вектора гидродинамических сил на  $i$ -ое звено манипулятора, включающие в себя силы присоединенных масс и силы гидродинамических сопротивлений;  $m_i$  – масса  $i$ -ого звена манипулятора;  $M_{qx,qy,qz}^i$  – проекции вращающего момента на оси системы координат, связанной с  $i$ -ым звеном манипулятора;  $I_i$  – суммарный момент инерции  $i$ -ого звена, включающий момент инерции твердого тела и момент инерции присоединенных масс;  $D_{mx,my,mz}^i$  – суммарный момент гидродинамического сопротивления в проекции на оси системы координат, связанной с  $i$ -ым звеном манипулятора.

Таким образом можно определить проекции моментов внешних сил на каждый из шарниров манипулятора. При этом параметры для определения гидродинамических сил и моментов, действующих на каждое звено, могут

быть оценены отдельно в специализированном программном обеспечении, например, ЛОГОС, предназначенном для моделирования гидродинамики жидкости.

Далее по известным размерам плеч, в соответствии с которыми каждый из гидроцилиндров создает момент в заданном шарнире, определяется проекция внешних гравитационных, гидродинамических и инерционных сил, приложенных к штоку каждого из гидроцилиндров.

Полученные силы могут быть добавлены в качестве внешних возмущающих воздействий в математическую модель гидравлической системы манипулятора, которая может быть промоделирована при помощи встроенных библиотек любой из программных сред моделирования гидравлики. Далее в результате расчета такта моделирования на модели гидравлической системы определяются смещения каждого из штоков гидроцилиндра, которые на основании кинематической схемы манипулятора могут быть единообразно пересчитаны в обобщенные координаты каждого из шарниров.

Таким образом, представленный метод позволяет свести задачу моделирования динамики гидравлического подводного манипулятора к задаче моделирования гидравлической системы с учетом силовых воздействий, оказывающих влияния на звенья манипулятора.

В качестве примера применения данного метода рассмотрим типовую модель гидравлического манипулятора с семью степенями подвижности, представленную на рисунке 3.

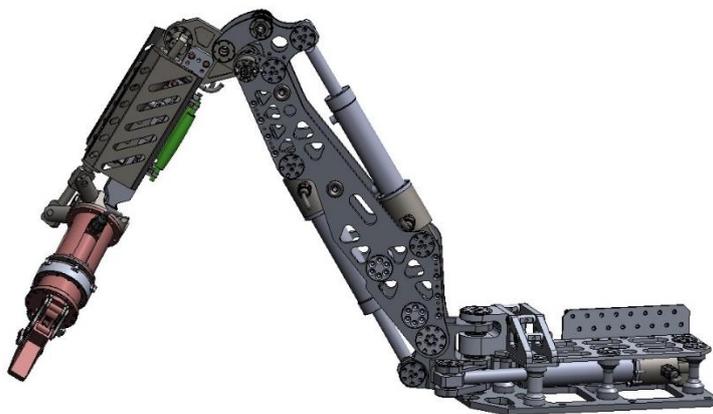


Рис. 3. Внешний вид манипулятора

Для демонстрации эффективности данного метода моделирования рассмотрим управляемое изменение обобщенной координаты шарнира тангажа локтя при следующих параметрах моделирования:

- внешняя нагрузка нулевая, движение только по одному гидроводу;
- внешняя нагрузка 50 кг, движение только по одному гидроводу;
- внешняя нагрузка нулевая, движение по трем гидроводам;
- внешняя нагрузка 50 кг, движение по трем гидроводам.

Полученный график изменения обобщенной координаты шарнира тангажа локтя представлены на рисунке 4.

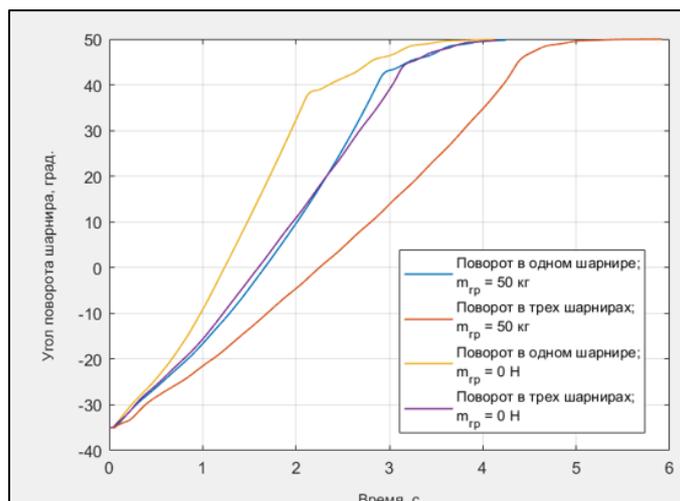


Рис. 4. График изменения угла поворота шарнира тангажа локтя при различных условиях моделирования

Исходя из полученного графика можно сделать вывод, что максимальная скорость изменения обобщенной координаты шарнира зависит как от величины внешней нагрузки, так и от количества одновременно задействованных гидроприводов, что соответствует реальной физической картине гидравлического манипулятора и подтверждает справедливость предложенного метода.

*Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России на 2024 год № 075-00697-24-01 от 03.04.2024 FNRG-2022-0021 1021101316133-1-2.2.2 «Поиск путей создания глубоководного гидравлического манипулятора для подводно-технических работ, в том числе в условиях ионизирующего излучения».*

## Список литературы

1. Инзариев А. В., Киселев Л. В., Костенко В. В. и др. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / Владивосток: ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, 2018. – 368 с.
2. Zhang Q., Chen J., Huo L. et al. Design and experiments of a deep-sea hydraulic manipulator system // OCEANS 2013 MTS/IEEE. 2013. – pp. 1–5.
3. Юревич Е. И. Основы робототехники / Л: Машиностроение, 1985. – 284 с.
4. Колубин С.А. Динамика робототехнических систем / Спб.: Университет ИТМО, 2017 – 117 с.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВАНИЯ РЫБОПОДОБНОГО РОБОТА С ДВУХПЛАВНИКОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

*Аннотация:* В данной работе приведены результаты расчётов динамики плавания модели рыбоподобного робота с двумя плавниками. Его движение определялось на основе численного решения уравнений гидродинамики, применялся URANS подход. Проведено сравнение с одноплавниковой моделью со схожими характеристиками. Использование двухплавниковой системы позволило существенно уменьшить амплитуду колебаний объекта по курсу.

*Ключевые слова:* двухплавниковый движитель, CFD-модель, деформируемая сетка

S.T. Shekelashvili, programmer, s.shekelashvili@rtc.ru  
Russian State Scientific Centre  
for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia

## NUMERICAL MODELING OF A FISHLIKE ROBOT WITH A DUAL-FOIL PROPULSION SYSTEM

*Abstract:* This paper presents the results of calculations of swimming dynamics for a fish-like robot model with two fins. Its motion was determined on the basis of numerical solution of hydrodynamic equations, for which the URANS approach was used. A comparison with a single-finned model with similar characteristics was carried out. The use of the double-fin system allowed to significantly reduce the amplitude of heading oscillations.

*Key words:* dual-foil propulsion, CFD model, dynamic mesh

Одним из перспективных направлений развития пропульсивных систем для необитаемых подводных аппаратов является разработка взмаховых движителей, генерирующих тягу за счёт трансляционных и угловых колебаний. Такой метод перемещения широко распространен в природе и позволяет рыбам, птицам и насекомым наиболее эффективно перемещаться в своей среде обитания.

Тот факт, что взмаховые движители могут генерировать существенную тягу с высоким КПД, неоднократно подтверждался в экспериментах. Напри-

мер, в статье [1] описаны измерения тяги и мощности, затрачиваемой на колебания, для случая гармонических колебаний крылового профиля в гидроканале (число Рейнольдса было равным 40000). В достаточно широком диапазоне параметров возможно достичь КПД взмаха более 50% и генерировать тягу, сравнимую с тягой винтового движителя. Кроме того, результаты измерений указывают на то, что взмаховые движители позволяют эффективно стартовать с места и маневрировать за счёт изменения закона колебаний. Взмаховые движители находят применение в области проектирования биоморфных роботов, например, MIT RoboTuna [2] и рыбоподобного робота из [3].

Одним из характерных эффектов, обнаруженных в ранних исследованиях по тематике пропульсии за счёт взмахов, является увеличение тяги и КПД при симметричных колебаниях двух профилей в противофазе. Он успешно моделируется методами CFD, что показано, например, в работе [4].

Целью настоящей работы является исследование динамики упрощенной модели рыбоподобного робота с двухплавниковым движителем. Проводятся сопряженные расчёты динамики аппарата и гидродинамики, используется метод деформируемых сеток с оригинальным алгоритмом деформации.

Используемая расчётная методика схожа с представленной в работе [5]. Расчёты проводятся в пакете ANSYS Fluent 2019 R2 с первым порядком точности по времени и вторым – по пространству, используется модель турбулентности  $k-\omega$  SST, при этом алгоритм деформации сетки был обобщен на трёхмерный случай. Колебания плавников также задаются схожим образом – иллюстрация для центрального сечения одного плавника представлена на рис.1. Смещение профиля  $h(t)$  от центрального положения  $z_{01}$  и поворот  $\theta(t)$  изменяются по гармоническому закону. Расстояние от  $z_{01}$  до плоскости симметрии  $z_{sym}$  обозначено  $\Delta z$ . Отметим, что вращение происходит относительно точки, находящейся на расстоянии  $1/3$  хорды от передней кромки профиля.

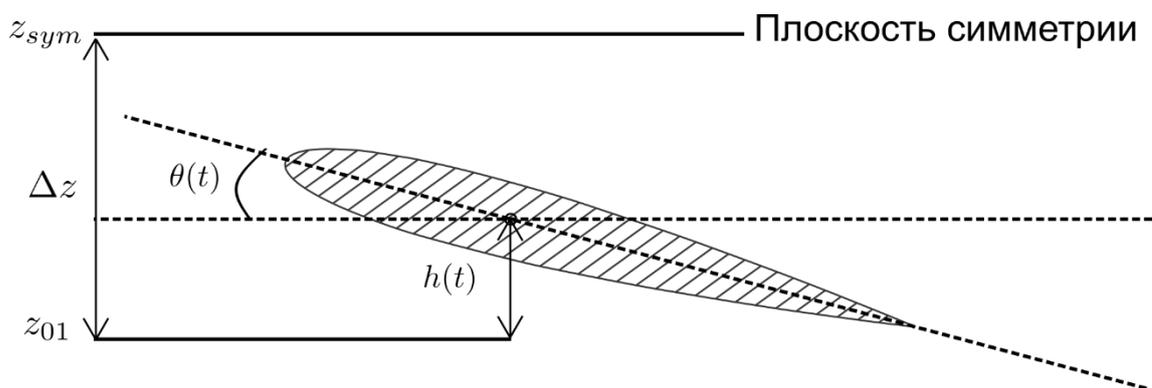


Рис. 1. Иллюстрация к закону колебаний плавников

$$h(t) = h_m \cdot \sin(2\pi ft) , \quad (1)$$

$$\theta(t) = \theta_m \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) . \quad (2)$$

В настоящей работе расчёты проводятся для упрощенной трёхмерной модели робота (рис.2), без учёта крепления и дополнительных конструктивных элементов движителя. Модель имеет габариты 510×160×140 мм, её суммарная масса равна 4.6 кг. Площадь каждого плавника составляет 0.015 м<sup>2</sup>, их сечение – профиль НАСА 0012. В центральном сечении длина хорды профиля составляет 40 мм, расстояние между двумя плавниками – 100 мм (таким образом,  $\Delta z=50$  мм). Длина каждого из них составляет 240 мм, стреловидность по передней кромке равна 15°. Размерность расчётной сетки (рис.3) – порядка 2 млн ячеек.

Параметры колебаний плавников следующие: амплитуда перемещений  $h_m=20$  мм, амплитуда вращений  $\theta_m=10^\circ$ , частота  $f=2$  Гц, а сдвиг по фазе между перемещением и вращением  $\varphi=90^\circ$ .

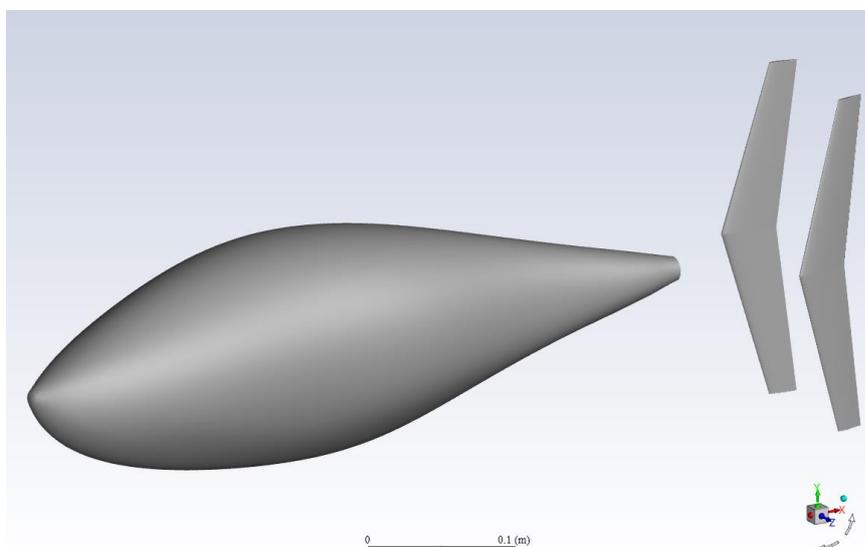


Рис. 2. Упрощенная модель рыбоподобного робота с двухплавниковым движителем

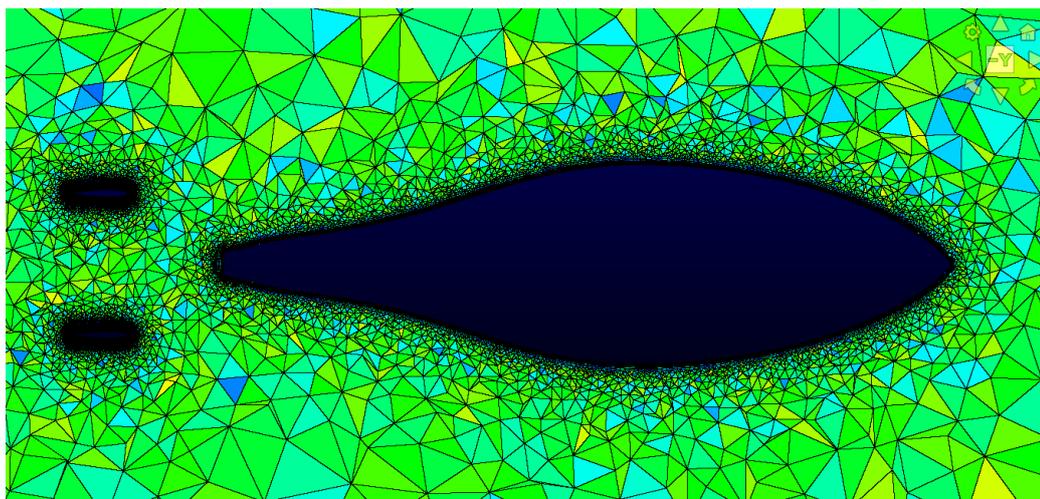


Рис. 3. Вид расчётной сетки в центральном сечении модели

Для достижения установившегося режима движения с заданными параметрами колебаний аппарату требуется порядка 30 секунд, достигается

скорость 0.58 м/с. Во время плавания наблюдаются незначительные осцилляции скорости с частотой, близкой к частоте колебаний плавников.

Течение вблизи движущихся плавников оказывается существенно неоднородным вдоль их длины. Это можно наблюдать, например, по полю давления на поверхности плавника во время колебаний (рис.4). Неоднородность полей вдоль длины плавников связана с их стреловидностью и наличием концевых вихрей, а также с отрывом потока с поверхности на стороне разрежения. Таким образом, для получения наиболее точных оценок генерируемой тяги и энергетических затрат требуется проведение трёхмерных расчётов.

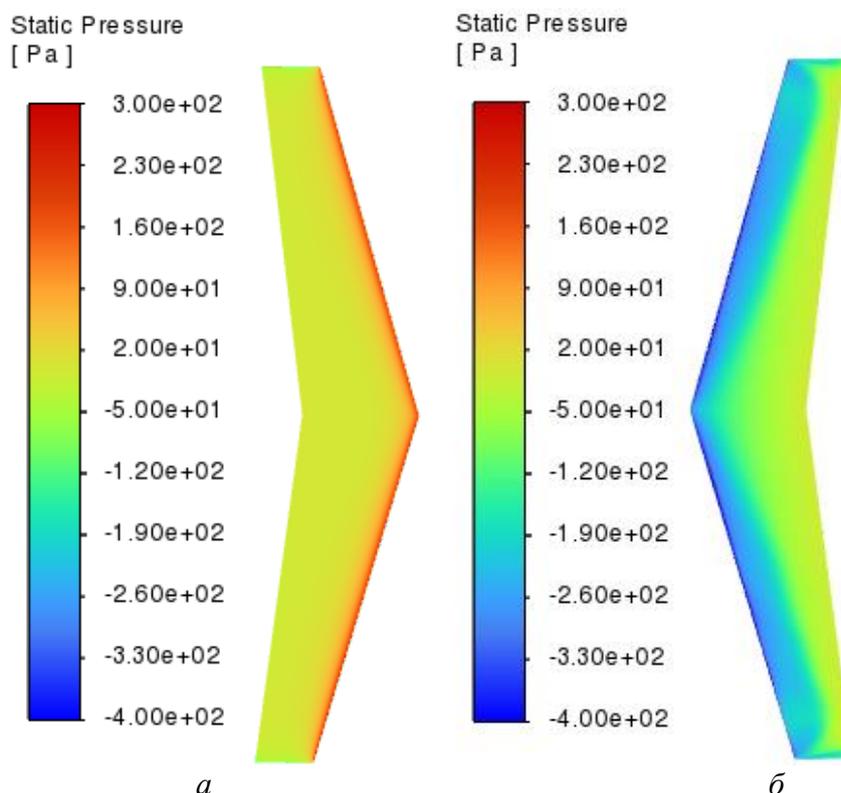


Рис. 4. Давление на поверхности плавника в момент  $t/T = 0.65$ : а) внешняя поверхность, б) внутренняя поверхность

Помимо расчёта для модели с двумя плавниками был также проведен расчёт для случая одного плавника, соединенного с телом. В данном случае поперечное смещение плавника рассчитывалось по формуле  $z(t)=A*(x-x_0)^2*\sin(2\pi ft)$ , где  $x_0$  – точка его закрепления. Частота колебаний также задавалась равной 2 Гц, а амплитуда была подобрана таким образом, чтобы установившаяся скорость движения аппарата была равной в обоих случаях – максимальное отклонение кончика плавника в этом случае составляло 75 мм.

На рис.5 приведены зависимости угловой скорости модели по курсу от времени для обоих вариантов расчёта. В случае, когда используется система из двух плавников, амплитуда колебаний минимальна, в то время как для одноплавниковой модели наблюдаются существенные изменения угловой ско-

рости во время работы двигателя: различие составляет около трёх порядков. Таким образом, использование двухплавникового двигателя позволяет исключить колебания объекта по курсу.

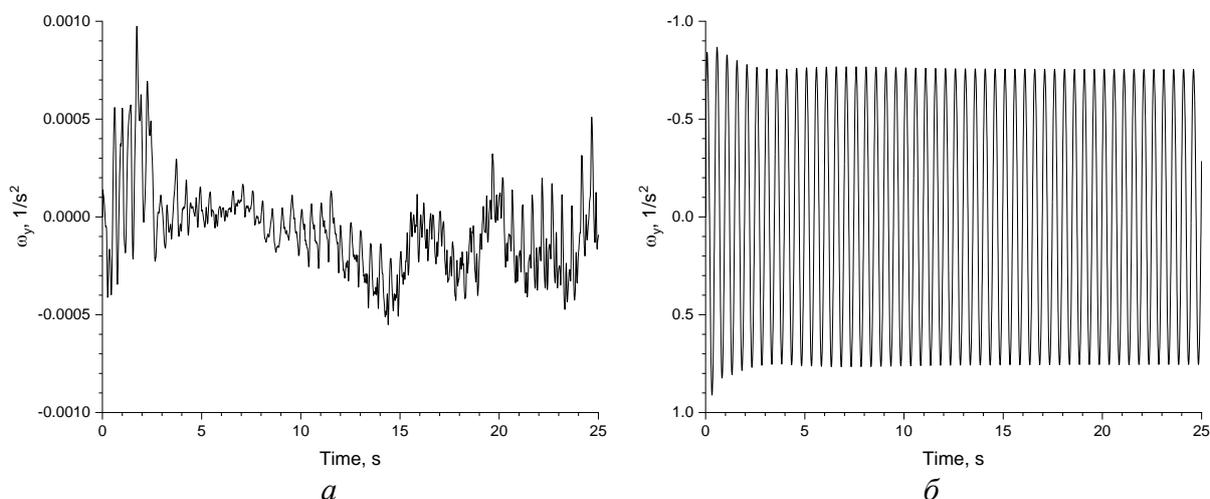


Рис. 5. Угловая скорость аппарата по курсу: а) модель с двумя плавниками б) модель с одним плавником

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00697-24-00 от 27.12.2023 «Исследование путей создания и областей возможного применения биоморфных подводных роботов» (FNRG-2022-0013 1021060307689-7-1.2.1;2.2.2).

## Список литературы

1. Read, D., Hover, F., Triantafyllou, M. Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering // Journal of Fluids and Structures. — 2003. — Jan. — Vol. 17, no. 1. — P. 163—183.
2. Barrett, D. [et al.] Drag reduction in fish-like locomotion // Journal of Fluid Mechanics — 1999. — Vol. 392. — P. 183—212.
3. Mitin, I. [et al.] Modeling Biomorphic Robotic Fish Swimming: Simulations and Experiments // International Conference on Interactive Collaborative Robotics — 2022 — P. 189—198.
4. Zhu J., Lei B. Effect of Wing-Wing Interaction on the Propulsive Performance of Two Flapping Wings at Biplane Configuration // Applied Bionics and Biomechanics. — 2018. — Vol. 2018.
5. Шекелашвили, С. Т. Расчет силовых характеристик двухплавникового двигателя // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Железногорск, 02 декабря 2023 года / Сибирский федеральный университет — Железногорск: ЛИТЕРА-принт, 2023. — С. 45-50.

## *Секция 3*

# **ИНЖЕНЕРИЯ ЗНАНИЙ И БАЗЫ ЗНАНИЙ**

**К.А. Аксенов**, к.т.н., доцент, k.a.aksenov@urfu.ru

**А.А. Боярская**, магистрант, aa.boiarskaia@urfu.me

**И.А. Калинин**, к.ю.н., доцент, igor\_kalinin@hotmail.com

**О.П. Аксенова**, к.х.н., программист bpsim.dss@gmail.com

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВОПРОСНО-ОТВЕТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕКСТОВ И БАЗЫ ЗНАНИЙ**

*Аннотация:* Статья рассматривает роль и развитие вопросно-ответных систем (ВОС), которые помогают пользователям эффективно взаимодействовать с большими объемами данных. Особое внимание уделено задаче интеграции технологий анализа текста и экспертных систем, что позволяет создавать точные и персонализированные решения. Описаны ключевые этапы разработки комплексной ВОС, включая сбор и обработку данных, а также использование современных платформ, таких как TWIN. В качестве экспертной подсистемы используется BPsim.DSS.

*Ключевые слова:* вопросно-ответные системы, экспертные системы, анализ, текст, интеграция, запрос.

**K.A. Aksyonov**, Ph.D., associate professor, k.a.aksenov@urfu.ru

**A.A. Boyarskaya**, student, aa.boiarskaia@urfu.me

**I.A. Kalinin**, Ph.D., associate professor, igor\_kalinin@hotmail.com

**O.P. Aksyonova**, Ph.D., programmer, bpsim.dss@gmail.com

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

## **INTEGRATION OF TECHNOLOGIES FOR CREATING QA SYSTEMS BASED ON TEXT ANALYSIS AND KNOWLEDGE BASE**

*Abstract:* The article examines the role and development of question-answering systems (QAS) that help users effectively interact with large volumes of data. Particular attention is paid to the integration of text analysis technologies and expert systems, which allows for the creation of accurate and personalized solutions. The key stages of QAS development are described, including data collection and processing, as well as the use of modern platforms such as TWIN. For expert subsystem are used decision support system BPsim.DSS.

*Key words:* question-answering systems, expert systems, analysis, text, integration, query.

В эпоху цифровой трансформации взаимодействие человека с компьютерами прошло впечатляющий путь: от первых перфокарт до голосовых ассистентов, способных понимать и реагировать на естественную речь. Технологии обработки естественного языка (NLP) меняют наше восприятие взаимодействия с устройствами, делая его интуитивным, быстрым и удобным.

Одним из ключевых решений на этом пути стали вопросно-ответные системы (ВОС) [1-3]. ВОС становятся важным инструментом в самых разных сферах: от повседневного общения до научных исследований.

Одним из перспективных решений является интеграция экспертных систем (ЭС) с методами анализа текста [4-6], что позволяет не только извлекать информацию, но и обеспечивать её глубокую интерпретацию. В рамках ВОС ЭС могут эффективно обрабатывать запросы, требующие анализа взаимосвязей и логических выводов.

Современные ВОС используют сложные алгоритмы, такие как нейронные сети и глубокое обучение. Они анализируют текст на уровне смысла, идентифицируют ключевые элементы, и находят логические взаимосвязи. Примером может служить система QA-LaSIE [7], которая применяет синтаксический и семантический анализ текстов, сочетая работу с базами знаний.

### Решение задачи интеграции анализатора текста и ЭС для ВОС

Интеграция элементов ВОС представлена на рисунке 1: пользователь отправляет запрос в систему. Интерфейс пользователя обрабатывает запрос и передает его в систему обработки запросов. Компонент NLP анализирует запрос, определяет намерения и извлекает ключевые слова. База знаний хранит информацию. Модуль обработки запроса выполняет поиск в базе знаний на основе обработанного запроса. Модуль генерации ответа формирует ответ на основе результатов поиска. Модуль обучения обрабатывает обратную связь и обучает модели для улучшения качества ответов.

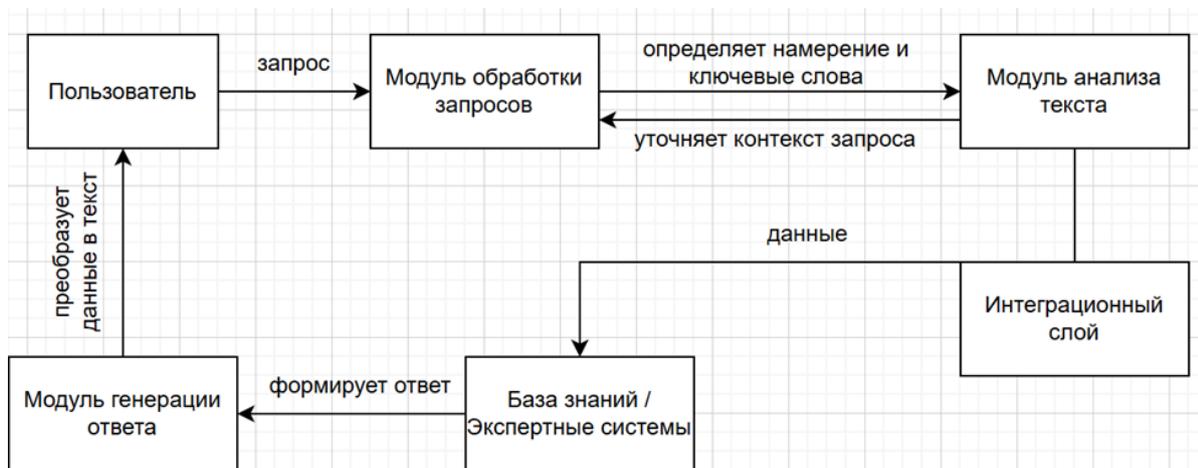


Рис. 1. Схема интеграции элементов ВОС

Схема позволяет представлять архитектуру ВОС и связи между её компонентами. В качестве прототипного программного решения рассмотрим ВОС на основе интеграции вопросно-ответной системы «ТВИН» (англ. «TWIN») и системы поддержки принятия решений BPsim.DSS.

Одной из современных платформ для разработки ВОС является ТВИН, которая предоставляет инструменты для создания интеллектуальных агентов, анализа текста, роботов обзвона, чат-ботов. ТВИН поддерживает [8]:

1. работу с именованными сущностями: выделение ключевых объектов текста, таких как имена, города или события;
2. идентификацию намерений: понимание сути запроса пользователя;
3. понимание и синтез речи.

В качестве ЭС для ВОС выбрана BPsim.DSS. BPsim.DSS поддерживает фреймовую модель представления знаний. Для организации вывода на сети фреймов в BPsim.DSS используется диаграмма поиска решений, построенная на основе диаграммы последовательности языка UML. Сценарии диалогов ВОС могут быть формализованы в виде диаграммы поиска решений или набора таких диаграмм.

Интеграция в ВОС методов анализа текста и фреймовой подсистемы, позволит увеличить гибкость диалогов (за счет сочетания диагностики намерений и сущностей с возможностью завязки на конкретный сценарий и вызова соответствующих присоединенных процедур (демонов) фреймовой системы в зависимости от ситуации). Применения комплексной ВОС прошло на задаче разработки рекомендательной системы подбора квартиры (для агентства недвижимости).

### **Вопросно-ответная система для подбора квартиры**

Цель: реализовать прототип системы, которая помогает пользователям подобрать квартиру, анализируя их запросы и учитывая знания экспертной системы. Распределение функций в комплексной ВОС:

1. экспертная система на базе BPsim.DSS хранит данные о предложениях на рынке жилья города. В качестве визуального конструктора фреймовой сети в BPsim.DSS используется диаграмма классов языка UML (рис. 1);

Фрагмент наполнения фрейм-концепта «Квартира» экземплярами представлен на рис. 2.

Поиск решения в BPsim.DSS может осуществляться в диалоговой подсистеме или путем вызова, соответствующего сценария. Пример выполнения сценария поиска решения в диалоговой подсистеме показан на рис. 3.

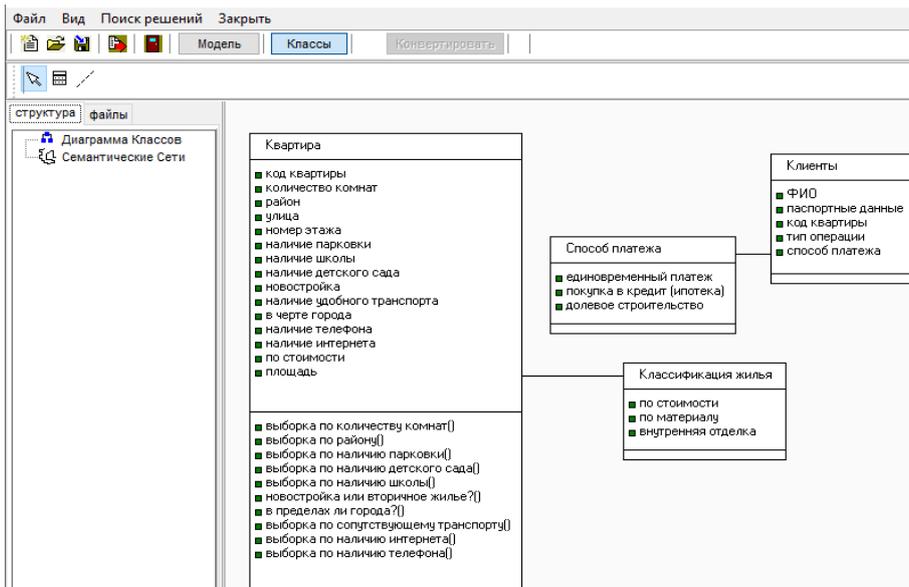


Рис. 1. Фрагмент диаграммы классов для задачи выбора квартиры

Квартира

Свойства

|   | код | количество комнат | район      | улица        | номер этажа | наличие парковки | наличие школы | наличие детского сада | новостройка |
|---|-----|-------------------|------------|--------------|-------------|------------------|---------------|-----------------------|-------------|
| 1 | 1   | 2                 | Ленинский  | Ленина       | 2           | 1                | 1             | 0                     | 1           |
| 2 | 2   | 3                 | ЖБИ        | Красная      | 3           | 1                | 0             | 1                     | 0           |
| 3 | 3   | 4                 | Пионерский | Советская    | 7           | 1                | 1             | 1                     | 1           |
| 4 | 4   | 1                 | ЖБИ        | Темная       | 4           | 1                | 1             | 1                     | 1           |
| 5 | 5   | 5                 | Уралмаш    | Индустрии    | 2           | 1                | 1             | 1                     | 1           |
| 6 | 6   | 3                 | ЖБИ        | Пролетарская | 8           | 1                | 1             | 1                     | 1           |

Добавить Удалить

Рис. 2. Наполнение класса «квартира» экземплярами (фрагмент)

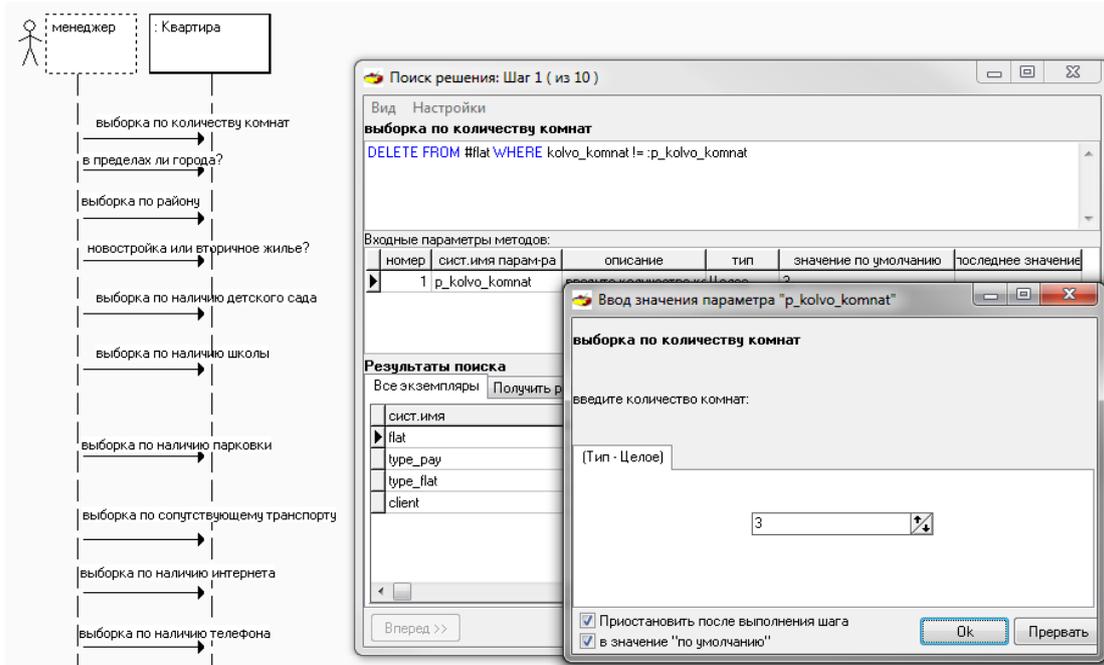


Рис. 3. Выполнения сценария поиска решения в BPsim.DSS

2. анализ текста (NLP) и взаимодействие с пользователем выполняется в системе ТВИН (используется для понимания запросов и извлечения информации из ответов). Окно отладки анализатора текста системы ТВИН с результатами диагностики одного из запросов пользователя представлена на рис. 4.: «Добрый день! Ищу трех комнатную квартиру с отделкой (новую) или в хорошем состоянии, в Кировском районе, ЖБИ, хочу ее приобрести, чтобы были в шаговой доступности садик, школа, порекомендуйте варианты.». Результаты анализа текста: намерения - выбор (покупка) квартиры; сущности: район: Кировский (ЖБИ); состояние квартиры: новостройка / ремонт; доп. параметры запроса: садик и школа рядом;

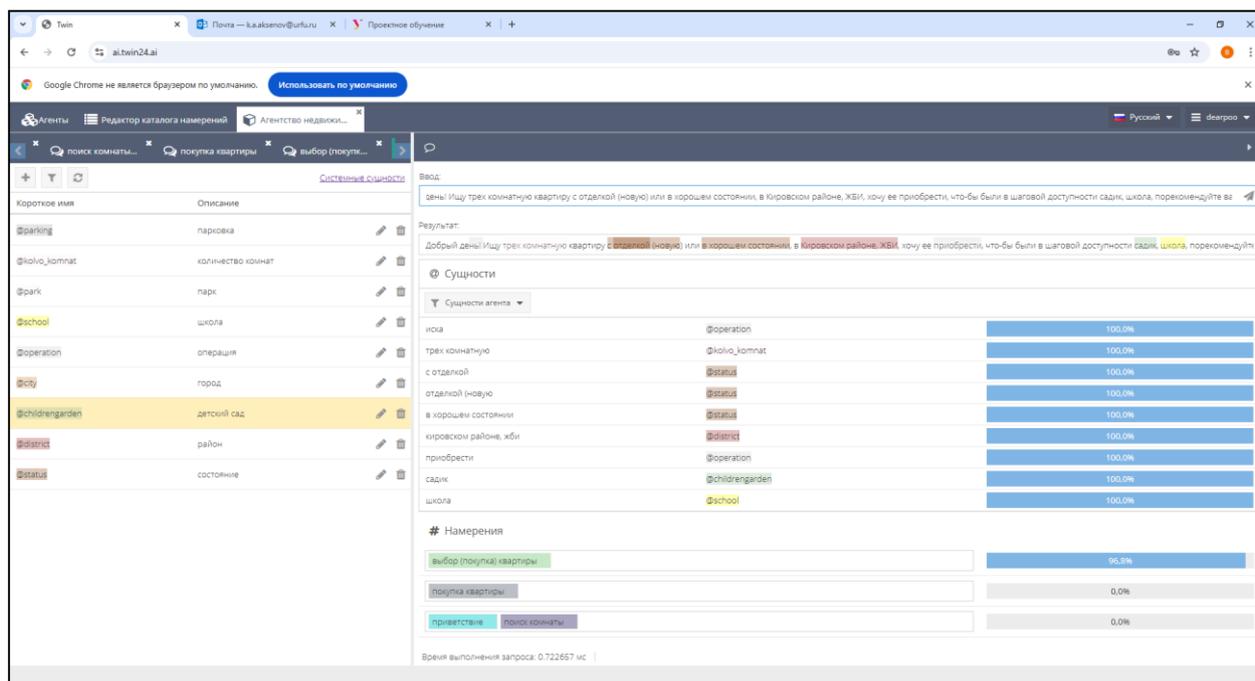


Рис. 4. Веб-интерфейс анализатора текста системы ТВИН

3. управления сценарием диалога возлагается на агента в ТВИН.

Основные этапы работы комплексной ВОС для подбора квартиры следующие:

1. начало запроса в агенте ТВИН (начальная точка, когда пользователь инициирует запрос в системе);
2. обработка текста (запрос проходит обработку с использованием методов NLP, чтобы понять смысл, структуру и параметры запроса);
3. уточнение параметров (система может задать дополнительные вопросы для уточнения требований \ предпочтений пользователя);
4. обращение к ЭС ВРsim.DSS (обработки запроса и поиск решений);
5. анализ вариантов и формирование ответа ЭС;
6. формирование ответа пользователю в ТВИН.

Таким образом, вопросно-ответные системы становятся не просто инструментом поиска, а важным звеном во взаимодействии человека с маши-

ной, открывая новые возможности для бизнеса и науки. Современные технологии, такие как TWIN, позволяют создавать персонализированные решения, улучшая качество взаимодействия с данными. Инновации в этой области продолжают развиваться, превращая системы в интеллектуальных партнеров, а не просто инструменты. Интеграция экспертных систем с анализом текста способствует созданию более точных и эффективных решений, отвечающих на запросы пользователя с учетом контекста, а также предоставляющие результаты найденных решений с их обоснованием.

## Список литературы

1. Рыбак, К. В. Обзор современного состояния интеллектуальных вопросно-ответных систем / К. В. Рыбак, А. В. Кошкарров // Вестник науки. – 2020. – Т. 1, № 6 (27). – С. 202–205.
2. Волкова, И. А. Методы построения вопросно-ответных систем / И. А. Волкова, И. К. Полозов // Синергия наук. – 2018. – № 23. – С. 1355–1364.
3. Ненаусников, К. В. Анализ подходов к созданию базы данных вопросно-ответных систем на основе автоматической обработки естественно языковых текстов / К. В. Ненаусников, С. В. Кулешов, А. А. Зайцева // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 92–100.
4. Фомичев, В. А. Метод формального описания содержания сложных естественно-языковых текстов и его применение к проектированию лингвистических процессов: автореф. дис. д-ра тех. наук: 05.13.11 / Фомичев Владимир Александрович. – М., 2006. – 36 с.
5. Куратов, Ю. М. Специализация языковых моделей для применения к задачам обработки естественного языка: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ю. М. Дмитриева. – М., 2020. – 121 с.
6. Правиков, А. А. Разработка и применение метода формализации проектирования рекомендательных систем с естественно-языковым интерфейсом: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.13.11 / Правиков Алексей Александрович. – М., 2011. – 18 с.
7. Scott, S., Gaizauskas, R. (2000). QA-LaSIE: A Natural Language Question answering system. In: Stroulia, E., Matwin, S. (eds) *Advances in Artificial Intelligence. Canadian AI 2001. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2056. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-45153-6\\_17](https://doi.org/10.1007/3-540-45153-6_17)
8. TWIN: [сайт]. – URL: <https://ai.twin24.ai/> (дата обращения: 20.12.2023).
9. Tarasiev A.A., Filippova M.E., Aksyonov K.A., Talancev E.N. Application of a hybrid speech-recognition post-processing system to improve the quality of decision-making based on phonetic analysis of words and phonemes. ICNAAM 2021. AIP Conference Proceedings 2849, 190002 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0162428> P. 190002-1- 190002-4. P. 190002-1- 190002-4.
10. Tarasiev A., Filippova M., Aksyonov K., Aksyonova O., Antonova, A. Using of Open-Source Technologies for the Design and Development of a Speech Processing System Based on Stemming Methods. IFIP Advances in Information and Communication Technology Volume 582 IFIP, 16th IFIP WG 2.13 OSS 2020; Innopolis; Russian Federation; 12-14 May 2020, 2020. pp.98-105. DOI: 10.1007/978-3-030-47240-5\_10

И.Л. Артемьева, д.т.н., профессор, artemeva.il@dvfu.ru  
А.Д. Сусоева, магистрант, susoeva.ad@dvfu.ru  
Дальневосточный Федеральный университет, г. Владивосток, Россия

## ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ ВОПРОСНО-ОТВЕТНОЙ СИСТЕМЫ ПО МЕЖКУЛЬТУРНЫМ СИТУАЦИЯМ

*Аннотация:* Статья посвящена подходу к решению проблемы формирования обширной базы знаний для вопросно-ответной системы, специализирующейся на межкультурных ситуациях. В работе рассматриваются ключевые аспекты создания и структурирования базы знаний, включающие сбор и обработку информации о различных культурах, формирование сценариев межкультурных взаимодействий. Модель такой базы знаний служит основой для принятия решений и формулирования информативных ответов на запросы пользователей.

*Ключевые слова:* база данных, база знаний, межкультурная коммуникация, LLM.

I.L. Artemeva, Ph.D., professor, artemeva.il@dvfu.ru  
A.D. Susoeva, student, susoeva.ad@dvfu.ru  
Far East Federal University, Vladivostok, Russia

## KNOWLEDGE BASE FORMATION FOR QUESTION-ANSWER SYSTEM ON AN INTECULTURAL SITUATION

*Abstract:* This article focuses on the development of a methodology for constructing a comprehensive knowledge base for a question-answering system (QAS) specializing in intercultural communication situations. The work details key aspects of knowledge base creation and organization, including the collection and processing of data on various cultures, the modeling of intercultural interaction scenarios, and the development of information retrieval mechanisms. The proposed knowledge base model serves as a foundation for system decision-making and the formulation of comprehensive responses to user queries.

*Key words:* Database, knowledge base, intercultural communication, LLM.

В настоящее время межкультурное взаимодействие играет все более значимую роль в свете глобализации и международного обмена. Одной из главных проблем, связанных с межкультурной коммуникацией, являются сложности, возникающие при взаимодействии людей из разных культур [1].

Различия в культурных нормах, языковые барьеры и обычаи могут осложнять общение и приводить к недопониманиям. Именно поэтому данная тематика привлекает внимание и становится объектом научного исследования. Для успешного ведения бизнеса и адаптации к новым культурным средам необходимы инструменты, способные эффективно решать задачи межкультурного взаимодействия [3]. Создание системы, которая позволяет анализировать межкультурные ситуации и отвечать на вопросы пользователя, является путём к упрощению проблемы.

Лучший подход для создания системы - использовать существующую нейросеть-трансформер LLM и дообучить её, основываясь на данных по межкультурной коммуникации [2]. Дообучить модель может RAG (Retrieval Augmented Generation) в связке с базой знаний в качестве обучающего набора данных для тренировки моделей машинного обучения. Это позволяет моделям научиться распознавать паттерны и делать прогнозы на основе доступной информации.

База знаний требуется для обработки широкого спектра вопросов и предоставления актуальных и точных ответов вопросно-ответной системы. Цель Базы знаний решить проблему обработки и хранения информации, для дальнейшего обучения LLM. Главная задача - принятие теории из ресурса (Pdf, docx, html, djvu), перевод в текст и извлечение информации из текста на естественном языке с помощью семантического анализа.

В таком случае база знаний должна быть структурирована с использованием семантических моделей и онтологий. Это позволяет системе понимать семантические связи между понятиями и сопоставлять запросы с соответствующими записями в базе знаний. Например, система использует методы семантического поиска и анализа чтобы найти эквивалентные или связанные термины в базе знаний и вывести ответы на основе сопоставления семантической информации.

С точки зрения общественного производства межкультурные ситуации могут быть поделены на следующие категории (см. рис. 1.).



Рис. 1. Сферы развития межкультурной коммуникации

Каждая категория отображает подсистему базы знаний, которая хранит информацию по конкретной тематике. База данных для базы знаний представляет совокупность таких подсистем и состоит из нескольких таблиц, каждая из которых хранит различные типы проиндексированной информации, полученной в результате семантического анализа.

Подсистемы базы знаний в базе данных включает следующие таблицы:

1. Facts (Факты) - объективные и проверенные утверждения;
2. Concepts (Понятия) - абстрактные идеи или обобщённые представления;
3. Rules (Правила) - инструкции или закономерности;
4. Relations (Взаимосвязи) - связи между различными понятиями, фактами и правилами.

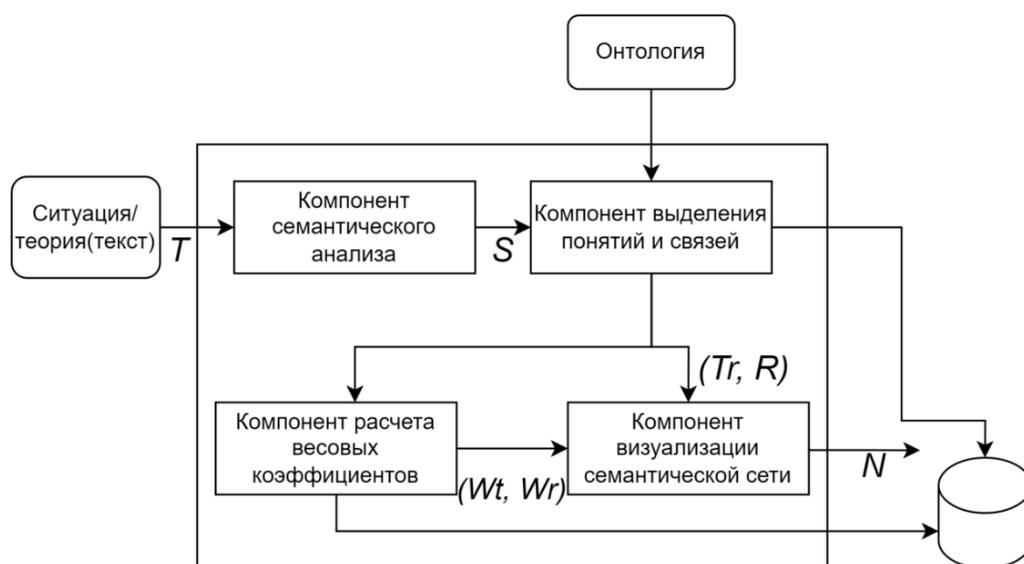


Рис. 2. Схема Базы знаний для семантического анализа

Система базы знаний межкультурных ситуаций представлена кортежем:

$$F = (Ks, Ktr, Kw, Kn).$$

Входные данные:

- текст  $T = \{p_i\}$ , где  $p$  — предложение;
- онтология  $O$ .

Выходные данные:

- Термины, их отношения и веса в базе данных;
- Семантическая сеть  $N$ ;
- Компоненты системы.

Компонент расчета весовых коэффициентов терминов и связей  $Kw$  является ключевым звеном в подготовке данных для передачи в нейросеть LLM. Вес термина  $Wt$  представлен как комбинированная оценка:

$$W_t = \alpha * TF-IDF(t) + \beta * S_c(t) + \gamma * G_c(t) + \delta * E(t),$$

где:

$S_c(t)$  - семантическая релевантность,

$G_c(t)$  - графовая центральность,

$E(t)$  - экспертная оценка,

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  - весовые коэффициенты, начальная оценка важности термина, полученная методом векторизации.

Результаты данной базы знаний можно интегрировать с RAG для поиска релевантной информации и передавать данные модели LLM для дообучения и формирования ответа пользователю.

### Список литературы

1. Бергельсон М. Б. Межкультурная коммуникация, 2008, [https://www.krugosvet.ru/enc/gumanitarnye\\_nauki/sociologiya/MEZHKULTURNAYA\\_KOMMUNIKATSIYA.html](https://www.krugosvet.ru/enc/gumanitarnye_nauki/sociologiya/MEZHKULTURNAYA_KOMMUNIKATSIYA.html).
2. Cloudflare, Inc. How do LLMs work, 2021, 1, pp. <https://www.cloudflare.com/learning/ai/what-is-large-language-model/>
3. Jerome Dumetz & Fons Trompenaars, Charles Hampden-Turner, Meredith Belbin, Juliette Tournand, Peter Woolliams, Olga Saginova, Stephen M. R. Covey, Dean Foster, Craig Storti, Joerg Schmitz: 2012. Cross-cultural management textbook: Lessons from the world leading experts, CreateSpace Publishing, 2012, ISBN 978-1479159680.

**Р.О. Колганов**, студент, ruslanwolk77@gmail.com  
Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия  
**О.П. Чукунов**, студент, faimer15112004@gmail.com  
Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия  
**В.В. Ларионов**, студент, larionov\_v@bk.ru  
Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия  
**Д.Е. Тянь**, студент, dimontkiller@gmail.com  
Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия  
**А.С. Михалев**, инженер-исследователь, asmikhalev@yandex.ru  
Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ КРОВИ ДЛЯ АНАЛИЗА ИММУНОМОДУЛИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ

*Аннотация:* В статье представлена концепция информационной системы классификации крови, основанной на использовании алгоритмов машинного обучения и инструментов визуализации для анализа данных. Подробно описаны архитектура системы и её основные модули. Система обеспечивает высокую точность обработки, предоставляет персонализированные рекомендации и гарантирует безопасность данных, ориентируясь на задачи диагностики, лечения и профилактики.

*Ключевые слова:* анализ крови, иммуномодуляторы, информационная система, классификация данных, машинное обучение, визуализация, диагностика, безопасность данных

**R.O. Kolganov**, student, ruslanwolk77@gmail.com  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia  
**O.P. Chukunov**, student, faimer15112004@gmail.com  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia  
**D.E. Tyan**, student, dimontkiller@gmail.com  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia  
**V.V. Larionov**, student, larionov\_v@bk.ru  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia  
**A. S. Mikhalev**, research engineer, asmikhalev@yandex.ru  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## BLOOD CLASSIFICATION INFORMATION SYSTEM DESIGN FOR IMMUNE MODULATION ANALYSIS

*Abstract:* The paper presents the concept of blood classification information system based on the use of machine learning algorithms and visualization tools for data

analysis. The system architecture and its main modules are described in detail. The system ensures high accuracy of processing, provides personalized recommendations and guarantees data security, focusing on the tasks of diagnosis, treatment and prevention.

*Keywords:* blood analysis, immunomodulators, information system, data classification, machine learning, visualization, diagnostics, data security.

Современная медицина сталкивается с серьёзными вызовами, особенно когда речь идёт о работе с большими данными. В области иммунологии это проявляется наиболее остро, поскольку анализ иммунного статуса пациентов требует учёта множества факторов, таких как уровни цитокинов, состояние клеток-эффекторов, биохимические показатели и другие параметры. Каждый из них связан с другими, и их диагностическая значимость изменяется в зависимости от возраста пациента, наличия хронических заболеваний и текущего состояния организма.

Традиционные методы анализа, основанные на ручной обработке и интерпретации данных, больше не способны удовлетворять потребности современной медицины. Увеличивающийся объём информации делает процесс слишком трудоёмким и подверженным ошибкам. Врачам приходится выбирать: тратить время на анализ или рисковать ошибками в диагнозе. Это обстоятельство подчёркивает необходимость разработки новых инструментов для эффективной обработки и анализа данных.

Одним из таких инструментов становится информационная система, предназначенная для автоматизации анализа крови с учётом иммуномодулирующих факторов. Данная система интегрирует данные из различных источников, проводит их обработку, анализирует взаимосвязи между параметрами и предоставляет врачам готовые рекомендации, основанные на результатах анализа. Такой подход позволяет повысить точность диагностики, ускорить процесс принятия решений и минимизировать влияние человеческого фактора.

Анализ крови остаётся одним из самых информативных методов диагностики в медицине. Однако его сложность заключается в том, что каждый биомаркер сам по себе не даёт полного представления о состоянии организма. Например, повышенный уровень цитокина может указывать на наличие воспалительного процесса, но для определения его природы требуется учитывать другие параметры, такие как уровень клеток-эффекторов, активность ферментов и биохимические показатели.

Кроме того, данные анализа крови часто подвержены влиянию шума, который может возникать из-за ошибок измерения, нестабильных условий хранения образцов или вариативности методик проведения исследований. Это создаёт дополнительные сложности для врачей, которые вынуждены тратить значительное время на интерпретацию результатов, исключение

ложных срабатываний и определение значимых показателей. Такие факторы снижают эффективность диагностики и подчёркивают необходимость автоматизированных систем, способных обрабатывать данные более точно и быстро.

Предлагаемая информационная система для анализа крови решает указанные проблемы с помощью комплексного подхода, объединяющего сбор данных, их предварительную обработку, анализ и генерацию рекомендаций для врачей.

В основе системы лежит трёхуровневая архитектура (см. рис. 1), которая обеспечивает её гибкость, производительность и удобство использования.

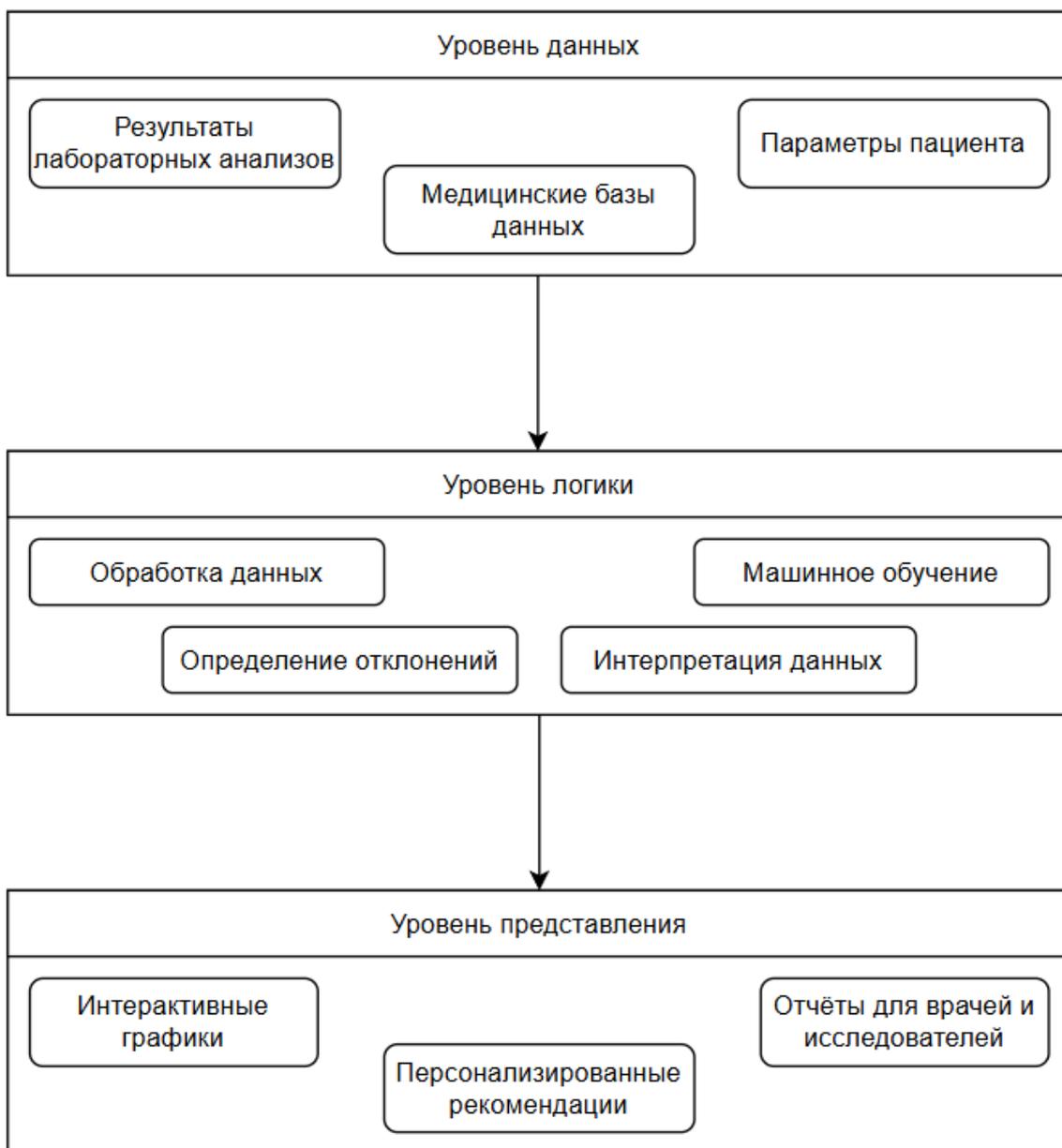


Рис. 1. Архитектура системы

**Уровень данных.** Отвечает за надёжное хранение и управление информацией. На этом уровне происходит интеграция данных из различных источников, включая результаты лабораторных анализов, медицинские базы данных и дополнительные параметры пациента.

**Уровень логики.** Является ядром системы, обеспечивающим обработку и анализ данных. Здесь используются алгоритмы машинного обучения и статистические модели, позволяющие выявлять скрытые закономерности, исключать шум и формировать обоснованные выводы. На этом уровне также реализуются механизмы интерпретации данных, которые делают результаты анализа понятными для медицинских специалистов.

**Уровень представления.** Предоставляет результаты анализа в удобной и наглядной форме. Это могут быть интерактивные графики, структурированные отчёты или персонализированные рекомендации, адаптированные для различных пользователей – врачей, лабораторных специалистов или исследователей.

Благодаря такой архитектуре система обеспечивает высокую точность анализа, минимизирует влияние ошибок и значительно упрощает процесс принятия медицинских решений.

Работа информационной системы для анализа крови включает несколько этапов, каждый из которых направлен на сбор, обработку и анализ данных с последующей генерацией рекомендаций.

**Сбор данных.** На первом этапе система интегрируется с лабораторными информационными системами (например, QMS) и клиническими базами данных. Это позволяет не только получать актуальные результаты анализов, но и использовать исторические данные для построения более полной картины. Например, если пациент проходил обследование несколько месяцев назад, эти данные учитываются при анализе текущих результатов. Такой подход особенно важен для пациентов с хроническими заболеваниями, у которых изменения в организме происходят постепенно.

**Обработка данных.** После сбора данные проходят этап обработки, чтобы привести их к единому формату, проверить на наличие ошибок, пропусков и выбросов, а также приведение к единому формату для корректного анализа. Данные нормализуются и масштабируются, чтобы обеспечить их совместимость и удобство обработки алгоритмами. Устраняются шумы и некорректные значения, а категориальные параметры преобразуются в числовой вид. Дополнительно проводится проверка на сбалансированность данных, удаление избыточных параметров и, при необходимости, создание новых признаков для повышения эффективности анализа. Этот процесс обеспечивает высокое качество и структурированность данных для дальнейшего этапа анализа.

**Анализ данных.** Подготовленные данные передаются в модуль анализа, где используются алгоритмы машинного обучения. Система анализирует взаимосвязи между параметрами, определяет отклонения от нормы и оцени-

вает их влияние на состояние пациента. Используемые методы обеспечивают комплексный подход к анализу, учитывая как линейные, так и сложные зависимости между показателями.

**Генерация рекомендаций.** После анализа система формирует рекомендации для врача. Эти рекомендации основываются на результатах анализа и существующих клинических протоколах. Например, если система обнаруживает признаки воспалительного процесса, она может предложить назначение дополнительных исследований или противовоспалительной терапии. Однако итоговое решение всегда остаётся за врачом, что обеспечивает контроль над процессом и учитывает индивидуальные особенности пациента.

Одной из ключевых особенностей системы является её способность визуализировать данные. Врачи не всегда имеют возможность подробно разбираться в результатах анализа, поэтому система предоставляет результаты в виде графиков, диаграмм и отчётов.

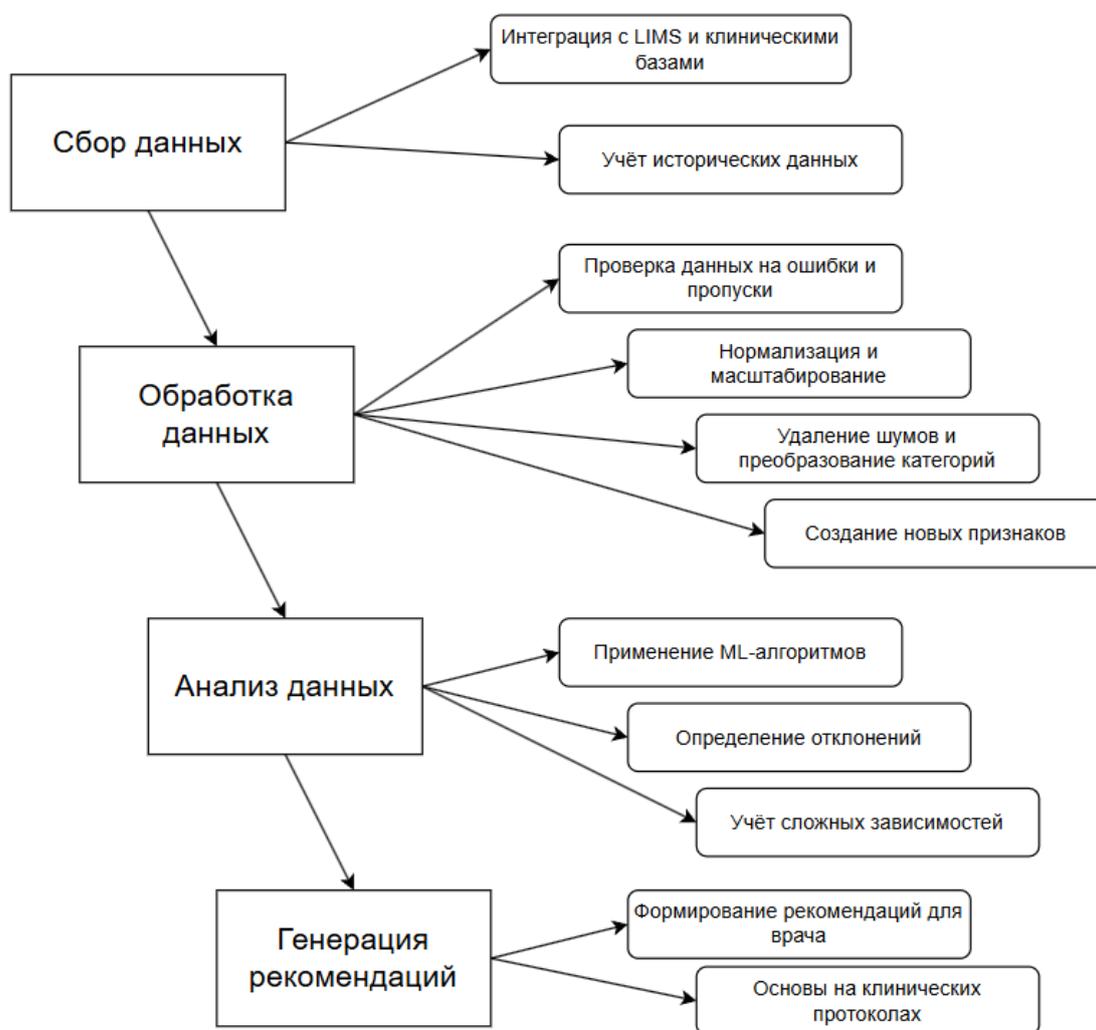


Рис. 2. Блок-схема

Например, врач может построить тепловую карту, которая показывает взаимосвязи между различными биомаркерами. Если определённые показате-

тели отклоняются от нормы, карта выделяет эти изменения, позволяя быстро понять, какие из них требуют внимания. Также система может показывать динамику изменений, что особенно важно для пациентов, проходящих длительное лечение. Линейные графики отображают, как изменялся уровень биомаркеров за последние дни, недели или месяцы.

Эти визуализации помогают врачам быстро оценить состояние пациента и принять обоснованные решения. Вместо того чтобы тратить время на анализ таблиц с результатами анализов, врач может сразу увидеть ключевые изменения и их взаимосвязи, что позволит быстро принять решение по лечению и осмотреть большее количество пациентов.

**Технологии искусственного интеллекта.** Модуль анализа данных использует широкий спектр методов, начиная от классических подходов и заканчивая современными алгоритмами машинного обучения, включая нейронные сети. Каждый из них имеет свои преимущества и применяется в зависимости от характеристик задачи и данных.

**Классические методы машинного обучения.** Эти подходы основаны на использовании простых математических моделей и статистических методов, таких как линейная регрессия, деревья решений и байесовские классификаторы. Они хорошо подходят для задач с небольшим количеством параметров и линейными зависимостями.

**Современные алгоритмы машинного обучения.** Методы, такие как Random Forest и XGBoost, предоставляют более гибкие и мощные инструменты для анализа сложных данных. Они способны работать с большими наборами данных, учитывать нелинейные зависимости и обеспечивать высокую точность предсказаний.

**Нейронные сети.** Эти алгоритмы представляют собой более сложные модели, которые особенно эффективны для работы с временными рядами, многофакторными зависимостями и большими наборами данных. Нейронные сети могут выявлять скрытые паттерны, которые недоступны для других методов, но требуют больше вычислительных ресурсов.

При выборе конкретного метода для решения задач используются следующие критерии:

1. Сложность данных

- Простые зависимости: классические методы.
- Нелинейные зависимости: алгоритмы машинного обучения.
- Сложные и скрытые зависимости: нейронные сети.

2. Размер данных

- Небольшие наборы данных: классические методы или Random Forest.
- Большие данные: XGBoost или нейронные сети.

3. Интерпретируемость

- Высокая интерпретируемость: классические методы, Random Forest.
- Сложные зависимости с низкой интерпретируемостью: нейронные се-

ти.

#### 4. Тип задачи

- Классификация: Random Forest, XGBoost.
- Предсказание временных зависимостей: нейронные сети.

#### 5. Ресурсы системы

- Ограниченные ресурсы: классические методы.
- Доступ к мощным вычислительным ресурсам: нейронные сети.

Информационная система для анализа крови может применяться в самых разных областях медицины. Она особенно полезна в следующих сценариях.

**Диагностика заболеваний.** Система помогает врачам быстрее и точнее определять, какие изменения в иммунном статусе пациента могут свидетельствовать о развитии патологии. Например, она может быть полезна при диагностике воспалительных заболеваний, аутоиммунных процессов или инфекций.

**Мониторинг лечения.** Для пациентов, проходящих терапию, система позволяет отслеживать изменения в их состоянии в более качественной и быстрой форме. Это особенно важно при лечении хронических заболеваний, таких как ревматоидный артрит или воспалительные заболевания кишечника, где иммунный статус пациента может меняться от недели к неделе.

**Профилактика заболеваний.** Анализ данных о состоянии иммунной системы пациента может помочь в выявлении рисков на ранних стадиях, до появления клинических симптомов. Например, система может предложить провести дополнительные исследования для более полной картины состояния для предотвращения осложнений.

Информационная система для анализа иммуномодулирующих параметров крови представляет собой инновационное решение, которое поможет врачам справляться с вызовами современной медицины. Она сочетает в себе передовые технологии обработки данных, алгоритмы машинного обучения и удобные инструменты визуализации. Система обеспечивает не только точный анализ, но и предлагает рекомендации, основанные на клинических протоколах и индивидуальных особенностях пациента.

Перспективы использования таких систем огромны. Они способны не только ускорить процесс диагностики, но и повысить её точность, предоставляя врачам мощный инструмент для работы. Внедрение таких решений в клиническую практику станет важным шагом к улучшению качества медицинского обслуживания и достижению нового уровня персонализированной медицины.

### Список литературы

1. Караулов А. В., Кокушков Д. В. Иммуномодуляторы: классификация, принципы и практика применения // Детские инфекции. – 2007. – Т. 6. – №. 4. – С. 68-70.

2. Шауцукова Л. З. Система группы крови АВ0: генетика, биохимия, физиология //Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2010. – №. 2. – С. 131-133.

3. Хаитов Р. М. Иммуномодуляторы: мифы и реальность //Иммунология. – 2020. – Т. 41. – №. 2. – С. 101-106.

4. Исмаилов И. З., Зурдинов А. З., Сабирова Т. С. Разработка и применение иммуномодуляторов на современном этапе // //Научный журнал. – 2017. – №. 1 (14). – С. 83-87.

5. Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. Инженерия знаний: Учебник. – СПб.: Лань, 2016. – 324 с.

Е.Н. Крючкова, к.ф-м.н., профессор, kruchkova\_elena@mail.ru  
Е.В. Вопилова, аспирант, vopilova.elena@gmail.com  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
г. Барнаул, Россия

## АЛГОРИТМЫ МОДИФИКАЦИИ СЕМАНТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ТЕМАТИЧЕСКОГО ТЕЗАУРУСА ПРИ ОБРАБОТКЕ ТЕКСТОВ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

*Аннотация:* В статье предлагается метод автоматического построения тезауруса научной терминологии, представленного в виде семантического графа. В качестве обучающих текстов использованы предметные тематические энциклопедии. Предложен алгоритм модификации семантических связей построенного тезауруса в процессе обработки частично-структурированных текстов. Представлены результаты работы алгоритмов создания и пополнения тезауруса на примере обработки математических текстов.

*Ключевые слова:* аспектно-ориентированный анализ, научный лексикон, семантический граф, автоматическая обработка неструктурированных текстов

E.N. Kryuchkova, Ph.D., professor, kruchkova\_elena@mail.ru  
E.V. Vopilova, postgraduate student, vopilova.elena@gmail.com  
Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

## ALGORITHMS FOR MODIFYING SEMANTIC RELATIONS OF THEMATIC THESAURUS IN TEXT PROCESSING SCIENTIFIC PUBLICATIONS

*Abstract:* The paper proposes a method of automatic building of scientific terminology thesaurus represented as a semantic graph. Subject thematic encyclopedias are used as training texts. An algorithm for modifying semantic relations of the built thesaurus via the processing partially structured texts is proposed. The results of experiments on creation and modification of thesaurus on the example of processing mathematical texts are presented.

*Key words:* aspect-oriented analysis, scientific vocabulary, semantic graph, automatic processing of unstructured texts

Стремительный рост количества научных публикаций стимулирует развитие инструментария для их автоматической обработки, который должен обеспечивать не только релевантный поиск информации, но и реферирование и аннотирование [1], классификацию и аспектный анализ [2]. При разработке алгоритмов автоматической обработки необходимо учитывать ряд структурных особенностей научных текстов, как синтаксических, так и семантических. Главной особенностью научной терминологии является наличие многословных терминов, в некоторых предметных областях большинство терминологии составляют термины их нескольких слов. При этом в некоторых случаях порядок этих слов может меняться, кроме того, термин может быть использован в усеченной форме.

Наличие адекватной модели представления знаний предметной области является необходимым условием для решения задачи автоматического анализа научных публикаций. В качестве доменного семантического ядра может быть использована формальная онтология предметных знаний [3] или лексический тезаурус [4]. Широко распространение получили графовые модели представления текста [5].

В данной работе предлагается семантическая модель тезауруса научной области, учитывающая не только отношения между научными терминами, но и частотность терминов в научной публикации. В результате экспериментов построен семантический доменный граф «Математика», в качестве источника обучающих данных использована математическая энциклопедия в пяти томах [6]. Предложен алгоритм модификации построенного тезауруса, в результате работы которого возможно как изменение существующих семантических связей, так и пополнение тезауруса новыми терминами и новыми семантическими связями. В качестве обучающих данных используются тексты научных публикаций.

### 1 Семантический граф научной области

В качестве модели представления знаний научной области будем использовать взвешенный ориентированный мультиграф  $G_{domain}=(V, E)$ , вершины  $V$  которого содержат предметные термины, а дуги  $E$  представляют семантические отношения между ними. Между вершинами графа  $G_{domain}$  устанавливаются семантические связи различных типов: родовидовые связи, связи-определения, связи-ассоциации. Вес каждой дуги  $e = (v_1, v_2)$ ,  $e \in E$  определяет семантическую значимость вершины  $v_2$  для соответствующего термина  $v_1$ . Подробно алгоритм построения графа  $G_{domain}$  и способы количественной оценки семантической значимости между научными терминами рассмотрен в [7].

## 2 Алгоритмы пополнения терминологии тезауруса

В процессе эволюции научной области появляются не только новые тематические разделы, но и целые научные направления. Появляется новая терминология, изменяется семантическая нагрузка уже существующих терминов, устанавливаются новые семантические связи и модифицируются некоторые уже существующие связи. База знаний предметной области должна быть пополнена новой информацией, при этом источники новой информации должны быть надежными. В качестве таких источников могут быть использованы научные публикации из рецензируемых изданий в ранжируемых научных издательствах.

Любая научная публикация имеет определенную структуру и порядок изложения материала, что позволяет рассматривать научный текст как слабоструктурированный. Рассмотрим задачу определения новых предметных терминов в процессе обработки текста научной публикации, в качестве новых терминов будем рассматривать перечисленные в статье ключевые слова.

При появлении в тексте анализируемой публикации нового термина  $Y$  в семантический граф  $G_{domain}$  добавляется термин  $Y$  и термины, составленные из подмножества слов термина  $Y$ , которые связываются с  $Y$  родовидовыми связями. Для создания ассоциативных связей термина  $Y$  выделим терминологические кластеры  $C_1, C_2, \dots, C_n$  и определим центроиды каждого кластера  $M_1, M_2, \dots, M_n$ . Значимость ассоциативных связей между ключевым словом  $Y$  и термином  $M_i$  определяется как

$$Z(Y, M_i) = \frac{p(C_i)}{\sum_{i=1}^n p(C_i)} \quad (1)$$

где  $p(C_i)$  – вес кластера  $C_i$ .

В процессе экспериментов была обработана коллекция публикаций научных журналов [8, 9], представлены результаты выделения новых терминов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты пополнения базового семантического графа информацией из текстового корпуса

|  |      |
|--|------|
| Число существующих вершин-кандидатов, переведенных в статус базового термина | 36   |
| Число новых вершин   | 107  |
| Число новых связей   | 4345 |
| – из них связей «часть-целое»  | 2818 |
| – из них связей-ассоциаций   | 1527 |

### 3 Алгоритмы модификации ассоциативных связей тезауруса

При обработке научной статьи может быть найдена более сильная ассоциативная связь между существующими терминами. При построении базового семантического ядра были использованы доверенные источники информации, и одна статья не может значительно изменить вес существующих связей, но может привести к некоторой их модификации.

Пусть  $Z(Y_1, Y_2)$  - вес дуги в графе  $G_{domain}$ ,  $Z_1(Y_1, Y_2)$  – новый вычисленный по формуле (1) вес этой дуги. В случае  $Z(Y_1, Y_2) \geq Z_1(Y_1, Y_2)$ , вес существующей связи не может быть изменен. Если же  $Z(Y_1, Y_2) < Z_1(Y_1, Y_2)$  значимость существующей ассоциативной связи должна быть повышена.

Вычислим относительное среднеквадратичное отклонение

$$d = \frac{|Z(Y_1, Y_2) - Z_1(Y_1, Y_2)|}{Z(Y_1, Y_2) + Z_1(Y_1, Y_2)}$$

и выполним корректировку веса дуги:

$$Z_{new}(Y_1, Y_2) = g(Z(Y_1, Y_2), Z_1(Y_1, Y_2))$$

где

$$g(Z(Y_1, Y_2), Z_1(Y_1, Y_2)) = Z(Y_1, Y_2) + Z_1(Y_1, Y_2) \cdot f(d) \quad (2)$$

Функцию  $f(d)$  определим как

$$f(d) = \frac{d}{\sqrt{2}} = \frac{|Z(Y_1, Y_2) - Z_1(Y_1, Y_2)|}{\sqrt{2} \cdot (Z(Y_1, Y_2) + Z_1(Y_1, Y_2))}$$

Выбранная функция  $f(d)$  удовлетворяет следующим критериям:

1. однократное появление большого значения  $Z(Y_1, Y_2)$  не должно иметь существенного влияния на  $Z_{new}(Y_1, Y_2)$ ;

2. при многократном появлении большого значения  $Z(Y_1, Y_2)$  значение  $Z_{new}(Y_1, Y_2)$  за несколько итераций должно сходиться к  $Z_1(Y_1, Y_2)$ . Фактически это означает, что даже при небольшом начальном весе дуги обработка некоторого количества текстов с высокой значимостью ассоциативных отношений приводит к постепенному повышению веса дуги.

### Заключение

В статье рассмотрены проблемы автоматического построения семантического ядра научной области в виде взвешенного ориентированного семантического графа. В результате экспериментов создан тезаурус математической терминологии, предложены алгоритмы пополнения и модификации по-

строенного доменного графа. Предложенные алгоритмы реализованы на языке программирования Python с использованием библиотеки Natasha [10], которая решает такие базовые задачи обработки естественного русского языка как выделение токенов и предложений, лемматизация, морфологический и синтаксический анализ.

## Список литературы

1. Altmami N., Menai M. Automatic Summarization of Scientific Articles: A Survey // *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2020, v. 34, pp. 1011-1028. DOI:10.1016/j.jksuci.2020.04.020.
2. Berna A, B., Ganiz, M. Semantic text classification: A survey of past and recent advances // *Information Processing & Management*. – Vol.54(6). – 2018. – pp.1129-1153.
3. Клименко С.В., Золотарёв О.В., Шарнин М.М. Использование онтологического подхода для анализа текстов естественного языка, *Сложные системы: модели, анализ и управление*, 2017, №1, С. 67-71.
4. Lakhani S., Jhamb R., Arora M., Kandasamy S. Application of WordNet for Text Analysis in Different Domains, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2020, vol. 9, pp. 774-786. Available at: <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v9i5/E9824069520.pdf>.
5. Belwal R., Rai S., Gupta A. A new graph-based extractive text summarization using keywords or topic modeling // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2021, V. 12.
6. Вополова Е.В., Крючкова Е.Н. Методы автоматического анализа динамики изложения информации в текстах на основе адаптируемых словарей научных терминов // *Программная инженерия*, 2024, т. 15, №4, С. 206-215.
7. Загребина С.А., ред. Вестник Южно-Уральского университета, серия «Математика. Механика. Физика», 2022, т. 14, №2-4. URL: <https://vestnik.susu.ru/mmph/>.
8. Математический сборник: научный журнал, учредитель Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук, 2019. URL: <http://www.mathnet.ru/msb>.
9. Виноградов И.М. (ред.) Математическая энциклопедия в 5 томах, Москва, Сов. Энциклопедия, 1977.
10. Natasha. Tools for Russian NLP: segmentation, embeddings, morphology, lemmatization, syntax, NER, fact extraction. URL: <https://github.com/natasha>.

**Е. А. Созинова**, бакалавр, elizavetasozinova04@gmail.com  
**М. И. Попова**, бакалавр, mar1aaa.popova@yandex.ru  
**А. И. Парфенова**, бакалавр, ann4parfen@yandex.ru  
**А. С. Михалев**, инженер-исследователь, asmikhalev@yandex.ru  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

## **МЕТОДЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗНАНИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КЛЕТОК КРОВИ: РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ**

*Аннотация:* В статье рассматривается использование технологий поддержки принятия решений на основе базы знаний для автоматизации анализа клеток крови, направленное на повышение точности и интерпретируемости диагностических решений. Описаны методы извлечения и структурирования медицинских данных, включая семантические сети и ментальные карты. Особое внимание уделено интеграции базы знаний с моделями машинного обучения для обеспечения объяснимости результатов и повышения доверия со стороны врачей. Предложенная система способствует стандартизации диагностики, снижению числа ошибок и повышению качества медицинских решений.

*Ключевые слова:* анализ клеток крови, поддержка принятия решения, база знаний, машинное обучение, интерпретируемость.

**E. A. Sozinova**, student, elizavetasozinova04@gmail.com  
**M. I. Popova**, student, mar1aaa.popova@yandex.ru  
**A. I. Parfenova**, student, ann4parfen@yandex.ru  
**A. S. Mikhalev**, research engineer, asmikhalev@yandex.ru  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## **KNOWLEDGE FORMALIZATION METHODS FOR AUTOMATED BLOOD CELL ANALYSIS: DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A KNOWLEDGE BASE**

*Abstract:* The article discusses the use of knowledge base-based decision support technologies to automate blood cell analysis, aimed at improving the accuracy and interpretability of diagnostic decisions. Methods for extracting and structuring medical data, including semantic networks and mind maps, are described. Emphasis is placed on integrating the knowledge base with machine learning models to ensure explainability of results and increase physician confidence. The proposed system helps to standardize diagnosis, reduce errors and improve the quality of medical decisions.

*Key words:* blood cell analysis, decision support, knowledge base, machine learning, interpretability.

Процесс анализа клеток играет ключевую роль в современной медицине, являясь основой диагностики множества заболеваний. Однако традиционные методы анализа часто требуют значительных временных и человеческих ресурсов, что ограничивает их эффективность в условиях увеличивающейся нагрузки на систему здравоохранения.

Решением этих проблем может стать использование технологий искусственного интеллекта. Их внедрение позволяет значительно ускорить процесс диагностики, минимизировать влияние человеческого фактора и обеспечить высокую степень стандартизации анализа, что особенно важно для повышения точности и надежности результатов.

На сегодняшний день методы машинного обучения (далее МО) предлагают широкий спектр подходов для решения различных задач в области анализа крови. Методы с учителем (supervised learning) уже зарекомендовали себя в классификации патологий, например, при выявлении анемии на основе уровня гемоглобина или при определении атипичных клеток крови для диагностики онкогематологических заболеваний [1]. Методы без учителя (unsupervised learning) находят применение в анализе скрытых закономерностей, таких как группировка пациентов с похожими клиническими отклонениями, что может быть полезно для выявления новых подтипов заболеваний или предсказания их течения [1].

Особое значение в задачах медицинской диагностики является интерпретация полученного решения (Explainable AI) [2], направленное на объяснение механизмов работы моделей и обоснование их предсказаний. Для врачей крайне важно понимать, какие параметры влияют на постановку диагноза. Например, использование методов интерпретации, таких как SHAP-значения (Shapley Additive Explanations) [2], позволяет определить вклад отдельных факторов (например, уровня гемоглобина или формы эритроцитов) в общий прогноз. Решающие деревья, представляющие последовательность прозрачных решений, также обеспечивают высокий уровень доверия к результатам благодаря их интуитивной понятности.

Несмотря на значительный прогресс, внедрение МО в медицинскую диагностику сталкивается с рядом сложностей. Одной из главных проблем остаётся ограниченная интерпретируемость сложных моделей, таких как глубокие нейронные сети. Высокая точность их предсказаний зачастую сопровождается "чёрным ящиком" принятия решений, что вызывает сомнения у медицинских специалистов. Недостаток объяснимости приводит к снижению доверия к автоматизированным системам со стороны врачей. Это ограничивает их широкое использование в клинической практике, где важна не

только достоверность результата, но и обоснование диагноза, подкреплённое понятными для медицинского специалиста аргументами [2-3].

Для преодоления этих ограничений требуется дальнейшее развитие технологий Explainable AI, которые не только демонстрируют результаты, но и дают их логическое обоснование. Одним из таких решений является интеграция машинного обучения с экспертными системами на основе базы знаний, которая может повысить прозрачность выводов, предоставляя врачам понятные аргументы для принятия решений.

База знаний (далее БЗ) представляет собой эффективный метод структурирования и формализации медицинских данных, предоставляя врачам не только итоговое решение, но и его обоснование. Такой подход делает возможным интеграцию автоматизированных систем в клинический процесс, поддерживая врача в принятии решений. БЗ играют ключевую роль в повышении интерпретируемости нейросетевых моделей. Кроме того, они помогают улучшить точность диагностики за счёт использования структурированных данных, включающих нормы, пороговые значения и связи между различными медицинскими параметрами [4-5].

Применение БЗ для анализа клеток крови особенно полезно в задачах выявления аномалий. Например, если уровень тромбоцитов превышает норму, система может предложить проверить наличие реактивного тромбоцитоза или миелопролиферативных заболеваний [4]. Она также способна связать такие результаты с другими параметрами, например, с повышением уровня лейкоцитов, чтобы уточнить возможные диагнозы [5]. Кроме того, база знаний активно поддерживает процесс принятия врачебных решений, предоставляя не только интерпретацию отклонений, но и рекомендации по следующим шагам. Например, при выявлении высокого уровня лейкоцитов система может предложить провести дополнительные тесты, такие как определение С-реактивного белка или прокальцитонина, чтобы уточнить наличие воспалительного процесса или инфекции. Это позволяет врачам сосредоточиться на более сложных клинических случаях, доверяя системе рутинный анализ данных.

Создание БЗ для автоматизированного анализа клеток крови базируется на строгом процессе формализации, структурирования и представления медицинской информации. БЗ объединяет ключевые данные о параметрах крови, клинических нормах и связанных патологиях, что позволяет поддерживать точность и интерпретируемость диагностических решений.

Процесс построения БЗ начинается с извлечения данных из различных источников, включая клинические рекомендации, научные исследования и экспертные знания. Для этого используются различные подходы, обеспечивающие полноту и точность собираемой информации. **Текстологический метод** предполагает анализ монографий, статей и других материалов для определения ключевых понятий, диагностических критериев и диапазонов норм [4-5]. Этот метод позволяет систематизировать существующие знания и

адаптировать их для дальнейшего использования в автоматизированных системах. **Коммуникативный метод** основан на интервью с медицинскими экспертами, которые уточняют клинические значения параметров, пределы их отклонений и связь с патологиями [4]. Такой подход обеспечивает включение актуальной и практической информации, непосредственно применимой в клинических условиях.

После извлечения знаний данные преобразуются в формализованный вид, что позволяет организовать их в логически структурированную систему. На этом этапе ключевую роль играет **атрибутивное описание**, где каждому параметру крови присваиваются такие характеристики, как нормальные значения, допустимые границы и связь с клиническими состояниями. Например, для **уровня гемоглобина** устанавливаются нормы (120–160 г/л), допустимые отклонения и их клиническая интерпретация. Снижение значений может быть связано с анемией, тогда как повышение – с гипоксемией [5]. Такое структурирование позволяет не только хранить данные, но и использовать их для автоматической интерпретации результатов анализа и формирования диагностических рекомендаций.

Для представления взаимосвязей между параметрами используются **семантические сети**, где узлы и связи отражают отношения между показателями крови и патологиями (рис. 1). Такой подход не только визуализирует данные, но и значительно облегчает их интерпретацию, делая структуру знаний более понятной как для системы, так и для врача.

В дополнение к семантическим сетям разрабатываются продукционные правила в формате «если–то». Например, правило может звучать так: «**Если уровень гемоглобина ниже 100 г/л, то вероятно анемия**». Эти правила автоматизируют процесс диагностики, позволяя системе самостоятельно выдвигать предположения на основе формализованных данных.

Подобная структура данных обеспечивает не только их упорядоченное представление, но и возможность интеграции в систему поддержки принятия решений. Это, в свою очередь, существенно повышает точность анализа и объяснимость выводов, делая автоматизированный процесс диагностики более надежным и прозрачным для врачей [4].

Далее происходит структурирование информации. На этом этапе данные объединяются в единую модель, которая организует параметры крови и их отклонения в логически взаимосвязанную систему, с помощью которой облегчается процесс верификации знаний. Для визуализации используются различные методы. Наиболее подходящими для работы с медицинскими данными являются **иерархическая структура** и **ментальные карты** (рис. 2–3). Иерархическая структура группирует показатели, такие как эритроциты, тромбоциты и лейкоциты, и классифицирует отклонения по степени тяжести и типам патологий [4].



Рис 1. Семантическая сеть



Рис. 2. Иерархическая структура

Ментальные карты отражают возможные причины отклонений и рекомендуемые исследования. Например, при низком уровне гемоглобина карта может указать на железодефицитную анемию и предложить анализ ферритина [5]. Такая структура систематизирует данные, облегчая диагностику и их интерпретацию.

Визуализация с использованием иерархических структур и ментальных карт не только улучшает организацию знаний, но и повышает их доступность для анализа и применения в клинической практике.



Рис. 3. Ментальная карта

Таким образом, реализация экспертной системы включает последовательные этапы, начиная с извлечения и формализации знаний до верификации и интерпретации системы в медицинской практике (рис.4). Использование формализованных подходов и модульной архитектуры обеспечивает не только эффективность разработки, но и гибкость системы. Это позволяет быстро адаптировать её к добавлению новых параметров, обновлению базы знаний или расширению функционала для анализа других медицинских данных. Такой подход делает систему универсальным инструментом, способным поддерживать врачей в различных аспектах диагностики.

Использование базы знаний значительно повышает эффективность работы медицинских систем. Она не только поддерживает высокую точность анализа, но и улучшает интерпретируемость результатов, помогая врачам быстрее и точнее принимать решения. Внедрение таких систем в клиническую практику способствует стандартизации диагностики и снижению вероятности ошибок. Кроме того, интеграция базы знаний с современными предсказательными моделями МО позволяет создать мощный инструмент для медицины [2]. БЗ представляет собой платформу, которая может быть адаптирована для анализа различных параметров крови и других медицинских данных. Её расширение за счёт интеграции с электронными медицинскими картами упростит доступ к данным пациента и позволит использовать их в реальном времени. Это создаст условия для ещё более точной и персонализированной диагностики, делая шаг к следующему поколению медицинских технологий.

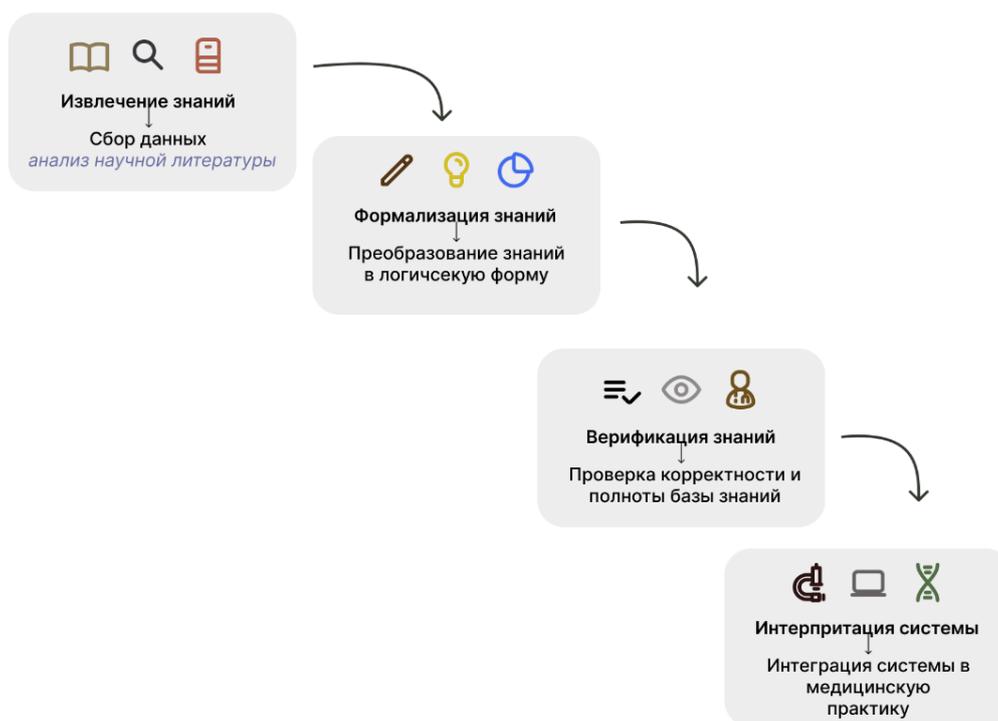


Рисунок 4. Экспертная система

## Список литературы

1. Gruzenkin D.V. The use of a production approach in the development of decision support systems for medical purposes, 2020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1661/1/012039/pdf>
2. Жихарев А.Г., Маторин С.И. Метод формализации организационных знаний // Искусственный интеллект и принятие решений. №2. – 2011. – С. 12-18. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17818796>
3. Попова О.Б. Теория формализации знаний предметной области для поискового исследования // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КУБГТУ". №1. – 2017. – С. 43-53. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29953556>
4. Ковелькова М.Н. Интеллектуальная система для мониторинга риска артериальной гипертензии // Вестник новых медицинских технологий. – Т. 27. - №4. – 2020. – С. 92-97. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44534463>
5. Колыбенко Е.Н. Подходы к средствам искусственного интеллекта в информационной технологии автоматизации подготовки механообрабатывающего производства по всему циклу // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 35-65. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48176188>

## ЗАДАЧА ФОРМАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ УЧАЩЕГОСЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АВ- ТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

*Аннотация:* В статье рассматривается вопрос формирования базы знаний для интеллектуальной автоматизированной обучающей системы, которая содержит данные о моделях поведения учащегося. Источником являются протоколы системы, фиксирующие цифровой образовательный след. Приводится описание того, как результаты формализации модели поведения используются для выработки решений интеллектуальным планировщиком системы. Отмечается роль средств когнитивной визуализации при идентификации модели поведения и её последующего анализа.

*Ключевые слова:* интеллектуальная автоматизированная обучающая система, модель поведения, образовательный цифровой след, база знаний.

V.A. Uglev, Ph.D, docent, uglev-v@yandex.ru  
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

## THE TASK OF FORMALIZING A STUDENT'S BEHAVIOR MODEL FOR FORMING A KNOWLEDGE BASE OF AN INTELLIGENT TUTOR- ING SYSTEM

*Abstract:* The article discusses the issue of forming a knowledge base for an Intelligent Tutoring Systems that contains data on student behavior patterns. The source is the system's protocols that record the digital educational footprint. It describes how the results of the formalization of the behavior model are used to make decisions by the intelligent scheduler of the system. The role of cognitive visualization tools in the identification of a behavior model and its subsequent analysis is noted.

*Key words:* Intelligent Tutoring Systems, behavior model, digital educational footprint, knowledge base.

*Интеллектуальные автоматизированные обучающие системы* (ИАОС) разработаны для того, чтобы реалистично имитировать работу учителя-человека при передаче знаний в системе машина-человек. Это актуально при организации индивидуализированного взаимодействия с учащимся при невозможности организации аудиторного учебного процесса. Данным методом автоматизации учебные заведения зачастую злоупотребляют, т.к. достаточно трудозатратными процессами является организация качественной модели дидактического (учебного) материала, проработка моделей принятия решений интеллектуальным решателем (планировщиком) ИАОС, формирование гибкой обратной связи и пр. В результате формируется электронная среда обучения, которая взаимодействует с учащимся по реактивному принципу и не обладает гибкостью в анализе учебной ситуации. Чего стоит массовое применение LMS Moodle, которую в «ковидные» годы в нашей стране пытались продвинуть в качестве последнего достижения автоматизации. По сути, там остался принцип программированного обучения Скиннера [1,2], в авторских методиках приправленный элементами Data Mining или нейронных сетей [3]. Но что важно в настоящей ИАОС, так это умение системы объяснять свои решения, убедительно их аргументируя, а заодно и мотивируя учащегося к активности в образовательной среде, соответствующей педагогическим воздействиям.

Качество обратной связи с учащимся ИАОС может обеспечить в первую очередь благодаря тому, что корректно «представит» его в рамках модели учащегося. Поэтому целью данной статьи является обрисовка общего контура базы знаний, которая должна отвечать за идентификацию модели поведения учащегося при обучении на базе ИАОС.

### **Источники данных для идентификации модели поведения**

Примерами ИАОС, пытающимися не просто отреагировать на действия учащегося, а сформировать обратную связь, например, являются Г. Рыбина, Р. Brusilovsky, С. Troussas [4-7] и др. Если опираться на модель афферентного синтеза П.К. Анохина [8], то она в основном обуславливает акт принятия решения тремя компонентами: описанием текущей диспозиции (обстановочная афферентация), имеющихся знаний и опыте (память) и образе конечного результата (предвосхищаемой цели). Со стороны ИАОС данный механизм может быть симитирован подсистемой интеллектуального планировщика [9]. Их успех выработки управляющего воздействия во многом зависит от того, как интеллектуальный планировщик «поймет» текущую стратегию действий учащегося.

*Модель поведения учащегося* (МПУ) при работе с ИАОС – это одна их характеристик модели учащегося, которой обучающая система оперирует

при принятии решений и выработке обратной связи. Она разделяется на три уровня:

- тактический – специфика поведения в текущей (сложившейся) учебной ситуации;
- оперативный – специфика поведения в рамках учебного курса;
- стратегический. – специфика поведения в рамках ступени обучения.

Такое деление моделей поведения позволяет работать с целями и предпочтениями учащегося на различных этапах обучения в иерархии дидактической единица/тема – электронный курс – множество курсов/учебный план ступени подготовки. Идентификация (формализация) МПУ базируется на предположении, что исходная модель ученика инициализируется при первой записи на обучения в электронной среде, которая начинается с предъявления личных предпочтений, объявление целей и фиксации исходного состояния овладения дидактически материалом (входной контроль в разрезе знаний и навыков). Тогда индивидуализированные решения ИАОС, доводимые до учащегося в масштабе учебного курса, проявляются как в реакциях интерфейса, так и через диалог методического типа [10] с первых шагов работы в курсе (инициализации). На рис. 1 приведена укрупненная схема работы учащегося в электронном курсе с выходом на диалог. При этом все действия учащегося фиксируются в протоколе работы ИАОС, формируя образовательный цифровой след (ОЦС). Первичными компонентами следа будут являться:

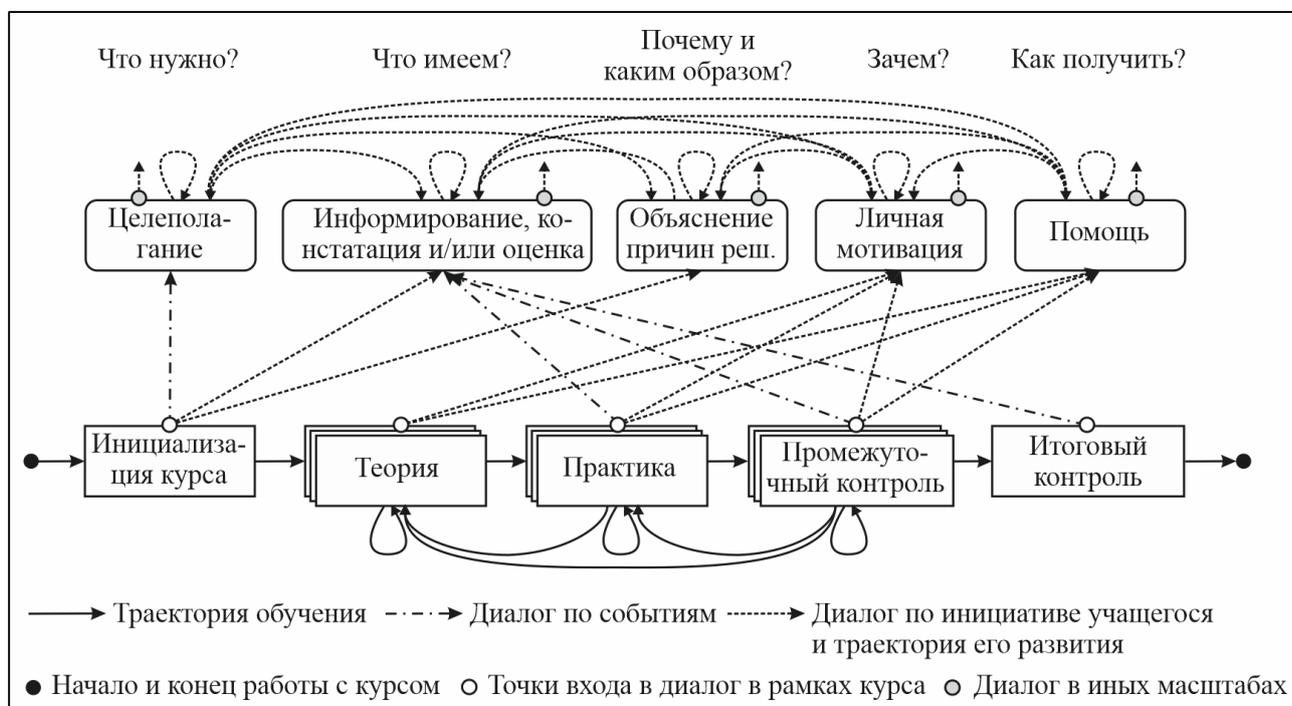


Рис. 1. Схема перехода из электронного курса (нижний ряд) к элементам методического диалога (верхний ряд) [10]

- переходы между элементами дидактического материала в электронных курсах (траектория, активация элементов интерфейса, частотные и временные показатели работы с учебным материалом);

- ответы на задания из контрольно-измерительных материалов (задач, тестов);

- вопросы, задаваемые обучающей системе по инициативе учащегося или как реакция на информирование учеником со стороны ИАОС (траектория диалога, характер ответов, взаимодействие с элементами интерактивной поясняющей визуализации);

- ответы на вопросы анкет и данные из профиля регистрации учащегося (пол, возраст, целевые предпочтения и пр.);

- социальные контакты и оценки со стороны других учащихся и преподавателя (при наличии).

Кроме того, не следует забывать о динамике изменения МПУ и фактах пересмотра целевых показателей учащимся в процессе обучения. Тогда на основании этих данных можно выделить ряд вторичных параметров ОЦС, которые позволят сформировать в первом приближении контур базы знаний об МПУ.

### **МПУ как объект идентификации**

Сформулируем задачу идентификации МПУ для модели учащегося в составе ИАОС. Пусть дан поток событий, формализованный в составе ОЦС. Он формируется сначала на уровне учебного плана, а затем относительно каждого учебного курса. Собственно, параметры учащегося нам известны либо непосредственно от самого человека (они сообщены в анкетах и могут не соответствовать действительности), а могут быть зафиксированы опосредованно через реакции на те или иные воздействия. В такой ситуации задача идентификации модели опирается на *параметрическую модель*, значения которой следует прояснить в ходе накопления эмпирических данных [11]. Таким образом получается множество латентных параметров [12], приближенно описывающих сложный объект (нашего учащегося). Единой красивой формулой, которую можно использовать для предсказания поведения объекта или выработки оптимальных решений, данная модель описываться не будет. Такая постановка задачи приводит к необходимости задать структуру МПУ и определить методы её обработки для применения в ИАОС. Рассмотрим эти задачи в первом приближении. На рис. 2 приведена упрощенная ментальная карта с данными об МПУ, которая должна формировать не только часть модели ученика, но и определить особенности базы знаний обучающей системы.

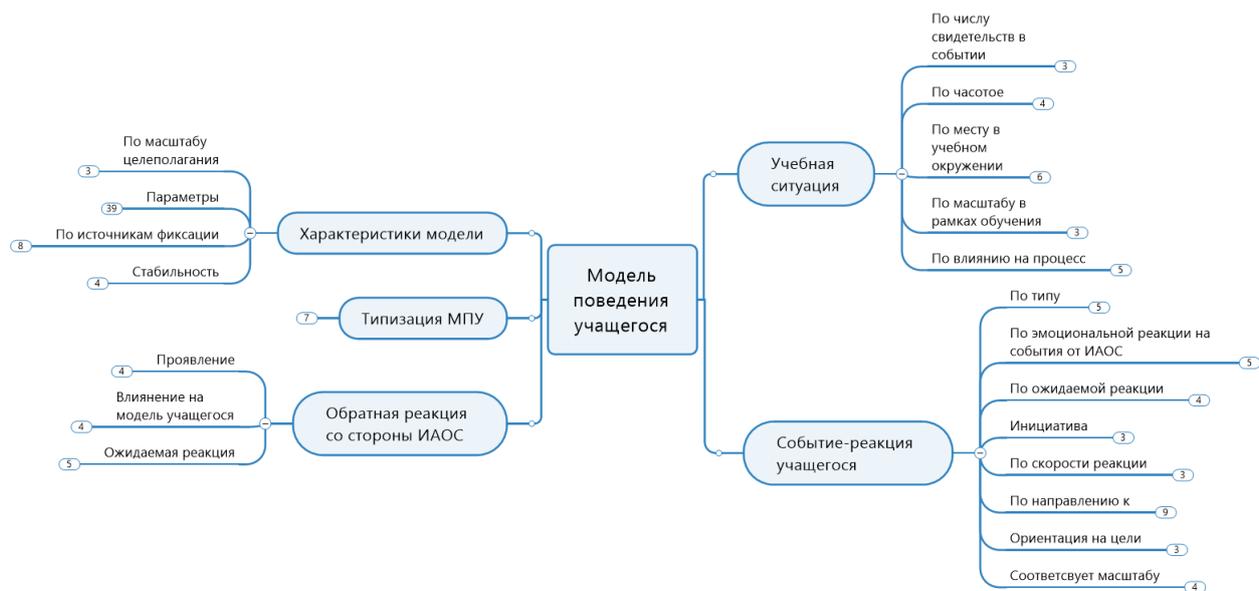


Рис. 2. Ментальная карта данных об МПУ для ИАОС

Данные с рис. 2 показывают разнообразие аспектов, которые следует учитывать при формировании правил базы знаний. Более подробная детализация блока с параметрами (как характеристик модели МПУ) представлена на рис. 3. Не имея целью подробно описать сами модели поведения, мы всё же отметим, что они могут быть не эквивалентны для тактического, оперативного и стратегического уровней.

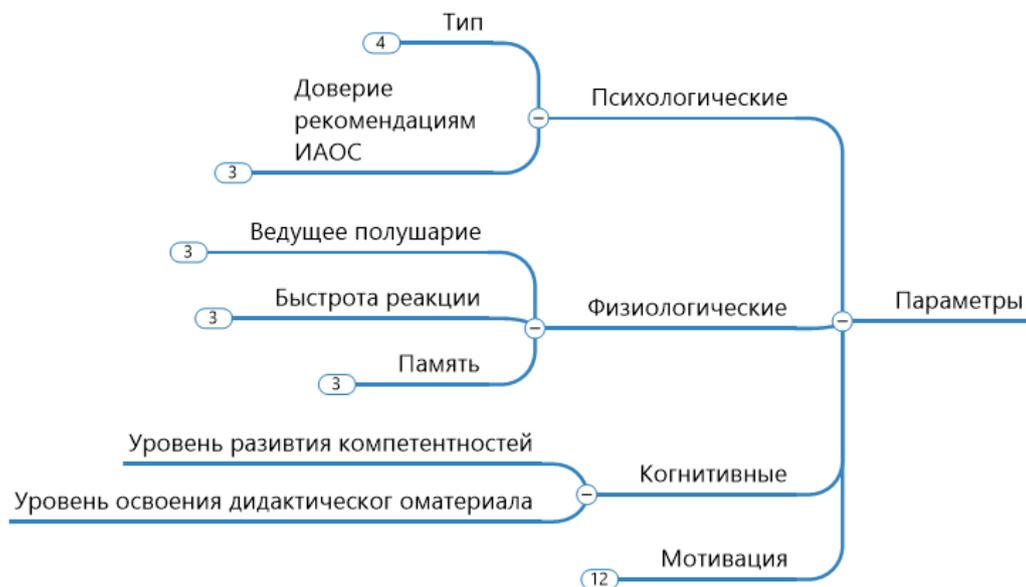


Рис. 3. Фрагмент ментальной карты с группами параметров МПУ

### База знаний для обработки МПУ

Например, если учащийся бегло просматривает дидактический материал, вместо вдумчивого чтения, то это может обозначать не только его безразличие к предмету или спешку к открытию следующей порции материала (от-

рицательный посыл), но и возможность спланировать время на дальнейшее изучение, ознакомиться с неизвестными терминами, освежение в памяти ранее известного материала или поиск определенного фрагмента информации (положительный посыл). Проверка каждой из гипотез при выборе модели МПУ будет предполагать всесторонний анализ учебной ситуации и формирование самостоятельных решений для каждого уровня при формировании комплексной обратной связи.

*База знаний*, согласно определению из [13], это ядро рекомендательной (экспертной) системы, содержащей совокупность знаний о предметной области и хранящейся в памяти интеллектуальной системы в форме, понятной эксперту и пользователю. Она не ограничивается перечислением концептов, предполагая наличия процедурного слоя (совокупности правил). Инициализируясь на определенные события и следуя логике эксперта, правила позволяют не просто проверять гипотезы, а формировать решения ИАОС и давать поясняющие ответы.

Воспользуемся композицией параметров из МПУ для проверки гипотез относительно результативности использования тех или иных стратегий формирования педагогического воздействия на учащегося. Если совокупность исходных параметров, прошедших (при необходимости) статистическую концентрацию, обозначить через  $D$ , множество гипотез о проявлении различных моделей поведения учащихся  $B$ , то решение системы о характере обратной связи  $u$  и его аргументация  $\lambda$  будут получены через отображение (1).

$$B(D_t) \rightarrow \langle y_j, \lambda \mid b_i \rangle, \quad (1)$$

где  $t$  – идентификатор времени, для которого происходит оценка учебной ситуации;  $i$  – идентификатор текущей МПУ, применяемой учащимся;  $j$  – идентификатор актуальной реакции ИАОС. Анализ текущей  $D$  (параметрической карты) для отображения к решению  $y_j$  опирается на дерево решений, реализуемое в виде совокупности продукционных правил с элементами фазификации (пример см. в [14]). Учет согласованности параметров МПУ позволит рассчитать коэффициент уверенности в выводах интеллектуального решателя. В дальнейшем эту цепочку «рассуждений» можно будет дополнить анализом прогнозируемого поведения.

Для упрощения концентрации данных в  $D_t$  мы используем механизм когнитивной визуализации, отображая на *когнитивной карте диагностики знаний* [15] наиболее значительные данные об учебной ситуации и давая возможность учащемуся провзаимодействовать с ней (сквозной подход). В результате формируется дополнительный набор данных о реакциях учащегося и возможность пояснить решения ИАОС.

## Заключение

В процессе работы интеллектуального решателя ИАОС не только актуализируется содержание самой модели учащегося, но и постоянно проверяется текущая модель поведения. Первичные данные берутся из образовательного цифрового следа и преобразовываются: сначала через статистическую концентрацию, затем в метрическую (картирование), и только после этого происходит их обработка в базе знаний (фашификация, логическая и X концентрация). Фрагмент базы знаний ИАОС, посвященный МПУ, хоть и является второстепенным для функционирования всей обучающей системы, но играет важную роль для качественной индивидуализации решений и выработке обратной связи. Подробнее о технологии такой обработки знаний (сквозной подход) см. в работе [16].

## Список литературы

1. Skinner B.F. Programmed instruction revisited // *Phi Delta Kappan*, 68(2), pp. 103-10.
2. Беспалько В.П. Программированное обучение. Дидактические основы. – М.: 1970. – 300 с.
3. du Boulay B., Mitrovic A., Yacef K. (Eds.) *Handbook of Artificial Intelligence in Education*. UK, Edward Elgar Publishing, 2023. – 696 p. <https://doi.org/10.4337/9781800375413>
4. Машбиц Е.И., Андриевская В.В., Комиссарова Е.Ю. Диалог в обучающей системе. К.: Выща. шк., 1989. – 184 с.
5. Рыбина Г.В. Интеллектуальные обучающие системы на основе интегрированных экспертных систем: учеб. пособие. – М.: Директ-Медиа, 2023. – 132 с.
6. Brusilovsky P. AI in Education, Learner Control, and Human-AI Collaboration // *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. – 2023. – vol. 34. – pp. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s40593-023-00356-z>
7. Troussas C., Krouska A. Path-based recommender system for learning activities using knowledge graphs // *Information*. – 2022. – vol. 14(1). – pp. 1-9. <https://doi.org/10.3390/info14010009>
8. Анохин П.К. Очерки по физиологии функциональных систем. – М.: Медицина, 1975. – 448 с.
9. Углев В.А. Применение принципов теории функциональных систем П.К. Анохина для симуляции процессов принятия решений (на примере обучения) // *Робототехника и искусственный интеллект: Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием*. - Красноярск: Монография, 2014. - С. 176-182.
10. Uglev V. Explanatory didactic dialogue in the Intelligent Tutoring Systems based on the cross-cutting approach // *Intelligent Tutoring Systems*. LNCS, vol. 13891. Springer, Cham. 2023. pp. 371-380. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32883-1\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32883-1_34).

11. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: Институт математики, 1999. – 270 с.
12. Дроздов В.И., Бойков А.В., О.В. Свойства некоторых оценок латентных переменных. Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Информатика и информатизация образования. – 2006. – №7. – С. 238-239.
13. Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. Инженерия знаний. Модели и методы: учебник. – СПб.: Лань, 2016. – 324 с.
14. Uglev V.A. Implementation of Decision-Making Mechanism in the Intelligent Tutoring System Based on the Expert Systems Module // Pattern Recognition and Image Analysis, 2024, Vol. 34, No. 3, pp. 744–750. <https://doi.org/10.1134/S1054661824700615>
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 (NiDS 2024). NiDS 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1170. Springer, Cham. 2023. pp. 594–605. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-73344-4\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-031-73344-4_51)
16. Uglev V., Gavrilova T. Cross-Cutting Visual Support of Decision Making for Forming Personalized Learning Space // Novel & Intelligent Digital Systems: Proceedings of the 2nd International Conference (NiDS 2022). NiDS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 556. Springer, Cham. 2022. pp. 3-13. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17601-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17601-2_1)

В.А. Углев, к.т.н., доцент, uglev-v@yandex.ru  
Сибирский федеральный университет, лаборатория прикладных  
интеллектуальных систем, г. Железногорск, Россия

## РАЗЛИЧИЯ В ПОДХОДЕ К ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗНАНИЙ И.А. УЁМОВА И Д.А. ПОСПЕЛОВА НА ПРИМЕРЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К НАДЁЖНОСТИ

*Аннотация:* В статье рассматривается проблема формализации знаний о процессе проектирования и подготовки конструкторско-технологической документации при промышленном изготовлении сложных технических объектов ответственного назначения. Обсуждаются подходы А.И. Уемова и Д.А. Поспелова. В качестве базового подхода к формализации задачи выбран «конструкторско-технологический анализ надёжности» (КТАН). Делается сравнение возможностей различных методов представления знаний для нужд интеллектуальных систем проектирования. Отмечаются перспективы применения в составе цифровых двойников механизма онтологий, фреймов и рекомендательных систем.

*Ключевые слова:* сложный технический объект, проектирование, конструкторско-технологический анализ надёжности (КТАН), база знаний, прикладная семиотика.

V.A. Uglev, Ph.D, docent, uglev-v@yandex.ru  
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

## DIFFERENCES IN THE APPROACH TO THE FORMALIZATION OF KNOWLEDGE BETWEEN I.A. UEMOV AND D.A. POSPELOV ON THE EXAMPLE OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS WITH HIGH RELIABILITY REQUIREMENTS

*Abstract:* The article considers the problem of formalizing knowledge about the process of designing and preparing design and technological documentation for the industrial preparation of complex technical objects for responsible purposes. The approaches of A.I. Uemov and D.A. Pospelov are discussed. The "design & technology reliability analysis" (DTRA) was chosen as the basic approach to formalizing the problem. A comparison is made between the possibilities of different methods of knowledge representation for the needs of intelligent design systems. The prospects of using the mechanism of ontologies, frames and recommendation systems as part of digital twins are noted.

*Key words:* complex technical object, design, design & technology reliability analysis (DTRA), knowledge base, applied semiotics.

## **Введение**

Процесс проектирования сложных технических объектов (СТО) уже давно является объектом автоматизации. Отдельным направлением в этой области являются интеллектуальные системы проектирования [1]. Пока в приоритете стоит экономическая целесообразность, то промышленное производство СТО опирается на необходимость удешевления. Но если создаётся высокотехнологичная продукция, имеющая высокие требования к срокам функционирования и надёжности, то качества следует добиваться за счёт смещения трудозатрат на ранние фазы проектирования. Это может быть и не всегда экономически целесообразно, но в большинстве случаев оправдывает себя [2, 3]. Как правило, такой подход целесообразен для изделий класса Space&Military и предполагает специфику в формализации знаний об объекте проектирования.

Существует ряд подходов к описанию СТО как объекта проектирования. В нашей стране даже есть отдельное издание, посвящённое интеллектуальным системам проектирования (ИСП): журнал «Онтология проектирования» ([https:// journals.ssau.ru/ontology](https://journals.ssau.ru/ontology)). Как показывает практика, подавляющее большинство подходов в ИСП базируются на моделях знаний, детально формализующих описание СТО. При этом следует помнить, что внутри такой системы может быть «защита» любая логика, но при изготовлении элементов изделия исполнители будут оперировать только конструкторско-технологической документацией. Поэтому создание баз знаний для проектирования СТО важно не только реализовать как этап принятия решений, но и как источник для синтеза непротиворечивых проектных документов [3].

Целью данной работы является рассмотрение проблемы формализации знаний для принятия конструкторско-технологических решений при проектировании СТО на базе двух подходов, предложенных А.И. Уёмовым и Д.А. Поспеловым (на примере подхода КТАН).

### **Компоненты описания СТО по Уёмову**

Формализация объектов может носить как структурный, так и функциональный характер. Проектирование специфично тем, что обязано рассматривать диалектическое единство этих описаний не только как готового изделия, но и в процессе его синтеза [4]. Опираясь на работы Аристотеля, советско-украинский учёный Авенир Иванович Уёмов (1928-2012 гг.) предложил брать за основу триаду *вещь-свойство-отношения*. В своей книге «Вещи, свойства и отношения» (1963) он подробно описывает онтологические и ло-

гической аспекты представления знаний об объектах, выделяя в отдельную категорию свойства (но не впадая в атрибутивизм) [5].

Если обратиться к вопросу о надёжных изделиях, проектирование которых должно опираться на формализованные знания об объекте проектирования, то подход Авенира Ивановича позволяет сформировать непротиворечивую систему соответствующих моделей. Например, в работах по конструкторско-технологическому анализу надёжности Ю.П. Похабов рассматриваем отношения в модели Уёмова «как взаиморасположение, взаимосвязь и взаимодействие вещей при определении свойств» [3]. Проектирование СТО, в таком случае, будет включать следующие этапы [6]:

1. анализ и инициализация;
2. оценка теоретической надёжности;
3. анализ соответствия;
4. оценка рисков;
5. итоговая оценка надёжности.

Такой подход получил название «конструкторско-технологический анализ надёжности» (КТАН). Чем он интересен? Во-первых, он позволяет обеспечить высокую степень формализации процесса проектирования, опираясь на различные типы моделей. Во-вторых, он оперирует надёжностью СТО с позиции рациональной организации конструкторско-технологических процессов (усиление требований к процессам и характеристикам изделий). В-третьих, данный подход может быть включен в логику ИСП. Последний пункт вызывает сложности, в связи с тем, что модели, которыми оперирует проект СТО в подходе КТАН, не объединяются в единый «механизм» кроме как в голове проектировщика. Это связано не только с ограничениями подхода Уёмова на формализацию описания объекта проектирования, а с необходимостью подходить к решению задачи с позиций инженерии знаний.

### Модель Поспелова и её развитие

Описание сложных объектов и систем волновали не только Аристотеля и Уёмова. Гносеология, как система знаний о познавательной деятельности, многократно в истории человечества подводила инженеров к этой проблеме. А так как ни одна научная область не стоит на месте, то моделей формализации объектов появилось достаточно много. Основой стал треугольник Фреге (триада *знак-смысл-значение*, см. рис. 1а), а его модификации (треугольник Ордена-Ричардсона, треугольник Морриса и пр.) легли в основу такой научной дисциплины, как *семиотика*. В её основе лежит предположение, что любой сложный объект можно описать в трёх планах – *семантике-синтактике-прагматике* [7]. Семантика, если упрощенно, оперирует смыслами, синтактика – структурой, прагматика отвечает за функционирование и целеполагание. Если проводить параллели с моделью Уёмова, то вещи и свойству соот-

ветствует синтактика, отношениям соответствует часть семантики, а прагматический аспект остаётся проявлен в минимальной форме.



Рис. 1. Представления сущностей в прикладной семиотике

Дополнительным толчком для использования семиотики стало развитие систем искусственного интеллекта и инженерии знаний. Появились интеллектуальные системы поддержки принятия решений и ИСП. Развивая теорию семиотики, советско-российский учёный Дмитрий Александрович Поспелов (1932-2019 г.) предложил кибернетическую интерпретацию данной теории, назвав его *прикладной семиотикой* [8]. Рассмотрим два понятия, которые будут важны в контексте тематики проектирования надёжных СТО: денотат и квадрат Поспелова.

Описание объектов, их функционирования и использования опирается на обезличенную ментальную сферу: в такую модель сложно вклинить непротиворечивое представление об отдельных экземплярах объектов и конкретных значений их свойств. Разрешение этой проблемы было достигнуто за счёт введения дополнительной сущности – *денотата*. По сути, это конкретный представитель (экземпляр) того гипотетического объекта, для которого стандартная семиотическая модель позволяет сделать типовое описание (см. рис. 1б). Множественность представления – вот то, что дало это нововведение.

*Квадратом Поспелова* была названа дальнейшая модификация триады, когда четвертая компонента (вершина квадрата) стала интерпретироваться как метаяровень описания (см. рис. 1в). Он дает возможность не только рассмотреть денотат с различных точек зрения, но и сымитировать функцию рефлексии [9]. Для алгоритмов искусственного интеллекта это возможность осуществить не только более качественное описание, но и осуществить автоматическую проверку гипотез.

Если применить подход прикладной семиотики к процессу проектирования СТО, то получается, что инженер по знаниям, совместно с экспертами, должны осуществить следующую последовательность работ:

1. сформировать концептуальную схему объекта проектирования и самого процесса проектирования с позиции конструкторско-технологического обеспечения (первое приближение семантики, синтактики и прагматики);

2. описать знания экспертов о процессах, проявлении свойств СТО, их обеспечении, проверке и документировании в виде базы знаний (дополнение триады и проработка денотата);

3. сформировать дополнительные фрагменты базы знаний, которые отражают различные «точки зрения» на те проблемные аспекты функционирования и проектирования СТО, которые предполагают многовариантность проработки (например, в рамках подхода КТАН, но в интерпретации квадрата Пospelова);

4. подготовить модели (цифровые двойники) и интеллектуальный решатель, позволяющий реализовать полноценную интеллектуальную систему поддержки принятия решений или ИСП.

Данная последовательность работ носит укрупненный характер, т.к. на прямую зависит от того, каким методом искусственного интеллекта будет решаться задача проектирования, что, в свою очередь, определит то, каким методом нужно представлять знаний в базе знаний ИСП. Но такой взгляд на проблему предполагает, что моделей много, их результаты нужно согласовывать и вызывать по обстоятельствам, а не по «жесткой» схеме рассуждений.

### **От моделей представления знаний к базам знаний в ИСП**

Формализация знаний в ИСП базируется на методах нисходящего искусственного интеллекта [10], позволяющих не только в явном виде описывать объекты, но и реализовывать механизм объяснения предлагаемых решений. Поэтому методы Data Mining, все типы нейронных сетей и эволюционных вычислений (всё это методы восходящего искусственного интеллекта) не могут быть реализованы в качестве ведущих механизмов. Из наиболее развитых нисходящих подходов можно выделить рекомендательные системы (на базе продукционных правил и с доской объявлений) и весомые онтологии [11]. В любом из этих подходов потенциально можно вызывать внешние модели (передавать параметры и получать результаты моделирования, если это предусмотрено API вычислительных сред). Это позволяет сравнить наиболее значимые методы представления знаний [12] (прочие методы, типа нечёткой логики, рассматриваются как вспомогательные) относительно использования подходов Уёмова и Пospelова. В таблице 1. приведены основные методы представления знаний в базах знаний, где значком «V» обозначена возможность реализации данного аспекта описания, «~» показывает частичную возможность (с ограничениями), а «—» - отсутствие полноценной реализации.

Если подойти с прагматической точки зрения, то очевидно, что метод онтологий хорош тем, что может включать в себя любой другой тип представления знаний (не обязательно реализованный на языке типа OWL). Аналогичным образом можно работать и с логикой предикатов – это полноценный язык представления знаний. Но они оба сложны для реализации полноценной ИСП. Методы семантических сетей и сценариев достаточно

ограничены в своих возможностях. Что касается коллекций продукционных правил, то они не закрывают всех потребностей проектирования и должны сочетаться с другими подходами. Достаточно перспективным является метод представления знаний фреймами: собственно, на него и выходит прикладная семиотика, переходя в последствии к абстракции знака-фрейма, экзофрейма и протофрейма [13, 14].

Таблица 1. Сравнение элементов формализации знаний об СТО различными методами представления знаний

|                   | Весомые онтологии | Продукционные правила | Фреймы | Семантические сети | Сценарии | Логика предикатов |
|-------------------|-------------------|-----------------------|--------|--------------------|----------|-------------------|
| <i>Вещь</i>       | V                 | —                     | V      | V                  | ~        | V                 |
| <i>Свойство</i>   | V                 | ~                     | V      | ~                  | ~        | V                 |
| <i>Отношения</i>  | V                 | V                     | V      | ~                  | ~        | V                 |
| <i>Семантика</i>  | V                 | V                     | V      | ~                  | V        | V                 |
| <i>Синтактика</i> | V                 | —                     | V      | V                  | ~        | V                 |
| <i>Прагматика</i> | V                 | V                     | V      | ~                  | ~        | V                 |
| <i>Денотат</i>    | V                 | ~                     | V      | ~                  | V        | V                 |

Собственно, сама ИСП реализуется как при наличии встроенного или внешнего ядра моделирования, так и при адекватной архитектуре решателя, опирающегося на выбранный тип базы знаний. Практика показывает, что именно онтологии и экспертные (рекомендательные) системы с доской объявлений позволяют в своем функционале охватить все компоненты формализуемой задачи проектирования. При этом разные подходы (Уёмова в меньшей степени, а Поспелова в большей) могут быть положены в основу синтеза проектно-технологической документации. В ряде случаев можно использовать специальные системы для изделий ответственного назначения. Например, в системе [15] заложена база знаний на онтологиях, обрабатываемой экспертной системой с доской объявлений. Но для такого подхода как КТАН требуются самостоятельные программные решения.

## Заключение

Оба рассмотренных подхода (И.А. Уёмова и Д.А. Поспелова) к формализации объекта проектирования и синтеза проектно-технологической документации с разной результативностью могут быть положены в основу интеллектуальной системы проектирования. Специфика подхода КТАН не позволяет использовать существующие программные решения, что ставит перед проектировщиками надёжных изделий ответственного назначения задачу создания специфической базы знаний, а перед разработчиками ИСП – создание нового типа систем.

## Список литературы

1. Евгеньев Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования: учеб. пособ. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 410 с.
2. Левенчук А. Онтологическая инженерия в помощь системной инженерии [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://ailev.livejournal.com /975466.html>.
3. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 338 с.
4. Углев В.А. Актуализация содержания стандартов проектирования сложных технических объектов: онтологический подход // Онтология проектирования. – 2012. – №1(3). – С. 80-86.
5. Уёмов А.И. Вещи, свойства и отношения. – М.: АН СССР, 1963. – 184 с.
6. Похабов Ю. П. Проектирование сложных изделий с малой вероятностью отказов в условиях Индустрии 4. 0 // Онтология проектирования. – 2019. – №1 (31). – С. 24-35.
7. Лотман Ю. М., Лотман М. Ю. Семиосфера. – СПб.: Искусство-СПБ, 2000. – 704 с.
8. Поспелов Д.А., Осипов Г.С. Прикладная семиотика // Новости искусственного интеллекта. – 1999. - №1. – С. 9-35.
9. Осипов Г.С. От ситуационного управления прикладной семиотике// Новости искусственного интеллекта. – 2002. – № 6. – С. 3-7.
10. Copeland J. Artificial Intelligence: A Philosophical Introduction. – Blackwell, 1993.
11. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
12. Углев В.А. Подходы к организации логики работы моделей цифровых двойников изделий ответственного назначения // Преподавание информационных технологий в Российской Федерации: Материалы XXII Всероссийской конференции. - Тверь: ТГУ, 2024. - С. 399-400.
13. Найханова Л.В. Технология создания методов автоматического построения онтологий с применением генетического и автоматного программирования: монография. – Улан-Удэ, Изд-во БНЦ СО РАН, 2008. – 244 с.
14. Углев В.А. Представление учебной ситуации в интеллектуальных автоматизированных обучающих системах с позиций прикладной семиотики // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. - Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2022. – С. 76-83.
15. Лахин О. И. и др. Теория сложности и проблема управления жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности // Информационно-управляющие системы. – 2015. – №. 1 (74). – С. 4-12.

## *Секция 4*

# **МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

К.В. Васькин, магистрант, vkv777a@yandex.ru  
К.А. Аксенов, к.т.н., доцент, k.a.aksenov@urfu.ru  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

## АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ГЕНЕРАТИВНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ К ЗАДАЧЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ

*Аннотация:* В статье исследуется возможность применения нейронных сетей для помощи в работе IT-специалиста в формировании требований к программному обеспечению. Описываются основные платформы генеративных нейронных сетей, проводится их сводный анализ и на конкретном примере демонстрируется возможность формирования требований к программному обеспечению.

*Ключевые слова:* Генеративная нейронная сеть, нейросеть, искусственный интеллект

K. V. Vaskin, student, vkv777a@yandex.ru  
Aksenov K.A. PhD, Associate Professor, k.a.aksenov@urfu.ru  
Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

## ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF GENERATIVE NEURAL NETWORKS TO THE TASK OF FORMING SOFTWARE REQUIREMENTS

*Abstract:* The article explores the possibility of using neural networks to assist IT specialists in formulating software requirements. The main platforms of generative neural networks are described, their summary analysis is conducted, and the ability to form software requirements is demonstrated through a specific example

*Key words:* Generative neural network, neural network, artificial intelligence

### Введение

Генеративная нейронная сеть (ГНС) — это модель машинного обучения, которая имеет способность генерировать новые данные, которые соответствуют распределению исходных данных. Они находят применение во многих областях, включая компьютерное зрение, обработку естественного языка, генную инженерию и другие [1].

В сфере IT одной из важнейших сфер деятельности является разработка программных продуктов. В основном, выделяют следующие этапы разработ-

ки продукта: 1) сбор и анализ требований; 2) проектирование; 3) программирование; 4) тестирование; 5) внедрение; поддержка.

Этап сбора и анализа требований очень важен для проекта. Он включает в себя сбор, документирование и анализ требований к программному продукту для обеспечения его соответствия потребностям заинтересованных сторон и пользователей [2]. Зачастую, данный этап занимает значительную часть времени работы над проектом, поскольку предполагается составление множества документов: бизнес-требования, user story, use case и т. д.

Сбор требований — это процесс определения, документирования и управления потребностями и требованиями заинтересованных сторон [3].

Требования к ПО — это спецификация того, что должно быть реализовано. В них описано поведение системы, свойства системы или ее атрибуты. Они могут служить ограничениями в процессе разработки системы [4].

### **Исследование применимости генеративных сетей для поддержки процесса сбора требований**

Для проверки возможности использования ГНС на этапе сбора и анализа требований были выявлены следующие критерии:

1. возможность ГНС составлять user story;
2. возможность ГНС составлять функциональные требования;
3. возможность ГНС составлять use case;
4. возможность ГНС составлять технические задания;
5. возможность ГНС оформлять ответы в файл.

Для исследования были выбраны следующие ГНС [5]-[7]: YandexGPT 2; ChatGPT-4.0; phind; GigaChat.

Для тестирования работоспособности ГНС была придумана следующая ситуация, на которую нейросети должны были дать ответы: «Существует компания, которая занимается разработкой системы лояльности. Система продается клиентам. Клиенты взаимодействуют с системой с помощью личного кабинета. В личном кабинете необходимо разработать раздел управления пользователями и ролями».

На основе ответов разных сервисов ГНС была оформлена сравнительная таблица (табл. 1).

Таблица 1. Сводная таблица результатов исследования генеративных нейронных сетей

| Критерий/<br>ГНС | Составление функциональных требований | Составление user story | Составление use case | Составление прототипа тех. задания | Оформление ответов в файл |
|------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------------------|---------------------------|
| YandexGPT 2      | +-                                    | +-                     | +-                   | -                                  | -                         |
| Gpt 4.0          | +                                     | +                      | +                    | +-                                 | -                         |
| phind            | +                                     | +                      | +                    | +                                  | -                         |
| GigaChat         | +-                                    | +-                     | +-                   | +-                                 | -                         |

Как можно заметить из таблицы, у всех нейросетей есть как плюсы, так и минусы. Так, например, нейросеть от Яндекса составляет требования, пользовательские истории и use case несколько хуже, чем ChatGPT 4.0 и остальные ГНС.

Phind справляется с задачей формирования текстов лучше остальных «конкурентов». Ответы данной сети более подробные (рис. 1). Их текст визуально воспринимать легче, чем ответы других ГНС и составлен он более структурированно.

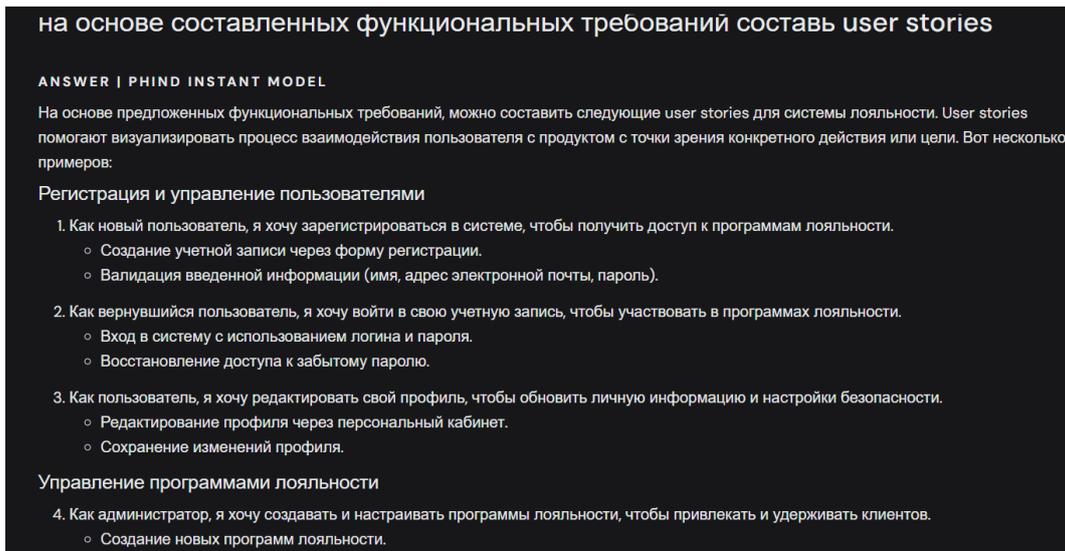


Рис. 1. Пример ответа Phind

Ответы от ChatGPT 4.0 несколько более развернутые, чем у Яндекса, но менее развернутые чем у Phind (рис. 2).

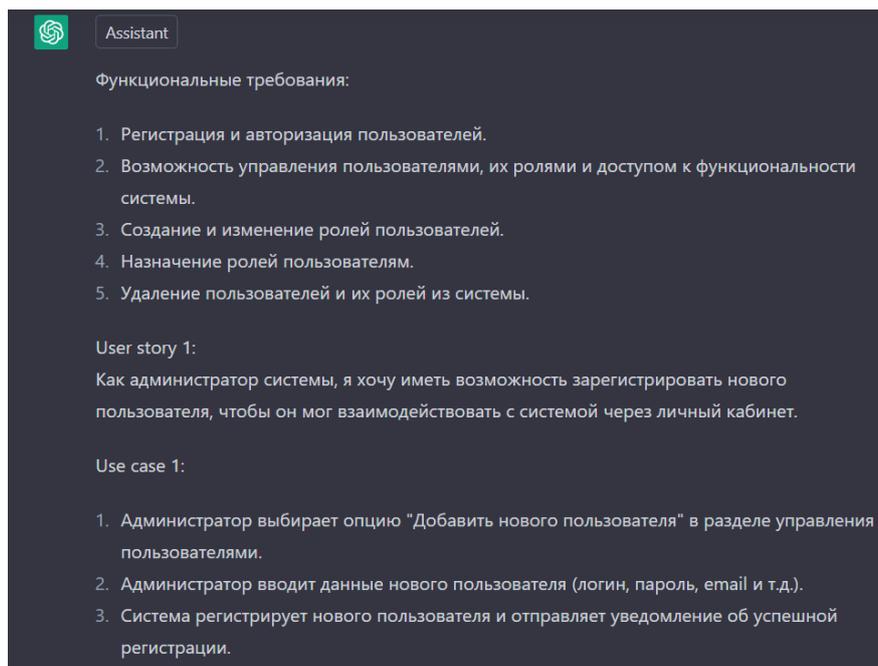


Рис. 2. Пример ответа ChatGPT 4.0

Ответы GigaChat в свою очередь выглядят как сплошной текст, размеченный пунктами. Читать их максимально не удобно, и информация воспринимается наиболее тяжело.

Если говорить про полноту текстов, то можно отметить, что нейросети Яндекса И Сбера похожи в своих ответах: они составляют текст по поставленному запросу хуже, чем ChatGPT 4.0 и Phind. Также в ходе работы заметно, что Phind формирует ответы намного быстрее других сравниваемых ГНС. На запрос оформить ответ в файл ни одна из нейросетей не смогла дать ответ. Также стоит отметить, что GigaChat – самая труднодоступная ГНС из всех сравниваемых. Поскольку она разрабатывается компанией Сбер, для доступа к ней нужно авторизоваться под SberID, что затрудняет её использование не клиентами Сбербанка.

## Выводы

Сеть Phind более полно работает напрямую с текстом запроса на формирование требований к ПО, нежели сеть YandexGPT 2, GigaChat или ChatGPT 4.0. Также определено, что использование Phind в помощи аналитику будет предпочтительнее, чем использование сети YandexGPT 2, GigaChat или ChatGPT 4.0. Таким образом, генеративные нейронные сети можно уже в некоторой степени использовать при сборе и анализе требований.

## Список литературы

1. Типы нейросетей. Часть 5. Генеративные модели (Generative Models) – URL: [https://dzen.ru/a/Y\\_jrNEK94z7rcBBd](https://dzen.ru/a/Y_jrNEK94z7rcBBd)
2. Анализ требований к программному обеспечению - URL: <https://appmaster.io/ru/blog/analiz-trebovanii-k-programmnomu-obespecheniiu>
3. Сбор требований к проекту. Зачем РМ-у уметь выявлять требования и фиксировать их с заказчиком проекта? – URL: <https://vc.ru/u/1096349-vladimir-savseris/538349-sbor-trebovaniy-k-proektu-zachem-pm-u-umet-vyyavlyat-trebovaniya-i-fiksirovat-ih-s-zakazchikom-proekta>
4. Выявление и сбор требований к ПО — ultimate guide – URL: <https://tproger.ru/articles/vyjavlenie-i-sbor-trebovanij-k-po-ultimate-guide>
5. Давай придумаем – навык Алисы, голосового помощника от Яндекс - URL: [https://ya.ru/alisa\\_davay\\_pridumaem?utm\\_source=landing](https://ya.ru/alisa_davay_pridumaem?utm_source=landing)
6. Бесплатный чат-бот для работы с ChatGPT 3.5 – URL: <https://gpt-chatbot.ru/chatgpt-3-5-besplatno-i-bez-registracii>
7. Русскоязычная нейросеть от Сбера – URL: <https://developers.sber.ru/portal/products/gigachat>

## УЧЕБНЫЙ МОДУЛЬ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕКСТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Аннотация:* в настоящей статье рассматривается структура учебного модуля приложения для анализа текста на основе методов тематического моделирования (ТМ). Основная цель создания модуля — упростить процесс освоения методов ТМ для студентов и специалистов, не обладающих навыками программирования. Модуль включает теоретические материалы, упражнения и тесты для закрепления знаний, а также реализует интерфейс для удобной работы с алгоритмами LDA, pLSA и NMF. Модуль ориентирован на no-code концепцию, что делает обучение доступным и понятным для широкого круга пользователей, а архитектура «клиент-сервер» позволяет использовать модуль на различных устройствах.

*Ключевые слова:* учебный модуль, тематическое моделирование, предварительная обработка данных, no-code

D.S. Gudkov, student, gudkov.2019@stud.nstu.ru  
O.K. Alsova, Ph.D., docent, alsova@corp.nstu.ru  
NSTU, Novosibirsk, Russia

## LEARNING MODULE OF AN APPLICATION FOR TEXT ANALYSIS BASED ON TOPIC MODELING METHODS

*Abstract:* this paper presents the structure of a learning module in an application designed for text analysis based on topic modeling (TM) methods. The primary goal of the module is to simplify the process of mastering TM techniques for students and professionals who lack programming skills. The module includes theoretical materials, exercises, and tests to reinforce knowledge, and provides an interface for efficient interaction with LDA, pLSA, and NMF algorithms. The module follows a no-code concept, making the learning process accessible and comprehensible to a broad audience, while its client-server architecture enables usage across various devices.

*Key words:* learning module, topic modeling, data preprocessing, no-code

В современных условиях обработки и анализа больших объемов текстовых данных методы тематического моделирования становятся незаменимым инструментом для извлечения из текста ключевых понятий, определе-

ния эмоциональной окраски текста, решения задач кластеризации и классификации текстов. Эти методы находят применение в самых различных сферах, начиная с анализа социального медиаконтента и отзывов пользователей и заканчивая автоматизацией документооборота и сегментацией текстов в исследовательских проектах [1].

Однако большинство прикладных инструментов требуют для их использования не только глубокого понимания теоретических основ методов ТМ, но и знания языков программирования, что может затруднить процесс обучения и освоения практических навыков анализа текстов для студентов и начинающих специалистов.

Если обратить внимание на обучающие курсы по данной теме, то ряд сервисов (таких как coursera, stepik) предлагают электронный учебник с текстовыми и видео уроками, а из интерактивных элементов обеспечивают только прохождение тестов. Другой класс сервисов (например, Kaggle) предлагает интерактивную среду программирования и справку к используемым функциям.

Таким образом можно сделать вывод об отсутствии на рынке инструмента, позволяющего помочь пользователю освоить методы ТМ в форме решения прикладных задач и проведения экспериментов без концентрации на языках и библиотеках программирования, а также об отсутствии самих инструментов для проведения ТМ текстов в рамках no-code концепции, каковые разработаны для других областей анализа данных (например, ПО Statistica, PowerBI, Excel).

Для решения вышеописанных проблем предлагается разработать учебный модуль, который будет являться составной частью приложения для анализа текста. Цель разработки модуля – упростить процесс изучения методов тематического моделирования текстов, позволив пользователям освоить ключевые этапы ТМ без применения навыков программирования. Модуль также должен содержать теоретические материалы и тестовые задания, что обеспечит возможность пользователю самостоятельно контролировать ход и результаты обучения. Такой подход позволяет сосредоточиться на прикладном аспекте решения задачи ТМ, выборе корректных методов ее решения, что способствует лучшему усвоению учебного материала и развитию аналитического мышления.

Предлагаемый модуль является программой-тренажером [2] – фокусируется на решении прикладных задач и отработке практических навыков, причем в роли инструктора выступает интеллектуальный сценарий обучения, также модуль включает в себя тестирующую часть, предназначенную для проверки степени усвоения учебного материала, используя банк тестовых заданий.

Методы тематического моделирования предназначены для решения задачи мягкой классификации текстов, заключающейся в распределении корпуса документов по заранее заданному числу тем. Классификация называется

мягкой, так как документ относят к каждой из тем с определённой вероятностью. Основными этапами решения любой задачи ТМ являются: предварительная обработка данных (разметка документов, токенизация, лемматизация) [3], выбор метода (модели) ТМ для решения задачи, настройка параметров метода, анализ точности метода, графический анализ результатов ТМ.

С помощью учебного модуля пользователю предлагается решить задачу классификации, описанную в [4] со следующей формулировкой. Рассмотрим корпус из  $N$  текстов:  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ , где каждый документ  $d_i$  представляет собой книгу, разделённую на  $M_i$  глав:  $d_i = \{g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iM_i}\}$ . Пусть все главы перемешаны, образуя совокупность текстов  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_M\}$ , где  $M = \sum_{i=1}^N M_i$ , тогда требуется:

1. Определить распределение глав  $G$  по  $K$  темам  $\{z_1, z_2, \dots, z_K\}$ , где  $K = N$  (число тем соответствует числу книг).

2. Выполнить построение тематической модели, чтобы найти апостериорное распределение тем:  $P(z|g)$  для всех  $g \in G, z \in \{z_1, z_2, \dots, z_K\}$ .

3. Выполнить классификацию глав:  $\hat{z}(g) = \arg \max P(z|g)$ , чтобы каждой главе  $g$  была присвоена наиболее вероятная тема  $\hat{z}(g)$ .

Для проверки качества результата рассчитывается доля глав  $g_{ij}$  каждой книги  $d_i$ .

Схема этапов решения данной задачи представлена на рис. 1.

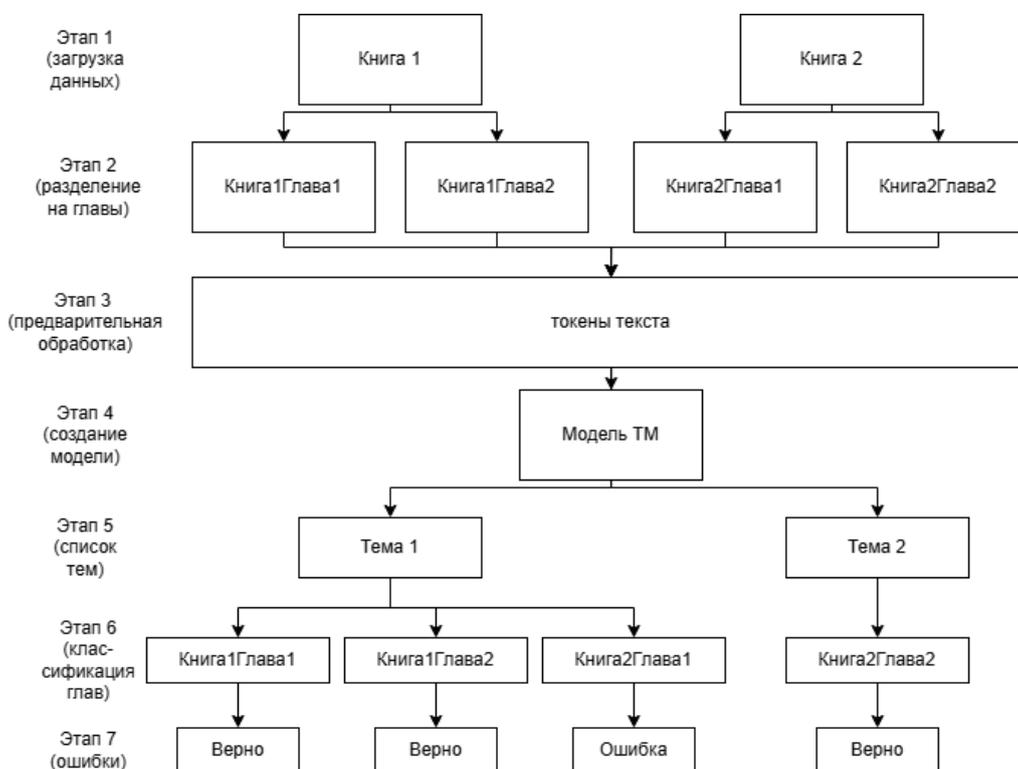


Рис.1 – Схема решения задачи классификации текстов

На основе анализа схемы решения задачи классификации текстов, а также используя обобщенную функциональную схему компьютерного тренажера [5] предложена следующая структура компонентов учебного модуля:

- блок предварительной обработки текста;
- блок моделирования;
- блок визуализации результатов;
- блок анализа ошибок;
- блок проверки знаний;
- справочный блок.

Блок предварительной обработки текста включает в себя функционал, обеспечивающий знакомство с понятиями и инструментами токенизации, лемматизации, удаления стоп-слов и представления данных во входных форматах моделей (матрица Document-Term, мера TF-IDF).

Блок моделирования включает функционал, позволяющий пользователю освоить принципы работы с классическими моделями LDA, pLSA, NMF, особенности выбора модели и подбора ее параметров. Для оценки результатов тематического моделирования применяется метрика перплексии [1].

Визуализация результатов ТМ на различных этапах представлена в учебном модуле тепловыми картами, диаграммами размаха, гистограммами и таблицами значений.

Блок анализа ошибок содержит функционал, позволяющий пользователю качественно оценить результаты решения задачи.

Результаты прохождения учебного материала можно сохранить на диск и затем завершить обучение.

В справочном блоке представлено описание основных терминов и методов ТМ, включая идею каждого метода, его математическое представление, область применения, достоинства и недостатки. В справочный блок можно перейти по гиперссылкам из других блоков учебного модуля.

Блок проверки знаний содержит функционал, позволяющий пользователю закрепить теоретические и практические навыки, пройдя тестирование с использованием банка тестовых заданий за ограниченный период времени. Банк тестовых заданий состоит из тестов закрытого (выбор ответа из предложенного списка) и открытого (ввод ответа пользователем) типа. Для преподавателя реализована возможность получать результаты ученика.

Таким образом, разработанный учебный модуль предлагает реализацию возможностей, представленных диаграммой use-cases (рис.2).

Учебный модуль является частью приложения, построенного по архитектуре «клиент-сервер». На клиентской стороне реализуется логика отображения графического интерфейса пользователя (GUI) с помощью браузера, тогда как вся логика обработки данных реализуется на стороне сервера. Такой подход позволяет пользоваться приложением с любых устройств, имеющих доступ в Интернет.

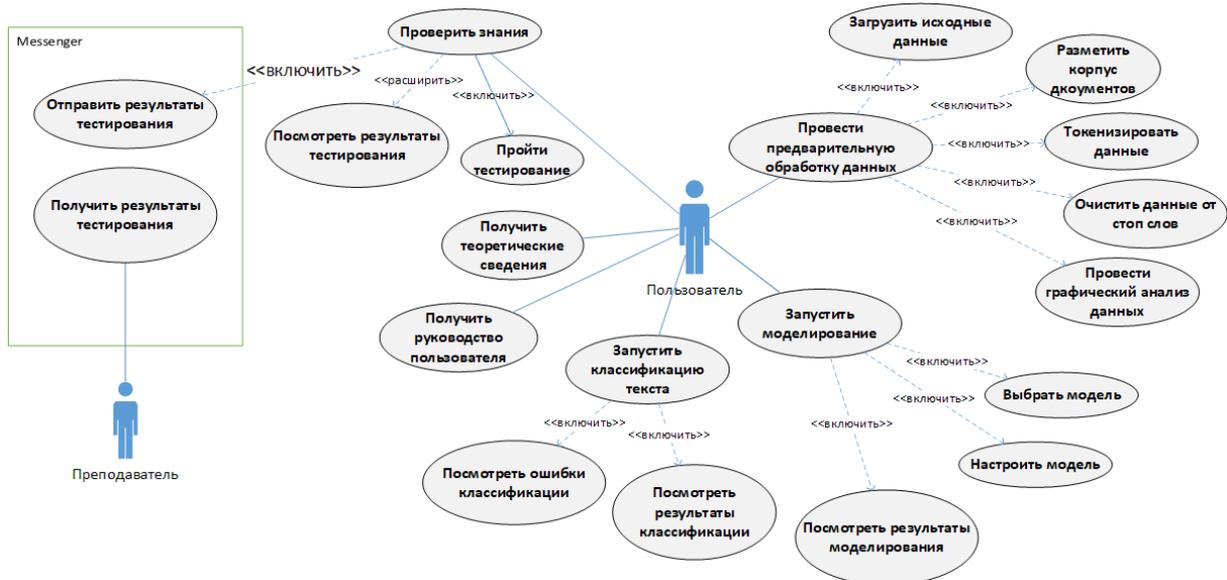


Рис.2 Диаграмма use-cases учебного модуля

Прототип учебного модуля разработан на языке R с применением фреймворка Shiny, позволяющего создавать интерактивные приложения с GUI. Для реализации методов ТМ использованы библиотеки: `topicmodels`, `tidyr`, `dplyr`, `ggplot2`. Вид главного окна модуля представлен на рис. 3.

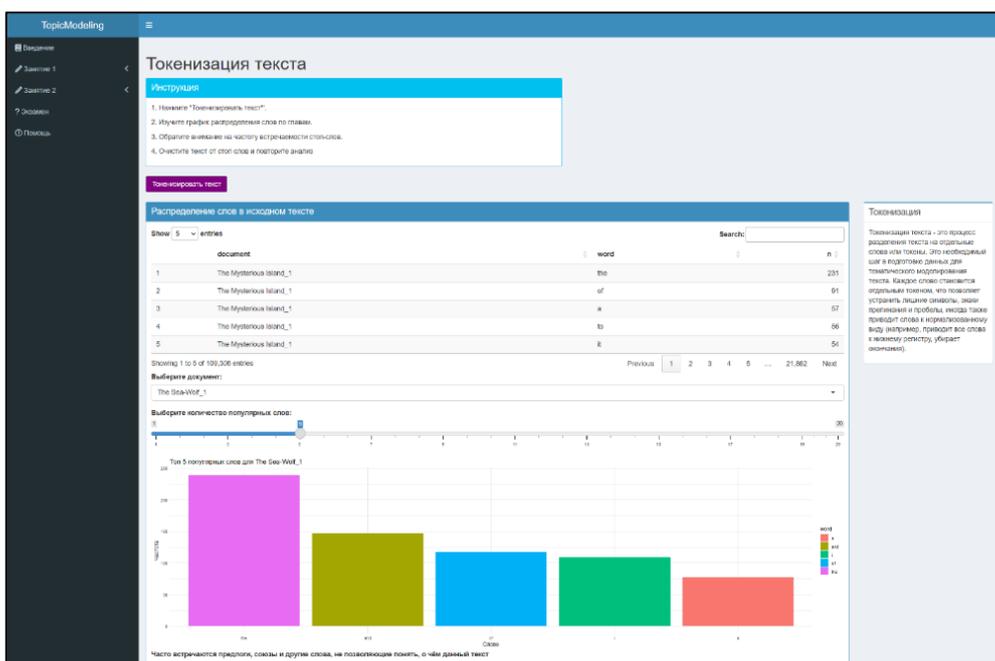


Рис.3 Главное окно прототипа учебного модуля

Описанный в статье учебный модуль предоставляет пользователям возможность изучения ключевых этапов анализа текстовых данных и принципов работы базовых методов ТМ без необходимости программирования.

## Список литературы

1. Коршунов А., Гомзин А. Тематическое моделирование текстов на естественном языке // Труды ИСП РАН. 2012. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tematicheskoe-modelirovanie-tekstov-na-estestvennom-yazyke>
2. Дудырев Ф., Максименкова О.В. Симуляторы и тренажеры в профессиональном образовании: педагогические и технологические аспекты // Вопросы образования. 2020. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/simulyatory-i-trenazhery-v-professionalnom-obrazovanii-pedagogicheskie-i-tehnologicheskie-aspekty>
3. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и анализ данных: учеб. пособие / Большакова Е.И., Воронцов К.В., Ефремова Н.Э., Клышинский Э.С., Лукашевич Н.В., Сапин А.С. — М.: Изд-во НИУ ВШЭ, 2017. — 269 с
4. Silge J., Robinson D. Text Mining with R: A Tidy Aproach. Sebastopol: O`Reilly Media, 2017. — 184 p.
5. Долотин Ю.Г., Коростелев Д.А. Концепция проектирования интерактивных компьютерных тренажеров и их применение в учебном процессе // Ученые записки ОГУ. Серия: Гуманитарные и социальные науки. — 2021. — № 3 (92). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-proektirovaniya-interaktivnyh-kompyuternyh-trenazherov-i-ih-primenenie-v-uchebnom-protssesse>

П.О. Гуськов, магистрант, pavel\_guskov\_o@mail.ru  
Р.В. Брежнев, к.т.н., доцент, rbrejnev@sfu-kras.ru  
Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*Аннотация:* Рассмотрен вопрос разработки архитектуры программно-технологической инфраструктуры для обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и беспилотных авиационных систем (БАС), с акцентом на интеграцию методов искусственного интеллекта и интеллектуальных систем. Описаны ключевые компоненты системы: подсистемы сбора, обработки и визуализации данных, которые обеспечивают масштабируемость и автоматизацию анализа с помощью алгоритмов машинного обучения в составе нейронных сетей и эволюционных вычислений, позволяющих повысить точность обработки больших объемов данных. Инфраструктура ориентирована на мониторинговые задачи лесного и сельского хозяйства, экологии.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, беспилотные авиационные системы, масштабируемость, автоматизация, машинное обучение, анализ данных.

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 SOFTWARE AND TECHNOLOGY INFRASTRUCTURE FOR PROCESSING AND ANALYZING REMOTELY SENSED EARTH DATA

*Abstract:* The issue of developing the architecture of software and technology infrastructure for processing and analyzing data from remote sensing and unmanned aerial systems (UAS), with a focus on the integration of artificial intelligence and intelligent systems. The key components of the system are described: subsystems of data collection, processing and visualization, which provide scalability and automation of analysis using machine learning algorithms in neural networks and evolutionary computations, allowing to increase the accuracy of processing large volumes of data. The infrastructure is focused on monitoring tasks in forestry, agriculture and ecology.

*Key words:* Earth remote sensing, unmanned aerial systems, mass scalability, automation, machine learning, data analysis.

ДЗЗ из космоса – процесс получения информации о поверхности Земли путем наблюдения и измерения из космоса собственного и отраженного излучения элементов суши, океана и атмосферы в различных диапазонах электромагнитных волн в целях определения местонахождения, описания характера и временной изменчивости естественных природных параметров и явлений, природных ресурсов, окружающей среды, а также антропогенных факторов и образований. При этом различают деятельность по ДЗЗ из космоса, под которой подразумевают деятельность, направленную на целевое применение (использование, эксплуатацию) космических комплексов (систем) ДЗЗ. К видам деятельности по ДЗЗ из космоса относятся: планирование космической съемки, управление КА ДЗЗ, осуществление космической съемки, прием, сбор, обработка, хранение, распространение (предоставление) данных ДЗЗ различных видов и уровней обработки, продуктов, сервисов и услуг на основе таких данных [1].

Анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) представляет собой одно из приоритетных направлений современной геоинформационной науки, предоставляющее важную информацию для мониторинга окружающей среды и рационального управления природными ресурсами, оценки состояния экосистем, градостроительства, сельского хозяйства и многих других направлений. Значительные достижения в данной области, однако не являются лимитом в создании и усовершенствовании программно-технологических комплексов обработки и анализа данных ДЗЗ. Причины актуальности темы обусловлены вопросами, как:

- рост объёмов и разнообразия данных;
- появление новых источников и видов данных, на примере БАС;
- оперативность и точность данных;
- изменения целей и задач применения данных ДЗЗ.

Данные ДЗЗ являются важнейшим источником оперативной информации об окружающей природной среде для тематических ГИС, а также являются инструментом для поддержания существующих пространственных данных в актуальном состоянии [2].

### **Современные вызовы и потребности обработки данных ДЗЗ**

С увеличением количества спутников и беспилотных авиационных систем (БАС), объёмы данных дистанционного зондирования резко возросли. Тенденция наблюдается не только в России, но и по всему миру, где элементами инфраструктуры мониторинга являются данные ДЗЗ. По этой причине, возникает необходимость в высокопроизводительных алгоритмах, которые могли бы справляться с обработкой больших объёмов данных в минимальные сроки, а также с возможностью интеграции автоматизированных реше-

ний для исключения рутинных задач обработки, как калибровка, наложение, геокоррекция.

В настоящее время системы обработки ДЗЗ сталкиваются с проблемой интероперабельности, так как данные поступают из различных источников и форматов. Рекомендованные стандарты OGC, определяют форматы и протоколы, которые не требуют усилий для интеграции всех источников. Использование общих стандартов позволяет не только снизить затраты и преобразование данных из одного формата в другой, но и повысить точность анализа и согласованность данных. Эти аспекты позволяют создавать комплексные модели спутниковых и БАС-данных.

Для интеграции данных с разным пространственным разрешением необходимы алгоритмы геокоррекции и трансформации. Например, для привязки изображений, полученных с БАС, к глобальной системе координат используют метод аффинного преобразования (1):

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $(x, y)$  и  $(x' y')$  – начальные и скорректированные координаты  $a, b, c, d, e, f$  – параметры преобразования, которые оптимизируются для каждого набора данных. Данный метод позволяет совмещать данные с разными масштабами и разрешениями, что критично для анализа данных с различной детализацией.

Возникает сложность и разнообразие данных, на примере многоканальных изображений и данных с высоким разрешением. Данные ДЗЗ включает изображения, полученные в различных диапазонах спектра, каждый из которых направлен на выявление конкретных характеристик поверхности Земли. Современные методы обработки многоканальных данных используют нейронные сети и методы машинного обучения для автоматической классификации и анализа. Примером такого подхода, является использование глубоких сверточных нейронных сетей (CNN) для классификации растительности и водных объектов, что сокращает ошибку классификации до 4%. Данный процесс может быть представлен функцией потерь (2):

$$L(\theta) = - \sum_{i=1}^N y_i \log(f(x_i; \theta)) \quad , \quad (2)$$

где  $L(\theta)$  – функция потерь,  $y_i$  – метка класса,  $f(x_i; \theta)$  – вероятность правильной классификации для каждого объекта  $x_i$  с параметрами модели  $\theta$ . Оптимизация этой функции позволяет улучшить точность классификации и сократить время на обработку данных.

## **Предложение по архитектуры программно-технологической инфраструктуры**

С учётом современных требований к обработке данных дистанционного зондирования Земли и беспилотных авиационных систем, мною предлагается архитектура программно-технологической инфраструктуры, которая представляет собой модульный подход для обработки и визуализации данных. Данное решение позволит интегрировать данные с их последующем анализом в различных отраслях.

Основные компоненты программно-технологической инфраструктуры:

- подсистема сбора и хранения данных (интеграция данных, стандартизация форматов, автоматическая индексация и каталогизация с использованием Data Mining);
- подсистема обработки и анализа (гистограммное растяжение, JPEG-компрессия, автоматические фильтры, сверточные нейронные сети (CNN) для классификации);
- подсистема визуализации (веб-интерфейсы, поддержка временных рядов NDVI, интеграция стандартов OGC);
- учет особенностей данных (методы геопривязки, высокоточные карты и 3D-модели).

### **Заключение**

В статье была предложена архитектура программно-технологической инфраструктуры для обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и беспилотных авиационных систем (БАС), направленная на решение актуальных задач в области масштабируемой и автоматизированной обработки пространственных данных. Реализация представленной инфраструктуры основывается на модульном подходе, включающем подсистемы сбора, хранения, анализа и визуализации данных, что обеспечивает её гибкость, адаптивность и возможность интеграции с различными внешними платформами. Ключевым элементом разработки являются интеллектуальные системы, использующие методы машинного обучения, для повышения точности классификации, автоматизированной обработки данных и выявления пространственно-временных изменений. Кроме того, внедрение стандартов интероперабельности и подходов к масштабируемости, таких как распределённые вычисления, позволяет оптимизировать работу с большими объёмами данных и повысить эффективность системы в целом. Предложенная архитектура ориентирована на широкий спектр прикладных задач, включая мониторинг природных ресурсов, анализ экосистем и управление урбанизированными территориями. Указанные направления создают основу для формирования высокоэффективных решений, соответствующих современным

вызовам в области обработки данных ДЗЗ и их применения в различных отраслях.

### Список литературы

1. Журнал «ДЗЗ в России» официальный сайт РОСКОСМОС [Электронный ресурс]: режим доступа- <https://www.roscosmos.ru/38805/>.

2. Якубайлик О. Э., Кадочников А. А., Токарев А. В. Программно-технологическое обеспечение для визуализации спутниковых данных // МНИЖ. 2018. №11-1 (77). <https://cyberleninka.ru/article/n/programmno-tehnologicheskoe-obespechenie-dlya-vizualizatsii-sputnikovyyh-dannyh>

3. Брежнев, Р. В., Маглинец, Ю. А., Мальцев, Е. А., Перфильев, С. Е., Сидоров, А. Ю., Цибульский, Г. М., Шokol, А. С. (2012). Программно-технологическая инфраструктура информационной поддержки решения задач территориального управления. Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 5 (3), 340-352.

**А.А. Клушина**, магистрант, anastasiaklushina13@gmail.com  
**М.В. Мурашов**, д.т.н., профессор, murashov@bmstu.ru  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦЕН НА НЕДВИЖИМОСТЬ

*Аннотация:* В статье представлены этапы разработки модели системы прогнозирования цены жилой недвижимости с использованием современной сверточно-рекуррентной нейронной сети ConvLSTM. Эта модель позволяет делать точные прогнозы цены квартир, учитывая и географические и временные факторы. Была рассмотрена архитектура нейронной сети, ее преимущества относительно сверточной и рекуррентной нейронных сетей. Также был подробно описан процесс подготовки данных для корректной работы модели.

*Ключевые слова:* архитектура нейронных сетей, недвижимость, сверточно-рекуррентная нейронная сеть, квартира

**A.A. Klushina**, undergraduate student, anastasiaklushina13@gmail.com  
**M.V. Murashov**, DSc, professor, murashov@bmstu.ru  
Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, Russia

## THE USE OF MODERN NEURAL NETWORKS TO PREDICT PRICES FOR REAL ESTATE

*Abstract:* The paper presents the stages of developing a model for predicting the price of residential real estate using a modern recurrent convolutional neural network ConvLSTM. This model allows you to make accurate forecasts of apartment prices, taking into account both spatial and temporal factors. The architecture of the neural network and its advantages in relation to convolutional and recurrent neural networks were considered. The process of preparing data for the correct operation of the model was also described in detail.

*Key words:* neural network architecture, real estate, convolutional recurrent neural network, apartment

### Введение

Рынок жилой недвижимости является многогранным и достаточно нестабильным, поэтому задача прогнозирования цен на квартиры является осо-

бенно интересной и сложной. Цена квартиры определяется большим количеством пространственных (географических) и временных факторов. Существующие на данный момент решения не способны учитывать все нюансы при формировании рыночных цен. Модели машинного обучения и нейронные сети, предназначенные для решения задач регрессии, обычно могут хорошо работать только с одномерными и двумерными данными, не прослеживая остальных зависимостей. Модели временных рядов могут предсказать среднюю цену на квартиру в какой-либо генеральной совокупности, исходя из предыдущей динамики средней цены, однако не могут учесть большое количество геоэкономических параметров, присущих конкретному объекту. Таким образом, эту модель можно использовать исключительно для отслеживания общих тенденций рынка. Модели, построенные на деревьях, такие как LightGBM, CatBoost, XGBoost и т.п. наоборот могут учесть параметры квартиры, такие как тип стен, отделка, количество комнат, географические параметры, такие как регион и координаты, а также различные экономические показатели. Однако такие модели отслеживают временную составляющую лишь косвенно, когда в обучающих данных содержатся продажи с разных периодов. Такие модели склонны к очень быстрой деградации во времени, так как не отслеживают рыночные тенденции и, поэтому требуют постоянного переобучения на актуальных свежих данных. Задача состоит в том, чтобы найти решение, которое могло бы эффективно учесть и пространственную и временную составляющую.

Одной из наиболее перспективных архитектур для обработки пространственно-временных данных является комбинированная сверточная и рекуррентная нейронная сеть Convolutional Long Short-Term Memory (ConvLSTM) [1].

## **1. Архитектура используемой нейронной сети и её особенности**

Основным недостатком сверточной нейронной сети CNN является отсутствие возможности отслеживания рыночной динамики. Другими словами, она игнорирует временной фактор [2]. Решением этой проблемы являются рекуррентные нейронные сети, такие как RNN и, в частности, LSTM [3]. Несмотря на успешность во многих других областях, такие нейронные сети также слабо применимы на рынке недвижимости. Прогноз цен на квартиры должен отличаться, если взяты квартиры разных классов, такие как эконом и бизнес. Если район недостаточно застроен, и в нем нет всей необходимой для жизни инфраструктуры, цена недвижимости в таком районе также должна быть понижена. Входными и выходными данными для рекуррентных нейронных сетей служат одномерные данные, которые не имеют пространственной составляющей. Эту проблему как раз решает сверточно-рекуррентная нейронная сеть.

Рассматриваемая модель состоит из последовательности блоков ConvLSTM, где на каждый из блоков в качестве входных данных подается последовательность трехмерных тензоров, где первые два измерения каждого тензора представляют состояние системы на конкретном временном шаге. Эти тензоры могут содержать различные пространственные признаки, что позволяет модели улавливать как пространственные зависимости, так и динамику изменений во времени. ConvLSTM вычисляет будущее состояние ячейки по входам и прошлым состояниям.

Рассмотрим архитектуру нейронной сети [4] (рисунок 1). Вначале идет последовательность слоев ConvLSTM2D. Этот слой выполняет стробирование LSTM с двумерными свертками. Он похож на LSTM нейронную сеть, но как входные, так и рекуррентные преобразования являются светочными. В качестве функции активации этих слоев использована функция  $\tanh$ . С ней выходные значения могут быть как положительными, так и отрицательными. Количество 2D слоев может быть подобрано под конкретную задачу. Важно ориентироваться на метрику результата в процессе использования нейронной сети. Для исследования было взято два таких слоя. После каждого слоя ConvLSTM2D следует слой BatchNormalization. Он увеличивает стабильность модели, уменьшает переобучение, путем нормализации выходных данных. Завершающим слоем является ConvLSTM3D, который использует окно свертки размером  $1 \times 1 \times 1$  и функцию активации ReLu, поскольку цены имеют строго положительное значение. Также можно использовать полносвязный слой TimeDistributed для предсказания цены на каждом временном шаге независимо.

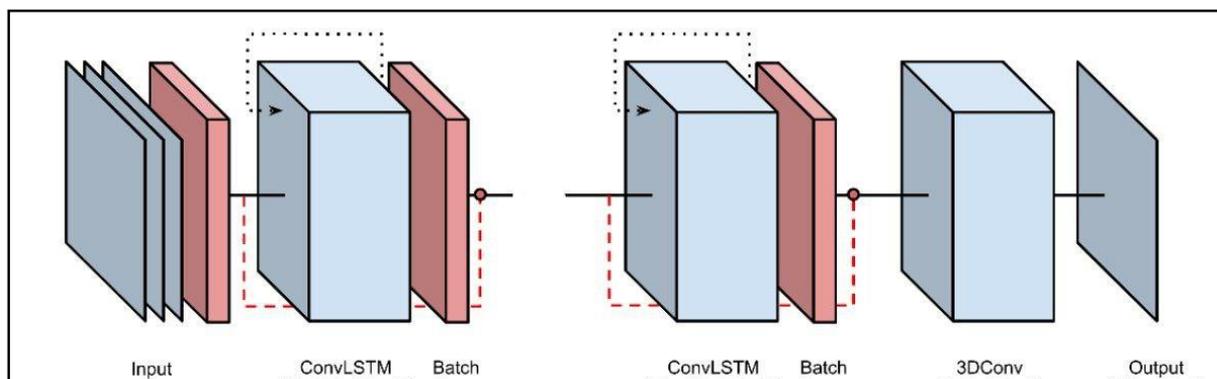


Рис. 1. Архитектура ConvLSTM [4]

## 2. Обзор данных и их преобразование

Имеются данные о поквартальных продажах квартир в разных объектах на первичном рынке. Под объектом подразумевается жилой комплекс со своим идентификатором, который содержит продажи квартир с разными характеристиками. Также каждый объект имеет несколько периодов продаж, в

диапазоне от 2019 до 2024 года. Для корректного использования необходимо выделить минимальное количество кварталов, которые будут учитываться в модели, например шесть. Таким образом, объекты, имеющие меньше шести продаж, были отброшены, а у жилых комплексов, имеющих большее количество продаж, были взяты более поздние периоды, так как они более актуальны на данный момент. Для каждого объекта есть данные о координатах, квартирографии, типе стен и отделке, жилой и нежилой площади, наличии балкона. Также есть несколько открытых источников, таких как СберИндекс, Росстат, где доступны открытые экономические данные по городам или регионам. Их можно присоединить к основным параметрам для увеличения информативности.

Вначале выполняется стандартная предобработка данных, включающая кодирование категориальных признаков методом One-Hot-Encoding и нормализация всех числовых значений для улучшения сходимости.

Также для увеличения информативности входного пространства признаков были сгенерированы карты по координатам каждого объекта. Они позволят отслеживать инфраструктуру и застраиваемость района. В качестве центра изображения были взяты координаты дома из датасета и сгенерирована карта радиусом один километр от него с помощью открытой библиотеки OpenStreetMap. Пример такой карты представлен на рисунке 2.

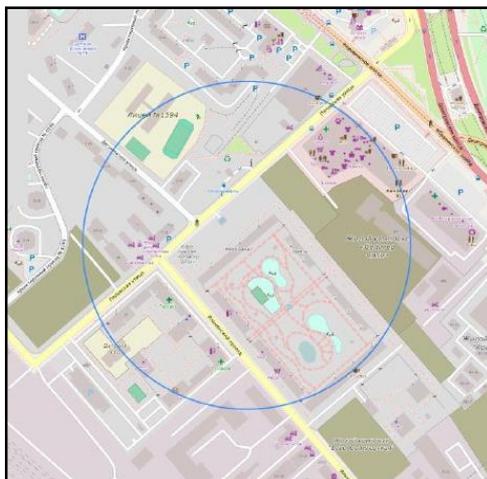


Рис. 2. Сгенерированная карта микрорайона жилого комплекса

Изображение карты преобразуется в матрицу, стандартную для обучения любых сверточных нейронных сетей [5]. Необходимо, чтобы все изображения имели одинаковый формат, например  $64 \times 64$  пикселя.

Входные данные для нейронной сети должны быть переданы в формате 5D массива следующей размерности: (количество объектов, количество временных промежутков, количество строк, количество столбцов, количество каналов). Таким образом, для карт необходимо сформировать массив с размерностью (число объектов, количество временных промежутков, высота

карты  $n$ , ширина карты  $n$ , 1 канал). Можно дополнить изображения карты параметрами квартиры, сформировав для них отдельный массив с размерностью (число объектов, количество временных промежутков,  $n$ ,  $n$ , количество факторов (количество каналов)). Для корректного объединения нужно привести размер данных к размеру карты повторением значений  $n \times n$  раз, где  $n$  равен высоте карты. Объединить данные массивы можно по каналу входа, так что карты будут одним каналом данных, а каждый добавленный параметр представляет собой отдельный канал. В итоге получится массив с количеством каналов, равным сумме отдельно сформированных одноканальных массивов.

### 3. Обучение модели и оценка качества

В качестве функции оптимизации использовался алгоритм Adam [6]. Этот вид оптимизации построен на методе стохастического градиентного спуска, что хорошо подходит для большого массива данных. Он эффективен с точки зрения затрат по времени и памяти. В качестве функции потерь используется значение среднеквадратичной ошибки MSE, которая помогает избегать значительных ошибок как в сторону меньшей, так и в сторону большей цены. В качестве метрики взята величина, равная  $1 - \text{MAPE}$ , где MAPE – это средняя абсолютная процентная ошибка. Такое значение метрики будет показывать точность предсказаний нейронной сети, где более высокие значения указывают на меньшую ошибку относительно фактического значения в абсолютных процентах.

### Заключение

В данной работе для предсказания цен на недвижимость применена сверточно-рекуррентная нейронная сеть современной архитектуры Convolution LSTM. Представлен обобщенный алгоритм подготовки данных для работы нейросети, а также рассмотрены основные параметры обучения. Приведенный в статье подход позволяет учесть одновременно как временные, так и пространственные факторы при прогнозировании цен на недвижимость.

### Список литературы

1. Shi X., Chen Zh., Wang H., Yeung D.-Y., Wong W.-K., Woo W.-Ch. Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting // Advances in Neural Information Processing Systems, V.28 (NIPS 2015), 2015.
2. Convolutional Long-Short-Term Memory Networks (ConvLSTM) for Weather Prediction using Radar and Satellite Images / Moreira N.A., Vasconcelos R., Carvalho Yu., Silva B., Maciel T.F., Simoes I., et al. // XXIV Congresso Brasileiro de Automática, Oct 2022, Fortaleza, Ceará, Brazil. hal-04079740.

3. Рапаков Г.Г., Горбунов В.А., Дианов С.В., Елизарова Л.В. Исследование LSTM-нейросетевого подхода при моделировании временных рядов // Вестник Череповецкого государственного университета, №3 (114), 2023, С. 47-54.

4. Hodges J.L., Lattimer B.Y. Wildland Fire Spread Modeling Using Convolutional Neural Networks // Fire Technologies, V.55, 2019, pp. 2115–2142.

5. Кыонг Н.Т., Сырямкин В.И., Чанг Н., Тхуи Х. Модель распознавания объектов на изображениях с использованием "сверточной нейронной сети - CNN" // Современные наукоемкие технологии, 2020, С. 269-280.

6. Jais I.K.M., Ismail A.R., Nisa S.Q. Adam optimization algorithm for wide and deep neural network. // Knowledge Engineering Data Science, 2019, pp. 41-46.

А.А. Кобаченко, студент, kobachenkoa@student.bmstu.ru  
М.А. Пароткина, студент, parotkinama@student.bmstu.ru  
С.В. Егоров, студент, egorovsv@student.bmstu.ru  
М.А. Волынчиков, студент, volynchikovma@student.bmstu.ru  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

## ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПОСТУПАЮЩИХ НА ВИРТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

*Аннотация:* В статье рассматриваются ключевые методы и алгоритмы, используемые для очистки данных в системах виртуального анализа. Акцентируется внимание на важности удаления дубликатов, обработки пропусков, коррекции ошибок и избавления от шумов для повышения качества данных. Кроме того, обсуждаются трансформационные процессы, такие как нормализация, стандартизация и управление выбросами, которые подготавливают данные для глубокого анализа. Обзор современных подходов и инструментов для автоматизации этих процессов подчеркивает значимость эффективной предобработки данных в условиях роста объема и разнообразия данных, поступающих из различных источников.

*Ключевые слова:* предобработка данных, виртуальный анализатор, машинное обучение.

A.A. Kobachenko, student, kobachenkoa@student.bmstu.ru  
M.A. Parotkina, student, parotkinama@student.bmstu.ru  
S.V. Egorov, student, egorovsv@student.bmstu.ru  
M.A. Volynchikov, student, volynchikovma@student.bmstu.ru  
Bauman Moscow State University, Moscow, Russia

## DATA PREPROCESSING FOR A VIRTUAL ANALYZER OF A GAS REFINERY

*Abstract:* The article examines key methods and algorithms used for data cleansing in virtual analysis systems. It emphasizes the importance of removing duplicates, handling missing values, correcting errors, and eliminating noise to enhance data quality. Additionally, transformative processes such as normalization, standardization, and outlier management are discussed, which prepare data for in-depth analysis. A review of modern approaches and tools for automating these processes highlights the significance of effective data preprocessing amidst the growing volume and variety of data from diverse sources.

*Key words:* data preparation, soft sensors, machine learning.

В настоящее время растёт потребность производств в применении технологий виртуального анализа показателей технологического процесса, в частности, виртуальных анализаторов с применением технологий машинного обучения и искусственного интеллекта. Их алгоритмы имеют разные требования к подаваемым для расчётов данным, соответственно, требуется качественная и подходящая методика их предобработки. В этом случае, требуется поступление исходных данных двух категорий: признаков (процессные показатели производства) и целевых переменных, значения которых и будут являться результатом работы анализатора.

После получения данных с производства они часто содержат шумы, выбросы, ошибки, пропуски и, в случае с временными рядами, несовпадения регулярности поступления информации. Этап очистки позволяет удалить неподходящие, избыточные или неверные записи [1].

Этот этап включает в себя:

- Удаление дубликатов: исключение повторяющихся строк или записей
- Обработка пропусков: заполнение пустых значений средними, медианными или предсказанными значениями.
- Коррекция данных: исправление ошибок ввода или заполнения строк, поиск и удаление аномальных значений.
- Избавление от шумов и выбросов.

Для автоматизации очистки данных используются специализированные алгоритмы, в основе которых могут лежать как стандартные математические алгоритмы (например, медианный фильтр или фильтр Калмана для избавления от шумов или методика IQR для идентификации выбросов), так и алгоритмы машинного обучения (SVM, изолирующие леса для обнаружения и корректировки выбросов) [2].

На примере ниже виден результат работы алгоритма избавления от выбросов (рис.1).

Следующим этапом предобработки является трансформация данных.

Трансформация заключается в изменении формата или структуры данных для их дальнейшей обработки и анализа. На этом этапе могут быть выполнены следующие операции [2]:

- Нормализация и стандартизация данных для приведения к общему масштабу.
- Кодирование категориальных переменных для обеспечения машиной читаемости.
- Агрегация данных для снижения объёма данных и выявления ключевых тенденций.
- Понижение размерности путем использования методов, таких как PCA (анализ главных компонент).

Трансформация помогает в создании структурированных и удобных для анализа наборов данных, что сокращает вероятность неправильного обучения моделей виртуальных анализаторов.

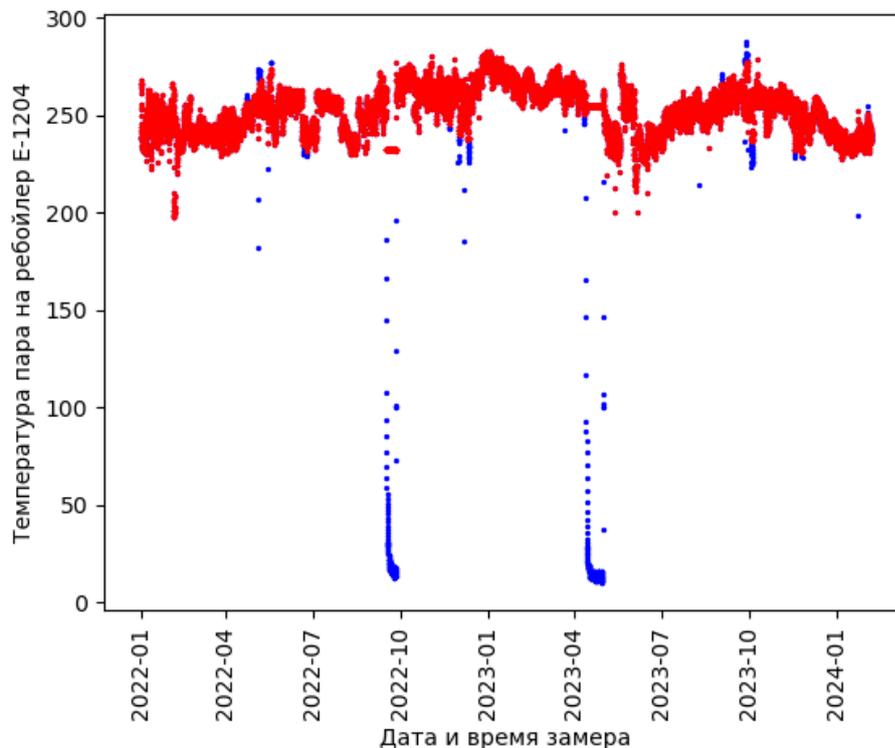


Рис.1. Результат работы алгоритма очистки от выбросов. Синим показаны – удалённые данные

Дальнейший этап предполагает манипуляции с данными с целью улучшения качества работы алгоритмов машинного обучения.

В первую очередь стоит удалить строки данных, которые не влияют или слабо влияют на целевую переменную, для этого вычисляется корреляция признаков с целевой переменной, устанавливается пороговое значение, после чего удаляются те данные, которые не прошли порог [3].

А, например, для качественной работы линейных алгоритмов, стоит удалить признаки, сильно коррелирующие между собой, для этого составляется матрица кросс-корреляции и устанавливается пороговое значение корреляции, после чего признаки, перешедшие порог удаляются или заменяются на относительные значения [4] (Рис. 2).

Анализ и предобработка данных — это критически важные стадии в работе с виртуальным анализатором, которые позволяют значительно улучшить качество и эффективность последующей аналитической работы. Очистка и трансформация данных готовят основу для глубокого анализа и принятия обоснованных решений. Использование подходящих методов и технологий на каждом этапе гарантирует, что информация, извлекаемая из данных, будет надежной и ценной для организации.

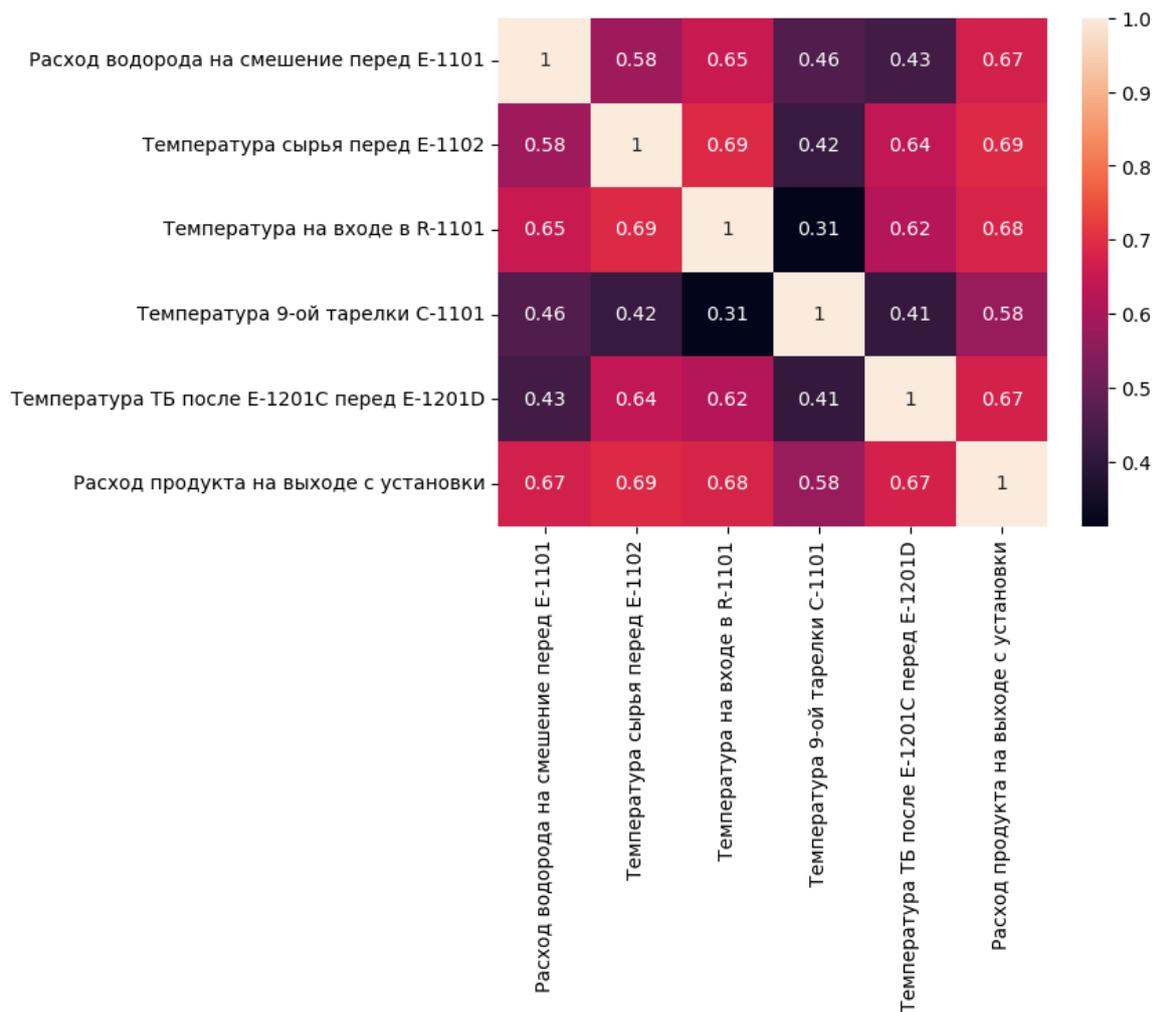


Рис. 2. Матрица кросс-корреляции признаков

## Список литературы

1. Rahm E., Do H.H. Data Cleaning: Problems and Current Approaches // Bulletin of the Technical Committee on Data Engineering. 2000. Vol. 23, no. 4. pp. 3-13.
2. McKinney W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython. O'Reilly Media, 2017. 529 p.
3. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R / G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani. Springer, 2021. 607 p. DOI: 10.1007/978-1-0716-1418-1.
4. Swamynathan M. Mastering Machine Learning with Python in Six Steps. Apress: New York, 2019. 374 p.

А.А. Ларионова, магистрант, llarionova.an@yandex.ru  
О.К. Альсова, к.т.н., доцент, alsova@corp.nstu.ru  
Новосибирский государственный технический университет, г Новосибирск, Россия

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ «КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ» УЧЕБНОГО ТРЕНАЖЕРА

*Аннотация:* Разработан учебный тренажер для изучения и исследования иерархических методов кластерного анализа данных. В его основу положена концепция no-code (без программирования), что делает тренажер доступным для пользователей, не имеющих навыков программирования. Тренажер состоит из нескольких модулей, соответствующих теоретической, практической и тестовой части. В настоящей статье подробно рассмотрен базовый модуль тренажера – «Кластерный анализ», реализующий основные методы, меры и алгоритмы кластерного анализа данных.

*Ключевые слова:* учебный тренажер, кластерный анализ, кластер, мера расстояния, иерархический метод

A.A. Larionova, undergraduate student, llarionova.an@yandex.ru  
O.K. Alsova, Ph.D., Associate Professor, alsova@corp.nstu.ru  
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

## DEVELOPMENT OF THE CLUSTER ANALYSIS MODULE OF THE TRAINING SIMULATOR

*Abstract:* A training simulator has been developed for studying and researching hierarchical methods of cluster data analysis. It is based on the concept of no-code (without programming), which makes the simulator accessible to users without programming skills. The simulator consists of several modules corresponding to the theoretical, practical and test parts. This article describes in detail the basic module of the simulator - "Cluster analysis", which implements the main methods, measures and algorithms of cluster data analysis.

*Keywords:* Training simulator, hierarchical methods, cluster analysis, distances, cluster

С развитием информационных технологий объемы обрабатываемых данных постоянно увеличиваются во всех предметных областях. Анализ данных становится все более и более востребованным, вследствие наблюдаемой

тенденции роста информационных объемов, помогая выявлять неизвестные ранее закономерности и принимать обоснованные управленческие решения по результатам анализа. По мере увеличения важности анализа данных растет и потребность в подготовке квалифицированных кадров и, как следствие, в разработке учебно-методических материалов и обучающих программ, поддерживающих процесс обучения. В этом контексте особенно востребованными становятся обучающие тренажеры. Тренажер – программный комплекс, ориентированный на обучение человека и отработку им определенных навыков и умений [1]. Учебный тренажер помогает не только изучить теоретические материалы по теме, но и практически освоить необходимые навыки для решения прикладных задач анализа данных. На сегодняшний день на российском рынке представлено не так много обучающих тренажеров в области анализа данных, что делает разработку такого продукта весьма актуальной.

Одной из основных задач анализа данных является кластеризация (кластерный анализ) – нахождение в выборке групп схожих по значениям признаков объектов [2]. Разработано множество методов и алгоритмов кластерного анализа данных. Среди наиболее распространенных методов кластерного анализа данных выделяют класс агломеративных иерархических методов. Иерархический метод кластерного анализа основан на идее структуризации объектов по степени близости и построении на этой основе иерархического представления.

Выбрать оптимальный алгоритм до проведения расчетов (априори), как правило, не представляется возможным, поскольку необходимо учитывать прикладной аспект задачи, цели кластеризации, структурные особенности исходных данных и ряд других факторов. Поэтому обоснованным представляется подход, предполагающий использование набора методов кластерного анализа данных для решения прикладной задачи.

В статье рассмотрен ключевой модуль учебного тренажера, реализующий функциональные возможности для обработки данных с помощью методов кластерного анализа данных. Важно отметить, что тренажер основан на концепции *no-code* (без программирования), что делает созданный программный продукт доступным для широкого круга пользователей.

В качестве языка для разработки тренажера выбран R, поскольку он разработан специально для анализа данных и имеет множество пакетов и средств для проведения кластеризации и визуализации ее результатов, что в сочетании с Shiny (фреймворк для веб-приложений R), позволяет создать обучающую программу с широким функционалом.

Учебный тренажер состоит из 6 модулей (рис. 1): справочно-теоретический, загрузка данных, предварительная обработка данных, кластерный анализ, оценка точности и интерпретация результатов, тестирование. Перед тем как перейти в раздел «Кластерный анализ» пользователю рекомендуется ознакомиться с теорией, выбрать и подготовить данные для ана-

лиза. Для удобства обучения в тренажере предусмотрен пример, в основе которого лежат данные о показателях деятельности 50-ти предприятий за год, содержащие объем выработки, фонд заработной платы, интегральный показатель использования рабочего времени, прибыль.

При переходе в раздел «Кластерный анализ» пользователю предлагается выбрать метод и меру расстояния. В тренажере реализовано 7 основных иерархических методов: метод одиночной связи, метод полной связи, невзвешенное попарное среднее, взвешенное попарное среднее, невзвешенный центроидный метод, взвешенный центроидный метод, метод Уорда.

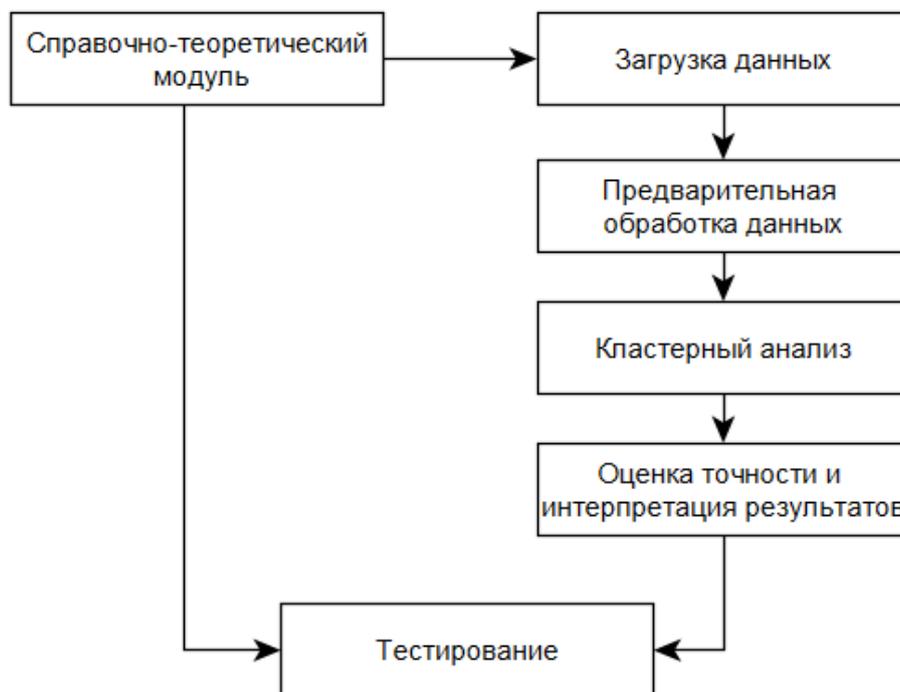


Рис. 1. Структура тренажера

Предоставляется также выбор среди следующих мер расстояний: Евклидово расстояние, взвешенное евклидово расстояние, квадрат евклидового расстояния, расстояние городских кварталов или манхэттенское расстояние, расстояние Чебышева, степенное расстояние.

При выборе того или иного метода анализа данных и меры расстояния пользователь должен учитывать характер данных. Тренажер поддерживает возможность проведения эксперимента с использованием различных методов и мер расстояний.

В тренажере реализованы различные типы графиков, позволяющие анализировать ход и результаты кластеризации: дендрограмма, тепловая карта, круговая дендрограмма, график «Многомерное масштабирование», силуэтный график, диаграмма распределения кластеров.

Дендрограмма позволяет пользователю оценить структуру данных, определить количество кластеров, понять, как объекты объединяются в груп-

пы. В дендрограмме высота соединения показывает расстояния между объектами, что помогает наглядно определить, насколько похожи те или иные объекты по значениям признаков. После построения дендрограммы пользователю предоставляется возможность задать оптимальное количество кластеров, после чего кластеры выделяются на диаграмме (рис. 2).

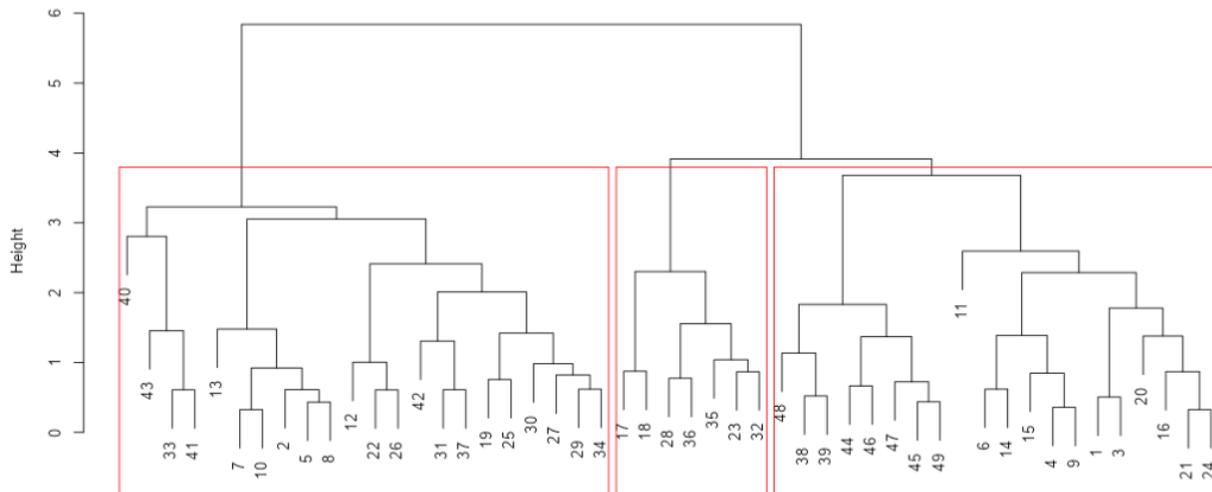


Рис. 2. Дендрограмма с выделенными кластерами

Следующим предлагаемым визуальным средством представления кластерного решения является тепловая карта (рис. 3). Это мощный инструмент, позволяющий за счет изменения интенсивности цвета быстро и наглядно определить и описать кластеры.

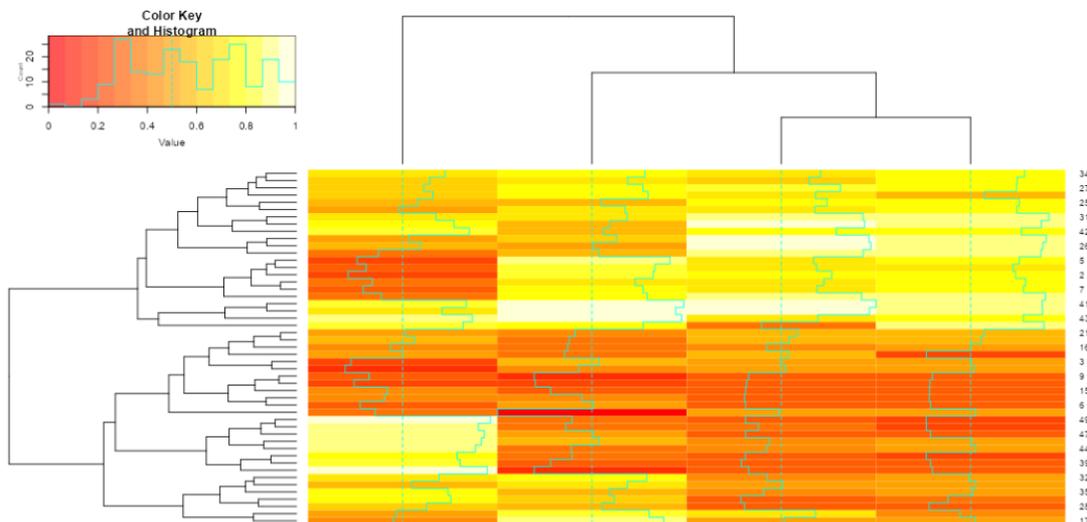


Рис. 3. Тепловая карта

Еще одним способом представления иерархической структуры кластеров является круговая дендрограмма (рис. 4). Главным отличием этой денд-

рограммы от классического варианта построения (рис. 2) является то, что все объекты располагаются по окружности.

«Многомерное масштабирование» – это подход, который позволяет выявить сходства или различия между объектами путем преобразования многомерных данных в двумерное пространство. Объекты показаны окружностями различных цветов, что помогает определять их принадлежность к тому или иному кластеру. На графике (рис. 5) видно, что выделено 3 кластера, но присутствует небольшое пересечение между объектами кластеров, что говорит о нечеткой границе между группами.

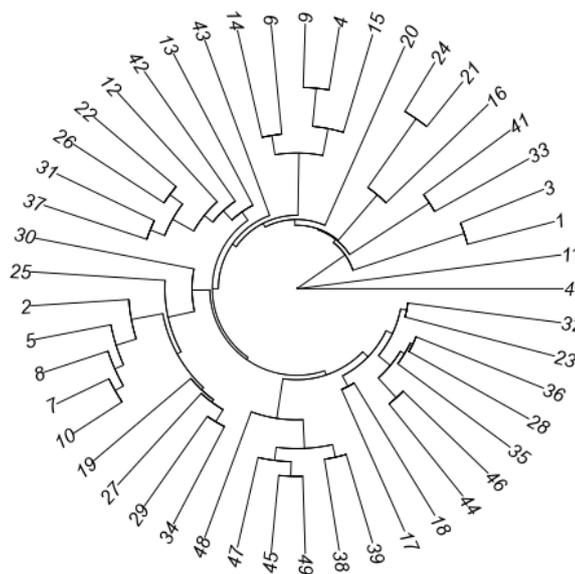


Рис. 4. Круговая дендрограмма

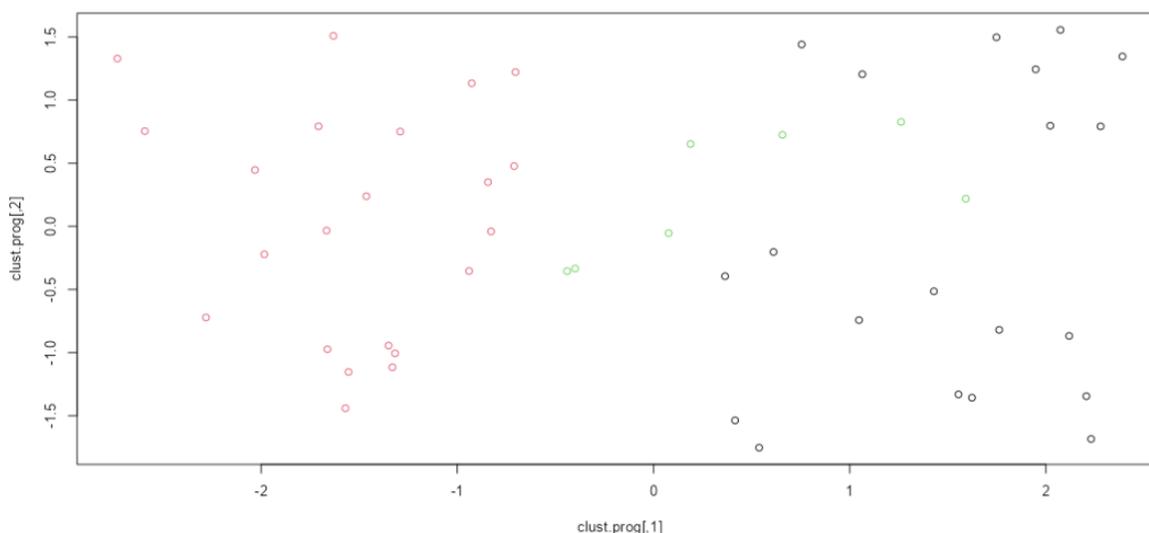


Рис. 5. «Многомерное масштабирование»

Одним из важных инструментов для оценки качества кластеризации является силуэтный график. Данный график показывает, насколько хорошо объекты подходят к кластерам, к которым они отнесены. Каждый объект

имеет силуэтный коэффициент, который варьируется от -1 до 1 и отражает соответствует объект кластеру или нет. Если значение коэффициента равно -1, считается, что объект неправильно отнесен к кластеру, а если значение равно 1, то объект хорошо вписывается в кластер, к которому он отнесен. Из силуэтного графика (рис. 6) видно, что выделено 3 кластера, при этом качество кластеризации не является высоким, поскольку 5 объектов в первом кластере и 2 объекта во втором кластере неправильно классифицированы.

Визуализация кластеров (Рис. 7) в пространстве первых двух главных компонент позволяет увидеть, как объекты сгруппированы в кластеры, что помогает лучше понять структуру данных.

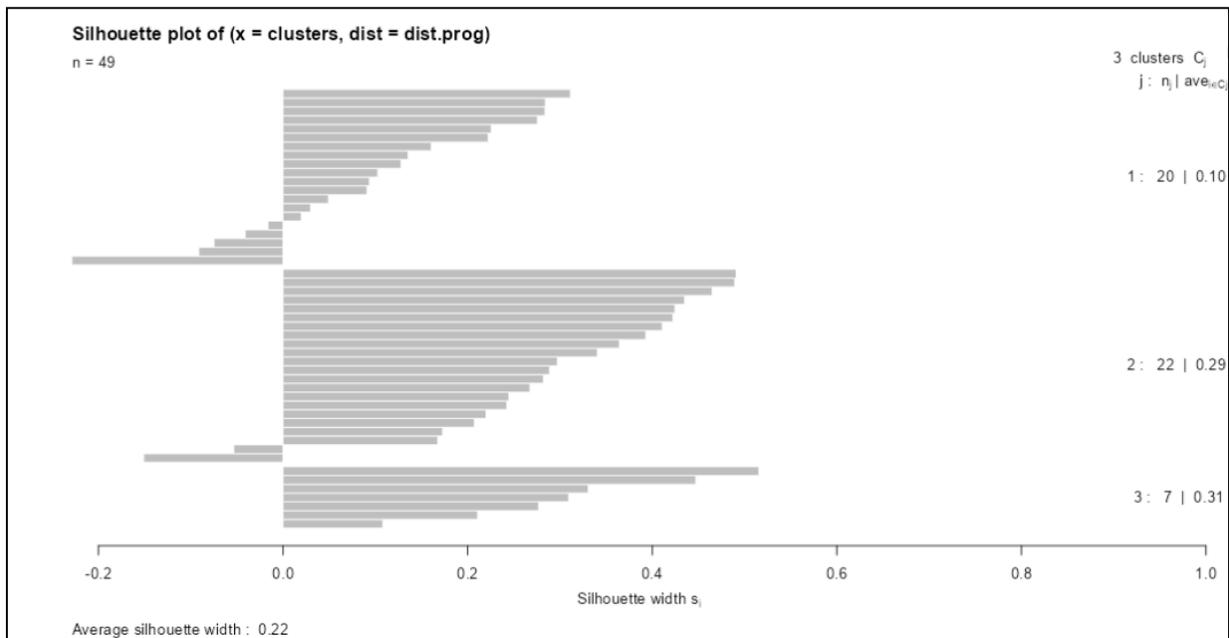


Рис. 6. Силуэтный график

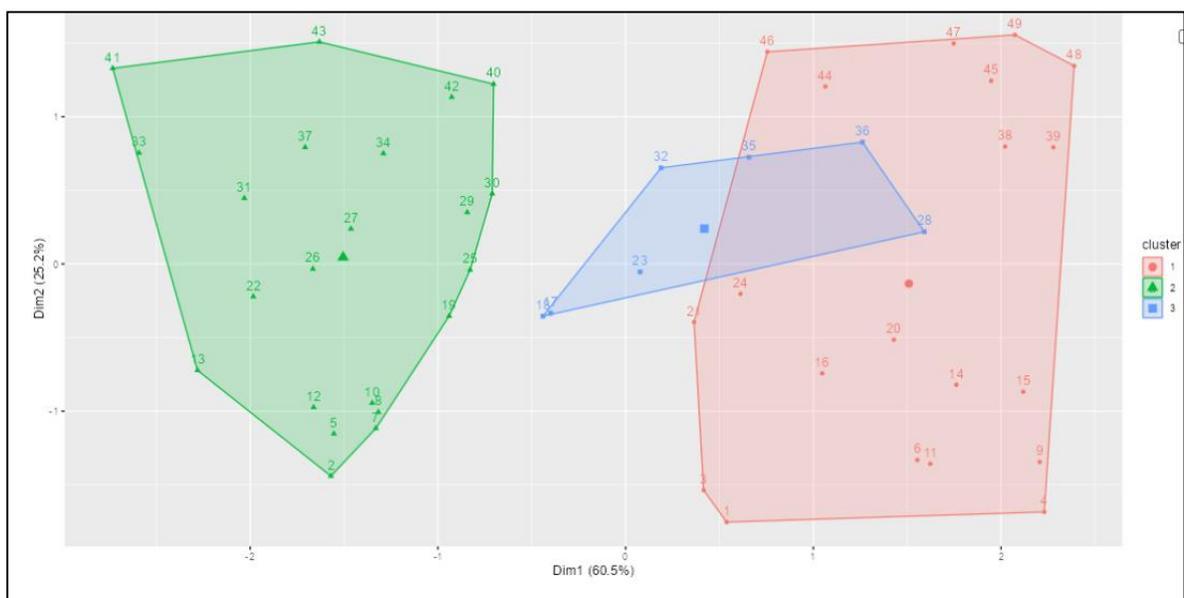


Рис. 7. Визуализация кластеров

К каждому графику в тренажере предусмотрено описание, что делает процесс кластеризации более понятным, удобным и доступным для пользователя.

Также в тренажере приведен код на языке R, реализующий используемые методы кластерного анализа данных. Это может быть полезно тем, кто хочет более детально погрузиться в анализ данных, изучить программную реализацию методов и алгоритмов кластерного анализа данных или модифицировать существующие алгоритмы.

Таким образом модуль «Кластерный анализ» является основной частью обучающего тренажера для изучения и исследования иерархических методов кластерного анализа данных. В этом разделе пользователи выбирают методы и меры расстояния для проведения кластеризации, а также визуально оценивают и сопоставляют результаты кластеризации на основе применения разных методов.

## Список литературы

1. Казанская, О.В. Индуктивные тренажеры в техническом университете / О.В. Казанская, О.К. Альсова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 902-906.

2. Ким Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / пер. с англ. А.М. Хотинского, С.Б. Королева // М.: Финансы и статистика. 1989. - 215 с.

3. Дубровская, Л.И. Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: Учебное пособие / Л.И. Дубровская, Г. Б Князев. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. – 120 с.

*Секция 5*

**АЛГОРИТМЫ И СИСТЕМЫ  
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

**А.В. Артемьев**, к.т.н., доцент, artemyev@msun.ru

**Д.А. Оськин**, к.т.н., доцент, osykinda@msun.ru

**Е.А. Яковенко**, аспирант, yackovenkoea@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала  
Г.И. Невельского», г. Владивосток, Россия

## **РАЗВИТИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА РАСХОЖДЕНИЯ МОРСКИХ СУДОВ**

*Аннотация:* Расхождение морских автономных надводных судов имеет особую специфику, связанную с получением и интерпретацией информации о намерениях других участников движения. Существующие классические подходы основаны на традиционных геометрических представлениях относительного движения судов. Предложен алгоритм действий судна в условиях группового движения, основанный на нечеткой логике. Описаны предложения по разработке алгоритма и программного инструментария для постановки вычислительных экспериментов по расхождению групп автономных судов.

*Ключевые слова:* морское автономное надводное судно, расхождение судов, нечеткая логика.

**A.V. Artemyev**, Ph.D., associate professor, artemyev@msun.ru

**D.A. Oskin**, Ph.D., associate professor, osykinda@msun.ru

**E.A. Yakovenko**, graduate student, yackovenkoea@yandex.ru

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

## **DEVELOPMENT OF INTELLIGENT METHODS BASED ON THE FUZZY LOGIC TO IMPLEMENT THE MARINE VESSEL DIVERGENCE ALGORITHM**

*Abstract:* The divergence of marine autonomous surface vessels has a special specificity related to the receipt and interpretation of information about the intentions of other participants in the movement. The existing classical approaches are based on traditional geometric representations of the relative motion of ships. An algorithm of ship actions in conditions of group movement based on fuzzy logic is proposed. Proposals for the development of an algorithm and software tools for setting up computational experiments on the divergence of groups of autonomous vessels are described.

*Key words:* marine autonomous surface vessel, divergence of vessels, fuzzy logic.

Увеличение интенсивности судоходства приводит к трудностям у судоводителей при принятии оптимальных решений для предотвращения развития опасных ситуаций. Благодаря развитию средств связи и навигации возможно создание единого морского информационного пространства для всех судов, или групп судов, находящихся в ситуации неблагоприятного сближения.

Проблема расхождения судов в море является весьма актуальной [1-4]. Анализ причин последних происшествий показывает, что в большинстве случаев человеческий фактор лежит в основе череды действий, ведущих к развитию неблагоприятной ситуации сближений судов. Для судоводителя становится все труднее принять оптимальное решение для предотвращения опасной ситуации в условиях интенсивного движения судов. Влияние человеческого фактора может быть уменьшено с помощью технических средств судовождения, снабженных высокотехнологичными компьютерными системами.

Развитие морских автономных надводных судов (МАНС) в судовождении получило широкий интерес с ускорением развития технологий, появлением роботов и искусственного интеллекта.

Разработка программного приложения для моделирования алгоритмов расхождения судов является важной задачей, связанной с тем, что, судовождение — это сложный процесс, требующий принятия быстрых и точных решений для предотвращения столкновений и обеспечения безопасности судоходства. Целью разработки является развитие программных решений, предназначенных для моделирования расхождения судов, в том числе МАНС.

Алгоритм совместного маневрирования группы (традиционных или автономных) судов приведен в [1]:

Шаг 1. Группа судов рассматривается как множество пар «судно-судно». Определяется наиболее опасная пара судов (для которой значение СПА (англ. Closest Point of Approach, ближайшая точка сближения) минимально и ТСРА (англ. Time to Closest Point of Approach, время до ближайшей точки сближения) менее установленного значения).

Шаг 2. Определяются параметры маневрирования для самой опасной пары судов.

Шаг 3. Определяется самая опасная пара судов с учетом измененных значений скорости и курса первой опасной пары. Если в новой паре присутствует одно из судов уже рассмотренной пары, то маневрирует второе (вновь обнаруженное опасным) судно пары.

4. Шаг 3 итерационно повторяется. Если последовательность вычислений приводит к невозможности выполнения маневра для безопасного рас-

хождения, то все маневры аннулируются и рассмотрение снова начинается с самой первой опасной пары, но уже с альтернативным маневром.

В статье [4] рассмотрен подход к проектированию приложения [5], реализующего процесс расхождения судов по трем основным ситуациям (обгон, ход встречными курсами, ход пересекающимися курсами).

В продолжение работы предпочтение отдается экспертному методу из-за его широкой приемлемости среди различных исследователей и возможности адаптации к работе судоводителя. Экспертный метод может воспроизвести мнение группы экспертов и позволить им поделиться своим опытом. Чтобы использовать знания экспертов, предлагается использовать методы нечеткой логики для оценки риска столкновения (англ. Collision Risk, CR) для каждого судна, участвующего во взаимном маневрировании (расхождении). Была выбрана самая близкая точка приближения CPA, но, в отличие от других, при выводе функций принадлежности используются безразмерная DCPA0 (англ. Distance at Closest Point of Approach, «дистанция кратчайшего сближения») и безразмерная TCPA0 (англ. Time at Closest Point of Approach, «время кратчайшего сближения»).

Кроме того, принимая во внимание тот факт, что сложность преодоления любого конфликта судов зависит от количества судов, вовлеченных в это столкновение, нечеткие функции принадлежности нормализуются с использованием масштабного коэффициента (англ. scale factor, SF), где SF может быть настроен на основе экспертного выбора для изменения значения риска в случае необходимости.

Система нечеткого вывода (англ. fuzzy inference system, FIS) обычно состоит из четырех основных компонентов, а именно [6, 7, 8]:

- фазификация четких входных данных,
- построение нечетких правил,
- реализация правил для получения нечеткого результата,
- дефазификация нечеткого результата в четкий выходной сигнал.

Основная задача этого интерфейса состоит в отображении четких входных данных от 0 до 1 с помощью набора функций принадлежности. Здесь DCPA0 и TCPA0 рассматриваются как два безразмерных четких входных сигнала. Для фиксированного набора функций принадлежности и заданного набора входных данных система затем проектируется для вычисления (англ. Collision Risk, CR) в соответствии с определенными правилами.

В системе FIS определен ряд лингвистических инструкций или правил для вычисления CR на основе DCPA0 и TCPA0. Чтобы обосновать значение CR, нечеткие правила выражаются в форме IF-THEN для описания взаимосвязей между входными данными и выходными данными.

Чтобы сопоставить четкие входные данные с нечеткими входными данными, разработаны функции принадлежности для относительного угла (англ. relative angle), угла столкновения (англ. encountering angle) и риска столкновения CR.

Нечеткие правила определяются в соответствии с правилами МППСС. Эти относительные углы и углы столкновения при столкновении судов позволяют нечеткой системе различать уступающие и стоящие суда, а затем предпринимать действия на основе значений CR.

Результатом работы системы нечеткого вывода является указание на изменение курса (Heading change) и изменение скорости (Speed change).

Структура системы нечеткого вывода приведена на рис. 1.

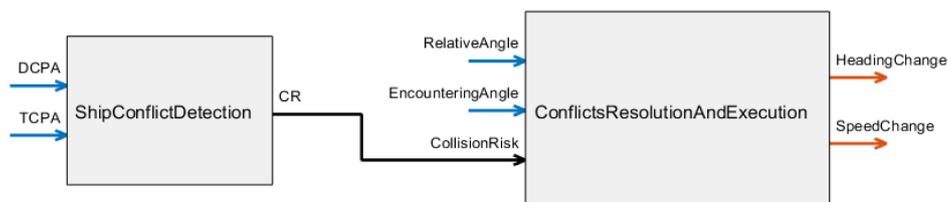


Рис. 1. Схема нечеткого вывода рекомендаций по изменению курса и скорости

В связи с этим правила для системы нечетких интерфейсов определены в соответствии с МППСС, и вся система реализована на платформе Matlab.

Проверка полученной системы осуществлялась с помощью смоделированной ситуации сближения трех судов с различными габаритами. Схемы движения судов для трех ситуаций опасного сближения приведены на рис. 2. Столкновения запланированы на 24-й минуте между первым (на схеме синий) и вторым (красный) судами и на 48 минуте между первым и третьим (на схеме зеленый) судами.

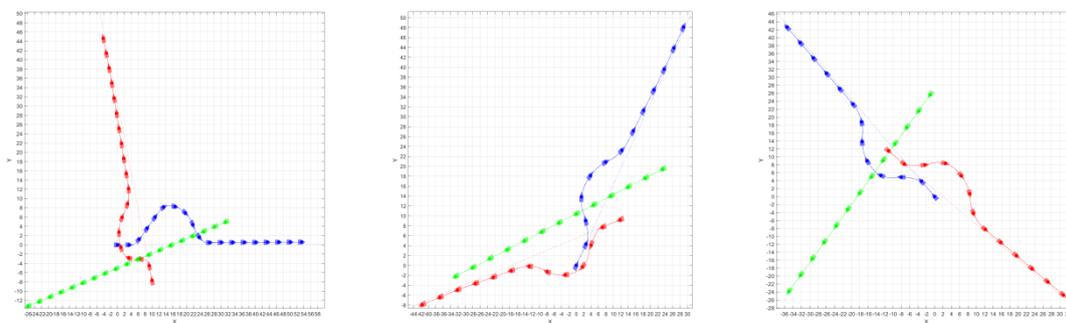


Рис. 2. Схемы движения судов, предложенная системой поиска расхождения

Полученная система корректно находит расхождения для ситуаций пересечения курсов и встречного движения, а также производит расчет возврата судна на прежнюю траекторию.

## Список литературы

1. Артемьев А.В. Имитационное моделирование безопасного расхождения групп морских судов / А.В. Артемьев, В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный, В.А.

Петров // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 3(42). – С. 25-26. – DOI 10.26102/2310-6018/2023.42.3.011. – EDN NNTJWE.

2. Артемьев А.В. Численное исследование задачи безопасного расхождения групп морских автономных надводных судов / А.В. Артемьев, В.А. Петров, В.М. Гриняк // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета. – 2023. – Т. 15, № 3(67). – С. 104-119. – DOI 10.24866/VVSU/2949-1258/2023-3/104-119. – EDN RMMZNL.

3. Артемьев А.В. Моделирование безопасного расхождения морских автономных надводных судов / А.В. Артемьев, В.М. Гриняк, В.А. Петров // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2023. – № 10. – С. 3-10. – DOI 10.36535/0236-1914-2023-10-1. – EDN ORDL SX.

4. Артемьев А.В. Разработка алгоритма и программы для моделирования расхождения автономных судов / А.В. Артемьев, Е.А. Яковенко, Д.А. Оськин // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 4-3. – С. 76-85. – DOI 10.37220/МИТ.2023.62.4.068. – EDN DEPPDM.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682137 Российская Федерация. Программа «Безопасное расхождение судов» : № 2024680775 : заявл. 10.09.2024: опубл. 18.09.2024 / Е.А. Яковенко, А.В. Артемьев, Д.А. Оськин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского». – EDN NGWTPQ.

6. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.

7. Нечеткая логика и нейронные сети в системах управления и диагностике: учеб. пособие / О.В. Веселов; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2023. – 288 с. – ISBN 978-5-9984-1641-5

8. Ahmed, Y.A.; Hannan, M.A.; Oraby, M.Y.; Maimun, A.; COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9, 790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>

А.Е. Архипов, м.н.с., a.arkhipov@rtc.ru  
Д.С. Кобзарь, математик, d.kobzar@rtc.ru  
К.К. Забелло, программист, k.zabello@rtc.ru  
А.А. Пожилов, инженер 2 категории, a.pojilov@rtc.ru  
ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЙ ПРЕПЯТСТВИЙ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ

*Аннотация:* В работе приведен анализ обобщающей способности графовой нейронной сети для моделирования нестационарного двумерного обтекания препятствий сложных форм, отсутствующих в обучающей выборке. Сформирован набор данных с использованием конечно-объемного моделирования. Обучена и протестирована графовая нейронная сеть для предсказания полей скорости и давления различных форм препятствия.

*Ключевые слова:* глубокое облучение, графовые нейронные сети, вычислительная гидрогазодинамика, конечно-объемные методы, обтекание препятствий.

A.E. Arkhipov, junior researcher, a.arkhipov@rtc.ru  
D.S. Kobzar, mathematician, d.kobzar@rtc.ru  
K.K. Zabello, programmer, k.zabello@rtc.ru  
A.A. Pojilov, engineer, a.pojilov@rtc.ru  
RTC, St.Petersburg, Russia

## APPLICATION OF A NEURAL NETWORK FOR NUMERICAL SIMULATION OF FLOW AROUND OBSTACLES OF VARIOUS SHAPES

*Abstract:* The paper presents an analysis of the generalizing ability of a graph neural network for modeling unsteady two-dimensional flow around obstacles of complex shapes that are absent in the training sample. A data set has been generated using FVM. A graph neural network has been trained and tested to predict velocity and pressure fields of various obstacle shapes.

*Key words:* deep learning, graph neural networks, computational fluid dynamics, finite volume method, obstacles flow.

### Введение

Вычислительная гидрогазодинамика (CFD) включает в себя целое многообразие методов, наиболее популярными из которых являются конечно-

объемные методы (FVM). FVM позволяет достаточно точно производить моделирования, связанные с потоком жидкости, без проведения дорогостоящих натуральных экспериментов. Сегодня FVM активно используется при проектировании высокотехнологического оборудования и строительных конструкций, а также в системах автоматического управления. Одним из примеров использования FVM в системах управления можно выделить работу [1], в которой предложена концепция вложенных моделей для синтеза регулятора автономного необитаемого подводного аппарата.

Существенным недостатком конечно-объемных методов является плохая параллелизуемость, особенно на графических ускорителях. В последние годы большую популярность обрели искусственные нейронные сети, которые, напротив, позволяют достаточно эффективно обрабатывать большие массивы данных за счет распараллеливания вычислений. Нейронные сети являются универсальными аппроксиматорами [2], то есть позволяют аппроксимировать произвольную функцию с заданной точностью. На практике при обучении нейронных сетей возникают сложности с недостаточным количеством обучающих примеров и эффективным представлением данных.

Сегодня существуют наработки, позволяющие использовать нейронные сети для задач гидродинамики, однако зачастую оценка предлагаемых решений проводится на примерах, аналогичных обучающей выборке. Такой подход не позволяет оценить обобщающую способность сети для другой постановки задачи, например, с более сложной геометрией. Цель настоящей работы состоит в исследовании качества моделирования с помощью нейронной сети обтекания препятствий сложных форм, отсутствующих в обучающей выборке.

### Набор данных

Для формирования набора данных проведены двумерные расчеты обтекания препятствий различной формы несжимаемой жидкостью. Расчётная область представляла собой прямоугольник  $H \times L$ , где  $H = 0.41$  (масштаб длины),  $L = 1.6$  м. Препятствие располагалось в центре расчётной области. На входной границе задавался равномерный профиль скорости ( $V = 1$  м/с – масштаб скорости), на выходной – нулевое относительное давление. На верхней и нижней границах ставилось условие симметрии. Плотность жидкости составляла  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость –  $\mu = 0,001$  кг/(м·с). Число Рейнольдса, составляет  $Re = HV\rho/\mu = 4,1 \cdot 10^5$ . Расчёты проводились в нестационарной ламинарной постановке. Масштабом давления выступал скоростной напор ( $P = \rho V^2/2$ ). Стоит отметить, что целью моделирования являлось формирование разнообразных примеров для обучения нейронной сети. Для ускорения обучения использовались достаточно грубые модели, которые, тем не менее, воспроизводили ключевое гидродинамическое явление – дорожку Кармана.

Рассмотрены два типа форм препятствий: простые (круг, треугольник, прямоугольник) и составные (круг и прямоугольник, треугольник и прямоугольник, стрелка). Составные использовались исключительно для тестирования нейронной сети и представляли собой совокупность двух простых. Моделирование приводилось множество раз с изменением одного из параметров геометрии (поворот, размер, перемещение). На рис. 1 приведено распределение моделирований по формам препятствий и выборкам, а также приведен варьируемый параметр геометрии (оранжевой стрелкой).

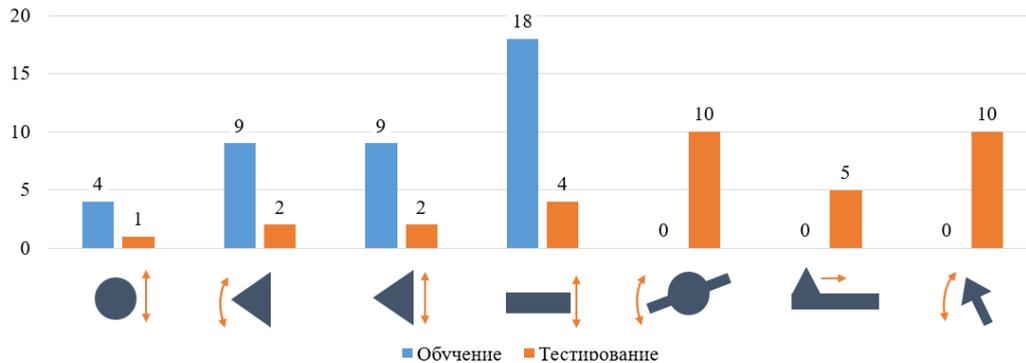


Рис. 1. Распределение примеров в наборе данных по различным формам

## Архитектура нейронной сети

Сверточные нейронные сети долгое время использовались для обработки различных типов данных, представляемых в виде набора матриц, например, аудио, изображений и текстов. Однако расчетная сетка FVM представима в виде графа, с помощью которого можно изменять плотность точек в различных областях физического пространства. Граф  $G = (V, E)$  можно представить в виде множества вершин  $V$  и ребер  $E$ , которые могут содержать признаки для нейросетевой обработки, как например, поля физических величин, информация о координатах, типах углов и т.д. Сегодня существуют специализированные архитектуры сетей, называемых графовыми нейронными сетями [3]. В работе используется нейронная сеть MeshGraphNets [4]. Архитектура сети состоит из трех компонентов: энкодера, обработчика (графовой нейронной сети) и декодера (рис. 2).

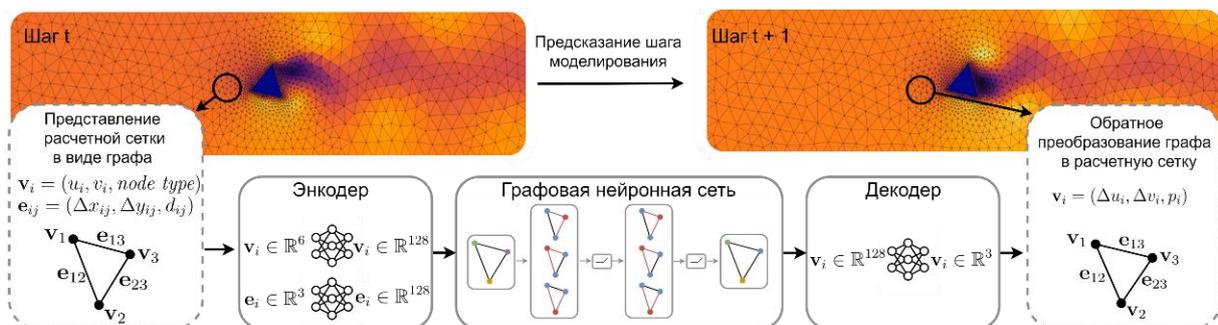


Рис. 2. Иллюстрация работы графовой нейронной сети

Графовые нейронные сети являются обобщением сверточных нейронных сетей, только свертка в данном случае производится с учетом соседних вершин. Поэтому основную операцию называют графовой сверткой, один слой которой принимает на вход граф и выдает тот же граф с обновленными значениями признаков вершин и ребер. Для реализации данного слоя предложена парадигма передачи сообщений (message passing) между вершинами, которая состоит из двух шагов агрегации и обновления. На шаге агрегации для каждой вершины формируются тройки, состоящие из ребра и признаков исходной вершины и вершины, связанных с исходным ребром. На этапе обновления признаковое состояние исходной вершины обновляется с учетом обучаемых весов и признаков соседних вершин. После обновления всех узлов новые признаковые значения вершин будут учитывать информацию только с ближайших соседей. Чтобы учитывать информацию удаленных узлов можно реализовать данную обработку несколько раз с различными наборами обучающих параметров, что фактически будет соответствовать нескольким слоям нейронной сети.

В качестве входных данных нейронная сеть принимает граф на шаге моделирования  $t$  и предсказывает поле для шага  $t + 1$ . Для предсказания всех временных шагов необходимо результат предсказаний использовать в качестве входа в нейронную сеть на следующем шаге. При предсказании большого количества шагов будут неизбежно накапливаться ошибки, поэтому нейронную сеть обучают на изначально зашумленных данных, чтобы обеспечить робастность сети к накоплению ошибок. Энкодер нейронной сети предназначен для конвертации физических величин в признаковое представление. Он состоит из двух перцептронов для вершин и ребер. Вектор физических величин в вершинах представляет собой проекции скоростей и тип узла, закодированных 1 или 0 для обозначения типа узла (в работе используется 4 типа узла). Ребра содержат информацию о взаиморасположении соседних вершин. После обработки энкодером, признаки представляют собой вектор из 128 элементов для каждой вершины и ребра. Графовая нейронная сеть обрабатывает граф с векторным представлением вершин и ребер и на выходе выдает граф исходной размерности. Декодер предназначен для конвертации вектора признаков в вектор физических величин. В работе предсказываются значения давления ( $p$ ) и изменения скоростей в узлах расчетной сетки ( $\Delta u$ ,  $\Delta v$ ).

### Экспериментальное исследование

Во время обучения нейронная сеть предсказывала поля гидродинамических величин на один временной шаг. Выявлено, что накопление ошибок происходит даже на обучающей выборке, для которой предсказание одного шага происходит достаточно точно (СКО для скорости меньше  $10^{-6}$ ). На рис. 3 приведены численные значения среднеквадратичного отклонения.

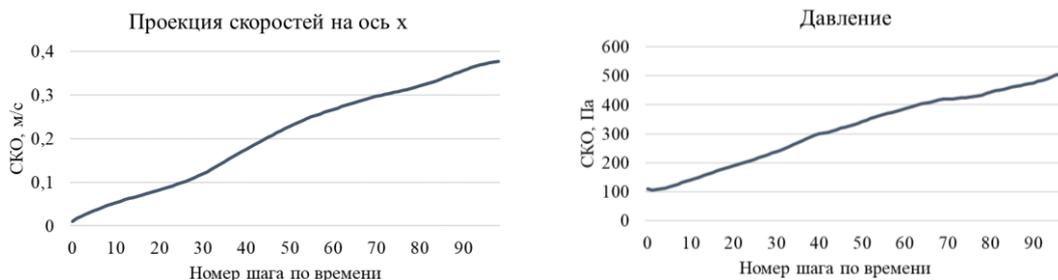


Рис. 3. Ошибка предсказания полей на обучающей выборке

Можно заметить, что после 30 шагов наблюдается значительный рост ошибки во всех физических величинах. При более детальном сравнении предсказанных полей с результатом численного моделирования выявлено, что большая часть ошибок связана с расхождением фазы дорожки Кармана. На рис. 4 приведены примеры, когда нейронная сеть запаздывает с предсказанием схода вихря (слева) и когда совпадает с конечно-объемной моделью (справа). Данные результаты соответствуют тесовой выборке для простых форм. Результаты численного сравнения полей для различных форм препятствий для 600 шагов последовательного предсказания одного и тридцати шагов приведены в таблице 1. Стоит отметить, что моделирование одного шага по времени FVM занимает 3,16 сек, а с помощью нейронной сети 0,02 сек.

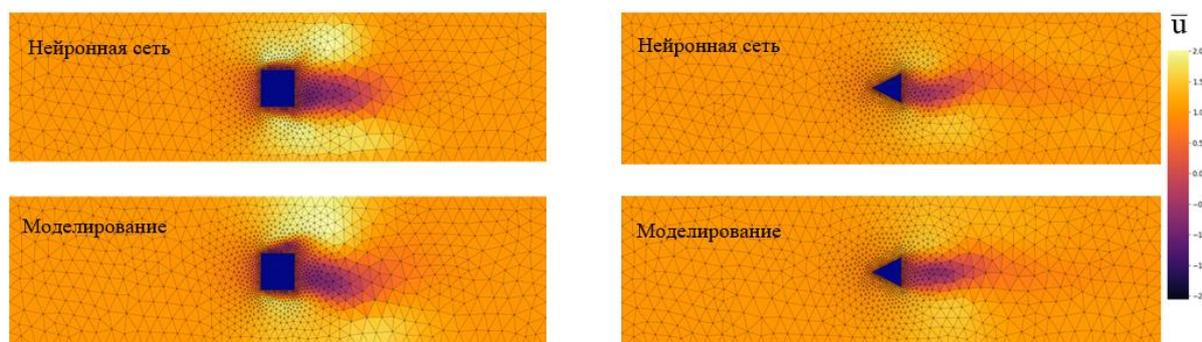


Рис. 4. Сравнения предсказания и моделирования поля скоростей

Таблица 1. Результат вычисления ошибок при моделировании

| Форма препятствий           | СКО, 1 шаг            |                       |           | СКО, 30 шагов         |                       |           |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------|
|                             | $\bar{u}$ , $10^{-3}$ | $\bar{v}$ , $10^{-3}$ | $\bar{p}$ | $\bar{u}$ , $10^{-3}$ | $\bar{v}$ , $10^{-3}$ | $\bar{p}$ |
| Круг                        | 0,61                  | 0,63                  | 0,03      | 5,25                  | 6,02                  | 0,03      |
| Треугольник                 | 4,20                  | 2,49                  | 0,15      | 65,58                 | 48,56                 | 0,25      |
| Прямоугольник               | 5,18                  | 3,98                  | 0,18      | 62,16                 | 33,66                 | 0,23      |
| Круг и прямоугольник        | 11,57                 | 9,34                  | 1,04      | 154,94                | 132,28                | 1,25      |
| Треугольник и прямоугольник | 10,18                 | 8,19                  | 0,58      | 145,14                | 114,72                | 0,72      |
| Стрелка                     | 10,29                 | 8,33                  | 0,45      | 152,35                | 110,51                | 0,67      |

## Заключение

В работе проводилось исследование возможностей графовой нейронной сети предсказывать обтекание препятствий сложной формы. Установлено, что графовая нейронная сеть позволяет ускорять моделирование вы узлов расчетной сетки, аналогичной FVM, более чем в 100 раз. При исследовании выявлено, что для сложной формы препятствий нейронная сеть предсказывает дорожку Кармана, однако со сдвигом по фазе относительно конечно-объемной модели. С увеличением количества временных интервалов ошибка предсказаний накапливается. Для скорости она приближается к 15% при моделировании 30 временных шагов. Качество моделирования сложных форм в 2-3 раза хуже качества предсказания простых форм, на которых производилось обучение нейронной сети. Для снижения уровня ошибки необходимо уменьшать количество предсказываемых временных шагов. В некоторых задачах управления полученная ошибка моделирования может быть приемлемой. В дальнейших исследованиях необходимо найти способ обучения модели устойчиво предсказывать длительные временные интервалы.

*Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00697-24-03 от 04.07.2024. «Исследование методов применения нейронных сетей для моделирования нелинейных нестационарных физических полей в анизотропных средах при решении задач механики разрушения и гидрогазодинамики турбулентных потоков» (FNRG-2024-0001 1023101000004-2-1.2.1;2.3.1).*

## Список литературы

1. Горюнов В. В., Половко С. А., Щур Н. А. Технология создания кибернетических моделей для синтеза и отработки регуляторов системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата //Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8. – №. 4. – С. 308-318.
2. Cybenko G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function //Mathematics of control, signals and systems. – 1989. – Т. 2. – №. 4. – С. 303-314.
3. Wu Z. et al. A comprehensive survey on graph neural networks //IEEE transactions on neural networks and learning systems. – 2020. – Т. 32. – №. 1. – С. 4-24.
4. Pfaff T. et al. Learning mesh-based simulation with graph networks //arXiv preprint arXiv:2010.03409. – 2020.

А.А. Беззубов, аспирант, Artem.Bezzubov@urfu.me  
К.А. Аксенов, к.т.н., доцент, k.a.aksenov@urfu.ru  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

## ОБЗОР МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВИРТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

*Аннотация:* Данная статья посвящена исследованию роли машинного обучения в развитии виртуальных электростанций, новой концепции в управлении энергосистемами. Проводится всесторонний обзор различных методов, применяемых для прогнозирования спроса на электроэнергию, оптимизации распределения ресурсов и управления гибкими нагрузками. Исследование демонстрирует, как эти методы повышают эффективность виртуальных электростанций, позволяя им принимать информированные решения в условиях быстро меняющейся энергетической среды. Рассматриваются преимущества и ограничения различных методов, а также предлагаются направления для будущих исследований, направленные на дальнейшее улучшение управления виртуальными электростанциями и содействие устойчивому развитию энергетики.

*Ключевые слова:* Виртуальные электрические станции, машинное обучение, оптимизация, прогнозирование

А.А. Bezzubov, PhD student, Artem.Bezzubov@urfu.me  
К.А. Aksenov, Ph.D., Associate Professor, k.a.aksenov@urfu.ru  
Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

## AN OVERVIEW OF METHODS FOR OPTIMIZING AND PREDICTING THE OPERATING MODES OF VIRTUAL POWER PLANTS

*Abstract:* This article is devoted to the study of the role of machine learning in the development of virtual power plants, a new concept in the management of energy systems. A comprehensive review of various methods used to predict electricity demand, optimize resource allocation, and manage flexible loads is being conducted. The study demonstrates how these methods increase the efficiency of virtual power plants, allowing them to make informed decisions in a rapidly changing energy environment. The advantages and limitations of various methods are considered, as well as directions for future research aimed at further improving the management of virtual power plants and promoting sustainable energy development are proposed.

*Keywords:* Virtual power plants, machine learning, optimization, forecasting.

## Введение

В последние десятилетия мир сталкивается с растущими вызовами в области энергетики, связанными с изменением климата, истощением традиционных ресурсов и необходимостью перехода к устойчивым источникам энергии. Виртуальные электрические станции (ВЭС) представляют собой инновационное решение, позволяющее интегрировать распределенные источники энергии, такие как солнечные и ветровые установки, в единую управляемую систему. Эти системы не только способствуют оптимизации использования возобновляемых ресурсов, но и обеспечивают надежность и гибкость энергоснабжения.

С развитием технологий искусственного интеллекта (ИИ) открываются новые горизонты для повышения эффективности и надежности ВЭС. Методы ИИ, такие как машинное обучение, нейронные сети и алгоритмы оптимизации, позволяют анализировать большие объемы данных, прогнозировать потребление энергии и оптимизировать управление ресурсами в реальном времени [1]. Это, в свою очередь, способствует более эффективному распределению энергии, снижению затрат и минимизации воздействия на окружающую среду.

В данной статье рассмотрены существующие методы, применяемые для прогнозирования погоды, ветра, солнечной радиации и других параметров, необходимых для эффективного управления виртуальными электрическими станциями. Производится анализ текущих достижений в этой области, рассматриваются преимущества и ограничения различных подходов, а также выделяются направления для будущих исследований и разработок.

## Проблемы

Одна из основных проблем заключается в том, что солнечные и ветровые электростанции, имеют непостоянный характер производства энергии, что приводит к увеличению спроса в процессе торговли в реальном времени [2, 3]. Это, в свою очередь, увеличивает разницу между результатами расчетов для рынка на сутки вперед (РСВ) и балансирующего рынка (БР), что может привести к росту волатильности цен и, следовательно, к более высоким затратам на электроэнергию.

Кроме того, существующие методы планирования ВЭС часто используют централизованную структуру управления, что затрудняет подключение новых распределенных энергетических ресурсов и требует перенастройки модели при изменении конфигурации ВЭС [2].

Исследования в области ВЭС направлены на решение проблем прогнозирования и гибкости. Маневренность ВЭС - это способность станции регулировать генерацию и потребление, для баланса спроса и предложения. Одной из проблем так же является долговечность этой маневренности [4].

Выделяют три основных типа задач, которые могут решаться с помощью машинного обучения (МО) в контексте ВЭС: оптимизация (затрат, возобновляемых источников энергии (ВИЭ), спроса и т.д.), прогнозирование (нагрузки, генерации, цен) и классификация (обнаружение и диагностика неисправностей ВИЭ) [5]. Точное прогнозирование ВИЭ и нагрузки критически важно для стабильности энергосистемы [6].

## Методы

В этом разделе идет описание различных методов, применяемых в задачах прогнозирования и оптимизации ВЭС. В таблице 1 приведено краткое сравнение некоторых методов.

В статье [2] предлагается новый метод планирования для ВЭС, работающей на возобновляемых источниках энергии, основанный на интеграции технологии управляемого рекуррентного блока и алгоритма Мягкий Актор-Критик. Предложенный метод обеспечивает эффективное планирование ВИЭ, учитывающее прогнозы на следующий день. Он позволяет снизить объем торговли БР до 10% от объема торговли в РСВ, что является важным достижением для ВЭС. Метод также позволяет эффективно смещать пиковые нагрузки на периоды с низкими ценами. При этом, проблема неопределенности ВИЭ остается сложной задачей, требующей дальнейшего решения.

В статье [4] подробно описаны два метода машинного обучения, используемые для прогнозирования маневренности виртуальных электростанций: многофакторная линейная регрессия и искусственные нейронные сети (ИНС) с одним скрытым слоем. Результаты исследования показали, что ИНС обеспечивает более точные результаты, чем линейная регрессия, с ошибкой в среднем 5,3% по сравнению с 15% для линейной регрессии. При этом отмечается сложность получения информации о доступной маневренности мощности и сложности её моделирования.

В статье [6] авторы предлагают сравнение нормализующих потоков с современными глубокими генеративными моделями, генеративно-состязательными сетями и вариационными автоэнкодерами, в области прогнозирования возобновляемых источников энергии и нагрузки. Авторы используют открытый набор данных GEFCom 2014. Но не ясна реальная эффективность моделей в условиях, когда погодные факторы играют важную роль.

В статье [7] авторы предлагают алгоритм глубокого обучения с подкреплением, который позволяет найти оптимальное решение для распределения энергии в ВЭС с учетом стохастических характеристик распределенной генерации энергии. Авторы показывают, что предложенный алгоритм имеет более низкую временную сложность. При этом они указывают на сложность реализации данного метода, а также наличие проблем интеграции различных источников энергии и потребителей.

В статье [8] авторы используют методику глубокого обучения для создания вероятностных прогнозов генерации ветровой энергии. В частности, они применяют модели из библиотеки GluonTS, которая предназначена для моделирования временных рядов с использованием методов глубокого обучения.

Таблица 1. Сравнение методов

| Метод  | Достоинства  | Недостатки   |
|--|--|--|
| Управляемый рекуррентный блок [2]  | <ul style="list-style-type: none"> <li>эффективно обрабатывает последовательные данные</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>проблемы с запоминанием долгосрочных зависимостей</li> </ul>  |
| Сдержанный Мягкий Актер-Критик [2]   | <ul style="list-style-type: none"> <li>использует технику релаксации Лагранжа</li> <li>обеспечивает соблюдение ограничений во время обучения</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>требует тщательной настройки</li> <li>требует дополнительного обучения сети</li> </ul>  |
| Многофакторная линейная регрессия [4]  | <ul style="list-style-type: none"> <li>относительно быстрое время обучения</li> <li>хорошо интерполирует и экстраполирует данные</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>может страдать от неточности при моделировании нелинейных сложных систем</li> </ul>   |
| Искусственная нейронная сеть (ИНС) [4]   | <ul style="list-style-type: none"> <li>может моделировать нелинейные отношения между входными и выходными данными,</li> <li>может адаптироваться к новым данным и продолжать обучаться</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>требует больше времени на обучение</li> <li>может быть более сложной в настройке и интерпретации,</li> <li>может быть подвержена переобучению</li> </ul>  |
| Нормализующие потоки [6]   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Простота в использовании</li> <li>учитывают контекстную информацию</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Низкая скорость</li> <li>требуют большого объема данных</li> <li>сложны в реализации</li> </ul>   |
| Теория потенциальных игр [9]   | <ul style="list-style-type: none"> <li>обеспечивает сбалансированное распределение доходов между виртуальными электростанциями</li> <li>позволяет учитывать ограничения на генерацию энергии и спрос на энергию</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>основан на ряде предположений и ограничений</li> <li>не учитывает некоторые аспекты реальной энергосистемы</li> </ul>   |
| Распределенный дискретный временной алгоритм с событие-ориентированным подходом [10] | <ul style="list-style-type: none"> <li>использует стратегию связи по событиям, которая позволяет избежать ненужного обмена данными и снизить нагрузку на сеть</li> <li>использует виртуальную стратегию связи, которая позволяет адаптировать алгоритм в реальном времени</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Требуется тщательное понимание теории графов и методов оптимизации</li> <li>может не работать должным образом в сетях с направленными или несвязанными связями</li> <li>предполагает отсутствие задержек или потерь пакетов в процессе передачи данных</li> </ul> |

|  |   |  |
|--|---|--|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>использует распределенную стратегию, которая позволяет лучше адаптироваться к изменениям топологии сети</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>разработан для работы с генераторами, которые имеют ограничения на выходную мощность</li> </ul>   |
| метод координации управления коммерческой виртуальной электростанцией [11] | <ul style="list-style-type: none"> <li>Метод учитывает требования к надежности распределительной сети</li> <li>Метод направлен на максимизацию чистой прибыли коммерческой ВЭС</li> <li>Метод был протестирован на реальных данных</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>требует тщательного моделирования и анализа данных</li> <li>опирается на определенные предположения и данные</li> <li>Эффективность метода зависит от точности прогнозов выходной мощности возобновляемых источников энергии</li> </ul> |
| Распределительно-устойчивая оптимизация [12]                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>может эффективно использовать исторические данные</li> <li>может быть адаптирован к различным сценариям и условиям</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>сильно зависит от качества и объема исторических данных</li> <li>требует настройки различных параметров</li> <li>может не полностью охватывать все аспекты вероятностного распределения неопределенности</li> </ul>                     |

Анализ методов, применяемых в контексте виртуальных электростанций, показывает, что каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, что влияет на их использование. Выбор методов должен основываться на конкретных задачах и условиях эксплуатации ВЭС, учитывая их преимущества и ограничения.

## Заключение

В этой статье представлен анализ последних достижений в области оптимизации и прогнозирования ВЭС. Исследование продемонстрировало, что эта область виртуальных электрических станций переживает быстрые изменения и инновации.

В обзоре рассмотрены различные аспекты, начиная от проблем, связанных с стохастической природой источников энергии до необходимости оптимизации работы ВЭС в взаимодействии между объектами ВЭС и потребителями, предоставляя обзор существующих методов и технологий. Использование глубокого машинного обучения с применением исторических данных внесло значительный вклад в улучшение прогнозирования на основе данных о погоде, в то время как обращение к алгоритмам принятия решений дает новые возможности для участия в рынках электроэнергии и оптимизации процессов взаимодействия объектов, включенных в ВЭС. Сочетание этих подходов может привести к новым решениям в области оптимизации и прогнозирования режимов работы ВЭС.

Кроме того, выявлен ряд проблем и нерешенных вопросов, которые требуют дальнейшего изучения. Проблемы, связанные с адаптацией данных

методов к использованию в энергосистемах и прогнозированием долгосрочных зависимостей, были признаны важными областями, требующими дополнительных исследований. Решение этих проблем может привести к значительному прогрессу в прогнозировании и оптимизации режимов работы ВЭС.

Дальнейшие исследования, основанные на этих выводах, могут способствовать развитию методов прогнозирования и оптимизации ВЭС, что приведет к более глубокому пониманию и практическим достижениям.

## Список литературы

1. Ruan G. et al. Data-driven energy management of virtual power plants: A review // *Advances in Applied Energy*. – 2024. – pp. 100170.
2. Deng X. et al. GRU-integrated constrained soft actor-critic learning enabled fully distributed scheduling strategy for residential virtual power plant // *Global Energy Interconnection*. – 2024. – vol. 7. – №. 2. – pp. 117-129.
3. Sarathkumar T. V. et al. Virtual Power Plant Generating Units and Energy Arbitrage Economics in the Electricity Market Using Machine Learning Approach // *Research, Virtual Power Plant Generating Units and Energy Arbitrage Economics in the Electricity Market Using Machine Learning Approach*.
4. MacDougall P. et al. Applying machine learning techniques for forecasting flexibility of virtual power plants // *2016 IEEE electrical power and energy conference (EPEC)*. – IEEE, 2016. – pp. 1-6.
5. Sierla S., Pourakbari-Kasmaei M., Vyatkin V. A taxonomy of machine learning applications for virtual power plants and home/building energy management systems // *Automation in Construction*. – 2022. – vol. 136. – pp. 104174.
6. Dumas J. et al. A deep generative model for probabilistic energy forecasting in power systems: normalizing flows // *Applied Energy*. – 2022. – vol. 305. – pp. 117871.
7. Lin L. et al. Deep reinforcement learning for economic dispatch of virtual power plant in internet of energy // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2020. – vol. 7. – №. 7. – pp. 6288-6301.
8. Eikeland O. F. et al. Probabilistic forecasts of wind power generation in regions with complex topography using deep learning methods: An Arctic case // *Energy Conversion and Management: X*. – 2022. – vol. 15. – pp. 100239.
9. Liu W. et al. Optimal dispatch strategy of virtual power plants using potential game theory // *Energy Reports*. – 2022. – vol. 8. – pp. 1069-1079.
10. Wu Y. et al. A distributed event-triggered algorithm for constrained economic dispatch problem via virtual communication // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2024. – vol. 155. – pp. 109501.
11. Hu S., Chen Y., Feng J. A flexible interactive coordination control method of commercial virtual power plant based on WCVAR // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2024. – vol. 160. – pp. 110128.
12. Song C., Jing X. Bidding strategy for virtual power plants with the day-ahead and balancing markets using distributionally robust optimization approach // *Energy Reports*. – 2023. – vol. 9. – pp. 637-644.

П.В. Васильев, ассистент, pavel-vasilev-99@bk.ru  
О.В. Даринцев, д.т.н., доцент, oleg\_sam@mail.ru  
Р.А. Мунасыпов, д.т.н., профессор, rust40@mail.ru  
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТИ В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Аннотация:* Представлен регулятор на основе ассоциативной памяти. Описан алгоритм и принцип его работы. Проведено сравнение регуляторов на основе нечеткой логики и ассоциативной памяти. Представлен план дальнейших исследований.

*Ключевые слова:* ассоциативный регулятор, нечеткая логика, автоматическое управление.

P.V. Vasiliev, assistant, pavel-vasilev-99@bk.ru  
O.V. Darintsev, Ph.D, Associate Professor, oleg\_sam@mail.ru  
R.A. Munasypov, Ph.D, Professor, rust40@mail.ru  
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

## COMPARATIVE ANALYSIS OF FUZZY LOGIC AND ASSOCIATIVE MEMORY IN INTELLIGENT CONTROL TASKS

*Abstract:* A regulator based on associative memory is presented. The algorithm and the principle of its operation are described. A comparison of regulators based on fuzzy logic and associative memory is carried out. A plan for further research is presented.

*Key words:* associative controller, fuzzy logic, automatic control.

Производительность нечеткого регулятора тесно связана с информативностью формируемой поверхности отклика, определяемой чувствительностью выходного сигнала к вариациям входных параметров. Увеличение количества термов в лингвистических переменных способствует более точной обработке входной информации. Расширение рабочего диапазона входных сигналов при неизменном количестве термов приводит к снижению разрешающей способности и информативности поверхности отклика. В то же время, увеличение количества термов, несмотря на повышение точности, вызывает экспоненциальный рост объема базы правил и, как следствие, вычисли-

тельной сложности, что негативно сказывается на скорости обработки информации и характеристиках переходного процесса в системе. [1-2].

В связи с этим актуальной задачей является синтез регулятора, который, имея большую базу данных, способен быстро находить значение, удовлетворяющее заданному режиму работы. Таким решением может стать регулятор на основе ассоциативной памяти [3].

Смоделируем работу регуляторов на основе объекта управления имеющий передаточную функцию (1):

$$W(s) = \frac{1}{s^3 + 6s^2 + s}. \quad (1)$$

Структурная схема регулятора на основе нечеткой логики имеет вид как на (рис.1). Регулирование объектом управления осуществляется по ошибке и скорости ошибки.

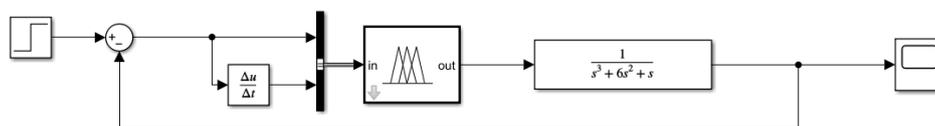


Рис.1. Структурная схема регулятора

А параметры нечеткого регулятора представлены ниже на рис.2-4 и табл. 1.

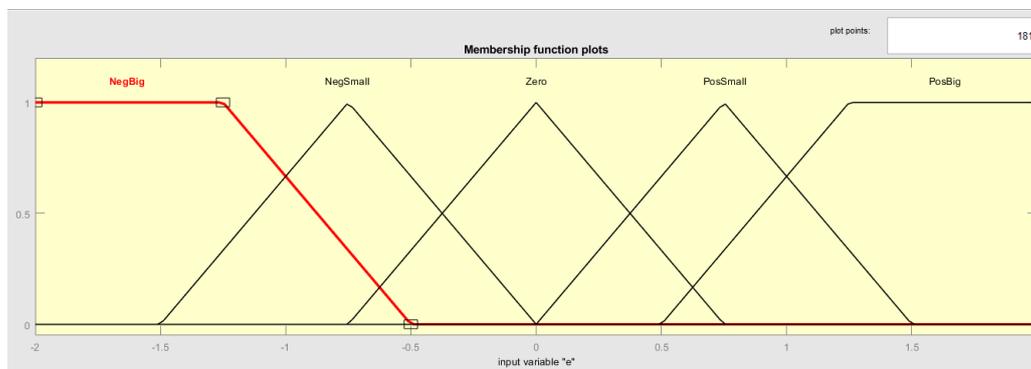


Рис. 2. Функции принадлежности для переменной  $e$

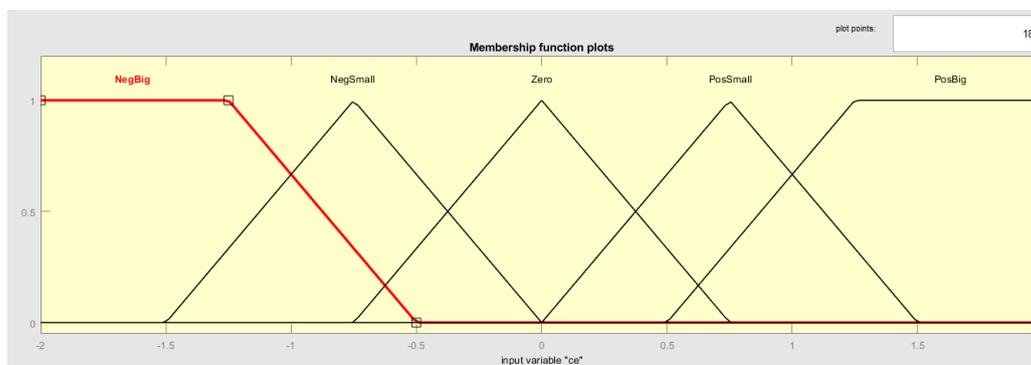


Рис. 3. Функции принадлежности для переменной  $ce$

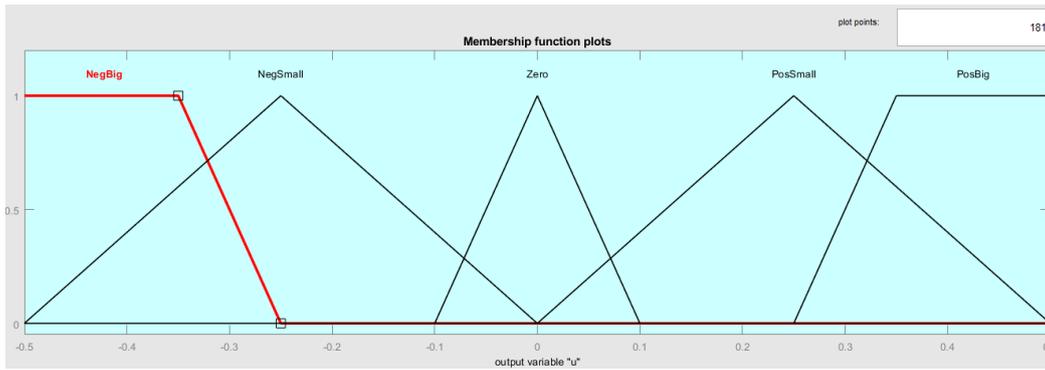


Рис. 4. Функции принадлежности для переменной  $u$

Таблица 1. Таблица решений

| $\varepsilon(t)/dt$ | $t_0$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_4$ |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\varepsilon(t)$    | $t_0$ | $t_0$ | $t_0$ | $t_0$ | $t_0$ |
| $t_0$               | $t_0$ | $t_0$ | $t_0$ | $t_0$ | $t_0$ |
| $t_1$               | $t_0$ | $t_1$ | $t_1$ | $t_1$ | $t_1$ |
| $t_2$               | $t_1$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_3$ |
| $t_3$               | $t_3$ | $t_3$ | $t_3$ | $t_4$ | $t_4$ |
| $t_4$               | $t_4$ | $t_4$ | $t_4$ | $t_4$ | $t_4$ |

Обозначения в табл. 1:

- $t_0$  – «положительная большая»;
- $t_1$  – «положительная малая»;
- $t_2$  – «нулевая»;
- $t_3$  – «отрицательная малая»;
- $t_4$  – «отрицательная большая».

В результате мы получаем график переходного процесса представленный на рис.5.

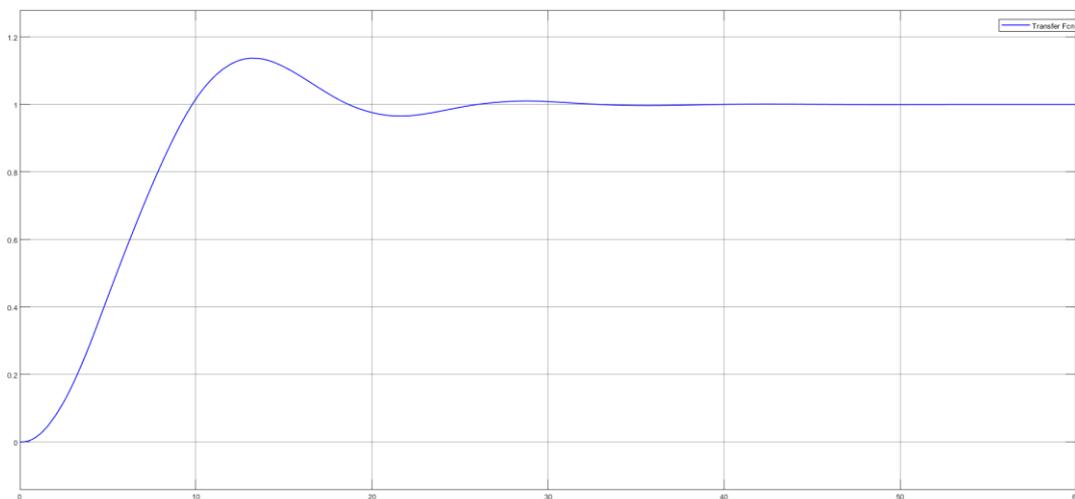


Рис.5. График переходного процесса системы с регулятором на основе нечеткой логики

Для построения регулятора на основе ассоциативной памяти воспользуемся алгоритмом, представленным ниже:

1. Создается матрица ячеек, в которой фиксируются значения из определенного диапазона для входных измеряемых сигналов и соответствующего им выходного сигнала.

2. В массиве по формуле (2) вычисляется максимально ячейка с максимально близкими значениями входных сигналов и принимается за базовую ячейку.

$$B_i = \sqrt{\sum (x_i - y_i)^2}, \quad (2)$$

где  $x_i$  – значение в ячейке ассоциативной памяти,  
 $y_i$  – значение входного сигнала.

3. Вычисляются  $n$  ближайших точек к базовой.

4. Вычисляются  $n$  корректирующих коэффициентов для данных точек по формуле (3):

$$k_i = \frac{|x_{i, \text{баз}} - y_i|}{dx_i}, \quad (3)$$

где  $x_{i, \text{баз}}$  – значение 1-го измерения базовой ячейки,  
 $y_i$  – значение  $i$ -ой входной переменной,  
 $dx_i$  – разницы между значениями  $i$ -го измерения соседних ячеек ассоциативного массива.

5. Вычисляются  $n$  корректирующих коэффициентов для нахождения выходного сигнала по формуле (4):

$$dh_i = k_i (Z_i - Z_{\text{баз}}), \quad (4)$$

где  $Z_i$  – значение  $i$ -ой ячейки ассоциативного массива,  
 $Z_{\text{баз}}$  – значение базовой ячейки ассоциативного массива.

6. Вычисляется выходной сигнал по формуле (5) [4]:

$$Z = Z_{\text{баз}} + dh_1 + dh_2 + \dots + dh_i. \quad (5)$$

Для объекта управления (1) подобран диапазон регулирования ошибки, скорости ошибки и выходного сигнала:

- $error = [5 \ 2 \ 1 \ 0.4 \ 0.1 \ 0 \ -0.2 \ -0.35 \ -0.6 \ -1 \ ]$ ;
- $error\_velocity = [5 \ 2 \ 1 \ 0.2 \ 0.1 \ 0 \ -0.2 \ -0.45 \ -0.6 \ -1 \ ]$ ;
- $exit = [5 \ 2.5 \ 1 \ 0.5 \ 0.2 \ 0 \ -0.1 \ -0.25 \ -0.3 \ -0.4 \ -0.6 \ -0.9 \ -1.5 \ ]$ .

Для получения желаемых значений с заданным диапазоном рекомендуется аппроксимировать заданный диапазон.

На рис.6 представлена структурная схема регулятора на основе ассоциативной памяти.

Результат моделирования регуляторов на основе нечеткой логики и ассоциативной памяти представлен на рис.7.

Как видно график переходного процесса ассоциативного регулятора (красная линия) выходит быстрее в установившееся желаемое значения в отличие от график переходного процесса регулятора на основе нечеткой логики

(синяя линия). Так же при увеличении размера массива данных ассоциативного регулятора качество его переходного процесса будет также улучшаться.

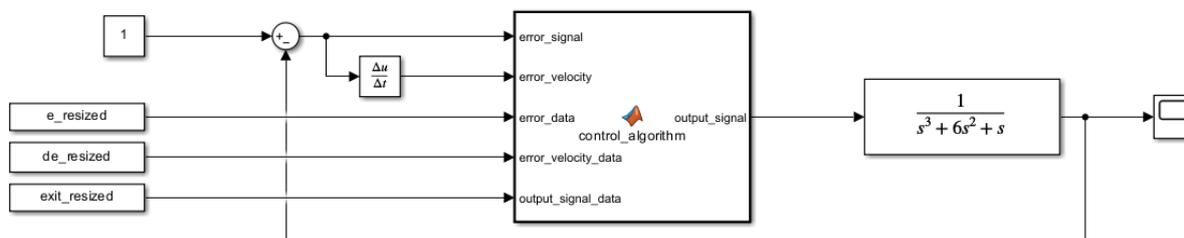


Рис.6. Структурная схема регулятора на основе ассоциативной памяти

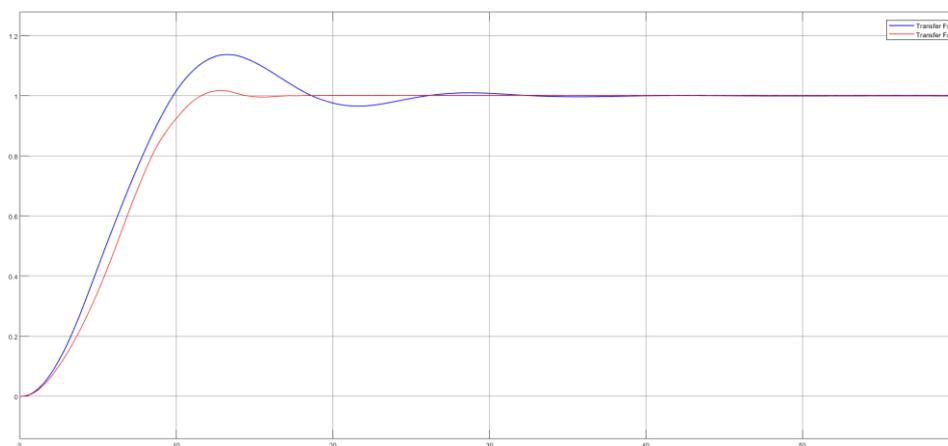


Рис.7. Сравнение графиков переходного процесса регуляторов

В дальнейших исследованиях планируется апробировать регулятор на основе ассоциативной памяти в системах управления приводами робототехнических и мехатронных систем.

## Список литературы

1. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.
2. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под.ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
3. Огнев И. В., Борисов В. В., Сутула Н. А. Ассоциативные память, среды, системы. — М.: Горячая линия-Телеком, 2016. — 420 с.
4. Мунасыпов Р.А. Методика построения ассоциативного регулятора на основе гибридных технологий/ Р.А. Мунасыпов, К.А. Ахмеров // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых 2013, Уфа 5-7 июня 2013 года — с. 255-258.

**М.Ю. Кузьменков**, магистрант, kuzmenkov.m.u@yandex.ru  
Московский Физико-Технический Институт (МФТИ),  
г. Москва, Россия

**А.Е. Жаворонков**, ассистент, Rokker1@mail.ru  
Уральского Федерального Университета (УрФУ),  
г. Екатеринбург, Россия

## **ВЫДЕЛЕНИЕ РЕГИОНА ИНТЕРЕСА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ**

*Аннотация:* С увеличением объёма дорожного строительства возникает необходимость оперативного контроля их состояния на разных участках. Хотя сегодня существует множество способов решения этой задачи передовыми архитектурами нейронных сетей, тем не менее, во многих научных статьях отмечается наличие проблемы ложноположительных детекций, в том числе, детекций за пределами автомобильной дороги, например, на тротуаре. Поэтому существует необходимость в улучшении качества детекции за счёт снижения ложноположительных срабатываний. В данной статье это предлагается сделать путём выделения региона интереса (дороги) и трансформации его перспективы в перспективу фотографий, сделанных «сверху вниз». Это позволит нейронным сетям, обученным на большом количестве доступных изображений, полученных с помощью специализированных камер высокого разрешения, эффективно детектировать наличие ям.

*Ключевые слова:* машинное обучение, нейронная сеть, детекция, сегментация, регион интереса, повреждение дорожного покрытия.

**M.Y. Kuzmenkov**, master student, kuzmenkov.m.u@yandex.ru  
Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT),  
Moscow, Russia

**A.E. Zhavoronkov**, assistant, Rokker1@mail.ru  
Ural Federal University (UrFU),  
Ekaterinburg, Russia

## **ALLOCATION OF THE REGION OF INTEREST FOR THE PURPOSES OF RECOGNIZING DAMAGE TO THE ROAD SURFACE**

*Abstract:* With the increase in the volume of road construction, there is a need for operational control of their condition in different sections. Although today there are many ways to solve this problem with advanced neural network architectures, nevertheless, many scientific articles note the problem of false positive detections, including detections outside the highway, for example, on the sidewalk. Therefore, there is a need to improve

the quality of detection by reducing false positives. In this article, it is proposed to do this by highlighting the region of interest (the road) and transforming its perspective into the perspective of photographs taken "from top to bottom". This will allow neural networks trained on a large number of available images obtained using specialized high-resolution cameras to effectively detect the presence of pits.

*Key words:* machine learning, neural network, detection, segmentation, region of interest, pavement damage.

Поскольку детектирование повреждений дорожного покрытия носит прикладной характер и имеет экономический эффект, ему было посвящено не мало научных статей и проведено практических экспериментов. При этом содержание таких статей постепенно наполнялось новыми методами детектирования и обработки изображения по мере развития компьютерного зрения и компьютерной науки в целом. Поэтому на сегодняшний день накопилось не мало методов работы с той или иной спецификой детекции повреждений на дорогах.

На ранних этапах изучения этого вопроса исследователи экспериментировали с алгоритмами, которые нацелены на нахождение контуров объектов на изображении. Затем среди найденных контуров объектов алгоритмически распознавались дорожное полотно и ямы на нём. Сейчас используются более продвинутые методы, основанные на нейронных сетях, архитектура которых предназначена для задач детекции, например, R-CNN, SSD, YOLO и другие. Но даже самые передовые методы детекции не лишены недостатков. И сегодня существует целый ряд вызовов, которые стоят на пути решения задачи детекции повреждений дорожного покрытия:

1. По-прежнему наблюдается большое количество ложноположительных предсказаний, когда в качестве ямы детектируется посторонний предмет. Это вызвано сложностью изображения, которое, помимо дороги, включает в себя различные объекты вокруг. Например, на рисунке 1, помимо правильных детекций, продемонстрировано ложноположительное нахождение повреждения, расположенного на тротуаре, хотя интерес представляют повреждения именно автомобильных дорог.



Рис.1. Пример ложноположительной детекции

2. Хотя детектирование повреждений дорог на изображениях, сделанных «сверху вниз» понизило бы количество ложноположительных предсказаний, применение такого подхода на практике требует особого технического оснащения автомобиля специальными камерами.

Для решения этих проблем в данной статье предлагается выделять регион интереса за счёт нейронной сети, сегментирующей дорогу. Сегментированная дорога затем может быть использована в качестве маски, для выделения самой дороги из первоначального изображения.

Для обучения и тестирования сети, сегментирующей дорогу, использовался датасет CityScapes. Данный набор данных содержит сегментирующие маски дорожной обстановки. На рисунке 2 показан пример изображений из оригинального набора данных.

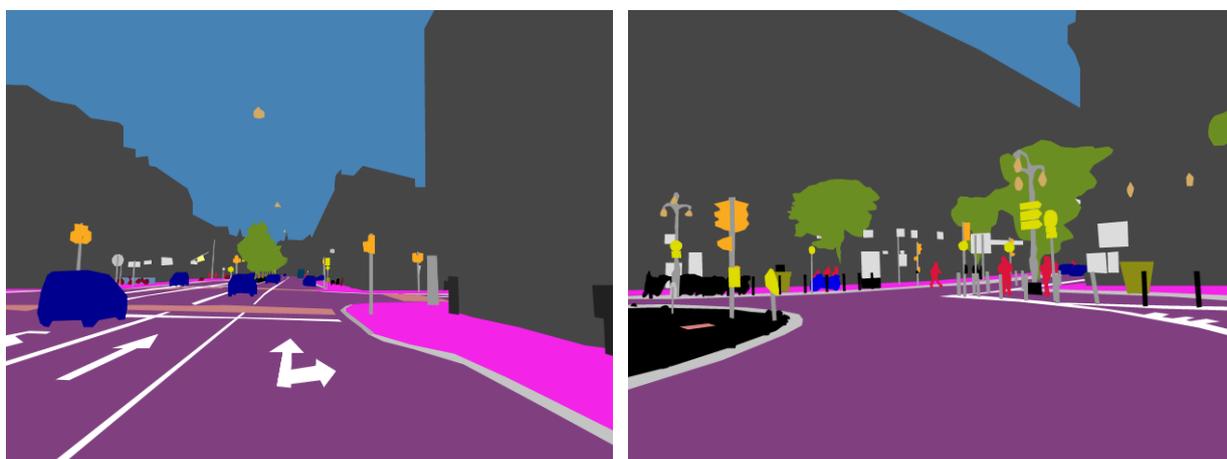


Рис.2. Сегментирующие маски из набора данных CityScapes

Поскольку для данного исследования интерес представляют только дороги, все сегментирующие маски были изменены. Все классы помечались как 0 (то есть фон), кроме классов «дорога», «пешеходный переход» и «дорожная разметка», которым присваивался класс 1 (то есть искомый сегментируемый объект). Иными словами, сегментирующие маски содержали информацию только о дорогах или их отсутствии. Полученный набор данных содержит 18000 изображений, 16000 из которых использовались для обучения, 1000 для валидации и 1000 для теста.

Идея состоит в том, чтобы, используя данные CityScapes, обучить нейронную сеть сегментировать дорогу, затем аппроксимировать выделенную область до некоторой геометрической фигуры, и за счёт трансформации перспективы изменять внешний вид изображения так, как если бы она была сфотографирована сверху вниз. Для примера рассмотрим рисунок 3 из тестового набора данных.



Рис.3. Пример изображения из тестового набора данных

Далее это изображение подаётся на вход некоторой сегментирующей модели, которая возвращает маску, выделяющую дорожное покрытие, как показано на рисунке 4.

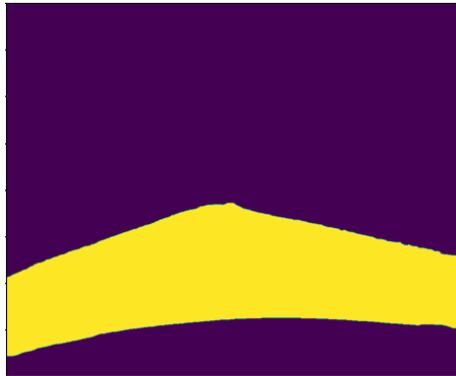


Рис.4. Сегментированное изображение из тестового набора данных

Исследование показало, что большинство сегментированных масок дорог своей геометрической формой напоминают трапецию. Конкретно в данном примере, если найти координаты крайних точек жёлтого региона, и соединить соответствующие координаты прямой линией на оригинальном изображении, то получится изображение, показанное на рисунке 5.



Рис.5. Выделенный регион интересов (дороги) после аппроксимации результатов сегментации дороги

В получившейся геометрической фигуре находится только дорожное покрытие. Именно эту область предлагается использовать для дальнейшей детекции повреждений дороги. Но поскольку нейронная сеть работает с матрицами, полученная фигура должна иметь аналогичную форму, то есть необходимо трансформировать выделенный регион интересов в прямоугольную матрицу. В случае с уходящими вдаль дорогами их трансформация будет выглядеть как фотография дороги, сделанная «сверху вниз». Применение такого алгоритма к региону интересов из рисунка 5 выглядит как показано на рисунке 6.

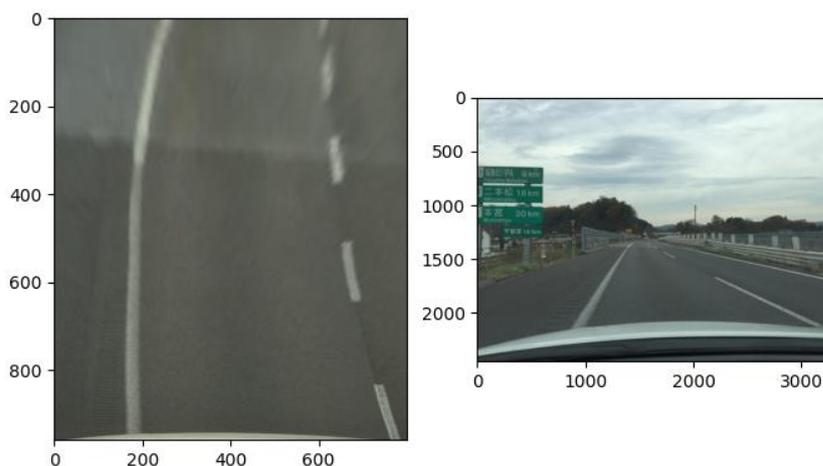


Рис.6. Трансформация перспективы выделенного региона интереса

Теперь первоначальная фотография дороги, сделанная видеорегистратором автомобиля, выглядит, как если бы она была сделана специальной камерой сверху вниз во время движения автомобиля. Именно такие фотографии (сделанные сверху вниз) содержатся в большинстве доступных публичных источниках данных. Используя предложенный метод выделения региона интересов и трансформации его перспективы, становится возможным обучать нейронные сети не только на большом количестве доступных фотографий, сделанных «сверху вниз», но и на кадрах, снятых видеорегистратором из салона автомобиля.

Для реализации описанной идеи были проведены эксперименты с несколькими архитектурами, способными решать задачу сегментации. А именно: FPN, Linknet, MAnet, SegNet, Unet. Все указанные архитектуры показали похожие результаты, за исключением SegNet, что не удивительно, так как SegNet является одной из первых архитектур, предназначенных для задач сегментации.

В качестве основной части сети в FPN, Linknet и MAnet использовался ResNet34. В Unet и SegNet использовался VGG-11. В качестве функции потерь была выбрана Cross-Entropy. Каждая сеть обучалась в течение 50 эпох. Для оценки качества сегментации использовалась метрика IOU (Intersection

Over Union), а для отнесения пикселя к классу 1, т.е. к искомой зоне сегментации было выбрано консервативное значение порога, равное 0.5, то есть все пиксели, предсказания для которых выше 0.5, были отмечены как сегментированная зона. Итоговые метрики сегментации набора данных CityScapes, полученные на тестовой выборке, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значение mAP для разных моделей сегментации

| Название модели                      | Значение метрики mAP |
|--------------------------------------|----------------------|
| CNN and Distributed LSTM             | 91.6%                |
| MultiNet                             | 93.71                |
| SAM + CLIP                           | 97.84%               |
| LinkNet (ResNet34 в качестве основы) | 92%                  |
| Unet (VGG-11 в качестве основы)      | 93.2%                |
| FPN (ResNet34 в качестве основы)     | 94.2%                |
| MAnet (VGG-11 в качестве основы)     | 93.5%                |
| SegNet(ResNet34 в качестве основы)   | 82%                  |

Точность всех моделей, кроме SegNet, достигает высоких результатов. Вместе с тем, цель исследования не требует стопроцентной сегментации дорог. Достаточно примерного выделения её формы и местоположения на изображении, чтобы стало возможным аппроксимировать её до геометрической фигуры и трансформировать её перспективу.

В данной статье были описаны некоторые проблемы, связанные с детекцией повреждений дорожного покрытия, в том числе, наличие ложноположительных детекций, связанных с нахождением объектов вне дороги. Для решения данной проблемы был передоложен способ выделения региона интереса (дороги) при помощи нейронных сетей, решающих задачу сегментации. Предложенные здесь архитектуры сегментации не превзошли по своему качеству лучшие модели, но они могут быть использованы как простая альтернатива сложных и тяжёлых с точки зрения количества параметров моделей. Тем более, задачей данного исследования является не сама сегментация как таковая, а новый подход к детекции повреждений на дорогах на основе выделения региона интереса. Такой подход позволит обучать сеть на более распространённых фотографиях дорог, сделанных сверху вниз, а применять к фотографиям, сделанным на видеорегистратор автомобиля.

## Список литературы

1. A. Kirillov, E. Mintun, N. Ravi, et al. Segment anything, in Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2023, 4015–4026 pp.
2. A. Radford, J. W. Kim, C. Hallacy, et al. Learning transferable visual models from natural language supervision, in International Conference on Machine Learning, 2021, 8748–8763 pp.

3. Dhiman, A., & Klette, R. // Pothole Detection Using Computer Vision and Learning». IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 1–15 pp.
4. Fulong Ma, Guoyang Zhao, Weiqing Qi, Ming Liu, and Jun Ma // Task-Oriented Pre-Training for Drivable Area Detection [Электронный ресурс]: режим доступа-<https://arxiv.org/pdf/2409.20166>.
5. M.J. (Thinus) Booyesen, Detecting Potholes Using Simple Image Processing Techniques and Real – World Footage. [Электронный ресурс]: режим доступа-[https://www.researchgate.net/publication/279538022\\_Detecting\\_Potholes\\_Using\\_Simple\\_Image\\_Processing\\_Techniques\\_and\\_Real-World\\_Footage](https://www.researchgate.net/publication/279538022_Detecting_Potholes_Using_Simple_Image_Processing_Techniques_and_Real-World_Footage).
6. P. A. Chitale, K. Y. Kekre, H. R. Shenai, R. Karani and J. P. Gala, Pothole Detection and Dimension Estimation System using Deep Learning (YOLO) and Image Processing 2020 // 35th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), Wellington, 2020. 1-6 pp.
7. Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, SSD: Single Shot MultiBox Detector, 2016, 21–37 pp. DOI:10.1007/978-3-319-46448-0\_2.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ СБОРА СТАТИСТИКИ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТАКТА И ЖЕСТИКУЛЯЦИИ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ В ОНЛАЙН-ОБУЧЕНИИ

*Аннотация:* В работе представлен подход к использованию технологий компьютерного зрения для анализа поведения преподавателя в онлайн-обучении. Разработанная система позволяет автоматически собирать статистику о направлении взгляда и положении рук преподавателя на основе видеозаписей занятий. Система использует модели детекции лица и рук для фиксации углов направления головы относительно камеры и координат положения рук в каждом кадре. Собранные данные могут быть использованы для исследования вовлеченности учеников в зависимости от поведения преподавателя и выработки рекомендаций по улучшению методик преподавания.

*Ключевые слова:* компьютерное зрение, онлайн-обучение, анализ преподавания, визуальный контакт, детекция лица, жестикуляция

D.I. Lelyushkin, master's student, lelyushkin.2019@stud.nstu.ru

A.V. Gavrilov, Ph.D., docent, gavrilov@corp.nstu.ru

## APPLICATION OF COMPUTER VISION TECHNOLOGIES FOR COLLECTING STATISTICS ON TEACHER'S VISUAL CONTACT AND GESTICULATION IN ONLINE LEARNING

*Abstract:* This paper presents an approach to using computer vision technologies for analyzing teacher behavior in online learning. The developed system automatically collects statistics on the teacher's gaze direction and hand positions based on video recordings of lessons. The system employs face and hand detection models to capture the head orientation angles relative to the camera and the hand coordinates in each frame. The collected data can be used to study student engagement depending on teacher behavior and to develop recommendations for improving teaching methods.

*Key words:* computer vision, online learning, teaching analysis, visual contact, face detection, gesticulation

Современные реалии онлайн-обучения требуют пересмотра традиционных подходов к анализу и повышению качества преподавания. Одним из ключевых факторов успешного взаимодействия преподавателя со студентами является поддержание визуального контакта, который способствует лучшему усвоению и восприятию информации, установлению психологического контакта между преподавателем и студентом, а также служит средством для обратной связи. Этот аспект одинаково важен для всех форматов обучения, включая дистанционный [1, 2, 3].

Кроме того, использование жестикуляции позволяет акцентировать внимание студентов на ключевых аспектах лекции и улучшает их понимание за счет визуального подкрепления информации, а недостаток жестов у лектора производит впечатление неестественной неподвижности [2, 4]. Однако, несмотря на очевидную важность этих факторов, существующие инструменты объективного анализа поведения преподавателя в онлайн-среде практически отсутствуют.

В данной работе предлагается использование технологий компьютерного зрения для автоматизированного сбора статистики о визуальном контакте преподавателя с камерой и положении его рук в течение занятия. Разработанная система анализирует видеозаписи занятий, детектирует лицо и руки преподавателя, вычисляет углы направления взгляда и фиксирует координаты положения рук в каждый момент времени. Эти данные могут быть использованы для дальнейшего анализа и выработки рекомендаций по повышению эффективности онлайн-преподавания.

## Архитектура системы

Разработанная система предназначена для автоматизированного сбора статистики о визуальном контакте и положении рук преподавателя на основе анализа видеозаписи занятия. Система реализована с использованием библиотек MediaPipe и OpenCV, обеспечивающих высокоточную детекцию лиц и рук, а также обработку видеопотока.

Архитектура системы включает три основных модуля:

1. Модуль захвата и предобработки видео:
  - Чтение видеопотока или файла.
  - Преобразование кадров из BGR в RGB для работы с библиотекой MediaPipe.
2. Модуль анализа видео:
  - Детекция лица и ключевых точек (нос, подбородок, глаза).
  - Вычисление углов направления взгляда относительно камеры.
  - Детекция рук и фиксация их положения (координаты ключевых точек).
3. Модуль записи данных:

- Запись результатов анализа (углы взгляда, координаты рук) в CSV-файл для последующего анализа.

На рисунке 1 представлена схема архитектуры системы.

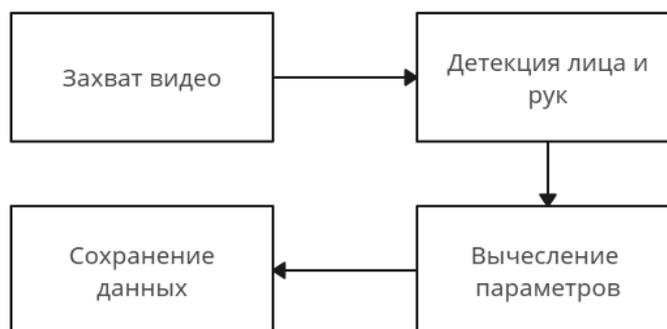


Рис. 1. Схема архитектуры системы

## Алгоритмы

### 1. Алгоритм детекции лица и вычисления углов взгляда:

- Используется модель MediaPipe Face Mesh для получения координат ключевых точек лица.

- Для вычисления углов направления взгляда используются точки носа, подбородка и глаз. Угол по оси X рассчитывается как арктангенс вектора от носа к подбородку. Угол по оси Y рассчитывается как разница арктангенсов векторов от носа к левому и правому глазам.

- Углы преобразуются в градусы и сохраняются для каждого кадра.

### 2. Алгоритм фиксации положения рук:

- Модель MediaPipe Hands используется для детекции рук и получения координат ключевых точек.

- Координаты ключевой точки центра ладони фиксируются для каждой руки.

- Если рука не обнаружена, соответствующие значения заполняются как None.

### 3. Алгоритм записи данных:

- Все вычисленные параметры (углы взгляда и координаты рук) записываются в формате CSV, где каждая строка соответствует одному кадру. Пример строки данных для одного кадра представлен в таблице 1.

Таблица 1. Пример собранных данных для одного кадра

| Frame | Rotation_X | Rotation_Y | Hand_X_1 | Hand_Y_1 | Hand_X_2 | Hand_Y_2 |
|-------|------------|------------|----------|----------|----------|----------|
| 96    | 80.00      | -65.56     | 0.1523   | 0.2149   | 0.702    | 0.7908   |

В качестве иллюстрации работы системы на рисунке 2 приведен один кадр из видеофайла с распознанными ключевыми точками на лице и руках.

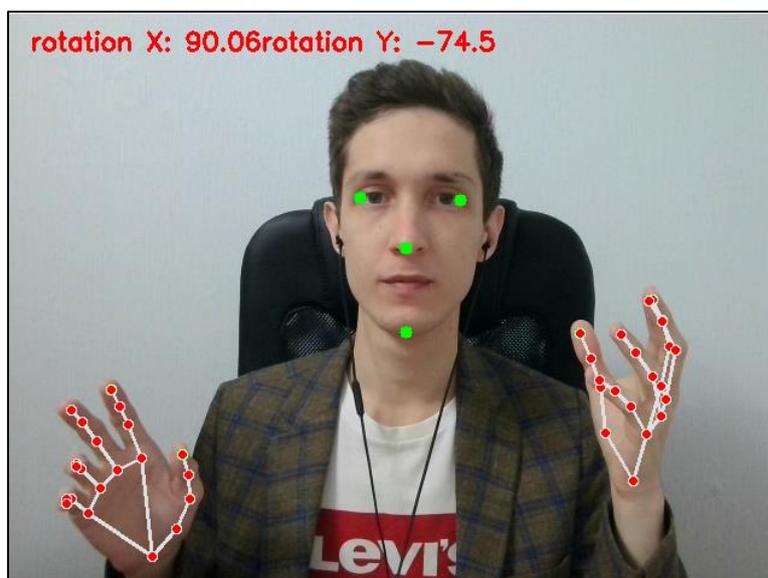


Рис. 2. Пример процесса обработки кадра

### Экспериментальная часть

Для тестирования разработанной системы была использована запись реальной лекции длительностью 3 минуты. Видеозапись обрабатывалась покадрово, данные о направлении головы преподавателя и положении его рук фиксировались в формате CSV для последующего анализа.

#### Интерпретация данных

##### 1. Направление взгляда по оси X:

- Значение 90 градусов соответствует направлению головы прямо в камеру.

- Увеличение значений означает поворот влево, уменьшение значений – вправо.

##### 2. Угол поворота головы по оси Y:

- Значение -90 градусов соответствует направлению головы прямо в камеру.

- Уменьшение значений означает наклон назад, увеличение значений – вперед.

##### 3. Положение рук:

- Координаты рук нормированы в пределах от 0 до 1, где:

- (0, 0) — левый верхний угол кадра, (1, 1) — правый нижний угол кадра.

Для анализа собранной статистики предлагается использовать график зависимости угла поворота головы по осям X и Y от кадра (рис. 3) и график изменения средней величины положения рук в окне из 100 кадров (рис. 4).

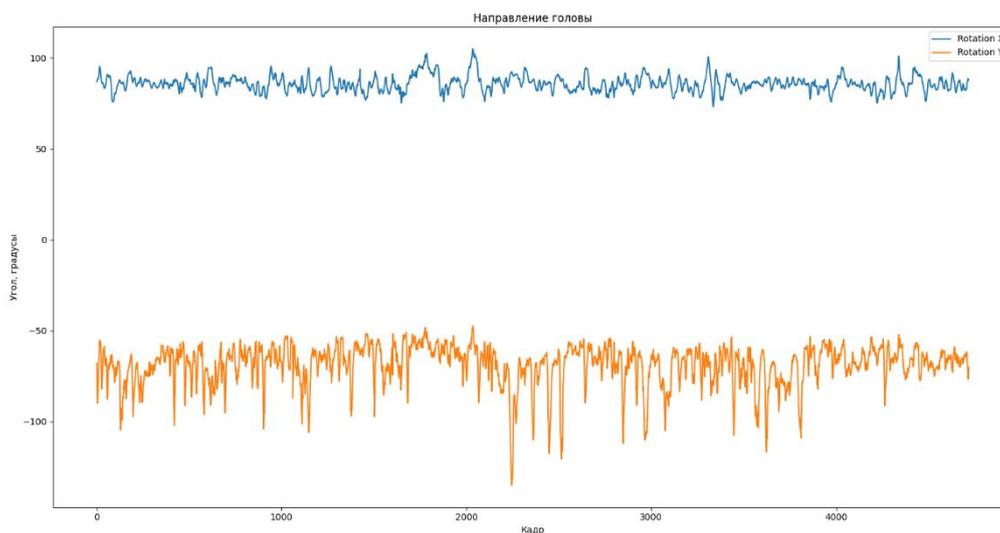


Рис 3. График зависимости угла поворота головы по осям X и Y от кадра

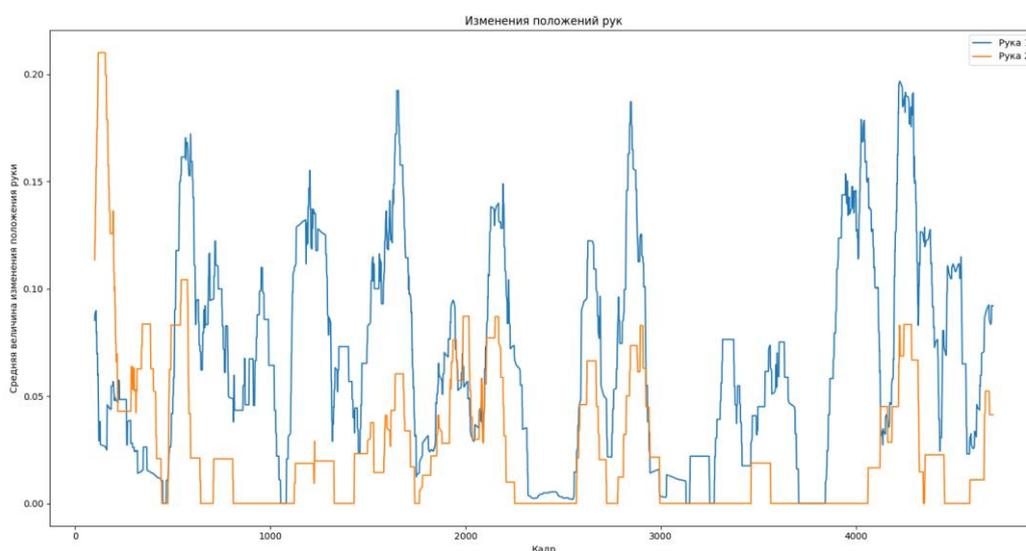


Рис 4. График зависимости изменения средней величины положения рук от кадра

На основе приведённых графиков можно определить, как долго преподаватель поддерживал визуальный контакт с камерой, анализируя близость углов к значениям (90, -90), а также оценить, насколько активно преподаватель использовал жестикуляцию, основываясь на величине изменений их координат.

Эти данные предоставляют основу для более глубокого анализа качества проведения занятий и могут использоваться для выработки рекомендаций по улучшению методик преподавания.

## Заключение

В данной работе представлена система на основе технологий компьютерного зрения для автоматизированного сбора статистики о направлении взгляда и положении рук преподавателя во время онлайн-занятий. Система позволяет анализировать видеозаписи занятий, фиксируя углы направления

головы относительно камеры и координаты положения рук, предоставляя объективные данные для дальнейшего анализа.

Разработанная система не оценивает напрямую качество преподавания, однако собранные данные могут использоваться для исследования вовлеченности преподавателя и улучшения методик преподавания. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение связи между этими параметрами и восприятием материала студентами, а также на разработку дополнительных метрик анализа. В перспективе систему можно расширить следующими возможностями: фиксация мимики и эмоций (для выявления эмоционального состояния преподавателя), обработка звуковой дорожки (для оценки динамики повествования), фиксация обращений к студентам (для анализа взаимодействия с аудиторией). Такие дополнения позволят получить более детализированные данные о поведении преподавателя и глубже понять, какие факторы способствуют эффективному обучению в дистанционном формате.

## Список литературы

1. Корнилова В.С., Донцов А.И. Особенности установления зрительного контакта в процессе обучения в вузе // *Science in a Megapolis*. – 2020. – Вып. 9(25). – URL: <https://mgpu-media.ru/issues/issue-25/psycho-pedagogical-science/distinctive-features.html> (дата обращения: 09.10.2024).

2. Родионова И.В. Использование кинетических невербальных средств общения при обучении русскому языку как иностранному // *Актуальные исследования*. 2024. №5 (187). Ч.III.С. 33-35. URL: <https://apni.ru/article/8371-ispolzovanie-kineticheskikh-neverbalnikh> (дата обращения: 13.10.2024).

3. Корнилова В. С., Сошина Е. А. Зрительный контакт как форма невербальной коммуникации: основные теоретические подходы // *Russian Journal of Education and Psychology*. 2020. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zritelnyy-kontakt-kak-forma-neverbalnoy-kommunikatsii-osnovnye-teoreticheskie-podhody> (дата обращения: 15.10.2024).

4. Соколов В.Д. Педагогические жесты, как средство повышения внимания слушателей // *Новые импульсы развития: вопросы научных исследований*. 2020. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pedagogicheskie-zhesty-kak-sredstvo-povysheniya-vnimaniya-slushateley> (дата обращения: 8.10.2024).

5. MediaPipe: Google. MediaPipe: A framework for building multimodal perception pipelines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/gesture\\_recognizer](https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/gesture_recognizer) (дата обращения: 10.08.2024).

6. OpenCV: Open Source Computer Vision Library. OpenCV: Official documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.skine.ru/articles/716349/> (дата обращения: 10.08.2024).

В. Д. Матвеев, инженер v.matveev@rtc.ru  
А. Е. Архипов, м.н.с, i.fomin@rtc.ru  
ФГАНУ «ЦНИИ РТК», г. Санкт-Петербург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ МОДЕЛИ СЕГМЕНТАЦИИ SAM НА МОБИЛЬНОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЕ

*Аннотация:* Общее быстродействие системы технического зрения с использованием нейронных сетей во многом зависит от скорости обработки выбранной модели. В работе исследуется быстродействие нейронной сети SAM в зависимости от параметров модели на мобильном вычислителе Jetson. На основе полученных результатов сформулированы общие рекомендации по настройке параметров, позволяющие существенно сократить время вычислений без ущерба качества сегментации.

*Ключевые слова:* сегментационные сети, быстродействие, размер изображения, количество точек SAM

## PERFORMANCE RESEARCH OF SAM SEGMENTATION MODEL ON A MOBILE COMPUTER

V. D. Matveev, engineer, v.matveev@rtc.ru  
A.E. Arhipov, j. r. a., i.fomin@rtc.ru  
RTC, St.Petersburg, Russia

*Abstract:* The overall performance of a computer vision system using neural networks largely depends on the performance of the selected model. The paper examines the performance of the SAM neural network depending on the parameters of the model on the Jetson mobile computer. Based on the results obtained, general recommendations for setting parameters are formulated, which significantly reduce the calculation time without compromising the quality of segmentation.

*Key words:* segmentation networks, performance, image size, number of SAM points

### 1 Введение

Для систем технического зрения мобильных роботов задача сегментации является одной из первостепенных. С помощью нее можно выделить на изображении препятствия любой формы и размеров, опорную поверхность для проходимости робота, объекты для решения целевой задачи. Одним из

ключевых показателей системы технического зрения, определяющий ее практическую применимость, является быстродействие.

Целью данной работы является исследование различных параметров модели сегментации, непосредственно влияющие на быстродействие технического зрения, для принятия решения о наилучшем соотношении параметров между собой.

Для проведения исследований в работе подготовлены несколько тестовых изображений с разным количеством объектов на них для оценки качества сегментации объектов различных размеров. Сам алгоритм работает на встраиваемом вычислителе Jetson Xavier.

## 2 Предыдущие работы

Модель сегментации, использованная в данной работе, относится к фундаментальным моделям, поскольку обучена на огромном количестве данных и способна распознавать и сегментировать практически любые объекты. Речь идет о Segment Anything Model [1]. Ее название буквально говорит о том, что она способна сегментировать что угодно. Ее главное отличие от других сегментационных моделей состоит в том, что она определяет объекты по заранее заданной сетке точек, а не по принадлежности каждого пикселя к классу.

Применение данной модели для задач мобильной робототехники уже было описано в работе [2]. Качество ее работы достаточно высокое для интеграции в различные системы технического зрения. Кроме того, в указанной работе показано быстродействие модели на лабораторном ПК.

Для сравнения же с быстродействием некоторой стандартной модели была рассмотрена работа [3], в которой было исследовано множество моделей сегментационных сетей, в том числе DeepLabv3 [4], у которого фиксированный размер входного изображения.

## 3 Исходные данные

Исходными данными послужили изображения из датасета RUGD [5]. В этом датасете хранятся снимки проездов мобильного робота по различной местности – вроде парковок и парков. Для проведения исследования быстродействия были рассмотрены различные вариации как самого изображения, так и алгоритма сегментации. На рисунке 1 показан пример различных изменений, которым подвергались изображения в ходе исследования быстродействия. Следующие изменения были произведены для сравнения вариантов работы модели:

- изменение разрешения изображения – три проверяемых разрешения 320x240 пикселей, 640x480 и 1280x960;

- изменение количества объектов в кадре – выбраны изображения с 3, 6 и 12 четко разделимыми человеком объектами;

- изменение количества точек модели – как уже было сказано выше, модель сегментирует изображение по точкам, поэтому проверялось быстродействие при 5x5, 10x10 и 20x20 точек (см. рис. 1).

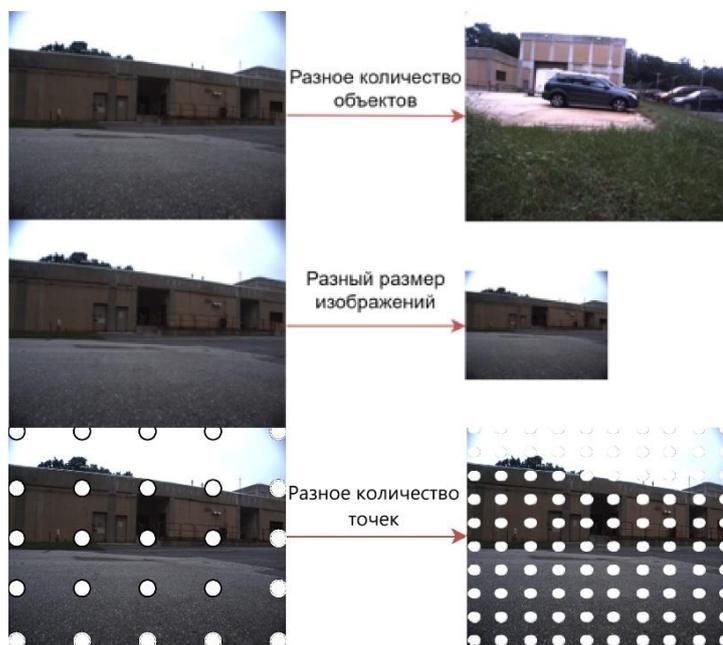


Рис. 1. Пример изменений, от которых зависит скорость работы SAM

#### 4 Результаты экспериментов

В таблице 1 представлены результаты экспериментального исследования быстродействия фундаментальной модели сегментации в зависимости от разрешения изображения и количества точек. В этой таблице было использовано изображение с минимальным количеством объектов в кадре. Исследование влияния разрешения было необходимо, поскольку обычно в моделях сегментации строго зафиксирован размер входного изображения. Архитектура модели SAM позволяет варьировать его для конкретной задачи.

Таблица 1. Зависимость времени обработки кадра от разрешения и количества точек в сегментаторе в секундах

|                      |       | Разрешение изображения |         |          |
|----------------------|-------|------------------------|---------|----------|
|                      |       | 320x240                | 640x480 | 1280x960 |
| Количество точек SAM | 5x5   | 3,85                   | 3,82    | 3,87     |
|                      | 10x10 | 4,47                   | 4,61    | 4,96     |
|                      | 20x20 | 7,32                   | 7,83    | 9,21     |

В таблице 2 показана зависимость быстродействия от количества точек и объектов на изображении. Для данного исследования был зафиксирован размер кадра – 640x480 пикселей.

Таблица 2. Зависимость времени обработки кадра от количества объектов и количества точек в сегментаторе в секундах

|                      |       | Количество объектов в кадре |      |      |
|----------------------|-------|-----------------------------|------|------|
|                      |       | 3                           | 6    | 12   |
| Количество точек SAM | 5x5   | 3,82                        | 3,78 | 3,74 |
|                      | 10x10 | 4,61                        | 4,46 | 4,58 |
|                      | 20x20 | 7,83                        | 7,43 | 7,79 |

Из данных таблиц можно заметить, что сильнее всего на время обработки кадра влияет именно количество точек, по которым сегментируется изображение. Изменение разрешения также имеет некоторый вклад в результат, однако значительно меньший – и в основном на большом размере изображения.

Увеличение же количества объектов в кадре не влияет на время обработки кадра. Вероятно, это связано с использованием алгоритма подавления немаксимумов в модели. Перед этим алгоритмом всегда сформировано одинаковое количество масок, равное количеству точек в сети – и они все проходят через алгоритм. Следовательно, время выполнения алгоритма зависит от этих точек, а не количества объектов.

## 5 Обсуждение результатов

Из представленных выше результатов можно сделать несколько выводов. Во-первых, время обработки изображений большого размера сильно отличается от среднего и малого только при большом количестве точек. Следовательно, при использовании 5x5 или 10x10 варианта можно применять наибольшее разрешение – что невозможно в моделях для семантической сегментации, вроде DeepLabv3, которая способна обрабатывать только 512x512 пикселей.

Во-вторых, как уже было замечено ранее, изменение количества объектов в кадре абсолютно не влияет на скорость работы алгоритма. Это связывается с тем, что алгоритм не обращает внимание на отдельные объекты при своей работе – он сегментирует именно по точкам, и именно влияние количества точек наибольшее при их росте.

Таким образом, наилучшее сочетание параметров для работы алгоритма – 5x5 точек при среднем разрешении 640x480 пикселей. С такими параметрами алгоритм работает быстрее наиболее долгого варианта на 5,39 се-

кунд и на 0,03 секунды быстрее самой небольшой настройки, при этом сегментирова такое же количество объектов – пример на рисунке 2.



Рис. 2. Сегментация алгоритма при разном разрешении изображения и 10x10 точек. Малое, среднее и большое – слева направо

## 6 Заключение

В данной работе описаны экспериментальные исследования, проводимые над фундаментальной моделью сегментации SAM. В ходе работы проверялось влияние различных характеристик как модели, так и изображения на скорость сегментации. По результатам исследования представлены таблицы с замерами быстродействия в различных условиях.

На основании полученных данных сделаны выводы о значимости исследуемых параметров для рассмотренного алгоритма сегментации. Сделан вывод, что количество объектов в кадре не влияет на скорость работы алгоритма, а разрешение изображения начинает сказываться только при большом количестве точек

В дальнейшем планируется реализовать полноценную систему технического зрения на мобильном вычислителе, обрабатывая не только заранее выбранные изображения, но и последовательный видеопоток.

*Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00697-24-00 от 27.12.2023 «Исследование методов создания самообучающихся систем видеонаблюдения и видеоаналитики на базе комплексирования технологий пространственно-временной фильтрации видеопотока и нейронных сетей» (FNRG 2022 0015 1021060307687-9-1.2.1)*

## Список литературы

1. Kirillov A. et al. Segment anything //Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2023. – С. 4015-4026.
2. Архипов А. Е., Фомин И. С., Матвеев В. Д. Комплексирование моделей сегментации, сопровождения и классификации для решения задач видеоаналитики //Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – №. 1.

3. Fomin I., Arhipov A. Selection of Neural Network Algorithms for the Semantic Analysis of Local Industrial Area //2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, 2021. – C. 380-385.
4. Chen L. C. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation //arXiv preprint arXiv:1706.05587. – 2017.
5. Wigness M. et al. A rugd dataset for autonomous navigation and visual perception in unstructured outdoor environments //2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2019. – C. 5000-5007.

Д.А. Перфильев, к.т.н., доцент, perfilyev7775@yandex.ru  
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

## СТРАТЕГИЯ КОРРЕКТИРОВКИ УГЛА УПРЕЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОШИБКИ ПРОГНОЗА

*Аннотация:* В статье приведены результаты апробации стратегии корректировки угла упреждения поисковой системы при групповом преследовании цели. Корректировка угла упреждения  $i$ -той поисковой системы выполняется на основе анализа ошибки прогноза группы. Отмечена относительная эффективность стратегии корректировки угла упреждения на основе анализа ошибки прогноза.

*Ключевые слова:* классический алгоритм преследования, вычисление угла упреждения, ошибка прогноза, стратегия преследования.

D. A. Perfil`ev, associate Professor, Ph. D, perfilyev7775@yandex.ru  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## STRATEGY OF CORRECTING ANGLE OF ANTICIPATION BASED ON ANALYSIS FORECAST ERROR

*Abstract:* The article presents the results of testing a strategy for adjusting the angle of the search system's lead in group pursuit of a goal. The correction lead angle  $i$ -th search system is performed based on the analysis forecast error group. The relative effectiveness strategy for correcting angle of anticipation based analysis forecast error is noted.

*Keywords:* classical pursuit algorithm, calculation of the angle of anticipation, prediction error, pursuit strategy.

### Ведение

При обнаружении, современные беспилотные летательные аппараты способны менять свой частотный канал связи с оператором, выполнять маневр по заданному априори алгоритму ухода от погони. Так задача преследования высокоавтоматизированной цели, поисковой системой представляет собой стратегию, раскрывающую данный алгоритм.

## 1 Стратегия

Классические стратегии преследования (типа «волчья стая», «оптимальный заслон») предполагают априорное разбиение пространства поиска на сектора [1-4]. При этом каждая поисковая система осуществляет контроль собственного участка пространства поиска и обладает априори заданным набором алгоритмов для организации совместного преследования. Недостаток такой стратегии заключается, прежде всего, в необходимости расходовать избыточный ресурс. Так часть поисковых систем «стаи» может длительное время быть не востребована.

В работе [4,5] оптимизация поисковой стратегии группы преследователей основана на анализе статистической информации о свойствах цели. Стратегия базируется на концепции о том, что цель может перемещаться и осуществлять маневрирование в соответствии с заданной её конструкцией возможности. На основе анализа статистических данных о маневрировании цели, конструктивной особенности, определяется наиболее вероятный алгоритм ухода цели от погони, и на его основе формируется оптимальная траектория преследования с углом упреждения.

В геометрической интерпретации основа стратегии преследования цели [4-6], с углом упреждения представлена математической системой вида:

1. Классическое условие преследования цели с углом упреждения определяется следующим отношением:

$$\left| \frac{V_{ПС}}{V_{Ц}} \right| \sin \gamma_0 \leq 1,$$

где:  $V_{ПС}$  и  $V_{Ц}$  – вектора скорости поисковой системы и цели;

$\gamma_0$  – угол упреждения.

2. Стратегия преследования с углом упреждения описывается уравнениями:

$$\tau = V_{Ц} \cos \varphi - V_{ПС} \cos \gamma_0,$$

$$\varphi \tau = V_{Ц} \sin \varphi + V_{ПС} \sin \gamma_0,$$

где:  $\tau$  – текущие «расстояние» между поисковой системой и целью (линия визирования);

$\varphi$  – курсовой угол цели.

3. Результирующие отношения учитываются при определении оптимального угла упреждения:

$$\varphi \rightarrow 0, \frac{\beta}{\sqrt{1-\alpha^2}} \leq 2$$

$$\varphi \rightarrow \infty \frac{\beta}{\sqrt{1-\alpha^2}} \geq 2$$

где:  $\beta = \omega \cos \gamma_0$ ,  $\alpha = \omega \sin \gamma_0$ ,  $\omega = \frac{V_{П}}{V_{ПС}}$ .

Логично представить, что классическая (геометрическая) интерпретация задачи преследования цели с углом упреждения базируется на констатации конструктивной особенности цели, без учета интеллектуальной возможности современной цели, позволяющей ей менять частотный диапазон связи при обнаружении. Принцип преследования интеллектуальной (высокоавтоматизированной) цели основан на аналогичной технологии анализа текущих данных отклика и дальнейшего формирования «угла упреждения».

Также очевидно, что стратегия определения «угла упреждения» для каждой поисковой системы будет более эффективна, если она будет основана на анализе совокупности текущих данных всей поисковой группы.

## 2 Стратегия преследования на основе анализа данных группы

Эффективная стратегия преследования должна обеспечить устойчивость контроля частотного диапазона цели, минимизировать вычислительный ресурс за счет применения поисковой системой интеллектуальных функций самонастраивания на частотный отклик цели с прогнозированием его изменения.

На рисунке 1 представлена схема корректировки угла упреждения поисковой системы и функции самонастраивания с учетом ошибки прогноза.

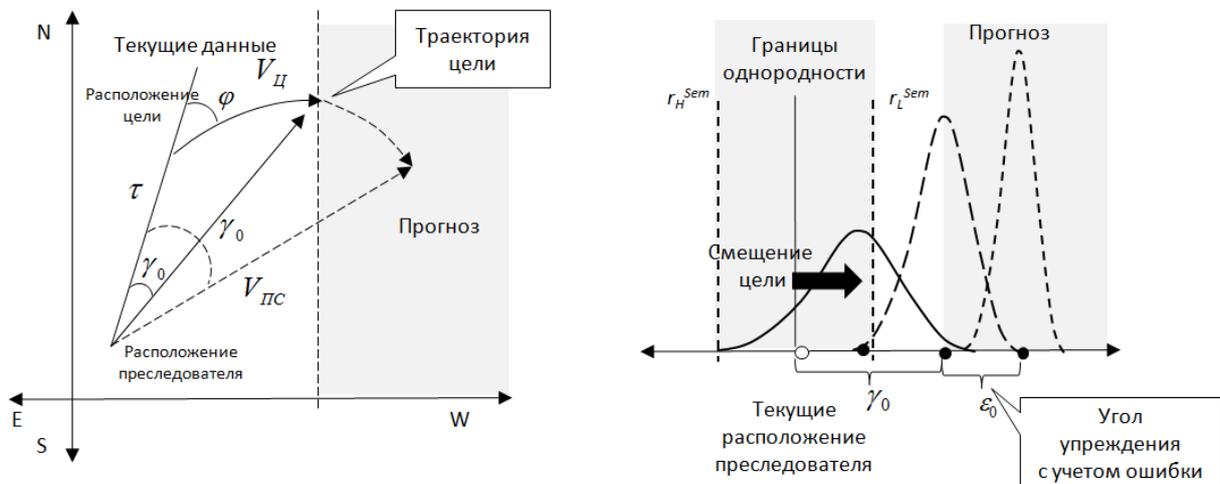


Рис. 1. Схема корректировки угла упреждения поисковой системы на основе самонастраивания на изменения частотного отклика цели

Прогнозирование позволяет оптимизировать траекторию преследования поисковой системы до заданного значения, относительно границ частотной однородности модели цели [7].

Вычисление радиуса  $r_i^{Sem}$  однородности (границы однородности) для  $i$ -той модели состояния цели выполняется от особой точки интегрирования ошибки прогноза  $\epsilon_{0i}$  следующим образом:

$$\varepsilon_{0i} = \mu_{cp} \pm \frac{r_i^{(Sem)} \sigma}{\sqrt{n}}.$$

где:  $\mu_{cp}$  – среднее математическое значение ошибки,

$n$  – итерации поиска.

Следует отметить, что значение «угла упреждения» зависит от функции ошибки прогноза  $f(\varepsilon_r)$ . В результате характеристика функции  $f(\varepsilon_r)$ , позволяет сформировать наиболее вероятную границу частотного отклика преследуемой цели радиусом  $r_i^{Sem}$ , вида:

$$W(\varepsilon_{0i}) = \text{arcSin}(\varepsilon_r \text{Sin} \varphi).$$

В этом случае интегральная характеристика  $W(\varepsilon_r)$ , позволяет сформировать модель траектории маневрирования цели в частотном диапазоне для каждой поисковой системы группы.

Более эффективная траектория преследования формируется при корректировке «угла упреждения» каждой  $i$ -той поисковой системы на основе текущих данных полученных всей поисковой группы.

$$W(\varepsilon_{0i}) = \sum_{i=1}^n W(\varepsilon_{ri}).$$

Алгоритмически стратегия самоорганизации группы поисковых систем представляет собой следующую цепочку действий [8-10]:

1. в заданный момент автономной работы (обычно после каждой итерации) в памяти каждой поисковой системы формируется уникальная модель динамики отклика цели  $W(\varepsilon_r)$ ;

2. на основе новых данных всей группы формируется общий массив. Закономерна ситуация, при которой часть новых данных в общей памяти многократно повторяется;

3. повторения удаляются;

4. оставшиеся оригинальные данные распределяются обычно равномерно по поисковым системам. После окончания распределения текущий общий массив данных удаляется;

5. на основании скорректированных данных для каждой  $i$ -той поисковой системы выполняется прогноз, на основе которого корректируется «угол упреждения».

На рисунке 2 представлен сравнительный анализ эффективности при использовании текущего общего массива данных группы.

Стратегия группового преследования позволяет более эффективно определять траекторию маневрирования цели, регулировать активность группы, направления поиска и величину сектора обзора каждой поисковой

системы, что существенно снижает вычислительный ресурс относительно традиционных стратегий.

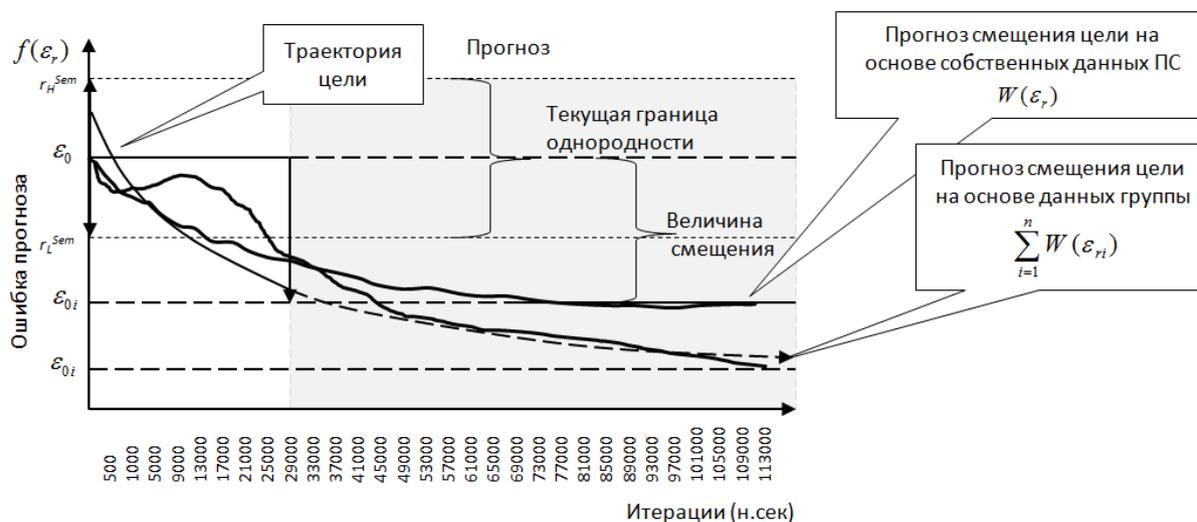


Рис. 2. Сравнительный анализ эффективности использования общего массива

Для выработки общей стратегии информационно-аналитической технологии группового преследования предлагается в дальнейшем применять типовые поправочные коэффициенты на основе расчета суммарной погрешности, наработанные для конкретной конструктивной особенности цели.

## Заключение

Технология корректировки угла упреждения на основе анализа ошибки прогноза позволяет значительно оптимизировать вычислительный ресурс относительно традиционных технологий преследования и кроме этого реализовать возможности интеллектуальной стратегии преследования для решения более широкого перечня задач управления развитием в социально-экономическом и информационно-коммуникационном секторе территорий.

## Список литературы

1. Гуткин Л.С. Принципы управления беспилотными объектами. – М.: Советское радио, 1970.
2. Запальский М.Б. Расчеты маневрирования при поиске цели // Морской сборник. 1969. - №6.
3. Лапшин В.П. Кинематические основы теории поиска // Морской сборник. 1962. - №8.
4. Неслин Ф.В., Зархан П. Сравнение классической и современной систем наведения самонаводящихся ракет // Ракетная техника и космонавтика. 1981 т. 19, № 6.

5. Ким Д.П. Методы поиска и преследование подвижных объектов. – М.: Наука. Гл. Ред. Физ.-мат. Лит., 1989. – 336 с.
6. Вермишев Ю.Х. Методы автоматического поиска решений при проектировании сложных технических систем / Ю.Х. Вермишев. – М.: Радио и связь, 1982. – 152 с.
7. Перфильев Д.А. Интеллектуальные технологии: монография / Д.А. Перфильев. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023. – 131с.
8. Perfilyev D.A. Segmentation frequency of heterogeneity image. In Regional problems of remote sensing of the Earth. Materials of the International Scientific Conference. Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 2020, 328 p.
9. Перфильев Д.А. Технология управления сектором обзора поисковых комплексов Робототехника и искусственный интеллект: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2021. – 280 с.
10. Перфильев Д.А. Технология управления сегментацией объекта Робототехника и искусственный интеллект: материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным. – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2022. – С 119-126.

**З.И. Самигулина**, Ph.D., доцент, z.samigulina@kbtu.kz  
**Б.Ж. Дюсенкулова**, докторант, bu\_dyussenkulova@kbtu.kz  
Казахстанско-Британский Технический Университет, г. Алматы, Казахстан

## **РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ УМНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

*Аннотация:* Статья посвящена разработке архитектуры умной производственной системы на основе модели управления предприятием GEMMA (Guide d'étude des modes de marche et d'arrêt) и нейронной сети с подкреплением. Управление сложными объектами осуществляется с помощью программируемых логических контроллеров от компании Schneider Electric серии Modicon M340 и Modicon M241. Нейросеть с подкреплением используется для интеллектуализации блока, отвечающего за диагностику оборудования.

*Ключевые слова:* умная производственная система, сложный объект, программируемый логический контроллер, нейронная сеть с подкреплением.

**Z.I. Samigulina**, Ph.D., docent, z.samigulina@kbtu.kz  
**B.Zh. Dyussenkulova**, Ph.D student, bu\_dyussenkulova@kbtu.kz  
Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

## **DEVELOPMENT OF AN ARCHITECTURE OF THE SMART MANUFACTURING SYSTEM FOR COMPLEX OBJECTS CONTROL**

*Abstract:* The article is devoted to the development of the architecture of a smart manufacturing system based on the GEMMA (Guide d'étude des modes de marche et d'arrêt) enterprise management model and a neural network with reinforcement. Complex objects are controlled using programmable logic controllers from Schneider Electric of the Modicon M340 and Modicon M241 series. A neural network with reinforcement is used to intellectualize the unit responsible for equipment diagnostics.

*Key words:* smart manufacturing system, complex object, programamable logic controller, human-machine interface, neural network with reinforcement learning.

### **1. Введение**

В настоящее время разработка умных производственных систем, отвечающих высоким требованиям безопасности, надёжности и эффективности, является одной из приоритетных задач промышленности. Интеллектуализация предприятий достигается за счёт внедрения методов искусственного ин-

теллекта на всех этапах производственного цикла, от проектирования до контроля качества. Например, в исследовании [1] предложена четырёхуровневая архитектура умной фабрики (CaSF, Cloud-assisted Smart Factory). Данная архитектура состоит из 4 уровней: уровень умных устройств, сетевой уровень, облачный уровень и уровень приложений.

Применение машинного обучения для решения проблем устойчивости в умных производственных системах является одним из эффективных решений. Например, в исследовании [2] предложена разработка цифрового двойника для аддитивного производства (additive manufacturing) с использованием модели машинного обучения. Модель машинного обучения EfficientDet-Lite была обучена на данных помеченных изображений для распознавания сбоев. Исследование [3] посвящено методу метамоделирования на основе машинного обучения (MLBSM, Machine Learning Based Simulation model) для достижения высокой точности прогнозирования. Предложенная модель имела 90 процентную точность в прогнозировании высоко рискованных задач. В работе [4] представлена адаптивная структура для предсказания процента выхода пригодных деталей на этапе окончательного испытания в производстве полупроводников. В исследовании [5] для автономного распределения производственных ресурсов (A-MRA, autonomous manufacturing resources allocation) предложена модель, основанная на скрытом Марковском процессе (HMM, Hidden Markov Model). Повсеместно применяются генетические алгоритмы в создании умных производственных систем. Например, исследование [6] посвящено генетическому алгоритму по Парето (PGA, Pareto Genetic Algorithm) для предотвращения взаимоблокировок в автоматизированных производственных системах (AMS, Automated Manufacturing system). Модель сети Петри (Petri net model) использовалась для проверки устойчивости индивидуумов в сравнении с генетическим алгоритмом сортировки (Non-dominated Sorting Genetic algorithm II). В работе [7] для решения НП-трудной задачи оптимизации (NP-hard optimization problem) предложен эволюционный генетический алгоритм (Evolutionary Genetic algorithm, EGA) с использованием виртуальных операторов скрещивания. В исследовании [8] представлена структура цифрового двойника с применением генетического алгоритма (Roulette Genetic algorithm). Данный подход был разработан для прогнозирования спроса и показал высокую эффективность оптимизации запасов и производственных процессов.

Широкое распространение получили гибридные алгоритмы для реализации концепта умных производственных систем. В работе [9] представлен интеллектуальный подход для устойчивого моделирования нелинейных систем на основе входных и выходных данных. Предлагается метод группировки параметров (GM, Group-Method) для обработки данных на основе метода собственных векторов (SVD, Singular Value Decomposition). Результаты моделирования и экспериментов проводились на примере производственной линии углеродного волокна. Исследование [10] посвящено разработке моде-

ли динамического планирования в режиме реального времени. Решалась задача гибкого оптимально минимизированного производственного планирования с учётом поломок (Flexible Job Shop Scheduling problem, FJSSP). На начальном этапе использовался генетический алгоритм (ГА) для решения задачи планирования, далее после применения ГА с помощью обратной связи от устройств концепции интернета вещей (IoT, Internet of things) о поломках оборудования осуществлялось изменение в расписании.

В статье [11] рассматривается разработка гибридного подхода, который сочетает в себе метод имитации отжига (Simulated Annealing, SA) и модели глубокого обучения на основе нейронной сети (Deep Neural Network) для прогноза потенциальных отказов оборудования. Результаты моделирования и экспериментов осуществлялись на наборе данных репозитория UCI Machine Learning A141. Работа [12] посвящена разработке архитектуры (Federated Learning Based Explainable Anomaly Detection, FedeX) для решения задачи обнаружения аномалий в умных производствах. Авторы использовали набор данных со SCADA системы по хранению жидкостей и набор данных SwaT (Secure Water Treatment, Singapore). Предложенный алгоритм показал эффективность по метрикам recall и f1-score.

Таким образом, внедрение современных методов искусственного интеллекта для разработки умных производственных систем является актуальной задачей. Однако, применение искусственного интеллекта имеет свои ограничения, связанные с принципами безопасности функционирования технологических процессов. При разработке новых интеллектуальных алгоритмов необходимо учитывать ограничения производственной среды.

## **2. Постановка задачи исследований**

Необходимо разработать концепцию умной производственной системы на основе модели (Guide d'étude des modes de marche et d'arrêt, GEMMA) для управления сложными объектами с использованием промышленного оборудования от компании Schneider Electric, платформы EcoStructure и SCADA системы AVEVA (Aveva Plant Scada).

## **3. Разработка архитектуры умной производственной системы**

На рисунке 1 представлена разработанная архитектура умной производственной системы на основе модели GEMMA и метода искусственного интеллекта нейронной сети с подкреплением. Концепция GEMMA была внедрена в 1984 году Агентством национального развития автоматизированного производства (ADEPA, Франция) с целью упрощения автоматизации производственных систем. Модель состоит из следующих основных зон: «зона А» – процедуры, выполняемые системой автоматике во время остановки и восстановления системы после отказа; «зона F» – состояния системы автоматике во время нормальной эксплуатации, в автоматическом режиме;

«зона D» – описание состояний автоматике в режиме отказа [13, 14]. Данная модель была построена на основе языка SFC (Sequential Function Charts) для программирования логических контроллеров, а язык SFC создан на основе сети Петри (Petri net model) [14].

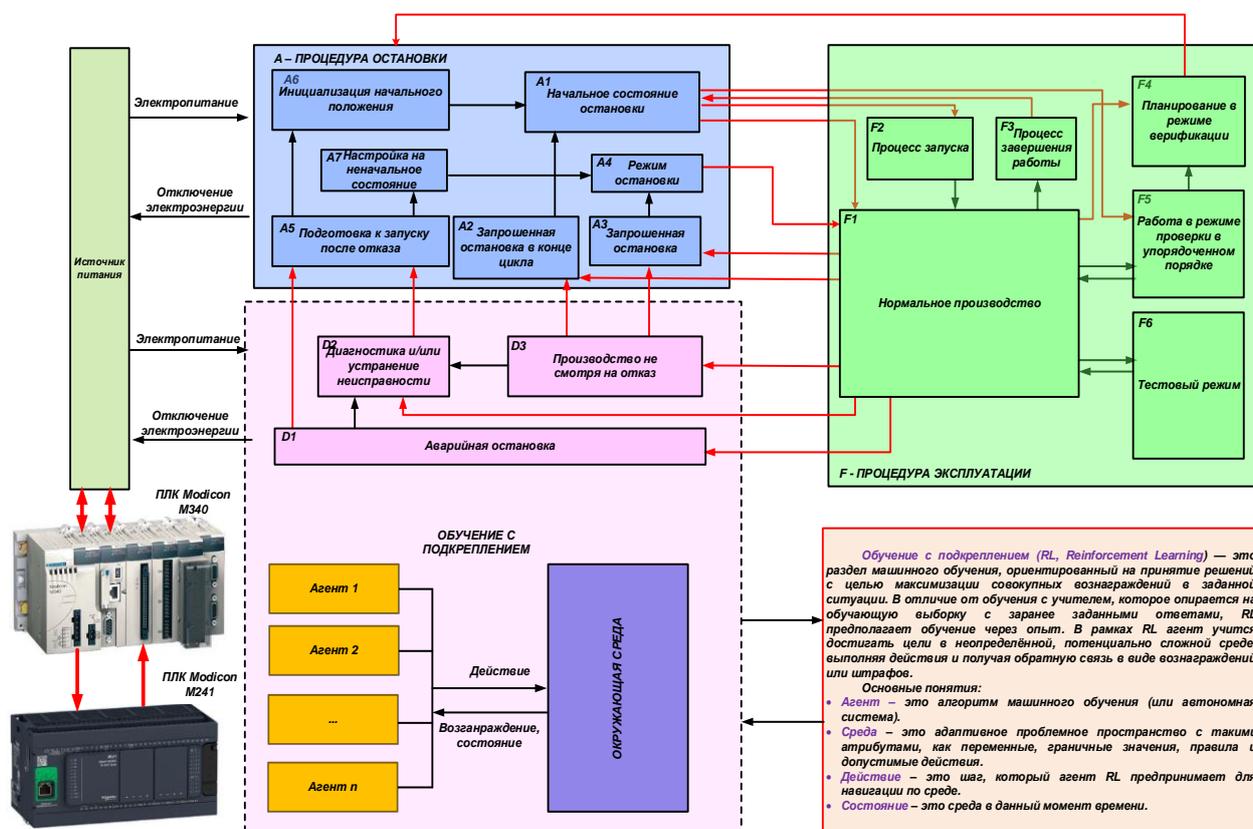


Рис 1. Архитектура умной производственной системы на основе модели GEMMA и нейросети с подкреплением

В исследовании предлагается модернизация «зоны D» с использованием нейронной сети с подкреплением (RL, Reinforcement learning). Контроль за производственным процессом осуществляется с помощью программируемых логических контроллеров от компании Schneider Electric серии Modicon M340 под управлением программного продукта EcoStructure Control Expert для средних производств и Modicon M241 (EcoStructure Machine Expert) для управления машинами и механизмами. Контроллеры связаны с HMI дисплеями фирмы Hamony. Сбор данных и мониторинг состояния оборудования осуществляется на основе SCADA системы Aveva Plant Scada. В качестве клиента используется Excel данные, с которого подаются на вход нейронной сети. Нейросеть использует принцип обучения с подкреплением основными элементами которой являются следующие компоненты: «агент», «состояние», «среда», «вознаграждение», «действие» [15]. Псевдокод алгоритма для интеграции с моделью GEMMA представлен ниже.

## Псевдокод алгоритма нейронной сети с подкреплением

Входные данные: state\_dim, failure\_threshold, eps, batch\_size, memsize.

Выходной параметр: класс.

---

```
Initialize agent(state_dim); state = 0; action = 0;
buffer = InitializeBuffer(memsize);
Select action A(state);
Train(agent, mini_batch);
Predict_failure(state, failure_threshold);
Loop for each step
  state = Reset() #Инициализация отказа
  reward = 0;
  while true: Update action = Select action();
    text_state, reward = Execute_action(state, action);
    buffer.add(state,action,reward,next_state);
    Train_agent(agent,mini_batch);
  Predict_failure(p(state))
```

---

В псевдокоде используются следующие параметры: state\_dim - размерность состояния; failure\_threshold – определённое значение, когда агент или система рассматривает какое-то событие, как случайный отказ; batch\_size – гиперпараметр для обучения; memsize – размер памяти.

## 4. Заключение

Разработка умных производственных систем на основе нейросетей с подкреплением является актуальной задачей в условиях стремительной цифровизации промышленности. Использование RL позволяет системам адаптироваться к изменяющимся условиям, оптимизировать управление ресурсами, снижать затраты и повышать качество продукции. Внедрение подобных технологий способствует повышению конкурентоспособности предприятий, устойчивости производства и ускорению инновационных процессов.

## Список литературы

1. Wan J., Yang J., Wang Zh., Hua Q. Artificial intelligence for cloud-assisted smart factory // IEEE Access. - 2018. - №6. - pp. 55419-55430.

2. Juenskhan N., Keutayeva A., Kazbek G., Ali H., Shehab E. Integrating Machine Learning Model and Digital Twin System for Additive Manufacturing // IEEE Access. - 2023. - №11. - pp. 71113-71126

3. Nejati E., Ghaedy-Heidary E., Ghasemi A., Torabi S. A machine learning-based simulation metamodeling method for dynamic scheduling in smart manufacturing systems // Computers & Industrial Engineering. - 2024. - №196. - pp. 110507.

4. Jiang D., Lin W., Raghavan N. A Novel Framework for Semiconductor Manufacturing Final Test Yield Classification Using Machine Learning Techniques // IEEE Access. 2020. - №8. – pp. 197885–197895.

5. Ding K., Zhang X., Chan F., Chan C.-Y., Wang Ch. Training a Hidden Markov Model-Based Knowledge Model for Autonomous Manufacturing Resources Allocation in Smart Shop Floors // *IEEE Access*. - 2019. - №7. - pp. 47366–47378.
6. Zan X., Wu Z., Guo Ch., Yu Zh. A Pareto-based genetic algorithm for multi-objective scheduling of automated manufacturing systems // *Advances in Mechanical Engineering*. - 2020. - T. 12. - №1.
7. Ali K. B., Telmoudi A. J., Gattoufi S. Improved Genetic Algorithm Approach Based on New Virtual Crossover Operators for Dynamic Job Shop Scheduling // *IEEE Access*. 2020. - T. 8. - pp. 213318–213329.
8. Tang Y.-M., Ho George T.S., Lau Y.-Y., Tsui S.-Y. Integrated Smart Warehouse and Manufacturing Management with Demand Forecasting in Small-Scale Cyclical Industries // *Machines*. 2022. T. 10. - №6. - pp. 472.
9. 1. Khayyam H., Jamali A., Bab-Hadiashar A., Esch T., Ramakrishna S., Jalili M., Naebe M. A Novel Hybrid Machine Learning Algorithm for Limited and Big Data Modeling With Application in Industry 4.0 // *IEEE Access*. - 2020. T. 8. - pp. 111381–111393.
10. Tariq A., Khan S., But W., Javaid A., Shehryar T. An IoT-Enabled Real-Time Dynamic Scheduler for Flexible Job Shop Scheduling (FJSS) in an Industry 4.0-Based Manufacturing Execution System (MES 4.0) // *IEEE Access*. - 2024. - T. 12. - pp. 49653–49666.
11. Hung Y.-H., Huang M.-L., Wang W.-P., Chen G.-L. Hybrid Approach Combining Simulated Annealing and Deep Neural Network Models for Diagnosing and Predicting Potential Failures in Smart Manufacturing // *Sensors and Materials*. - 2024. - T. 36. - №1. - pp. 49.
12. Huong T. T., Bac T. P., Ha K. N., Hoang N. V., Hoang N. X., Hung N. T., Tran K. P. Federated Learning-Based Explainable Anomaly Detection for Industrial Control Systems // *IEEE Access*. - 2022. - T. 10. - pp. 53854–53872.
13. Yakurangi O., Saltarén Pazmiño R., Cely J., Rodríguez A., García Cena C., San Segundo Carrillo P., De La Cueva J., Shapiro A. An Intelligent Algorithm for Decision Making System and Control of the GEMMA Guide Paradigm Using the Fuzzy Petri Nets Approach // *Electronics*. - 2021. - T. 10. - № 4. - pp. 489.
14. Barbieri G., Gutierrez D. A. A GEMMA-GRAFCET Methodology to enable Digital Twin based on Real-Time Coupling // *Procedia Computer Science*. - 2021. - T. 180. - pp. 13–23.
15. Li C., Zheng P., Yin Y., Wang B., Wang L. Deep reinforcement learning in smart manufacturing: A review and prospects // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023. T. 40. -pp. 75–101.

*Секция 6*

**УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ  
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ  
АВТОМАТИЗАЦИЯ**

УДК 681.518.3

**А.С. Губанков**, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, gubankov@dvo.ru

**И.В. Горностаев**, к.т.н., доцент, научн. сотр., gornostaev\_iv@mail.ru

МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

ИПМТ им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ БПЛА КВАДРОКОПТЕРНОГО ТИПА**

*Аннотация:* В докладе приведены результаты разработки метода автоматического формирования программной скорости движения беспилотного летательного аппарата квадрокоптерного типа. Этот метод позволяет за счет использования упрощенной математической модели аппарата осуществлять расчет указанной скорости в реальном масштабе времени. При этом настройка скорости на различных участках траектории осуществляется непосредственно в процессе отработки заданной миссии с учетом заданных ограничений на величину развиваемого движителем аппарата вектора тяги. С использованием предложенного метода была создана система, работоспособность которой подтверждена результатами моделирования.

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат, квадрокоптер, программная скорость, траектория, ограничения вектора тяги.

**A.S. Gubankov**, Ph.D., assistant professor, senior scientist, gubankov@dvo.ru

**I.V. Gornostaev**, Ph.D., researcher, gornostaev\_iv@mail.ru

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia

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

## **DEVELOPMENT OF METHOD OF GENERATING A REFERENCE MOVEMENT SPEED OF QUADCOPTER TYPE UAV**

*Abstract:* The report presents the results of developing a method for automatically generating reference speed for a quadcopter-type unmanned aerial vehicle. The method allows for real-time calculation of the reference speed using a simplified mathematical model of the vehicle. The speed is adjusted in different segments of the trajectory during the execution of a given mission, taking into account the limitations of the thrust vector developed by the vehicle's propellers. The proposed method was used to create a system, the efficiency of which are confirmed by the results of computer modeling.

*Keywords:* unmanned aerial vehicle, quadcopter, reference speed, trajectory, thrust vector limitations.

Последнее десятилетие беспилотные летательные аппараты (БПЛА) (особенно квадрокоптерного типа) всё более широко применяются для решения различных задач [1], в основном связанных с выполнением осмотровых работ (мониторинг лесных массивов и сельскохозяйственных угодий, контроль состояния объектов гражданской инфраструктуры, в том числе дорожных покрытий и линий электропередач). Сокращение затрачиваемого на выполнение этих работ времени (особенно с учетом необходимости быстрого осмотра больших площадей) является актуальной задачей. Для ее решения требуется в процессе выполнения миссии так формировать программную скорость движения БПЛА, чтобы его движительный комплекс был способен создать требуемый вектор тяги, который обеспечит движение аппарата по траектории с заданной скоростью с учетом влияния окружающей среды.

В настоящее время для задания режимов движения БПЛА по траекториям используются методы, описанные в следующих статьях. В работе [2] выполняется решение оптимизационных задач с целью выполнения миссии за минимальное время, а в работе [3] для решения этой задачи применен метод потенциальных полей, позволяющий также избегать столкновения с препятствиями. Общим недостатком этих и других известных методов является то, что они не позволяют учесть ограничения на развиваемый движителями БПЛА вектор тяги, либо их затруднительно применить, если траектории движения изменятся уже после начала выполнения миссии.

С учетом этого в работе ставится и решается задача разработки метода автоматического формирования высокой программной скорости движения БПЛА квадрокоптерного типа по гладким пространственным траекториям с учетом заданных ограничений на развиваемый вектор тяги БПЛА. Создаваемые на основе этого метода системы должны быть реализуемы на маломощных бортовых вычислительных устройствах БПЛА.

### **Разработка метода формирования программной скорости движения БПЛА**

Для обеспечения возможности осуществления всех расчетов непосредственно в процессе выполнения миссии БПЛА формирование программной скорости  $v^*$  будет выполнено по упрощенной модели беспилотника квадрокоптерного типа. В этой модели БПЛА представлен в виде материальной точки, перемещающейся в абсолютной (неподвижной) системе координат (АСК), а его пространственная ориентация в процессе движения не учитывается. Это упрощение допустимо при выполнении многих миссий БПЛА, связанных с его перемещениями по протяженным траекториям (мониторинг береговых линий, авто- и ж/д путей сообщения, газо- и нефтепроводов и пр.).

Согласно этому допущению вектор равнодействующей всех сил  $\mathbf{F}_\Sigma$  (см. рис. 1), приложенных к центру масс БПЛА, можно записать как

$$\mathbf{F}_\Sigma = m\mathbf{a} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_{res}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса БПЛА;  $\mathbf{a} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$  – вектор ускорения центра масс БПЛА в АСК;  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{F}_g$ ,  $\mathbf{F}_w$  и  $\mathbf{F}_{res}$  – векторы суммарной силы тяги движителей БПЛА, силы тяжести, силы воздействия ветра на БПЛА и силы сопротивления воздуха.

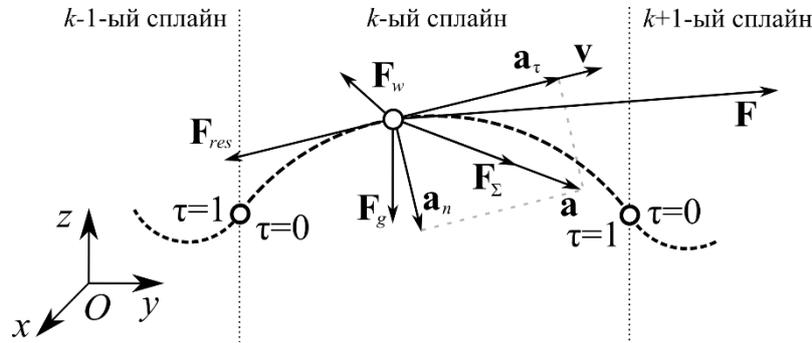


Рис. 1. Силы, действующие на БПЛА при его движении по  $k$ -му сплайну в АСК

Для расчета искомой высокой программной скорости  $v^*$ , при движении с которой величина вектора тяги  $|\mathbf{F}|$  не будет превышать ее максимальное допустимое значение  $|\mathbf{F}_{max}|$ , которое может обеспечить движительный комплекс этого БПЛА, используем подход, описанный в работе [4]. Для этого переписем уравнение (1) так, чтобы получить зависимость вектора тяги  $\mathbf{F}$  от величины скорости  $v$  и ускорения  $dv/dt$ , от которых зависят сила сопротивления воздуха  $\mathbf{F}_{res}$  [5] и вектор ускорения  $\mathbf{a}$  [6] (см. рис. 1) соответственно. При этом используем известный способ задания пространственных траекторий с помощью параметрических сплайнов [7]. Траектория состоит из  $K$  соединенных кривых (сплайнов), а положение программной точки  $(x, y, z)$  в АСК  $Oxuz$ , за которой следует БПЛА, на каждом сплайне определяется величиной параметра  $\tau \in [0,1]$  (см. рис. 1). С использованием полученного уравнения, принимая  $dv/dt = 0$ ,  $v = v_m$  и  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_{max}$ , уравнение (1) переписываем в виде:

$$\mathbf{F}_{max} = (\tilde{\mathbf{F}}_{\Sigma n} - \tilde{\mathbf{F}}_{res})v_m^2 - \mathbf{F}_g - \mathbf{F}_w, \quad (2)$$

где  $\tilde{\mathbf{F}}_{\Sigma n} = m([W_x \ W_y \ W_z]^T - [B_x \ B_y \ B_z]^T \frac{B_x W_x + B_y W_y + B_z W_z}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}) \frac{1}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ ,

$$\tilde{\mathbf{F}}_{res} = -[B_x \ B_y \ B_z]^T k_{res} / \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}.$$

где  $B_x(\tau)$ ,  $B_y(\tau)$ ,  $B_z(\tau)$ ,  $W_x(\tau)$ ,  $W_y(\tau)$ ,  $W_z(\tau)$  – соответственно первые и вторые производные координат  $x(\tau)$ ,  $y(\tau)$ ,  $z(\tau)$  по параметру  $\tau$  [6];  $k_{res}$  – коэффициент сопротивления воздуха, зависящий от формы БПЛА и параметров воздуха;  $v_m(\tau)$  – верхняя граница программной скорости  $v^*$  движения БПЛА.

Это векторное уравнение (2), как показано в работе [4], можно переписать в скалярном виде по трем проекциям на координатные оси  $x$ ,  $y$  и  $z$ . После чего с учетом того, что  $|\mathbf{F}_{max}| = \sqrt{F_{maxx}^2 + F_{maxy}^2 + F_{maxz}^2}$ , запишем:

$$|\mathbf{F}_{max}|^2 = \tilde{a}v_m^4 + \tilde{b}v_m^2 + \tilde{c}, \quad (3)$$

где  $\tilde{a} = [(\tilde{F}_{\Sigma nx} - \tilde{F}_{res x})^2 + (\tilde{F}_{\Sigma ny} - \tilde{F}_{res y})^2 + (\tilde{F}_{\Sigma nz} - \tilde{F}_{res z})^2]$ ,  $\tilde{b} = -2[(\tilde{F}_{\Sigma nx} - \tilde{F}_{res x}) \cdot (F_{gx} + F_{wx}) + (\tilde{F}_{\Sigma ny} - \tilde{F}_{res y})(F_{gy} + F_{wy}) + (\tilde{F}_{\Sigma nz} - \tilde{F}_{res z})(F_{gz} + F_{wz})]$ ,  $\tilde{c} = [(F_{gx} + F_{wx})^2 + (F_{gy} + F_{wy})^2 + (F_{gz} + F_{wz})^2]$ .

Решая уравнение (3), вычислим значение верхней границы скорости  $v_m$ , которую может обеспечить система управления БПЛА с учетом ограничения величины вектора тяги  $\mathbf{F}$ . Для этого заменим  $v_m^2 = V$ , решим полученное алгебраическое уравнение второй степени, проведем обратную замену переменных и найдем искомые корни уравнения (3). Из полученных четырех корней только два являются действительными, а из них только один соответствует движению БПЛА по траектории в сторону увеличения параметра  $\tau$ :

$$v_m = \sqrt{\frac{-\tilde{b} + \sqrt{\tilde{b}^2 - 4\tilde{a}(\tilde{c} - |\mathbf{F}_{max}|^2)}}{2\tilde{a}}}. \quad (4)$$

С использованием (4) рассчитывается скорость  $v_m$ . Однако необходимо учитывать, что при выводе закона (4) было принято, что величина тангенциального ускорения  $|\mathbf{a}_\tau| = 0$ . Поэтому формируемая скорость  $v^*$  должна быть всегда меньше или равна не только желаемой скорости  $v_d(\tau)$ , определяемой с учетом вида выполняемой миссии, но также и несколько ниже рассчитанной скорости  $v_m$  (4) для возможности осуществления движения с  $|\mathbf{a}_\tau| \neq 0$ .

В итоге для формирования программной скорости  $v^*$ , точное движение с которой может быть обеспечено системой управления с учетом ограничения  $|\mathbf{F}_{max}|$ , предлагается использовать следующий простой закон [8]:

$$v^* = \min\{\lambda v_m, v_d\}, \quad (5)$$

где  $\lambda \in (0,1]$  – эмпирически подбираемый коэффициент.

Формируемая программная скорость  $v^*$  будет проходить на всех участках траектории заведомо ниже верхней границы  $v_m(\tau)$  (5), что позволит сохранить высокую точность движений БПЛА по траектории. Если же требуется формировать скорость движения группы БПЛА, двигающихся в одном общем построении, то описанная процедура расчета программной скорости  $v^*$  должна повторяться для каждого аппарата, а общая скорость движения формации должна определяться скоростью самого медленного из аппаратов.

## Результаты моделирования

Для проверки работоспособности системы, синтезированной с использованием представленного метода, проведено моделирование в среде Matlab. Моделировалось движение БПЛА массой 1 кг по сложной пространственной траектории (законы изменения координат  $x, y, z$  в АСК представлены на рис. 2), построенной с использованием параметрических сплайнов Катмулла-Рома [7]. Сила ветра  $\mathbf{F}_w = [0 \ -15 \ 0]^T$  Н, коэффициент сопротивления среды  $k_{res} = 1$ .

Сначала рассмотрим результаты моделирования при движении БПЛА по траектории с постоянной скоростью  $v_d = v^* = 3.5$  м/с, представленные на

рис. 3 и 4а. На этих рисунках видно, что на участках траектории, где нарушалось условие  $v^* \leq v_m$ , величина вектора тяги  $|\mathbf{F}|$  (см. график 1 на рис. 3) превышала заданное допустимое значение  $|\mathbf{F}_{max}| = 20$  Н, то есть двигательный комплекс БПЛА не обеспечивал требуемую тягу  $\mathbf{F}$ .

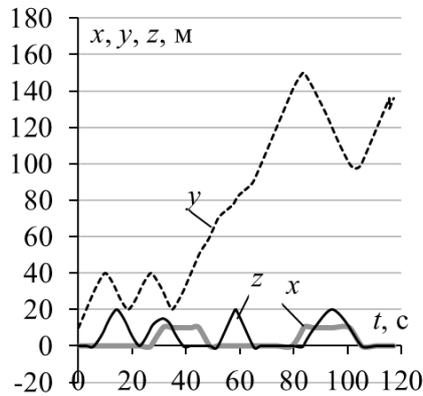


Рис. 2. Законы изменения координат  $x, y, z$ , задающих положение БПЛА на траектории

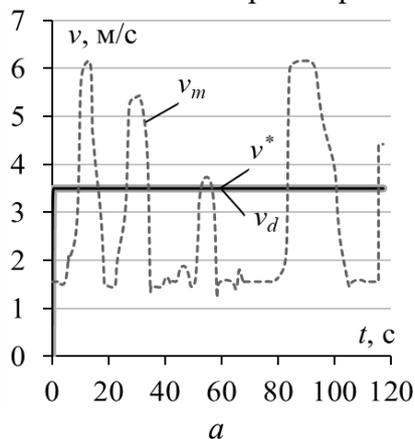


Рис. 4. Законы изменения желаемой  $v_d$ , максимальной  $v_m$  и программной  $v^*$  скоростей движения БПЛА при а)  $v^* = \text{const}$ ; б)  $v^* = \text{var}$

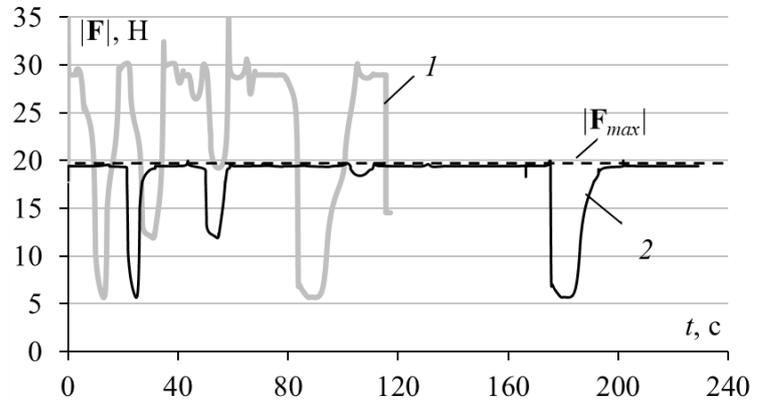
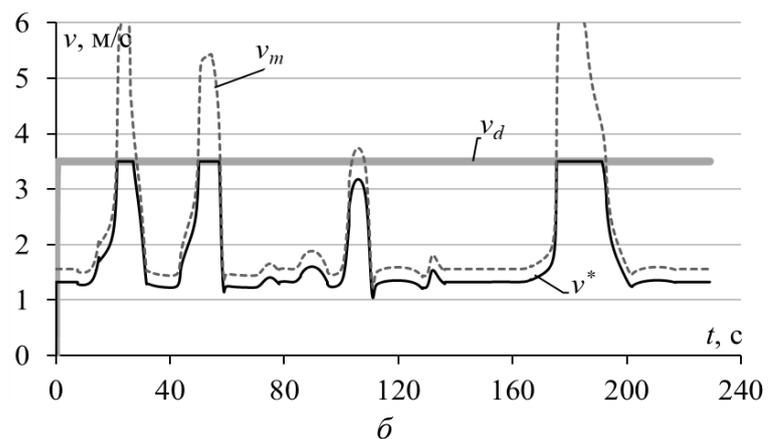


Рис. 3. Законы изменения величины вектора тяги  $|\mathbf{F}|$  при движении БПЛА по траектории с  $1 - v^* = \text{const}$ ;  $2 - v^* = \text{var}$



Для исключения ситуаций, когда условие  $v^* \leq v_m$  нарушается, можно снизить скорость  $v^*$  до постоянного значения 1.2 м/с (это минимальное значение  $v_m$  на рис. 4а). Однако из-за этого время выполнения миссии увеличится в 2.93 раза (со 115 с до 337 с). Поэтому для сохранения высоких темпов движения требуется снижать скорость  $v^*$  только на отдельных участках траектории, не допуская нарушения условия  $|\mathbf{F}| \leq |\mathbf{F}_{max}|$ .

Теперь рассмотрим результаты моделирования при движении БПЛА по траектории со скоростью, рассчитанной с использованием представленного выше метода. В этом случае скорость  $v^*$  формировалась согласно (5) (см. рис. 4б), принимая значение, равное либо желаемой скорости  $v_d$ , либо  $\lambda v_m$ , где  $\lambda = 0.85$ . В результате условие  $|\mathbf{F}| \leq |\mathbf{F}_{max}|$  непрерывно выполнялось, а система управления БПЛА поддерживала его движение с высокой точностью. За счет

того, что скорость  $v^*$  снижалась только на отдельных участках траектории, время выполнения миссии было снижено с 337 с до 229 с, то есть на 32%.

Представленные результаты подтверждают работоспособность предложенного метода. При этом из-за упрощенного расчета программной скорости синтезируемые с использованием этого метода системы могут быть реализованы даже на маломощных бортовых контроллерах БПЛА.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ № 24-29-00489.*

## Список литературы

1. Asif, A.L.; Awais, K.J.; Rashid, A.L.; Haque, N. Unmanned aerial vehicles: A review. *Cognitive Robotics*, 2023, 3, 8–22 pp. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.12.004>
2. Shikai, Sh.; Yu, P.; Chenglong, H.; Yun, D. Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization. *ISA Transactions*, 2020, 415–430 pp., <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.018>
3. Liu, Y.; Chen, Ch.; Wang, Y.; Zhang, T.; Gong, Y. A fast formation obstacle avoidance algorithm for clustered UAVs based on artificial potential field. *Aerospace Science and Technology*, 147, 2024, 1–17 pp., <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.108974>
4. Gubankov, A.; Gornostaev, I. Development of Method of Generating a Reference Movement Speed of a Group of UAVs. *Proc. of the International Conference on Ocean Studies, Vladivostok, Russia, 2024*, 141–145 pp.
5. Chan, Y.Y.; Kam, K.H.N.; Lee, C.K.M.; Li-Ta, Hs.; Keung, K.L. Wind dynamic and energy-efficiency path planning for unmanned aerial vehicles in the lower-level airspace and urban air mobility context. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 57, 1–12 pp. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103202>
6. Filaretov, V.; Gubankov, A.; Gornostaev, I. Method of Formation of Reference Movement Speed of Working Tool of Multilink Manipulator. *Lecture Notes in Computer Science*, 2020, 89–98 pp. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_9)
7. Gubankov, A.; Gornostaev, I. Comparison Study of Different Types of Setting Reference Movements for Mechatronic Objects by Parametric Splines. *Proc. of the 2022 International Conference on Ocean Studies, Vladivostok, Russia, 2022*, 35–38 pp. <https://doi.org/10.1109/ICOS55803.2022.10033330>
8. Gubankov, A.; Gornostaev, I. Development of a Method for Generating Extremely High Reference Motion Speeds of Mechatronic Objects Moving Alone or in a Group. *Proc. of the International Russian Smart Industry Conference, Vladivostok, Russia, 2024*, 574–579 pp. <http://dx.doi.org/10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10516162>

## ВЫБОР ПОХОДОК ДЛЯ ШАГАЮЩЕГО ДОМАШНЕГО РОБОТА

*Аннотация:* Домашние шагающие роботы, имитирующие домашних животных, должны иметь высокую маневренность для уверенного перемещения в домашней обстановке. Походка шагающего робота определяет набор движений при ходьбе и определяет его маневренность. Походки с переменным радиусом поворота позволяют обеспечить перемещение шагающего робота в любом направлении. Данный тип походок обладает низкой вычислительной сложностью, что увеличивает автономность домашнего шагающего робота.

*Ключевые слова:* шагающий робот, устойчивость, планирование движений

D.A. Dobrynin, Ph.D., senior researcher, [rabota51@mail.ru](mailto:rabota51@mail.ru)  
Federal Research Center "Computer Science and Control"  
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## CHOOSING GAITS FOR A WALKING HOME ROBOT

*Abstract:* Home walking robots that mimic pets must have high maneuverability to move confidently in a home environment. The gait of a walking robot determines the set of movements when walking and determines its maneuverability. Gaits with a variable turning radius allow the walking robot to move in any direction. This type of gait has low computational complexity, which increases the autonomy of a home walking robot.

*Key words:* walking robot, stability, motion planning

### Введение

Шагающие роботы – важное направление современных исследований в области робототехники. Шагающий робот способен адаптироваться к сложному рельефу местности. Поэтому его проходимость выше, чем роботов с колесами или гусеницами. Четырехногий робот по конструкции проще, чем шестиногий робот, и обладает лучшей устойчивостью и грузоподъемностью, чем робот с двумя ногами. Шагающие роботы могут быть эффективны при использовании на открытой местности и в сложной обстановке промышленных объектов. Домашние шагающие роботы более маневренны, чем их колесные собратья, и могут стать нашими друзьями и помощниками.

Исследования в области четвероногих роботов активно идут с 1980-х годов. Изначально использовались походки, основанные на кинематической модели ноги робота, похожие на походки насекомых и животных [1]. Matsuoka [2] предложил метод CPG для имитации ритмического движения. CPG позволяет генерировать периодические походки, используя небольшое количество параметров.

Современные исследования в области шагающих роботов направлены на решение проблем перемещения по сложной местности [3], [4]. При таком способе перемещения робот должен выбирать точку опоры для каждого шага, чтобы оптимально решать задачи проходимости и устойчивости. Такая походка робота получила название свободной походки. Макги и Фрэнк [5] занимались анализом свободной походки при исследовании перемещения робота по сложной местности. Для расчета свободной походки используются различные методы – оптимизация положения центра тяжести для обеспечения заданной устойчивости [6], обучение многослойных нейронных сетей [7].

Домашний шагающий робот должен обладать небольшой массой (до 5-6 кг). Поэтому для длительной работы от одной зарядки аккумулятора такой робот обычно имеет ограниченные вычислительные ресурсы. Целью данной работы является оценка различных походок и анализ их пригодности для небольшого шагающего робота.

### Устойчивость робота

Домашний шагающий робот внешне похож на собаку (рис.1а). Робот имеет четыре ноги простой конструкции. Каждая нога может перемещаться с тремя степенями свободы.

Устойчивость робота определяется по положению проекции центра тяжести COG на опорную поверхность [1]. Робот будет статически устойчив, если горизонтальная проекция его центра тяжести лежит внутри опорного многоугольника (рис. 1б). Для робота с четырьмя ногами опорный многоугольник может представлять собой либо четырехугольник, либо треугольник.

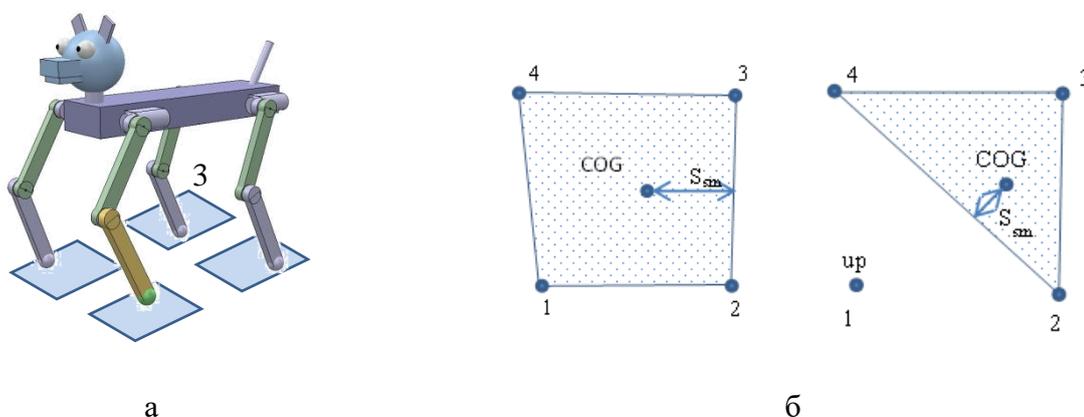


Рис.1 а) модель робота; б) статическая устойчивость робота

Для обеспечения запаса устойчивости расстояние от проекции центра тяжести COG до края опорного многоугольника должно быть не меньше заданной величины  $S_{SM}$  (рис. 1б). Основная идея устойчивых походок заключается в том, что статическая устойчивость  $S_{SM}$  должна обеспечиваться для каждой фазы походки.

Динамическая устойчивость зависит от скорости перемещения робота и характеристик его конструкции. Так как ноги робота обладают определенной массой, то при их перемещении возникают силы инерции, приложенные к корпусу робота. Точный расчет динамической устойчивости является сложной задачей, требующей отдельных подходов.

### Походки четырехного шагающего робота

Походка шагающего робота определяется количеством ног и конструкцией ноги. Различают следующие типы походок роботов:

а) статически устойчивые, когда робот при движении может остановиться в любой момент без потери устойчивости. Минимальная скорость перемещения робота не ограничена.

б) динамически устойчивые, когда робот сохраняет устойчивость в движении. Минимальная скорость перемещения робота ограничена, при уменьшении скорости ниже некоторого порога робот теряет равновесие. Остановка робота возможна только в определенные моменты, когда три или более ног стоят на опорной поверхности.

в) квазиустойчивые, когда устойчивость обеспечивается специальной конструкцией ноги робота. Примером могут служить двуногие роботы с тяжелыми ногами, при движении которых качающаяся нога уравнивает наклон туловища, выступая в роли маятника.

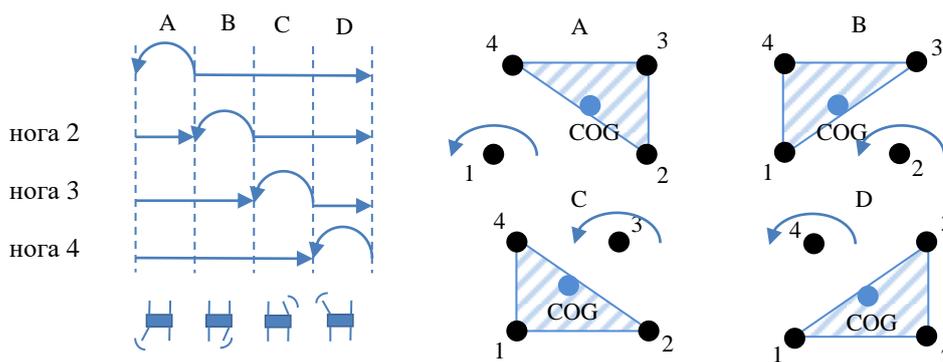


Рис. 2 Походка с поочередным переносом ног

На рис. 2 приведен пример регулярной походки с поочередным переносом ног. Справа показано положение проекции центра тяжести в разных фазах походки. В фазе А происходит перенос ноги 1 назад. В остальных фазах С-Д точка опоры ноги 1 движется по прямой относительно корпуса робота.

В фазе В происходит перенос ноги 2, который проходит аналогично. Время переноса ноги равно  $\frac{1}{4}$  длительности цикла шагания.

Данная походка является периодической. Из рис. 2 можно заметить, что после завершения фазы D опять начинается фаза А. Характер движения ног для данной походки одинаковый. Скорость перемещения тела робота остается постоянной.

Примером динамической походки, используемой во многих разработках четырехногих шагающих роботов, является походка двойками (рис. 3). При такой походке робот одновременно переносит пару диагональных ног. Другая пара ног робота стоит на опорной поверхности. При этом опорный многоугольник вырождается в узкую полосу (рис. 3а). Проекция центра тяжести робота находится внутри или возле этой полосы. Для того чтобы робот не опрокидывался, необходимо быстро переносить ноги.

При использовании походки двойками робот не может неподвижно стоять на одном месте на двух ногах. Для обеспечения устойчивости необходимо непрерывно переставлять ноги, чтобы проекция центра тяжести оставалась на месте.

Конструкция ноги робота обладает тремя степенями свободы, поэтому можно реализовать круговую траекторию движения опорных точек ног. Такая походка получила название VTR gate – походка с переменным радиусом поворота [8]. Эта походка является периодической и обладает универсальностью.

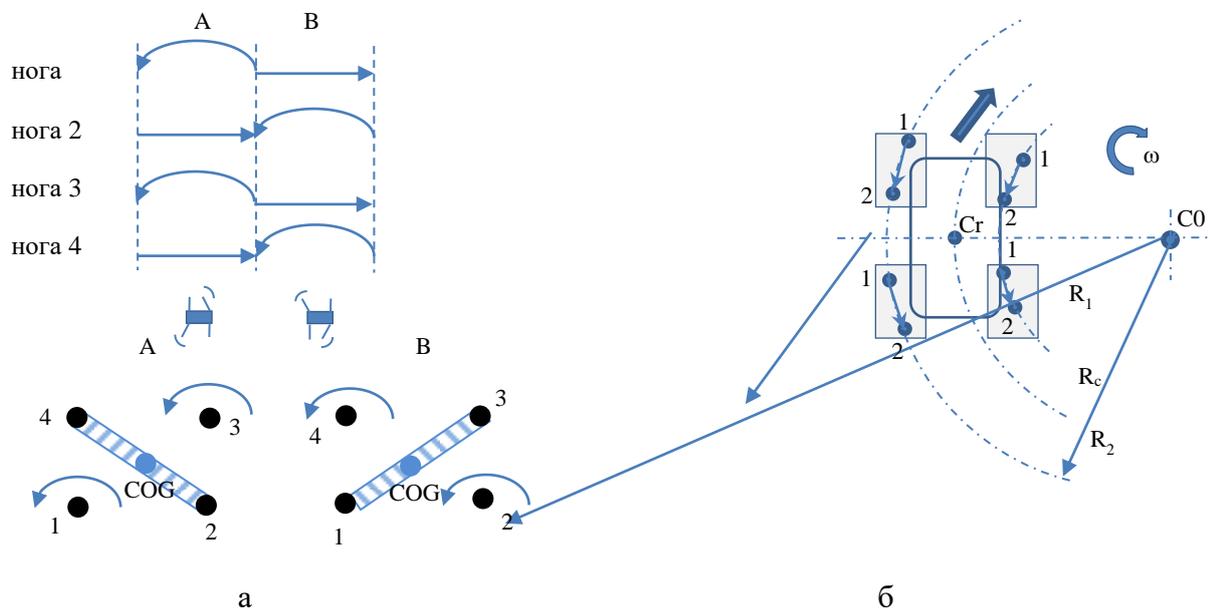


Рис. 3 а) Походка двойками; б) походка с переменным радиусом поворота (VTR gate)

На рис. 3б изображен принцип перемещения робота по окружности радиусом  $R_c$ . Каждая нога робота движется таким образом, чтобы траектория движения ее опорной точки (от 1 до 2) лежала на окружности. Центры всех

окружностей должны совпадать. Угловая скорость перемещения  $\omega$  опорных точек по поверхности также должна быть одинаковой. При этих условиях центр робота будет перемещаться по окружности вокруг общего центра  $C_0$  с угловой скоростью  $\omega$ .

VTR походка заменяет собой несколько видов перемещений шагающего робота - движение по прямой, поворот и движение вбок. При выполнении перемещения шагающим роботом с помощью VTR походки не требуется остановки для поворота.

Универсальным видом походки шагающего робота является свободная походка [6]. Для нее каждый шаг робота рассчитывается в реальном времени, исходя из критериев устойчивости и выбранных критериев оптимизации. Для расчета в реальном времени требуются большие вычислительные ресурсы. Кроме того, такая походка обычно является медленной.

### Сравнение походок шагающего робота

Выполним сравнение походок по критериям скорости, устойчивости, направлении перемещения и вычислительной сложности. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики походок

| Тип походки                 | максимальная скорость | устойчивость   | направление перемещения              | вычислительная сложность |
|-----------------------------|-----------------------|--|--------------------------------------|--------------------------|
| поочередный перенос ног     | низкая                | высокая при низкой скорости<br>низкая при высокой скорости | линейное, поворот с большим радиусом | низкая                   |
| Перенос двойками            | высокая               | низкая при низкой скорости<br>высокая при высокой скорости | линейное, поворот с большим радиусом | низкая                   |
| VTR с поочередным переносом | низкая                | высокая при низкой скорости<br>низкая при высокой скорости | любое                                | низкая                   |
| VTR походка двойками        | высокая               | низкая при низкой скорости<br>высокая при высокой скорости | любое                                | низкая                   |
| свободная походка           | низкая                | высокая  | любое                                | высокая                  |

Из табл. 1 хорошо заметно, что при наличии достаточной вычислительной мощности наиболее универсальной является свободная походка. У домашнего шагающего робота вычислительная мощность сильно ограничена массогабаритными и энергетическими характеристиками. Поэтому целесообразно в этом случае использовать два вида VTR походки – с поочередным

переносом ног и походку двойками. Такой подход позволяет при низких затратах вычислительной мощности обеспечить необходимую подвижность шагающего робота.

## Заключение

Выбор походки шагающего робота определяет набор возможных перемещений робота и его функциональность. Современные шагающие роботы используют различные виды походок – как статические, так и динамические.

Для небольшого домашнего робота целесообразно выбирать походки, обладающие с одной стороны универсальностью, с другой стороны низкой вычислительной сложностью. Таким критериям удовлетворяет класс походок с переменным радиусом поворота (VTR походки). Такие походки позволяют шагающему роботу перемещаться в любом направлении. Вследствие низкой вычислительной сложности, VTR походки могут быть реализованы с применением микроконтроллеров, что увеличивает автономность домашнего шагающего робота.

## Список литературы

1. Gonzalez-de-Santos, P., Garcia, E., Estremera, J. (2006). *Quadrupedal locomotion. An introduction to the control of four-legged robots*, 2006, Springer-Verlag, London. <https://doi.org/10.1007/1-84628-307-8>.
2. Matsuoka, K.: Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators. *J. Biol. Cybern.* 1987, 56, 345–353.
3. HyoungKwon, K., Daehee, W., Ohung, K., Tae-Ju, K., Sang-Seok, K., Sang-deok, P. Foot Trajectory Generation of Hydraulic Quadruped Robots on Uneven Terrain, *IFAC Proceedings Volumes, Volume 41, Issue 2, 2008*, pp. 3021-3026. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00511>.
4. Omer, K., Kemalettin, E. Bound Gait Reference Generation of a Quadruped Robot via Contact Force Planning. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 129-137, March 2022. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.3.129-137>
5. McGhee, R.B., Frank, A.A. On the stability properties of quadruped creeping gaits. *J. Math. Biosci.* 1968, 3, 331–351.
6. Estremera, J., Gonzalez de Santos P.: Free Gaits for Quadruped Robots over Irregular Terrain. *The International Journal of Robotics Research.* 2002;21(2):115-130. <https://doi.org/10.1177/027836402760475333>
7. Yecheng, S., Yongbin, J., Xianwei, L., Weiyan, H., Hongtao, W., Wei, Y.: Learning free gait transition for quadruped robots via phase-guided controller. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, vol. 7, pp. 1230-1237. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.00206>
8. Dobrynin, D. (2023). Movement Along the Trajectory of a Home Quadruped Robot. In: Ronzhin, A., Sadigov, A., Meshcheryakov, R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2023. Lecture Notes in Computer Science*, vol 14214. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_12)

**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, РГГУ, г. Москва, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ЭМОЦИОНАЛЬНОСТИ РОБОТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА ШКОЛЬНИКАМИ**

*Аннотация:* В работе представлен эксперимент, в котором школьники (N=43, средний возраст 15,6 лет) в течение 5 недель изучали лексику английского языка с компьютером, а также с роботами-компаньонами, работающими в двух режимах: эмоциональном и нейтральном. В результате не было обнаружено статистически значимого различия в объективных показателях обучения между группами, использовавшими компьютер, эмоционального или нейтрального робота. Однако эмоциональный робот был более успешен в поддержании интереса и позитивной вовлеченности школьников в учебную среду. Полученные результаты указывают на то, что эмоциональность робота способствует формированию устойчивого позитивного отношения, в то время как оценки нейтрального робота со временем снижаются.

*Ключевые слова:* робот-компаньон, невербальная коммуникация, человеко-машинное взаимодействие, обучение, социальный взгляд, контакт глаз

**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

## **THE INFLUENCE OF ROBOT EMOTIONALITY ON THE EFFECTIVENESS OF ENGLISH LANGUAGE LEARNING BY SCHOOLCHILDREN**

*Abstract:* The paper presents an experiment in which schoolchildren (N=43, average age 15.6 years) spent 5 weeks learning English vocabulary with a computer and with companion robots functioning in two modes: emotional and neutral. As a result, no statistically significant difference in objective measures of learning was found between the groups using the computer, emotional or neutral robot. However, the emotional robot was more successful in maintaining students' interest and positive engagement in the

learning environment. The results suggest that the emotionality of the robot facilitates the development of sustained positive attitudes, compared to the neutral robot's decreasing scores over time.

*Key words:* Companion robot, nonverbal communication, human-machine interaction, learning, social gaze; eye contact

Владение иностранным языком является важной компетенцией для современных студентов. Развитие образовательных технологий, таких как роботы-компаньоны, способствует интерактивному и игровому обучению языку [1]. Исследования показывают, что роботы являются эффективными инструментами для изучения языка [2–4], они способны улучшить образовательный процесс, обеспечивают бóльшую вовлеченность, мотивацию и любопытство. Исследования, посвященные изучению иностранного языка с роботами, формируют новую и достаточно обширную исследовательскую область – robot-assisted language learning (RALL) [5]. Именно в рамках данной области мы и провели экспериментальное исследование с участием робота-компаньона. В нашем первом эксперименте [6] мы оценивали привлекательность робота в ситуации изучения иностранного языка. Было показано, что обучение с помощью робота показало такую же эффективность, как и обучение с помощью компьютера при единичном взаимодействии. Мы также выявили, что студенты считали робота перспективным помощником в обучении, подчеркивали комфортность взаимодействия с ним, демонстрировали богатую мимику во взаимодействии [7].

В данном исследовании мы предположили, что поведение робота может влиять на успешность обучения иностранному языку. Мы также оценили обучение на относительно длительном интервале взаимодействия, чтобы снизить эффект новизны для учеников. Исследование было проведено с использованием робота Ф-2 – исследовательской платформы для изучения взаимодействия робота и человека в различных ситуациях. В соответствии с идеей о том, что внешний вид робота должен быть простым и нейтральным [8,9], робот Ф-2 спроектирован как простая аппаратная платформа: он состоит из шести исполнительных механизмов и экрана для отображения лица [10].

В рамках эксперимента ученики московской школы на протяжении 5 недель учили лексику английского языка в одной из трех групп – мы использовали межсубъектный экспериментальный план. Первая группа учила лексику только с компьютером. Робот был полностью удален из экспериментальной установки и не был виден участникам. Вторая группа – учила слова с роботом, поведение которого было эмоциональным (em\_robot), и третья группа – с роботом, демонстрирующим только формальные сигналы

общения – нейтральное поведение (*neut\_robot*). Для моделирования эмоционального и нейтрального поведения робота, мы использовали мультимодальный корпус REC [11]. Ранее мы показали, что сочетание эмоциональности в жестах и речи позитивно воспринимается испытуемыми [12]. Таким образом, поведение эмоционального робота было богато жестами, оно включало улыбку, открытые и направленные жесты. Кроме того, эмоциональный робот использовал эмоциональный язык и стратегии вежливости в речи [13], например, говорил *ой, здесь ошибка*. Поведение и речь нейтрального робота были сдержанными, он говорил только *правильно* или *неправильно* (рис. 2).

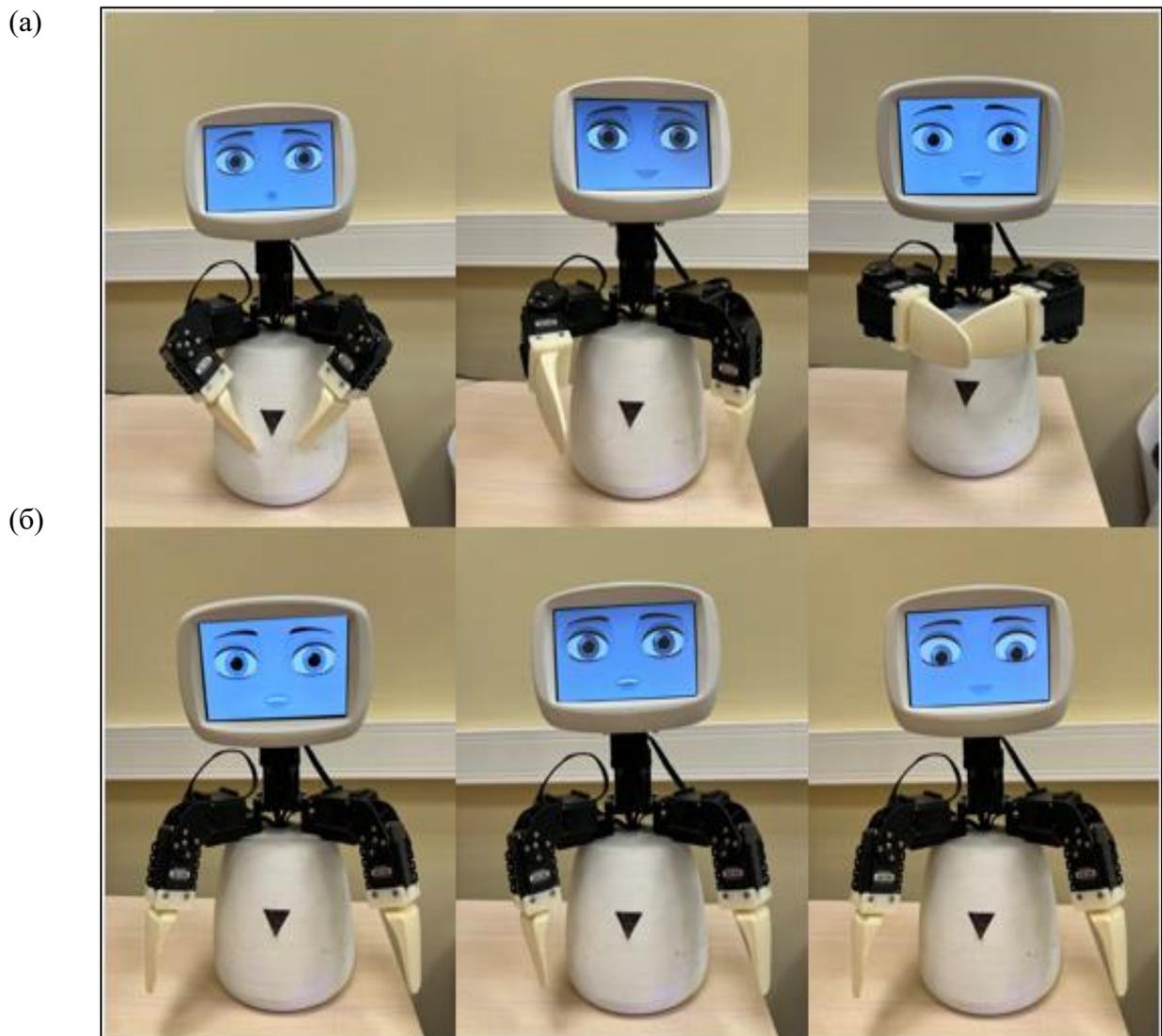


Рис. 2. Различия в поведении (а) эмоционального и (б) нейтрального роботов

Процедура эксперимента во всех условиях была одинаковой: каждый ученик в течение всего эксперимента изучал 60 сложных английских слов, которые были разделены на четыре темы, по 15 слов в каждой. В ходе эксперимента участники взаимодействовали с роботом и/или экраном

компьютера, но от них ожидалось только устные ответы – им не требовалось взаимодействия с традиционными устройствами ввода: клавиатурой, мышью или сенсорным экраном.

Учебная сессия на первой неделе состояла из двух фаз: фазы введения и фазы обучения. На 2-4-й неделях в начале учебной сессии школьник сначала повторял все слова предыдущих недель, затем проходил фазу введения и фазу обучения для слов текущей недели. На 5-й неделе студенты прошли только фазу повторения. На 6-й неделе экспериментатор проверял запомненные испытуемыми слова.

Контроль «правильных» ответов участников экспериментов осуществлялся с помощью парадигмы Wizard of Oz [14]. Контролирующий экспериментатор являлся специалистом в области преподавания английского языка и не менялся в ходе эксперимента. В эксперименте мы использовали ассоциативный метод запоминания подсказок, который применим к изучению иностранных языков [15–17]. В рамках этого метода, робот или компьютер сначала знакомил участников с английскими словами, сопровождая их фонетическими подсказками, а затем – использовали эти подсказки в качестве промежуточного звена при изучении слов.

Испытуемыми были учащиеся 8-10 классов (возраст 14-17 лет) предуниверситетской школы МГЛУ («Предуниверсарий»). Все школьники получили информированное согласие от своих родителей для участия в эксперименте. Участники эксперимента были случайным образом разделены на три группы. Первая группа изучала лексику иностранного языка с помощью экранного интерфейса (**screen**) (N = 11, средний возраст 15,5 лет). Вторая группа изучала лексику с эмоциональным роботом (**em\_robot**) (N = 14, средний возраст 15,9) и третья группа - с нейтральным роботом (**neut\_robot**) (N = 14, средний возраст 15,8). В течение 5 недель эксперимента 17 школьников были исключены по причине пропуска одной из недель.

Анализ полученных результатов позволяет получить представление о том, как различные средства обучения – эмоциональный робот, нейтральный робот и персональный компьютер – влияют на запоминание слов и субъективный опыт обучения. Данные, собранные в течение пятинедельного периода исследования, включают в себя показатели участников на повторных этапах сессии обучения: каждое предложенное слово участник мог перевести самостоятельно (**total right**), после подсказки (**total with help**) или не перевести вообще (**total wrong**).

**Эффективность изучения слов.** После анализа ответов школьников не было обнаружено различия между эффективностью изучения слов в экспериментальных условиях. Среднее количество всех правильных ответов в условии **screen** составляет 5,3 (SD 4,2), для **neut\_robot** - 6,3 (SD 4,7), в **em\_robot** - 5,2 (SD 4,5). В каждом из трех условий количество правильных ответов увеличивается с каждой неделей, но также увеличивается количество

ассистированных и неправильных ответов. Группы не демонстрируют статистически значимых различий в прогрессе запоминания.

**Эмоциональные оценки роботов.** После каждого взаимодействия мы просили испытуемых оценить робота, используя шкалы семантического дифференциала. Испытуемые оценивали только робота из своего условия: эмоциональный робот (em\_robot) и нейтральный робот (neut\_robot). Так, в условии em\_robot участники, действительно, оценили робота как более **эмоционального** – различия по этому параметру статистически значимы (U-тест Манна-Уитни,  $p = 0,03$ ). Роботу с эмоциональным поведением приписали такие характеристики, как **дружелюбие, искренность и надежность** (рис. 3).

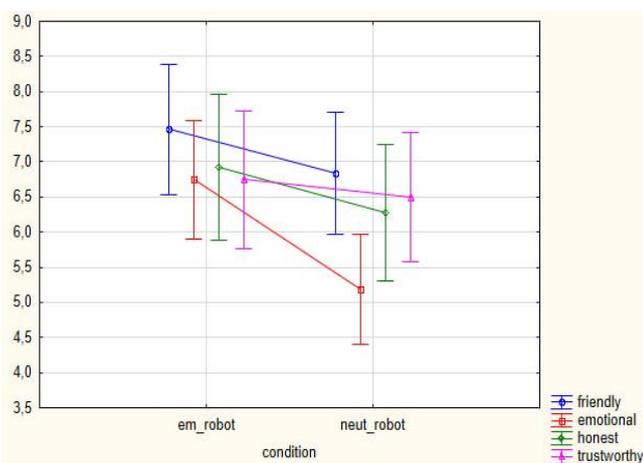


Рис. 3. Сравнение эмоционального и нейтрального робота по шкалам семантического дифференциала

Еще одним важным результатом стала оценка изменений приписываемых роботу характеристик со временем. Так школьники, взаимодействовавшие с нейтральным роботом, демонстрируют значимое снижение оценок со временем, в то время как эмоциональный робот сохраняет оценки со временем. Например, на рис. 4. представлено изменение в оценке *дружелюбия* робота в течение эксперимента.

Таким образом, полученные результаты показывают, что использование робота-компаньона для изучения школьниками английской лексики не оказывает существенного влияния на объективные результаты обучения: количество выученных слов. Это также подтверждает, что использование робота-компаньона по эффективности соответствует современным экранному обучающим программным средствам. Отсутствие различий может быть связано с общим интересом студентов к эксперименту, независимо от конкретного метода обучения. Если школьники мотивированы, они будут учиться эффективно, независимо от предлагаемых средств. Их внутренняя мотивация может преобладать над внешней мотивацией, такой как эмоциональная поддержка робота.

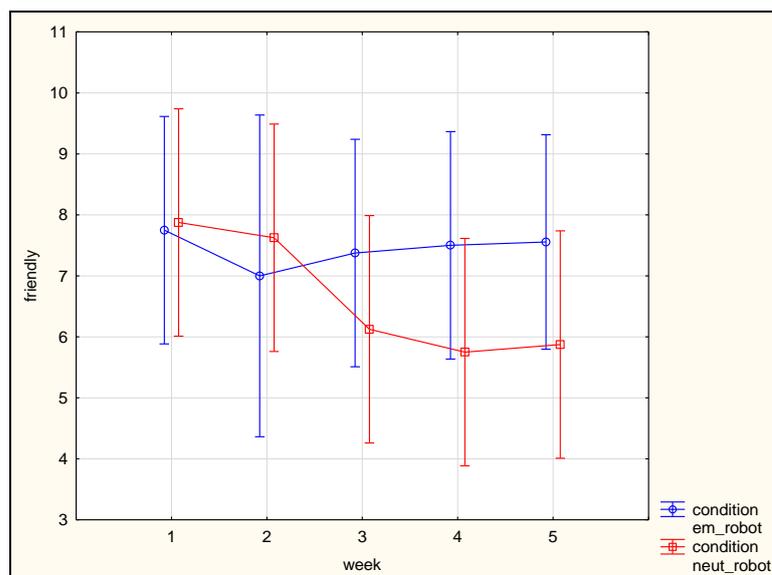


Рис. 4. Динамика оценок по шкале *дружелюбие* у эмоционального и нейтрального робота

Наиболее важным результатом нашего исследования является то, что **эмоциональный робот значительно успешнее поддерживает интерес и вовлеченность учащихся**, чем нейтральный робот и компьютерный интерфейс. Эмоциональный робот, демонстрируя различные эмоциональные реакции с помощью жестов и речи, создает более интерактивное и личностное взаимодействие. Эмоциональное поведение робота способствует установлению эмоциональной связи между учеником и роботом, что, в свою очередь, поддерживает интерес к учебному материалу, что может улучшить успеваемость в долгосрочной перспективе. Кроме того, робот, меняющий эмоциональное поведение, делает процесс обучения более разнообразным и менее предсказуемым, что предотвращает скуку ученика.

Поскольку учащиеся средних и старших классов в процессе обучения сталкиваются с большим объемом информации и сложными задачами, способность поддерживать интерес и высокую вовлеченность может быть важным критерием успешной программы обучения.

Успех в поддержании долгосрочного интереса и положительной вовлеченности студентов можно рассматривать как показатель более успешного обучения на более длительных интервалах (дольше, чем один месяц). Безусловно, необходимы дальнейшие исследования этого предположения, а также более детальная разработка конкретных методов поддержания интереса и вовлеченности учащихся, и, как следствие, повышение эффективности обучения иностранным языкам с помощью робота на протяжении длительных интервалов взаимодействия.

1. Gordon G., Breazeal C., Engel S. Can Children Catch Curiosity from a Social Robot? // 2015 10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). 2015. P. 91–98.
2. Alemi M., Meghdari A., Ghazisaedy M. Employing humanoid robots for teaching English language in Iranian junior high-schools // International Journal of Humanoid Robotics. World Scientific, 2014. Vol. 11, № 03. P. 1450022.
3. Sidner C.L. et al. Where to look: a study of human-robot engagement // Proceedings of the 9th international conference on Intelligent user interfaces. 2004. P. 78–84.
4. Wainer J. et al. The role of physical embodiment in human-robot interaction // ROMAN 2006 - The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. 2006. P. 117–122.
5. Randall N. A survey of robot-assisted language learning (RALL) // ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI). ACM New York, NY, USA, 2019. Vol. 9, № 1. P. 1–36.
6. Zinina A., Kotov A., Arinkin N., Zaidelman L. Learning a foreign language vocabulary with a companion robot // Cognitive Systems Research. 2022. Vol. 77. P. 110–114.
7. Зинина А.А., Котов А.А. Невербальное поведение человека при взаимодействии с роботом Ф-2 // Робототехника и искусственный интеллект. Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 2023. С. 189–194.
8. Kidd C.D., Breazeal C. Effect of a robot on user perceptions // 2004 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566). 2004. Vol. 4. P. 3559–3564.
9. Kory J., Breazeal C. Storytelling with robots: Learning companions for pre-school children’s language development // The 23rd IEEE international symposium on robot and human interactive communication. 2014. P. 643–648.
10. Kotov A., Zinina A., Zaidelman L., Arinkin N. F-2 Robot Toolkit: Model for Speech Comprehension and Communicative Behavior // 2019 8th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction Workshops and Demos, ACIIW 2019. 2019.
11. Kotov A., Budyanskaya E. The Russian Emotional Corpus: Communication in Natural Emotional Situations // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. Вып. 11 (18). Т. 1. М.: РГГУ, 2012. P. 296–306.
12. Zinina A., Zaidelman L., Kotov A., Arinkin N. The perception of robot’s emotional gestures and speech by children solving a spatial puzzle // Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Proceedings of the International Conference Dialogue. 2020. Vol. 19. P. 811–826
13. Malkina M. Arinkin N., Zinina A., Kotov, A. Multimodal Hedges for Companion Robots: A Politeness Strategy or an Emotional Expression? // Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Proceedings of the International Conference Dialogue. 2023. № 22. P. 319–326.

14. Kelley J.F. An iterative design methodology for user-friendly natural language office information applications // ACM Trans Inf Syst. 2002.
15. Lorayne H., Lucas J. The memory book: The classic guide to improving your memory at work, at school, and at play. Ballantine Books, 2012.
16. Abbassi A., Hassaskhah J., Tahriri A. The Effect of Teaching Memory Strategies on Iranian EFL Learner's Vocabulary Retention in Terms of learners' Multiple Intelligences // International Journal of Education and Literacy Studies. 2018. Vol. 6. P. 1.
17. Zhang M. An Empirical Study of Applying Associative Method in College English Vocabulary Learning // English Language Teaching. 2014. Vol. 7.

С.А. Которженко, магистрант, skotorzhenko@mail.ru  
М.А. Мутовин, магистрант, mutovinm@bk.ru  
А.В. Чубарь, к.т.н., доцент, Achubar@sfu-kras.ru  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

## СИСТЕМА ТЕПЛО-ВОДОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОМЕЩЕНИЯ В КОНЦЕПЦИИ УМНОГО ДОМА

*Аннотация:* Статья посвящена автоматизированной системе управления отоплением и водоснабжением в концепции умного дома. Рассматривается двухконтурная система отопления с использованием твердотопливного котла и стальных радиаторов, а также модели, созданные в среде SimInTech для управления тепловыми процессами. Приведены особенности функциональных субмоделей, оптимизирующих энергозатраты и обеспечивающих комфортное и безопасное использование системы.

*Ключевые слова:* Умный дом, автоматизация, отопление, водоснабжение, SimInTech, энергосбережение

S.A. Kotorzhenko, magister, skotorzhenko@mail.ru  
M.A. Mutovin, magister, mutovinm@bk.ru  
A.V. Chubar, Cand.Sc., associate professor, Achubar@sfu-kras.ru  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## THE HEAT AND WATER SUPPLY SYSTEM OF AN AUTONOMOUS ROOM IN THE CONCEPT OF A SMART HOME

*Abstract:* The article focuses on an automated heating and water supply control system within the smart home concept. It describes a dual-circuit heating system using a solid-fuel boiler and steel radiators, along with models developed in the SimInTech environment for thermal process control. Features of functional submodels optimizing energy consumption and ensuring comfortable and safe system operation are presented.

*Key words:* Smart home, automation, heating, water supply, SimInTech, energy efficiency

Современные технологии автоматизации существенно улучшают качество жизни, делая её комфортнее и эффективнее. Одной из таких технологий является концепция умного дома, которая предполагает использование си-

стемы, управляющей инженерными коммуникациями и отдельными устройствами дистанционно.

Для автономного одноэтажного дома с цокольным этажом рекомендуется двухконтурная система водяного отопления с нижней разводкой, принудительной циркуляцией теплоносителя и двухтрубным подключением радиаторов. В качестве источника тепла подойдет твердотопливный котел на пеллетах, а отопительными приборами лучше выбрать стальные панельные радиаторы, которые отличаются компактностью, эстетичным видом, эффективностью и доступной ценой.

Система тепло-водоснабжения дома включает два контура: потребления и отопления.

- Контур потребления состоит из скважинного насоса, накопительного бака, бойлера косвенного нагрева, насоса для поддержания давления и системы подачи воды.

- Контур отопления включает котел, циркуляционные насосы и системы распределения тепла через радиаторы и теплые полы.

Для моделирования работы системы в среде SimInTech разработана модель, позволяющая:

- настраивать параметры работы системы;
- моделировать наполнение бака, нагрев воды и смешение разных температур;
- управлять тепловыми процессами через математические модели.

Исходные данные для модели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для модели

| Описание   | Обозначение      | Значение              |
|--|------------------|-----------------------|
| Масса воздуха в помещении, кг                      | $m_{room}$       | 1470                  |
| Теплоемкость воздуха, Дж/(кг*К)                    | $c_{air}$        | 1005,4                |
| Теплопроводность материала стен, Дж/(м*ч*К)        | $k_{wall}$       | 136,8                 |
| Теплопроводность материала окон, Дж/(м*ч*К)        | $k_{window}$     | 2802                  |
| Площадь стен, м <sup>2</sup>                       | $A_{wall}$       | 914                   |
| Площадь окон, м <sup>2</sup>                       | $A_{window}$     | 6                     |
| Толщина стен, м                                    | $D_{wall}$       | 0,2                   |
| Толщина окон, м                                    | $D_{window}$     | 0,01                  |
| Постоянный расход воздуха, кг/ч                    | $M_{heater-air}$ | 3600                  |
| Температура в помещении, °С                        | $T_{room}$       | –                     |
| Температура окружающей среды, °С                   | $T_{outside}$    | –                     |
| Температура теплоносителя, °С                      | $T_{heater}$     | –                     |
| Термическое сопротивление стен, (ч*К)/Дж           | $R_{wall}$       | $1,599 \cdot 10^{-6}$ |
| Термическое сопротивление окон, (ч*К)/Дж           | $R_{window}$     | $5,935 \cdot 10^{-7}$ |
| Эквивалентное термическое сопротивление, Дж/ (ч*К) | $R_{equivalent}$ | $4,329 \cdot 10^{-7}$ |

Для удобства работы с системой было принято решение разделить ее на несколько функциональных субмоделей, взаимосвязанных с помощью списка сигналов. Условная схема связи между блоками системы представлена на рисунке 1.

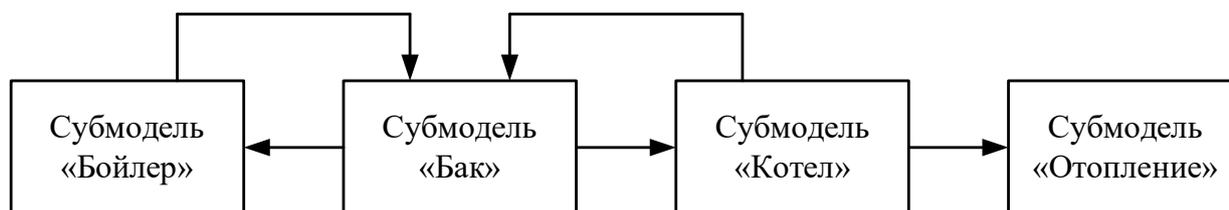


Рис. 1. Условная схема связи субмоделей

Субмодель «Бак» является ключевым элементом системы, поскольку обеспечивает её стабильную работу. При недостаточном уровне воды все элементы системы автоматически отключаются. Скважинный насос останавливается при заполнении бака и включается снова, если уровень воды снижается до установленного значения. Это решение увеличивает срок службы насоса, избегая его постоянной работы.

Субмодель «Бойлер» обеспечивает подачу горячей воды. Он нагревает воду до заданной температуры и поддерживает её в установленном диапазоне. При поступлении холодной воды из бака в процессе потребления бойлер моделирует смещение, учитывая снижение температуры.

Субмодель «Котел» отвечает за нагрев теплоносителя для системы отопления. Он включается, если температура окружающей среды ниже заданной температуры в помещении, и отключается при отсутствии топлива в бункере. Мощность нагрева котла определяется видом угля и размером его фракции. Запуск котла обеспечивается только при полном заполнении системы теплоносителем, предотвращая перегрев. Вентилятор регулирует температуру котла в заданных пределах.

Субмодель «Отопление» управляет температурой в помещении в зависимости от внешних условий. Котел отключается при включении режима охлаждения, если температура в помещении выше температуры воздуха.

Анимационное окно «Настройки системы» (рисунок 2) позволяет задавать и изменять параметры работы системы, такие как мощности насосов, уровень воды в баке, температура воды и воздуха. Эти параметры являются основными и влияют на работу всей системы.

Окно анимации «Пульт управления» (рисунок 3) позволяет имитировать потребление холодной и горячей воды, устанавливать желаемую температуру воздуха в помещении, устанавливать желаемую температуру нагрева воды в бойлере, а также имитировать заполнение бункера углем. Помимо этого, от выбора пользователем вида и размера фракции угля зависит теплоотдача угля, которая влияет на скорость нагрева котла и теплоносителя контура отопления.

|                                    |                              |                                  |                                       |
|------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| <input type="text" value="500"/>   | Объем бака                   | <input type="text" value="3"/>   | Мощность скважинного насоса           |
| <input type="text" value="200"/>   | Объем бойлера                | <input type="text" value="2"/>   | Мощность насоса контура водоснабжения |
| <input type="text" value="100"/>   | Объем отопительного контура  | <input type="text" value="200"/> | Уровень поплавка в баке               |
| <input type="text" value="40000"/> | Вместимость бункера для угля | <input type="text" value="10"/>  | Температура воды в баке               |
|                                    |                              | <input type="text" value="-20"/> | Температура воздуха окружающей среды  |

Рис. 2. Окно анимации «Настройки системы»

Желаемая температура воздуха в помещении

Напор воды

ВКЛЮЧИТЬ ХОЛОДНУЮ ВОДУ

ВКЛЮЧИТЬ ГОРЯЧУЮ ВОДУ

Необходимая температура горячей воды

Нагрев воды в бойлере за счет теплоносителя  
 Нагрев воды в бойлере за счет теплоэнергонагревателя

Вид угля

- Бурый
- Каменный
- Газовый
- Актрацит

Размер фракции угля

- Плитный
- Крупный
- Орех
- Мелкий
- Семечка

Загрузить уголь в котел

Рис. 3. Окно анимации «Пульт управления»

Окно анимации «Функционирование системы» (рисунок 4) предоставляет пользователю возможность контролировать работу отдельных элементов системы, а именно отслеживать уровень заполнения бака, резервуара бойлера и контура отопления, температуру горячей воды, нагреваемой в бойлере, температуру воздуха в помещении и влияющую на нее температуру окружающей среды. Также имеется сигнализация об утечке, загорающаяся

красным цветом при включении холодной или горячей воды, информация о работе котла (зеленая – котле включен, красная – котел выключен), способе нагрева воды резервуаре бойлера и количестве угля в бункере.

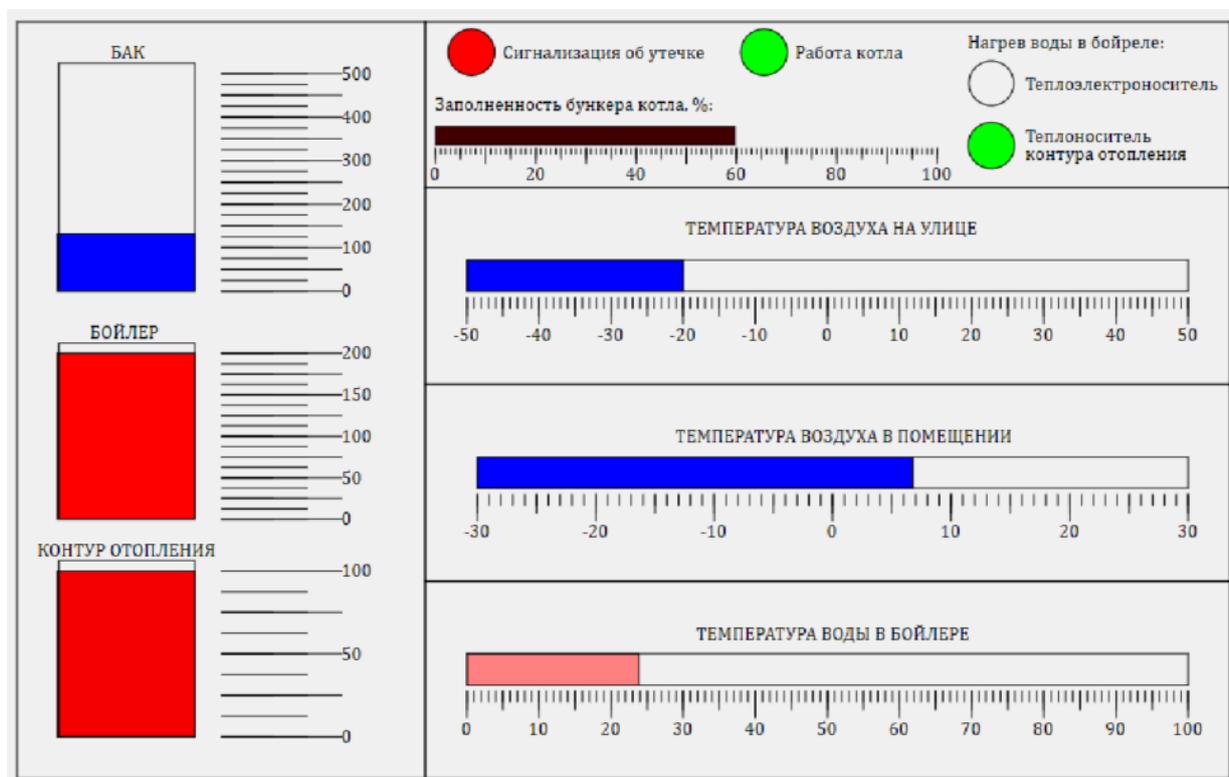


Рис.4. Модель бака

Автоматизированная система управления отоплением и водоснабжением снижает энергозатраты за счет оптимизации работы оборудования и точного контроля параметров. Система умного дома поддерживает комфорт, автоматически регулируя микроклимат и реагируя на внешние изменения и потребности жильцов. Автоматизация повышает безопасность, обеспечивая мониторинг состояния системы, быстрое устранение неисправностей и минимизацию влияния человеческого фактора.

## Список литературы

1. Домашняя автоматизация // Википедия – Свободная энциклопедия – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Домашняя\\_автоматизация](https://ru.wikipedia.org/wiki/Домашняя_автоматизация) (дата обращения: 12.05.2024).
2. Гордюшина, О.С. Концепция умного дома // О.С. Гордюшина, О.А. Кувшинова // Форум молодых ученых. Международный научно-практический журнал. – 2019. – №2. – С.540-545.
3. Главные плюсы и минусы Умного дома - все достоинства и недостатки // Компания цифровизации инженерных систем «Амперика»: официальный сайт. –

Москва, 2022. – URL: <https://amperika.com/plyusy-i-minusy-umnogo-doma/> (дата обращения: 18.05.2024).

4. Назарова В.И. Современные системы отопления / В.И. Назарова; Энциклопедия строительства. – М.: РИПОЛ классик, 2011. – 320 с. – ISBN 978-5-386-02873-2.

5. Виды котлов отопления для частного дома: особенности конструкции, плюсы и минусы // Аргументы и факты: [сайт]. – URL: <https://aif.ru/boostbook/kotly-otoplenija.html> (дата обращения: 17.05.2024).

6. Справочная система SimInTech // Официальный сайт SimInTech: [сайт]. – URL: [https://help.simintech.ru/#o\\_simintech/o\\_simintech.html](https://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html) (дата обращения: 04.06.2024).

**М.А. Мутовин**, магистрант, mutovinm@bk.ru  
**Д.А. Самохов**, магистрант, samohov2003@mail.ru  
**А.В. Чубарь**, к.т.н., доцент, Achubar@sfu-kras.ru  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

## ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ SIMINTECH

*Аннотация:* Статья посвящена разработке систем управления промышленными роботами-манипуляторами с применением современных информационных технологий. В работе обоснована актуальность темы, а также представлен процесс моделирования в среде SimInTech. Описаны ключевые разработанные подсистемы, включая кинематику, динамику, визуализацию и систему управления. В завершении подведены итоги исследования и даны выводы о достигнутых результатах.

*Ключевые слова:* Моделирование, simintech, манипулятор, кинематика, система управления, промышленный робот-манипулятор, 3d-визуализация

**M.A. Mutovin**, magister, mutovinm@bk.ru  
**D.A. Samohov**, magister, samohov2003@mail.ru  
**A.V. Chubar**, Cand.Sc., associate professor, Achubar@sfu-kras.ru  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## CONSTRUCTION OF AN INDUSTRIAL ROBOT CONTROL SYSTEM IN THE ENVIRONMENT OF DYNAMIC MODELING OF SIMINTECH TECHNICAL SYSTEMS

*Abstract:* The article is devoted to the development of control systems for industrial robotic manipulators using modern information technologies. The paper substantiates the relevance of the topic and presents the modeling process in the SimInTech environment. The key developed subsystems are described, including kinematics, dynamics, visualization and control system. In conclusion, the results of the study are summarized and conclusions are given on the results achieved.

*Key words:* Modeling, simintech, manipulator, kinematics, control system, industrial robot manipulator, 3d visualization

Рост автоматизации промышленных процессов делает актуальным создание эффективных систем управления роботами с учетом их специфики. Решение этой задачи возможно благодаря применению современных инфор-

мационных технологий, обеспечивающих оптимизацию работы роботов в производственной среде.

Промышленные роботы выполняют широкий спектр задач, включая сварку, резку, упаковку и окраску, адаптируясь к различным производственным операциям. Они состоят из управляющей системы и исполнительной, включающей манипулятор и, при необходимости, систему передвижения. Конструкция робота определяется его назначением, например, стационарные модели не требуют системы передвижения.

Рассматривается возможность разработки такой системы с использованием среды SimInTech, предназначенной для моделирования, анализа и автоматической генерации управляющего кода. Благодаря широким функциональным возможностям, включая решение уравнений и блочное программирование, SimInTech обеспечивает достаточный потенциал для реализации таких систем.

На рисунке 1 представлены схема звеньев и сочленений манипулятора (а) и кинематическая схема (б).

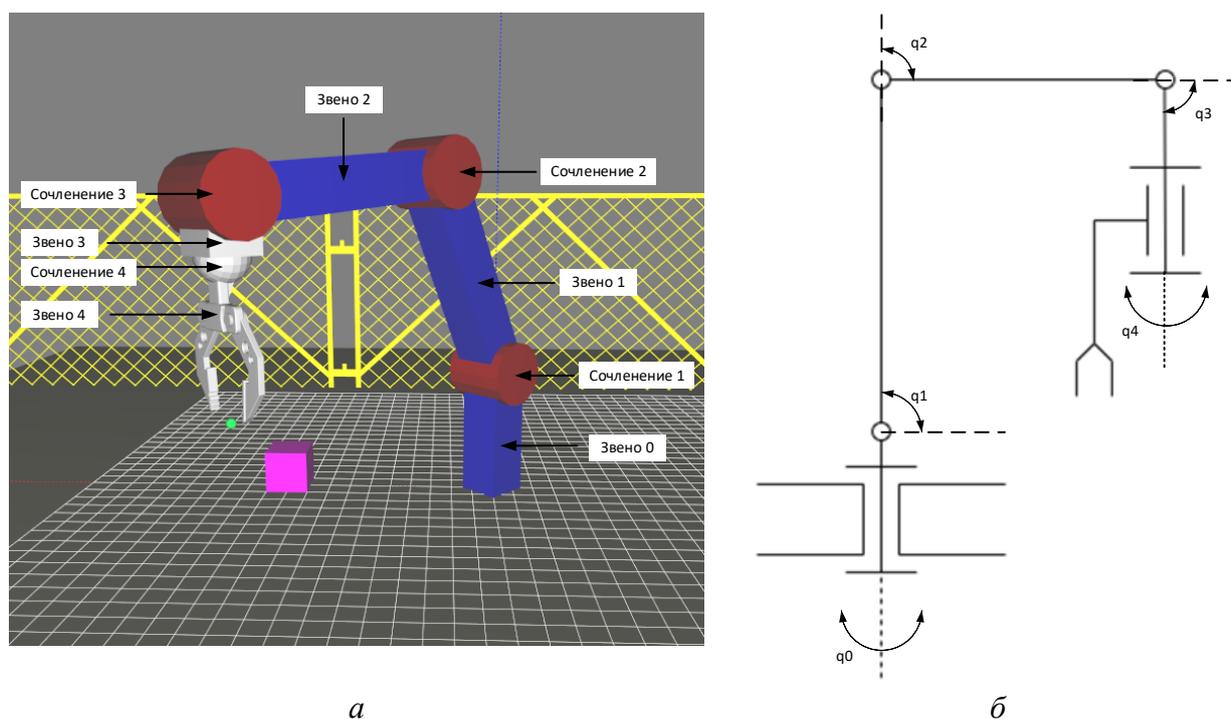


Рис. 1. Схемы звеньев и сочленений (а) и кинематическая (б) робота манипулятора

Из рисунка 1 видно, что данный манипулятор имеет 4 пары звено-шарнир, а следовательно, 4 степени свободы. Такие манипуляторы предназначены для перемещения грузов на горизонтальной поверхности в соответствии с программой или действиями оператора, широко применяются в промышленности для автоматического складирования продукции. Их рабочий орган перемещается вдоль осей X, Y, Z, но для задач перемещения грузов оптимально ориентирован перпендикулярно полу. Конструкция манипулятора

спроектирована с минимально необходимыми четырьмя степенями свободы, что обеспечивает эффективность выполнения задач без избыточной функциональности. Модель является типовой и предназначена для анализа манипуляторов данного типа с различной длиной звеньев. По способу управления модель робота-манипулятора относится к категории жёсткопрограммируемых устройств.

На рисунке 2 представлено главное окно проекта.

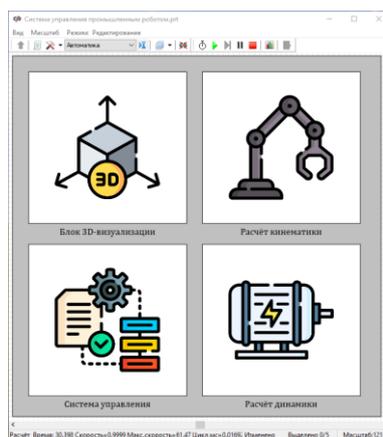


Рис. 2. Главное окно проекта

Краткое описание блоков субмоделей:

- блок 3D-визуализации – в субмодели содержатся блоки типа «Про-смотрщик», которые позволяют создать и открыть окно 3D-визуализации, и «Объект», которые дают возможность добавлять 3D-объекты в виртуальное пространство. Эта субмодель отвечает за отображение поведения робота-манипулятора в пространстве, позволяя пользователю видеть движения в реальном времени;

- блок «Расчёт кинематики» – осуществляет расчёт прямой и обратной кинематики для определения углов поворота сочленений робота-манипулятора в зависимости от требуемого положения рабочего органа;

- блок «Система управления» – содержит алгоритмы управления моделью робота-манипулятора. Представлено три режима управления: управление углом поворота приводов, управление положением и поворотом рабочего органа, и автоматическое управление по заранее заданной программе;

- блок «Расчёт динамики» – содержит в себе математическую модель электродвигателя вместе с редуктором, используемого для каждого из поворотных механизмов манипулятора. Пропорционально интегрально дифференцирующий (ПИД) регулятор для поддержания заданного угла поворота. Также блок содержит оптимизацию коэффициентов ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса и параметрическую оптимизацию с использованием встроенного блока «Оптимизатор».

На рисунке 3 представлен менеджер данных проекта.

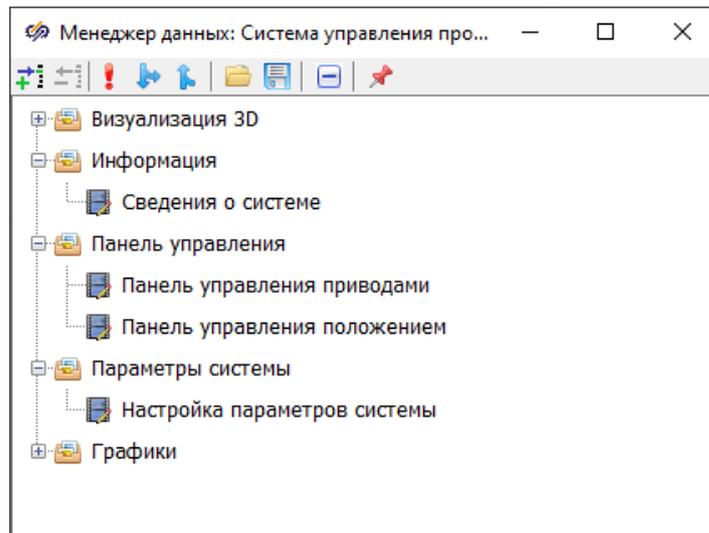


Рис. 3. Менеджер данных проекта

Менеджер данных содержит в себе следующие разделы:

- «Сведения о системе» – этот раздел содержит окно анимации «Сведения о системе», которое отображает все контролируемые параметры системы, изменяющиеся в процессе выполнения программы;

- «Панель управления» – включает в себя панели управления для различных режимов работы робота-манипулятора. Здесь находятся панель управления приводами для ручного управления углами поворота исполнительных механизмов и панель управления положением для ручного управления положением рабочего органа;

- «Параметры системы» – раздел, в котором расположено окно «Настройка параметров системы». Перед запуском модели на расчёт здесь можно поменять параметры системы, такие как длина звеньев, положение локальной системы координат (ЛСК) манипулятора и другие.

Построенная в SimInTech система управления сочетает в себе автоматическое, автоматизированное и ручное управление. При этом по типу алгоритма автоматического управления является программной, по типу движения дискретно цикловой. Управляемой переменной является положение (позиция).

Приведём пример работы системы управления. Согласно заданной управляющей программе, робот-манипулятор поочередно перемещает объекты в пределах рабочего пространства как это показано на рисунке 4. Управляющая программа представляет собой файл формата «\*.csv» определённой структуры столбцов.

Текстовый файл должен состоять из 5 столбцов, где:

- первый столбец – координата по X;
- второй столбец – координата по Y;
- третий столбец – координата по Z;
- четвёртый столбец – поворот рабочего органа в градусах;

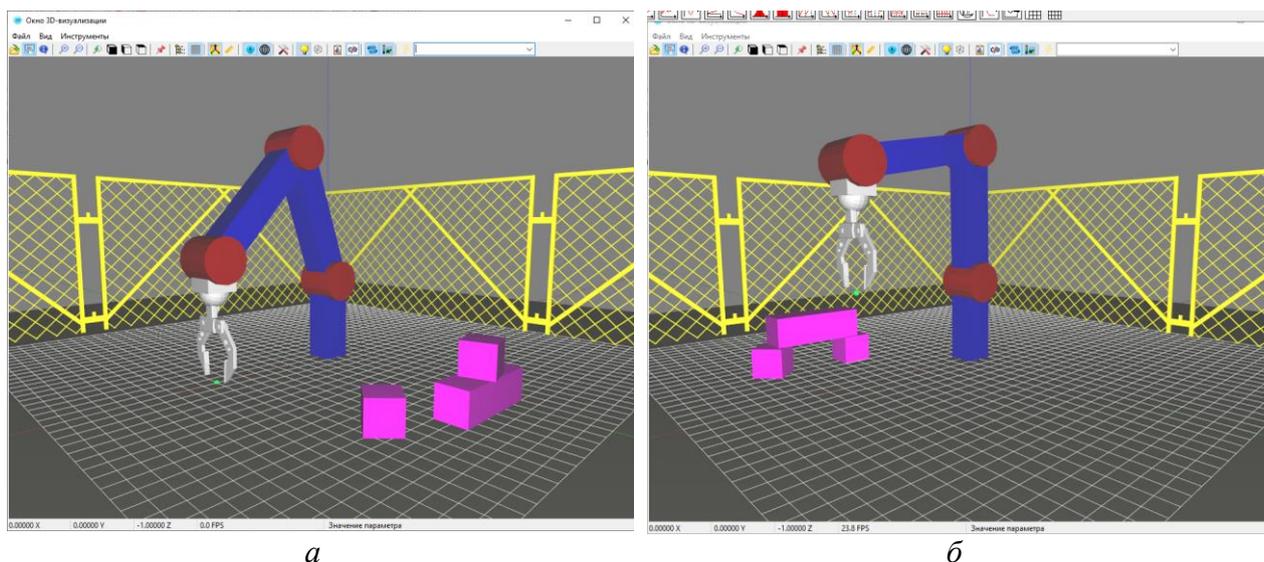


Рис. 4. Положение перемещаемых объектов до (а) и после (б) запуска управляющей программы в автоматическом режиме

- пятый столбец – статус рабочего органа (0 – открыт, 1 - захват).

В ходе выполнения работы разработана система управления промышленным роботом с учетом общих требований к системам управления и визуализации. Для этого были изучены принципы работы роботов-манипуляторов, проведен обзор современных методов управления и систем моделирования, а также реализована модель робота с базовыми алгоритмами управления. Разработанная система демонстрирует возможности моделирования работы робота-манипулятора в различных режимах и обеспечивает визуализацию его поведения. Представленная система может служить основой для дальнейшего анализа и совершенствования управления промышленными роботами данного типа.

## Список литературы

1. Разработка управляющих программ промышленных роботов: курс лекций / А.С. Климчик, Р.И. Гомолицкий, Ф.В. Фурман, К.И. Сёмкин. – Минск, 2008. – 131 с.
2. Юревич Е.И. Основы робототехники: учеб. пособие. – 3-е изд., пере-раб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 368 с. ISBN 978-5-94157-942-6.
3. Справочная информация SimInTech: сайт / SimInTech. – URL: [https://help.simintech.ru/#o\\_simintech/browsers.html](https://help.simintech.ru/#o_simintech/browsers.html) (дата обращения: 11.05.2024).
4. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с, ил. ISBN 5-03-000805-5.
5. Автоматизация обратной задачи кинематики двухзвенного манипулятора / К.С. Луговской, П.И. Казанин // Журнал «Теория и практика современной науки» – 2016. – №8(14) – С.257–264.

6. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера-Никольса: Методические указания к выполнению лабораторной работы / О.С. Вадутов. Издательство Томского политехнического университета, 2014 – 131 с.

7. Программирование в SimInTech: метод. указания к лаб. работам / В. В. Регеда, О. Н. Регеда. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. – 10 с.

8. Анализ обеспечения точности позиционирования промышленных роботов / А.А. Габитов, А.В. Каляшина // Работа выполнена в рамках Молодежного гранта АН РТ 03-64-ц-Г 2018, а также поддержана грантом гос. контракт с Министерством образования и науки РФ договор №14.Z50.31.0023 от 04.03.2014 г.

В.Г. Окроелидзе, инженер, v.okromelidze@rtc.ru  
Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК), г. Санкт-Петербург, Россия

## АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАХВАТНЫМ УСТРОЙСТВОМ ДВУРУКОГО МАНИПУЛЯТОРА ПРИ СИЛОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОБЪЕКТАМИ

*Аннотация:* В работе предлагается алгоритм захвата роботом объектов с учётом риска разрушения материала при манипулировании. Алгоритм основан на адаптации системы управления к свойствам объекта в процессе взаимодействия с ним. Кратко приведены результаты экспериментов, поставленных с помощью виртуальной модели с целью отработки обеспечения возможности захвата и последующего манипулирования объектами. Результаты экспериментов показывают, что предлагаемый алгоритм позволяет регулировать силу сжатия объекта для безопасного манипулирования.

*Ключевые слова:* Захватное устройство, алгоритм управления, виртуальная модель, деформация объекта, манипулирование, адаптация

V.G. Okromelidze, engineer, v.okromelidze@rtc.ru  
Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,  
St. Petersburg, Russia

## ADAPTIVE ALGORITHM FOR CONTROLLING THE GRIPPING DEVICE OF A TWO-ARMED MANIPULATOR DURING FORCE INTERACTION WITH OBJECTS

*Abstract:* The paper proposes an algorithm for grasping objects by a robot, taking into account the risk of material destruction during manipulation. The algorithm is based on the adaptation of the control system to the properties of the object during interaction with it. The results of experiments set using a virtual model to test the ability to grasp and subsequently manipulate objects are briefly presented. The experimental results show that the proposed algorithm allows regulating the compression force of an object for safe manipulation.

*Key words:* Robotic hand, control algorithm, virtual model, object deformation, manipulation, adaptation

Основными проблемами при захвате роботами объектов с заранее неизвестными параметрами является проскальзывание, которое возникает по причине избыточного веса объекта, недостаточной силы трения между объектом и захватным устройством, несбалансированных крутящих моментов, действующих на объект, а также при захвате объектов неправильной формы или захвате с краю. Чрезмерное усилие, предотвращающее скольжение способно привести к необратимому повреждению объекта.

Для решения этой задачи применяют адаптивные алгоритмы, принимающие на вход значения с датчиков давления/силы, на основании которых делаются выводы о состоянии захвата [1, 2]. При наличии нескольких датчиков давления возможно определение области контакта пальцев с объектом, прогнозирование веса объекта и силы захвата. Имея данные датчиков о давлении и известные значения массы объекта, можно построить регрессионную модель на основе нейронной сети для прогнозирования веса объекта неизвестной массы и области контакты пальца с ним [3]. Другим способом контроля устойчивости захвата является оценка положения центра масс объекта при помощи силомоментных датчиков и кинематических параметров захватного устройства, что также позволяет регулировать силу при захвате объектов неправильной формы или при захвате объектов с краю [4]. Машинное обучение может находить применение в сложных для моделирования системах (например, мягких захватах или захватах со сложной динамикой [5]), однако требует больших затрат вычислительных ресурсов, объемов данных для обучения и значительного времени обучения.

В настоящей статье рассматривается задача захвата и удержания тяжелого объекта двумя манипуляторами [6]. Поднятие и перемещение тяжёлых объектов одним манипулятором затрудняется ввиду ограниченных мощностей приводов захватного устройства или несбалансированных моментов при захвате с краю, поэтому в работе предлагается использовать двурукую антропоморфную манипуляционную систему с целью расширения диапазона доступных для манипулирования объектов и упрощения безопасного взаимодействия с ними. В связи с этим предложен алгоритм, учитывающий свойства объекта.

### Алгоритмы управления захватным устройством манипулятора

Для удержания объекта без скольжения сила тяжести не должна превышать силу трения между пальцами и объектом (рис. 1):

$$F_{\text{Тяж}} \leq F_{\text{Тр}} = \mu F \sin \alpha.$$

До момента разрушения материала сила трения изменяется линейно в процессе регулирования силы сжатия, таким образом, задача удержания объекта без повреждения его структуры сводится к тому, чтобы удерживать прилагаемое к объекту усилие в линейном диапазоне. При увеличении силы сжа-

тия сила трения между пальцами и объектом линейно возрастает до разрушения материала объекта (рис. 2).

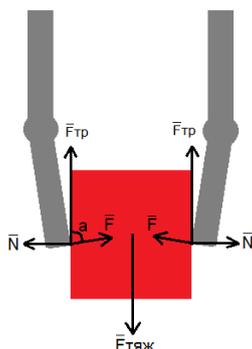


Рис. 1. Силы, действующие на удерживаемый объект ( $F_{тр}$  – сила трения,  $F$  – сила сжатия объекта,  $N$  – сила реакции опоры,  $F_{тяж}$  – сила тяжести,  $\alpha$  – угол приложения внешней силы)

Для измерения приложенной к объекту силы используются данные, поступающие от датчиков давления, за исключением составляющей силы тяжести, а для оценки деформации объекта определяется взаимное расположение фаланг пальцев в пространстве, с помощью решения прямой задачи кинематики.

Перед тем, как объект будет поднят, необходимо обеспечить его устойчивый захват на поверхности. Для этого предлагается использовать алгоритм оценки стабильности захвата, представленный в виде псевдокода 1. Здесь  $F_{min}$  – минимальное значение силы, которое способен регистрировать датчик,  $\Delta F_{min}$  – минимальное значение погрешности определения усилия сжатия,  $t_{des}$  – время захвата объекта на поверхности,  $F_1$  – сила сжатия первого захватного устройства,  $F_2$  – сила сжатия второго захватного устройства.

**Псевдокод 1.** Алгоритм оценки стабильности захвата объекта

1. инициализация  $\Delta X_{max}$ ,  $t_{des}$ ,  $ts_{max}$ ,  $\Delta F_{min}$ .
2. **пока** объект на поверхности **делать**
3.   **если**  $F_1 < F_{min}$  **то**
4.     сжатие пальцев первого захватного устройства
5.   **иначе если**  $F_2 < F_{min}$  **то**
6.     сжатие пальцев второго захватного устройства
7.   **иначе если**  $F_1 \geq F_{min}$  **и**  $F_2 \geq F_{min}$  **то**
8.     **если**  $F_1 - F_{min} > \Delta F_{min}$  **то**
9.       подстройка коэффициента регулятора контура силы контроллером первого захватного устройства
10.    **если**  $F_2 - F_{min} > \Delta F_{min}$  **то**
11.     подстройка коэффициента регулятора контура силы контроллером второго захватного устройства
12.   **иначе если**  $F_1 - F_{min} \leq \Delta F_{min}$  **и**  $F_2 - F_{min} \leq \Delta F_{min}$  **то**

13.  $t = t + 1$
14. **если**  $t = t_{des}$  **то**
15.       подъем объекта с поверхности

В контуре регулирования силы содержится SMC-PD регулятор, реализующий следующий закон управления:

$$u = \begin{cases} \text{sign} \left( e + \frac{1}{2} \frac{J_{\text{пр}}}{M_{\text{max}}} \dot{e} |\dot{e}| \right), M > \text{beta}, M < -\text{beta} \\ \frac{M}{\text{beta}}, -\text{beta} \leq M \leq \text{beta}, \end{cases},$$

где  $u$  – управляющее воздействие,  $e(t)$  – сигнал ошибки управления,  $J_{\text{пр}}$  – приведенный момент инерции,  $M_{\text{max}}$  – максимальный момент,  $M$  – момент,  $\text{beta}$  – коэффициент насыщения (параметр границы действия скользящего режима), который подбирается в процессе захвата таким образом, чтобы свести колебания выходного сигнала к пределу 10% от входного (желаемого).

Когда объект поднят с поверхности, применяется алгоритм, регулирующий силу захвата, представленный в виде псевдокода 2. Здесь  $\Delta X_{\text{max}}$  – максимальная деформация,  $ts$  – время проскальзывания объекта,  $ts_{\text{max}}$  – максимально допустимое время проскальзывания объекта,  $F_{\text{arr}}$  – массив значений датчиков силы,  $X_{\text{arr}}$  – массив значений деформации объекта.

**Псевдокод 2.** Алгоритм регулирования силы захвата

1. **пока** объект поднят **делать**
2.   формирование массивов значений показаний датчиков силы и величин деформации объекта
3.   **если**  $F_{\text{arr1}}[i] - F_{\text{arr1}}[i - 1] > \Delta F_{\text{max}}$  **то**
4.        $ts_1 = ts_1 + 1$
5.       **если**  $ts_1 > ts_{\text{max}}$  **то**
6.           увеличивается сила сжатия объекта первым захватным устройством
7.   **иначе если**  $X_{\text{arr1}}[i] - X_{\text{arr1}}[i - 1] \geq \Delta X_{\text{max}}$
8.       уменьшается сила сжатия объекта первым захватным устройством
9.   **если**  $F_{\text{arr2}}[i] - F_{\text{arr2}}[i - 1] > \Delta F_{\text{max}}$  **то**
10.        $ts_2 = ts_2 + 1$
11.       **если**  $ts_2 > ts_{\text{max}}$  **то**
12.           увеличивается сила сжатия объекта вторым захватным устройством
13.   **иначе если**  $X_{\text{arr2}}[i] - X_{\text{arr2}}[i - 1] \geq \Delta X_{\text{max}}$
14.       уменьшается сила сжатия объекта вторым захватным устройством

## Моделирование захвата объекта

Для разработки и проверки алгоритмов управления была создана виртуальная модель робота в среде CoppeliaSim (рис. 2).

Манипуляционная система состоит из многозвенного манипулятора UR5 и прикрепленной к нему трёхпалого антропоморфного хватного устройства. На проксимальных и дистальных фалангах пальцев расположены элементы, имитирующие датчики давления.

Модель объекта манипулирования (рис. 2б) состоит из двух поверхностей, объединенных тремя пружинами, и представляет из себя упруго-демпфированную систему, где пружины номер 1 и 3 выполняют роль участков линейной деформации объекта, пружина номер 2 – нелинейной деформации объекта. Данная конфигурация позволяет провести исследование динамики системы при различных условиях нагрузки, что является ключевым аспектом для понимания поведения деформируемых объектов в различных сценариях.

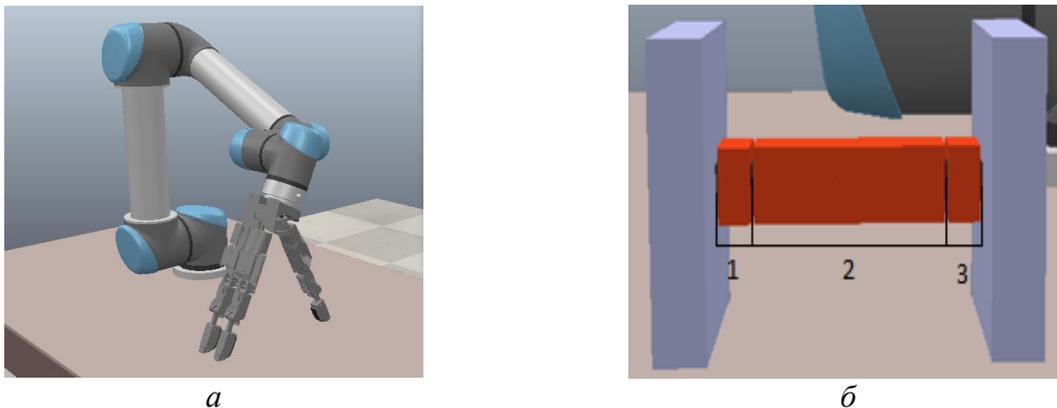


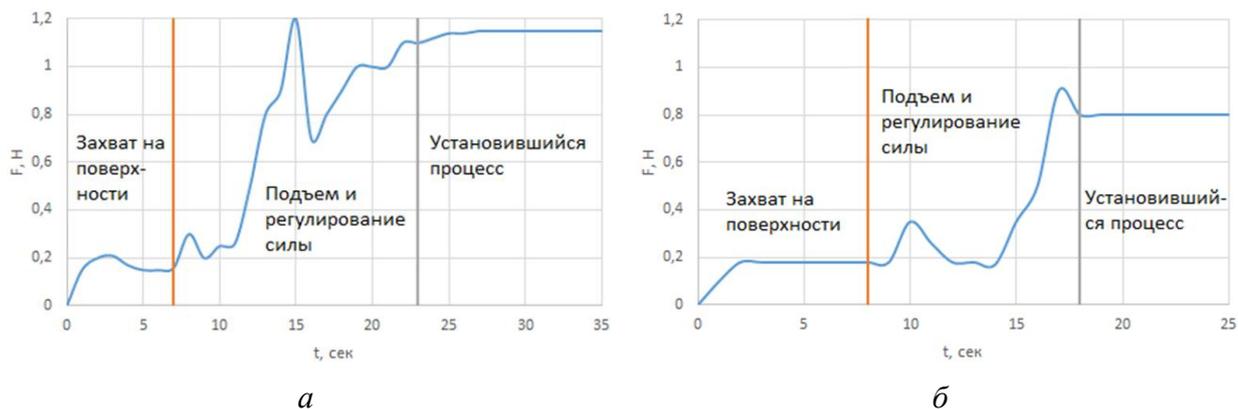
Рис. 2. Моделирование системы:  
а – модель руки робота; б – экспериментальный объект

## Результаты экспериментов

Эксперименты были проведены на деформируемых и твердых объектах одинаковой массы, в качестве которых выступала упомянутая выше модель, с различными коэффициентами демпфирования и упругости пружин. В результате были получены графики изменения силы в процессе манипулирования объектами (рис. 3), исходя из которых можно сказать, что алгоритм успешно справляется с задачей манипулирования как с твердыми, так и деформируемыми телами, а переходные процессы системы удовлетворяют заданным критериям качества.

## Заключение

Разработанный алгоритм эффективно осуществляет свою функцию в проведенных экспериментах с виртуальной моделью – регулирует силу сжатия объекта, необходимую для безопасного манипулирования им.



а

б

Рис. 3. Переходные процессы в контуре силы:

а – при взаимодействии с деформируемым телом; б – с твердым телом

*Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 2024 года № 075-00697-24-01 1021051302301-9-2.2.2 «Разработка коллаборативного робота с ассистирующей двурукой антропоморфной манипуляционной системой для работы в пространствах малого объема» (FNRG-2022-0012).*

## Список литературы

1. Shaw, J. S. Design of servo actuated robotic gripper using force control for range of objects / Jin-Siang Shaw, Vipul Dubey // International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS). – 2016. <https://doi.org/10.1109/ARIS.2016.7886619>
2. Huang, S. J. Intelligent robotic gripper with adaptive grasping force / Shiuh-Jer Huang, Wei-Han Chang, Jui-Yiao Su // International Journal of Control, Automation and Systems. – 15, 2272–2282. – 2017. <https://doi.org/10.1007/s12555-016-0249-6>
3. Kim, D. Artificial Intelligence-Based Optimal Grasping Control / Dongeon Kim, Jonghak Lee, Wan-Young Chung, Jangmyung Lee // Sensors (Basel). – 2020, Nov 9; 20(21):6390. <https://doi.org/10.3390/s20216390>
4. Wang, Chao. Parameter estimation and object gripping based on fingertip force/torque sensors / Chao Wang, Xizhe Zang, Xuehe Zhang, Yubin Liu, Jie Zhao // Measurement. – 179(13):109479. – 2021. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109479>
5. Su, Z. Force estimation and slip detection/classification for grip control using a biomimetic tactile sensor / Zhe Su, Karol Hausman, Yevgen Chebotar, Artem Molchanov, Gerald E Loeb, Gaurav S Sukhatme, Stefan Schaal // Proceedings of the 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Seoul, Republic of Korea, 3–5 November 2015. – Pp. 297–303.
6. Видими́на Ю. О. Способы управления двурукой антропоморфной манипуляционной системой с использованием технологий виртуальной реальности / Ю.О. Видими́на [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – Т. 12. – № 3. – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. – 2024. – С. 202-211.

Д.А. Самохов, магистрант, samohov2003@mail.ru  
С.А. Которженко, магистрант, skotorzhenko@mail.ru  
А.В. Чубарь, к.т.н., доцент, Achubar@sfu-kras.ru  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

## ПОСТРОЕНИЕ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ В АСУТП В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ SIMINTECH

*Аннотация:* В статье рассмотрены принципы построения нечётких регуляторов для автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) в среде моделирования SimInTech. Исследование базируется на применении нечёткой логики, которая позволяет учитывать неопределённости и нелинейности объектов управления. На примере газотурбинного двигателя (ГТД) подробно описаны структура регулятора, процесс его синтеза и оптимизации. Проведено сравнение с ПИД-регулятором, демонстрирующее преимущества нечёткой логики в условиях изменчивости параметров системы.

*Ключевые слова:* АСУТП, нечёткие регуляторы, нечёткая логика, SimInTech, газотурбинный двигатель

D.A. Samohov, magister, samohov2003@mail.ru  
S.A. Kotorzhenko, magister, skotorzhenko@mail.ru  
A.V. Chubar, Cand.Sc., associate professor, Achubar@sfu-kras.ru  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## CONSTRUCTION OF FUZZY CONTROLLERS IN THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM IN THE ENVIRONMENT OF DYNAMIC MODELING OF SIMINTECH TECHNICAL SYSTEMS

*Abstract:* The paper explores the principles of designing fuzzy controllers for automated process control systems (APCS) using the SimInTech modeling environment. The research is based on fuzzy logic, which accounts for uncertainties and nonlinearities in control objects. Using a gas turbine engine (GTE) as an example, the paper details the controller structure, synthesis process, and optimization. A comparison with a PID controller demonstrates the advantages of fuzzy logic under varying system parameters.

*Key words:* APCS, fuzzy controllers, fuzzy logic, SimInTech, gas turbine engine

Современная промышленность предъявляет высокие требования к автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУТП). Эти системы позволяют обеспечивать контроль, оптимизацию и безопасность работы технологического оборудования. Однако задачи управления усложняются при наличии нелинейных и динамических объектов, а также в условиях неопределённости параметров и внешних воздействий.

Одним из наиболее распространённых методов регулирования в АСУТП являются ПИД-регуляторы, обладающие простой структурой и широким применением. Однако они имеют ограничения при работе с нелинейными или изменяющимися во времени системами, что может привести к снижению качества управления. В таких условиях перспективным подходом является использование нечёткой логики, которая предоставляет инструменты для моделирования процессов с неопределённостями и позволяет учитывать экспертные знания.

Нечёткие регуляторы, построенные на основе нечёткой логики, демонстрируют высокую эффективность при управлении сложными объектами. Они способны адаптироваться к изменениям внешних условий, минимизировать ошибки регулирования и обеспечивать устойчивость системы.

Целью данной работы является разработка нечёткого регулятора для управления газотурбинным двигателем (ГТД) — нелинейным объектом с переменными параметрами. Для достижения этой цели проведено исследование следующих вопросов:

- Изучение теоретических основ нечёткой логики.
- Построение структуры нечёткого регулятора с использованием среды SimInTech.
- Проведение моделирования и анализа работы регулятора.
- Сравнение полученных результатов с традиционными ПИД-регуляторами.

Нечёткая логика была предложена Лотфи Заде в 1965 году как метод обработки неопределённой информации [1]. Она опирается на понятие нечётких множеств, где каждому элементу присваивается степень принадлежности, принимающая значения от 0 до 1.

Ключевые этапы работы нечёткой логики:

1. Фаззификация: преобразование чётких входных данных в нечёткие переменные с использованием функций принадлежности (например, треугольных).

2. Нечёткое правило: формулировка зависимостей между входами и выходами в лингвистической форме ("если температура высокая, то вентилятор работает быстро") [2].

3. Агрегация: объединение результатов работы всех правил.

4. Дефаззификация: преобразование нечётких данных в чёткое управляющее воздействие.

Исследуемый объект — газотурбинный двигатель (ГТД), используемый в газотранспортных установках и энергетике.

Основная задача управления заключается в поддержании частоты вращения ротора ( $n$ ) путём регулирования подачи топлива [3].

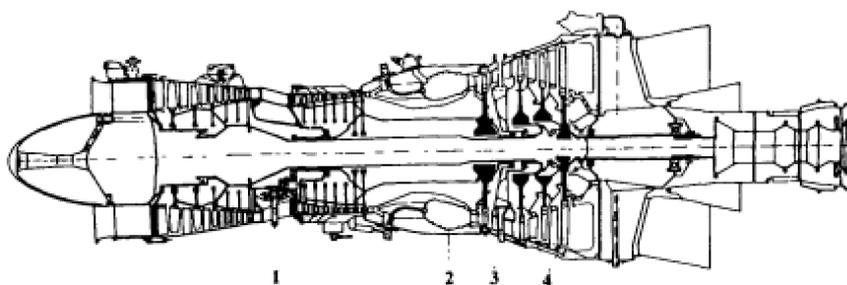
Передаточная функция двигателя линеаризуется относительно момента турбины ( $M_T$ ) и момента компрессора ( $M_K$ ) от частоты вращения ротора, без учета тепловой и массовой емкости двигателя для конкретного режима работы.

$$G_{ГТД}(s) = \frac{n(s)}{G_T(s)} = \frac{K_{ГТД}}{T_{ГТД}(s) + 1},$$

где коэффициент усиления и постоянная времени определяются как:

$$K = \frac{\left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} - \frac{\partial M_K}{\partial G_T}\right)G_{T0}}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n} - \frac{\partial M_T}{\partial n}\right)n_0}, \quad T_{ГТД} = \frac{2\pi J}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n} - \frac{\partial M_T}{\partial n}\right)n_0}$$

где  $K$  — коэффициент усиления,  $T$  — постоянная времени, изменяющаяся в зависимости от режима работы.



1- компрессор; 2 - камера сгорания; 3 – турбина компрессора; 4 – силовая турбина.

Рис. 1. Схема типового ГТД

Нечёткий регулятор состоит из следующих компонентов:

1. Входные переменные: отклонение ( $\Delta n$ ), его первая и вторая производные.

2. Фаззификация: преобразование входных переменных в нечёткие через треугольные функции принадлежности.

3. База правил: формирует зависимости между входами и выходами (например, "если отклонение большое и растёт, уменьшить подачу топлива") [3].

#### 4. Дефаззификация: преобразование нечётких выводов в управляющий сигнал.

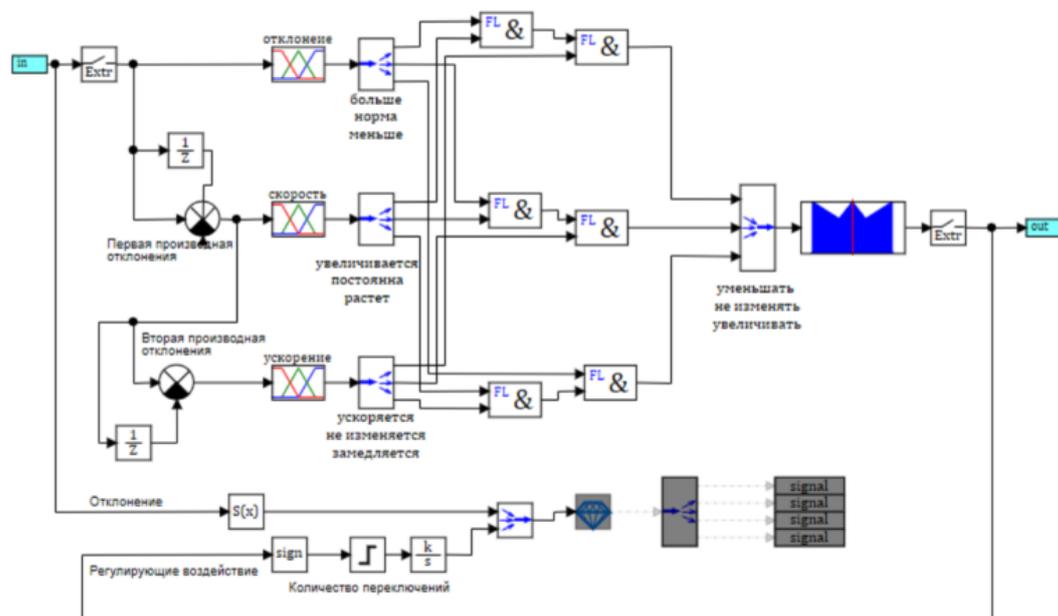


Рис. 2. Структура нечеткого регулятора

Настройка регулятора включает определение параметров функций принадлежности (амплитуды, максимального отклонения, производных).

Параметры, использованные в проекте:

- $u_{\text{Max}} = 14,39$  – амплитуда управляющего воздействия;
- $\Delta_{\text{Max}} = 4,89$  – максимальное отклонение;
- $\text{divMax} = 0.01$  – максимальная производная отклонения;
- $\text{div2Max} = 4,89$  – максимальная вторая производная отклонения.

Для оценки эффективности нечёткого регулятора была проведена серия экспериментов в среде SimInTech. Объектом управления являлся газотурбинный двигатель (ГТД), параметры которого изменялись в зависимости от внешних условий. Целью моделирования было сравнение работы нечёткого регулятора с классическим ПИД-регулятором в условиях различных режимов нагрузки.

На графиках переходных процессов представлены динамические характеристики системы при воздействии ступенчатого изменения задающего сигнала.

ПИД-регулятор:

При моделировании переходного процесса с ПИД-регулятором наблюдается перерегулирование до 5%, а также более длительное время выхода на установившийся режим (рис. 4-а). Это связано с фиксированными параметрами ПИД-регулятора, которые недостаточно эффективно адаптируются к изменению характеристик объекта.

Нечёткий регулятор:

Использование нечёткого регулятора позволило добиться значительно-го улучшения качества управления. Перерегулирование отсутствует, а время выхода на установившийся режим сокращено (рис. 4-б). Регулятор показал высокую гибкость и адаптацию к изменяющимся параметрам объекта за счёт использования нечёткой логики и лингвистических правил.

Для количественного сравнения регуляторов использовались следующие показатели:

1. Максимальное отклонение в переходном процессе:
  - ПИД-регулятор: 5%.
  - Нечёткий регулятор: 0%.
2. Время регулирования (до выхода на установившийся режим):
  - ПИД-регулятор: 8 секунд.
  - Нечёткий регулятор: 5 секунд.
3. Среднеквадратичная ошибка регулирования (SSE):
  - ПИД-регулятор: 0.007.
  - Нечёткий регулятор: 0.003.

Полученные результаты подтверждают, что нечёткий регулятор превосходит ПИД-регулятор по всем ключевым показателям качества регулирования. Это связано с тем, что нечёткий регулятор способен адаптироваться к изменяющимся условиям работы объекта и учитывать нелинейные зависимости.

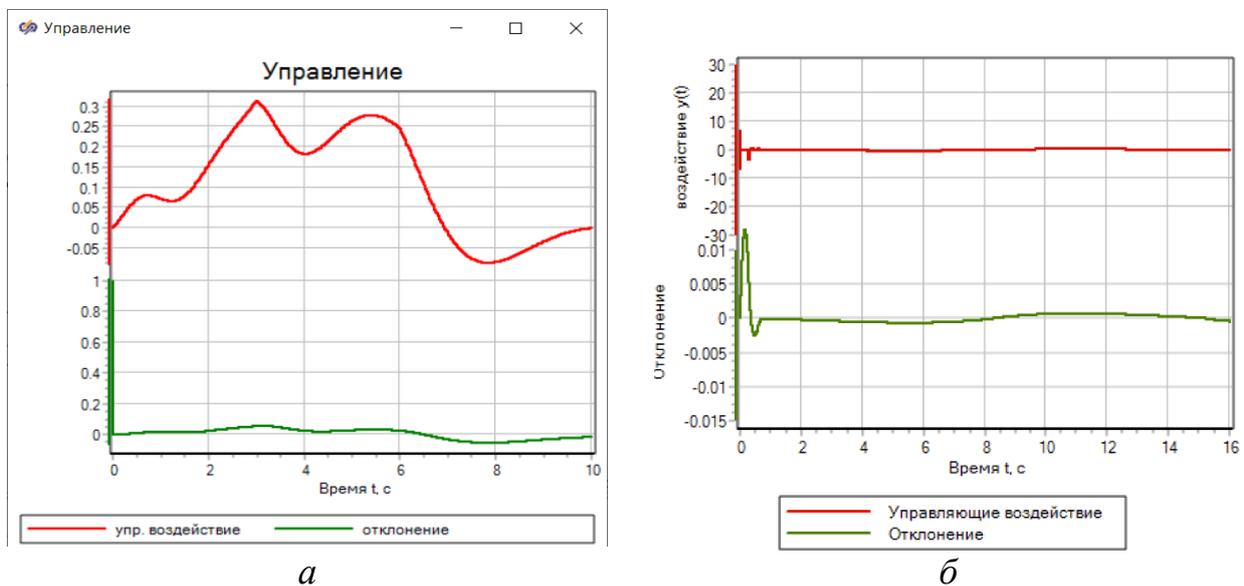


Рис. 3. Сравнение переходных процессов: (а) ПИД-регулятор, (б) нечеткий регулятор

В результате проведённого исследования была разработана и протестирована модель нечёткого регулятора для управления газотурбинным двигателем в среде SimInTech.

Основные результаты:

1. Нечёткий регулятор обеспечивает более высокое качество регулирования по сравнению с ПИД-регулятором.

2. Применение нечёткой логики позволило учесть нелинейные свойства объекта и обеспечить адаптивность к изменяющимся параметрам системы.

3. Отсутствие перерегулирования и сокращение времени регулирования подтверждают эффективность предложенного подхода.

Преимущества нечёткого регулятора:

- Возможность работы в условиях изменчивых и неопределённых параметров системы.

- Применение экспертных знаний через формирование нечётких правил.

- Простота интеграции в современные средства моделирования, такие как SimInTech.

Направления дальнейших исследований:

1. Расширение базы нечётких правил для управления более сложными объектами.

2. Интеграция нечётких регуляторов с другими методами управления, такими как нейронные сети и генетические алгоритмы.

3. Разработка адаптивных систем, которые автоматически настраивают функции принадлежности и базу правил.

Предложенный метод и результаты моделирования подтверждают целесообразность использования нечёткой логики для управления сложными техническими объектами.

## Список литературы

1. Заде Л. Нечёткие множества // Information and Control. – 1965. – Т. 8. – №3. – С. 338–353.

2. Гаврилов С.А., Морозов К.В. Теория нечёткой логики и её применение. – Новосибирск: НГУ, 2019. – 190 с.

3. Гостев В.В. Нечёткие регуляторы в системах автоматического управления. – М.: Наука, 2023. – 280 с.

## АЛГОРИТМ ПИРАМИДАЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ РОЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В ТРЕХМЕРНОЙ СРЕДЕ

*Аннотация:* В статье представлен алгоритм пирамидального формирования (АПФ), представляющий собой стратегию децентрализованного управления роем мобильных роботов (МР) в трехмерной среде. АПФ может быть использован для управления роем МР при выполнении таких действий роя, как агрегирование и перемещение к цели как в среде без ограничений (препятствий), так и с ограничениями.

*Ключевые слова:* мобильный робот, рой, модель

N.A. Scrypchenko, m.r.a, natasha@rtc.ru  
RTC, St.Petersburg, Russia

## PYRAMIDAL FORMATION ALGORITHM FOR CONTROLLING MOBILE ROBOTS SWARM IN A THREE-DIMENSIONAL ENVIRONMENT

*Abstract:* The paper presents a Pyramid Formation Algorithm (PFA), which is a strategy for decentralized control of mobile robots (MR) swarm in a three-dimensional environment. PFA can be used to control a MR swarm when performing such swarm actions as aggregation and moving to a target in an environment with and without restrictions (obstacles).

*Key words:* mobile robot, swarm, model

### 1 Введение

В [1] в качестве стратегии управления роем мобильных роботов (МР) в двумерной среде предлагается Алгоритм Треугольного Формирования (АТФ), который представляет собой децентрализованную стратегию управления роем МР, основанную на треугольной геометрии.

Децентрализованная стратегия управления роем (группой) МР полагается только на локальные правила для определения поведения группы. Децентрализованная стратегия менее затратна, более надежна и масштабируема по сравнению с централизованной стратегией, которая назначает центрального МР ответственным за поведение роя.

Базовая модель поведения МР роя при использовании АТФ заключается в том, что каждый МР пытается сгенерировать вместе со своими двумя соседями конфигурацию, представляющую собой равносторонний треугольник. Принцип АТФ прост, и он работает с тривиальными условиями или ограничениями. МР могут иметь как произвольные, так и определенные начальные положения. Алгоритм не имеет чувствительных параметров. Предполагается, что в пределах своей области действия (расстояния видимости) МР может определять местоположение других МР роя и препятствий, а также умеет отличать препятствия от МР роя. Поведение МР определяется информацией о локальном местоположении двух его соседей. Все МР управляются с использованием одного и того же алгоритма независимо и асинхронно. Чтобы избежать столкновений с возможными препятствиями во время перемещения, а также с другими МР, вводится упрощенная искусственная физическая модель для совместной работы с АТФ.

АТФ может быть использован для управления роем МР при выполнении таких действий роя, как агрегирование, перемещение в среде без ограничений (препятствий) и перемещение с обходом препятствий. При этом может осуществляться как перемещение роя в заданном направлении на заданное расстояние, так и перемещение к цели или в заданную целевую область (предполагается, что МР может определять местоположение цели (целевой области)).

Алгоритм пирамидального формирования (АПФ) основан на использовании базовых принципов АТФ для управления роем МР в трехмерной среде.

## 2 Модель роя МР и базовое поведение

Рассматривается гомогенный рой, состоящий из  $n$  одинаковых МР, которые обозначаются  $r_1, r_2, \dots, r_n$  соответственно. МР моделируются как подвижные объекты в трехмерной среде. Каждый МР оснащен компасом, датчиками приближения и простыми исполнительными механизмами и способен определять местоположение своих соседей и препятствий в области своего действия, а также положение цели. Прямой связи между МР нет. Все МР выполняют один и тот же алгоритм АПФ, их действия асинхронны и независимы друг от друга.

Основными параметрами МР являются:

- Конфигурация и размер; в качестве начального приближения рассматриваются МР шарообразной формы с радиусом  $R$ ;

- Расстояние сближения  $d_a$  – расстояние между центрами МР, при сближении на которое начинает действовать механизм предотвращения столкновений;

- Расстояние видимости  $d_v$  – расстояние от центра МР, в пределах

которого МР может определять положение других МР и препятствий; при этом предполагается, что положение цели определяется при любом расстоянии до нее;

- Скорость линейного перемещения  $v$ ;
- Шаг по времени (временной такт)  $dt$ , с которым осуществляется коррекция направления движения МР.

Базовая модель поведения МР роя заключается в том, что любой МР  $r_i$  в рое пытается сгенерировать вместе со своими тремя соседями  $r_{i1}$ ,  $r_{i2}$  и  $r_{i3}$  конфигурацию, представляющую собой правильный тетраэдр с ребром  $u$  (величина  $u$  не должна превышать расстояние видимости  $d_v$ ). Следовательно, весь рой может образовывать сеть с равномерными интервалами  $u$  между членами. Чтобы сформировать требуемую конфигурацию, МР  $r_i$  необходимо знать целевую позицию, к которой он должен двигаться. Для определения целевой позиции используется алгоритм АПФ.

### 3 Алгоритм Пирамидального Формирования (АПФ)

АПФ является основным механизмом, определяющим такое поведение роя МР, как агрегирование, перемещение в среде без ограничений (препятствий) и перемещение с обходом препятствий. АПФ масштабируем и практичен, поскольку основные требования к его внедрению на МР минимальны. Основная цель АПФ состоит в том, чтобы заставить четыре соседних МР (независимо от их начальных положений) сформировать правильный тетраэдр со стороной  $u$ . Следовательно, каждый МР должен пытаться поддерживать равноудаленное от трех своих соседей положение. Таким образом, для того, чтобы определить направление движения заданного МР  $r_i$  на каждом временном такте, необходимо вычислить положение цели  $(x_c, y_c, z_c)$ , зависящее от положения соседей  $r_{i1}$ ,  $r_{i2}$ , и  $r_{i3}$ . Основным подходом АПФ заключается в том, что в качестве цели выбирается ближайшая к МР  $r_i$  точка, находящаяся на одинаковом расстоянии  $u$  от МР  $r_{i1}$ ,  $r_{i2}$ , и  $r_{i3}$ .

Пусть  $(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ ,  $(x_{i1}(t), y_{i1}(t), z_{i1}(t))$ ,  $(x_{i2}(t), y_{i2}(t), z_{i2}(t))$  и  $(x_{i3}(t), y_{i3}(t), z_{i3}(t))$  – положение МР  $r_i$ ,  $r_{i1}$ ,  $r_{i2}$  и  $r_{i3}$  соответственно в момент времени  $t$ . Тогда положение цели  $(x_c, y_c, z_c)$  определяется как решение системы уравнений:

$$\begin{cases} (x_c - x_{i1}(t))^2 + (y_c - y_{i1}(t))^2 + (z_c - z_{i1}(t))^2 = u^2 \\ (x_c - x_{i2}(t))^2 + (y_c - y_{i2}(t))^2 + (z_c - z_{i2}(t))^2 = u^2. \\ (x_c - x_{i3}(t))^2 + (y_c - y_{i3}(t))^2 + (z_c - z_{i3}(t))^2 = u^2 \end{cases} \quad (1)$$

Из двух решений системы уравнений (1)  $(x_{c_1}, y_{c_1}, z_{c_1})$  и  $(x_{c_2}, y_{c_2}, z_{c_2})$  в качестве цели выбирается точка  $(x_c, y_c, z_c)$ , ближайшая к текущему положению МР  $r_i$ .

Отметим, что система уравнений (1) имеет решение если выполняется условие

$$R_{i123}(t) \leq u, \quad (2)$$

где  $R_{i123}(t)$  – радиус описанной окружности для треугольника с вершинами  $(x_{i1}(t), y_{i1}(t), z_{i1}(t))$ ,  $(x_{i2}(t), y_{i2}(t), z_{i2}(t))$  и  $(x_{i3}(t), y_{i3}(t), z_{i3}(t))$ .

Если условие (2) не выполняется, это означает, что соседние МР находятся достаточно далеко друг от друга (по сравнению с величиной  $u$ ) и требуется предварительное сближение МР. В этом случае положение цели определяется следующим образом:

$$\begin{cases} x_c = \frac{x_i(t)+x_{i1}(t)+x_{i2}(t)+x_{i3}(t)}{4} \\ y_c = \frac{y_i(t)+y_{i1}(t)+y_{i2}(t)+y_{i3}(t)}{4} \\ z_c = \frac{z_i(t)+z_{i1}(t)+z_{i2}(t)+z_{i3}(t)}{4} \end{cases} \quad (3)$$

После того, как положение цели определено, выполняется перемещение МР  $r_i$  в направлении цели на расстояние  $v \cdot dt$ .

Таким образом, базовая структура АПФ требует, чтобы МР периодически (с шагом  $dt$ , представляющим собой временной такт) выполняли работы трех видов. Этими видами работ являются:

- Определение местоположения других МР, включая идентификацию ближайших соседей;
- Определение положения цели;
- Движение к цели.

Для каждой из задач, которые решаются при управлении роем МР (агрегирование, перемещение и т.д.), использование АПФ имеет свои особенности.

#### 4 Агрегирование роя МР

Базовому алгоритму АПФ требуется как минимум четыре МР в рое. При этом они должны находиться в пределах видимости друг друга (расстояние между любыми двумя МР не должно превышать расстояние видимости  $d_v$ ).

Для более крупного роя в сочетании с АПФ вводится метод выбора соседей. Выбор соседей выполняется на каждом шаге  $dt$  работы АПФ. Каждый МР может обнаруживать только МР, расположенные в пределах расстояния видимости  $d_v$ . При выборе трех соседей используется следующий подход. В качестве первого соседа МР  $r_i$  выбирается МР  $r_{i1}$ , ближайший к МР  $r_i$ . Второй сосед  $r_{i2}$  в общем случае выбирается таким образом, чтобы сумма расстояния от  $r_{i2}$  до  $r_{i1}$  и расстояния от  $r_{i2}$  до  $r_i$  была минимальной. Третий сосед  $r_{i3}$  в общем случае выбирается таким образом, чтобы сумма расстояния от  $r_{i3}$  до  $r_{i2}$ , расстояния от  $r_{i3}$  до  $r_{i1}$  и расстояния от  $r_{i3}$  до  $r_i$  была минимальной. На заключительном этапе процесса агрегирования во избежание осцилляций в качестве второго соседа может быть выбран МР  $r_{i2}$ , ближайший к  $r_i$  после  $r_{i1}$ , а в качестве третьего соседа может быть выбран МР  $r_{i3}$ , ближайший к  $r_i$  после  $r_{i1}$  и  $r_{i2}$ .

Как только соседи выбраны, МР  $r_i$  запускает АПФ для вычисления своей целевой позиции для поддержания конфигурации правильного тетраэдра с этими тремя соседями. Поскольку каждый МР в рое пытается поддерживать конфигурации правильного тетраэдра с тремя динамически выбранными соседями, весь рой может поддерживать несколько таких конфигураций. Таким образом, АПФ распространяется на масштабируемый рой независимо от начальных позиций.

Для участия в процессе агрегирования у МР на каждом шаге должно быть по крайней мере три МР, расположенных в пределах расстояния видимости  $d_v$ .

## 5 Перемещение роя МР к точечной цели

В контексте роевой робототехники управление перемещением (стеканием) заключается в управлении большим количеством МР таким образом, чтобы они двигались к общей цели, избегая столкновений между собой, а также столкновений с препятствиями. Типичный подход заключается в использовании общего вектора стекания. При использовании АПФ для управления роем у каждого МР есть свой собственный вектор стекания.

Использование АПФ при перемещении роя МР к точечной цели в отсутствие препятствий выглядит следующим образом.

Предполагается, что каждому МР известно положение цели  $(x_T, y_T, z_T)$ .

Процедура выбора соседей при перемещении роя МР к точечной цели отличается от соответствующей процедуры, используемой при агрегировании роя тем, что в качестве соседей могут быть выбраны только МР, расположенные в направлении вектора стекания.

Если для МР удалось определить трех соседей в направлении вектора стекания, то для перемещения к точечной цели для него выполняется стандартная процедура агрегирования так, как это описано в разделе 4.

Если для МР удалось определить только двух соседей в направлении вектора стекания, то в качестве третьего соседа используется виртуальная точка в направлении вектора стекания.

Если для МР удалось определить только одного соседа или не удалось определить ни одного соседа в направлении вектора стекания, то МР выполняет перемещение в направлении цели на расстояние  $v \cdot dt$  за такт.

## 6 Статистическое моделирование работы АПФ

Исследование разработанного АПФ, было проведено на специально разработанной компьютерной модели (рис. 1), позволяющей осуществлять статистическое моделирование работы АПФ в трехмерной среде при различных значениях характеристик роя МР (включая количество МР), параметров среды (включая препятствия) и собственно параметров АПФ.

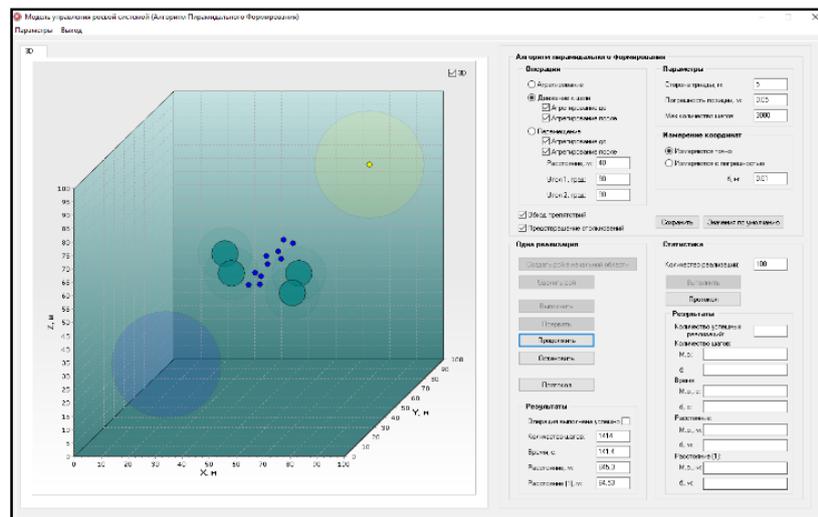


Рис.1 Статистическое моделирование работы АПФ

Выполненное статистическое моделирование показало работоспособность предложенного АПФ и его эффективность по сравнению с АТФ. В частности, использование АПФ при перемещении к цели позволяет уменьшить время выполнения задания и среднее расстояние, которое преодолевает отдельный МР при выполнении задания на величину до 25% по сравнению с АТФ. Сравнительная эффективность АПФ увеличивается с увеличением размера роя и количества препятствий.

## 7 Заключение

В статье рассмотрен алгоритм пирамидального формирования управления роем мобильных роботов в трехмерной среде. Результаты статистического моделирования показывают, что предложенный алгоритм позволяет повысить эффективность управления роем по сравнению с алгоритмом треугольного формирования, в том числе при решении задачи перемещения к цели.

*Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00697-24-01 от 03.04.2024 «Алгоритмы группового управления автономными необитаемыми подводными аппаратами в условиях ограниченной пропускной способности гидроакустических каналов связи» (FNRG-2022-0025 1021101316168-7-2.2.2 )*

## Список литературы

1. Xiang Li, M. Fikret Ercan, and Yu Fai Fung: A Triangular Formation Strategy for Collective Behaviors of Robot Swarm, Conference Paper, June 2009, DOI: 10.1007/978-3-642-02454-2\_70.

М.И. Скрыль, студент, michaelaskryl@gmail.com  
А.В. Бахшиев, к.т.н., доцент, palexab@gmail.com  
А.В. Черников, студент, 20alexchernik@gmail.com  
ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург, Россия

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ВИДЕОАНАЛИТИКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВ

*Аннотация:* В работе представлено описание решения для прототипирования систем интеллектуальной видеоаналитики. Предложенное решение реализовано на языке Python. Система предоставляет готовый пайплайн реализующий базовый функционал видеоаналитики – обнаружение и сопровождение объектов одновременно по нескольким видеоисточникам, ведение журнала событий. Описывается архитектура системы, представлены диаграммы процессов для описания работы ключевых модулей: блока видеоаналитики, модуля визуализации и модуля обнаружения объектов – приводится описание структуры базы данных, используемой в системе. Особенности реализации являются: нейросетевой модуль обнаружения объектов, пригодный для применения в сценах с существенно изменяющимся масштабом наблюдаемых объектов; возможность несложного расширения функционала через добавление новых модулей обработки; встроенная автоматическая фиксация в базе данных параметров запуска системы для обеспечения повторяемости экспериментов.

*Ключевые слова:* производственная безопасность, система интеллектуального видеонаблюдения, детектирование объектов, видеоаналитика.

M.I. Skryl, student, michaelaskryl@gmail.com  
A.V. Bakhshiev, Ph.D., associate professor, palexab@gmail.com  
A.V. Chernikov, student, 20alexchernik@gmail.com  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

## DEVELOPMENT OF A PLATFORM FOR INTELLIGENT VIDEO ANALYSIS SYSTEMS PROTOTYPING FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS

*Abstract:* The paper describes the development of a platform for prototyping intelligent video analysis systems. The proposed solution is implemented using Python. The system provides a ready-to-use pipeline that implements the basic functionality of video analytics - detection and tracking of objects by several video sources simultaneously, logging of events. The system architecture is presented, along with sequence diagrams for crucial modules such as controller, visualizer and object detector. The scheme of the developed database is described. The features of the implementation are: neural network module of object detection suitable for application in scenes with significantly changing

scale of observed objects; possibility of simple extension of functionality by adding new processing modules; inbuilt automatic fixation of system start parameters in the database to ensure repeatability of experiments.

*Key words:* industrial safety, video surveillance, object detection, video analysis.

## Введение

Интеллектуализация решений для задач промышленной безопасности осуществляется путем внедрения систем видеоаналитики и применения методов искусственного интеллекта для повышения эффективности подобных систем и исключения рисков, связанных с ошибками операторов систем видеонаблюдения. Интеллектуальные решения в видеоаналитике используются для контроля за ношением СИЗ – средств индивидуальной защиты [1, 2], анализа периметра и запрещенных зон, выявления аномального поведения индивидов и толпы [3]. При этом высокий темп развития методов видеоаналитики позволяет использовать системы для решения все более широкого круга проблем и выбирать необходимые методы, исходя из особенностей конкретной задачи.

Работа [4] направлена на рассмотрение применимости методов обучения с учителем и без учителя с использованием базового подхода к построению систем видеоаналитики, применяемых для решения задач выявления аномального поведения. Проведен анализ и сравнение методов в рамках каждого типа используемых алгоритмов и моделей. Также рассмотрены основные проблемы, возникающие при разработке подобных систем, такие как сложности в разграничении нормального и аномального поведения, доступность датасетов, необходимость больших вычислительных мощностей и проблемы, связанные с практическим применением: меняющиеся погодные условия и освещение, движение камеры, изменяющийся масштаб объектов. Отмечается, что проблема создания универсального решения для анализа поведения остается предметом текущих и будущих исследований.

В работе [5] рассматриваются перспективы применения больших языковых моделей для работы с видео. Автор указывает на возможность перехода от классических методов видеоаналитики, таких как подходы, описанные в [6], к использованию больших языковых моделей для управления всей системой. Это включает обработку и интерпретацию результатов, поступающих от модуля анализа видео. Задача такого модуля — преобразовать входное видео в текстовый формат, который затем обрабатывается языковой моделью.

В работе [7] рассматривается система для обеспечения безопасности на сборочной линии, основанная на YOLOv3 с применением дополнительно ре-

ализованных алгоритмов предобработки и постобработки. В работе [8] рассматривается система видеоаналитики, разработанная для контроля за ношением СИЗ, обнаружение осуществляется при помощи YOLOv5, модуль видеоаналитики основан на Nvidia Deepstream SDK.

Широкий спектр применения интеллектуальных систем видеоаналитики и большое количество возможных направлений исследований усложняет процесс нахождения наиболее подходящего решения для конкретной практической задачи, поэтому видится необходимым создание платформ, имеющих модульную архитектуру с унифицированной структурой компонентов для облегчения разработки новых модулей, а также гибкой настройкой, то есть обладающих функционалом для объединения различных методов и алгоритмов, создания прототипов систем, их анализа и сравнения.

Целью данной работы является разработка системы для прототипирования интеллектуальной видеоаналитики для контроля за производством. В силу того, что предпочтение отдано не производительности работы, а универсальности разрабатываемых систем, система разработана на языке Python и предоставляет пайплайн, который реализует основные функции системы видеоаналитики.

## Архитектура системы

На рисунке 1 представлена архитектура разрабатываемой системы.

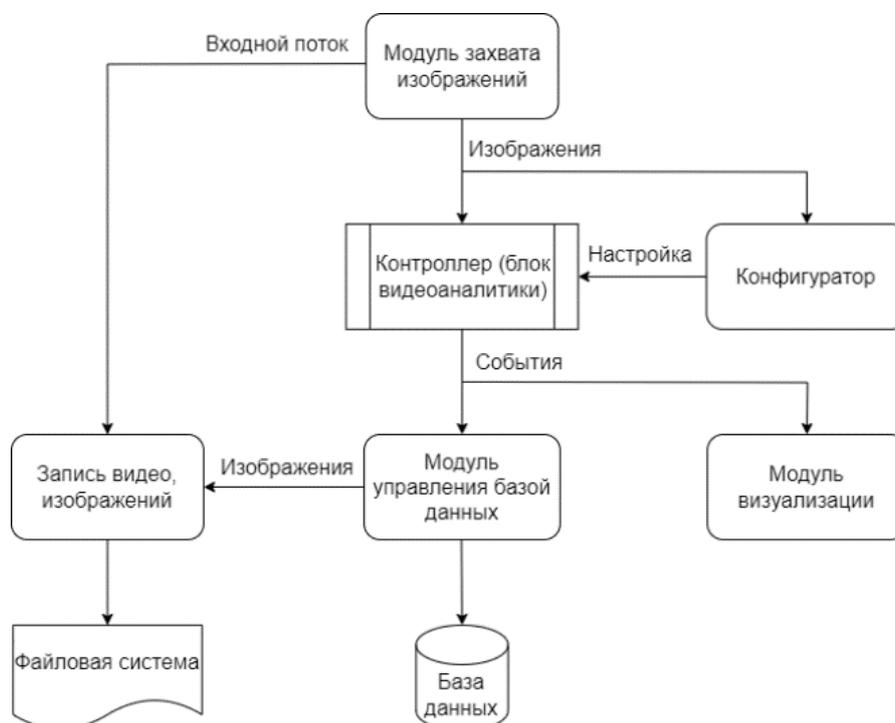


Рис. 1. Архитектура системы

Система осуществляет получение изображения от источников, его анализ и сохранение полученных данных в базе данных, а также визуализацию

результатов. Блок видеоаналитики отвечает за управление модулями обнаружения и отслеживания объектов и модулями, отвечающими за генерирование событий.

Диаграмма, которая отражает процесс работы контроллера, представлена на рисунке 2. Каждый модуль, к которому обращается контроллер, содержит входную и выходную потокобезопасные очереди, а также поток, который принимает данные из входной очереди и добавляет в выходную очередь результаты их обработки. При этом вызовы функций `put` и `get` – неблокирующие, что позволяет системе обрабатывать данные только по мере их поступления, не ожидая завершения длительных процессов, вроде детекции объектов. Классы `object_detector` и `object_tracker` отвечают за детектирование и отслеживание объектов. Класс `objects handler` предназначен для хранения и обработки объектов сцены, отвечает за классификацию объектов по нескольким категориям: новые объекты, активные объекты и потерянные объекты.

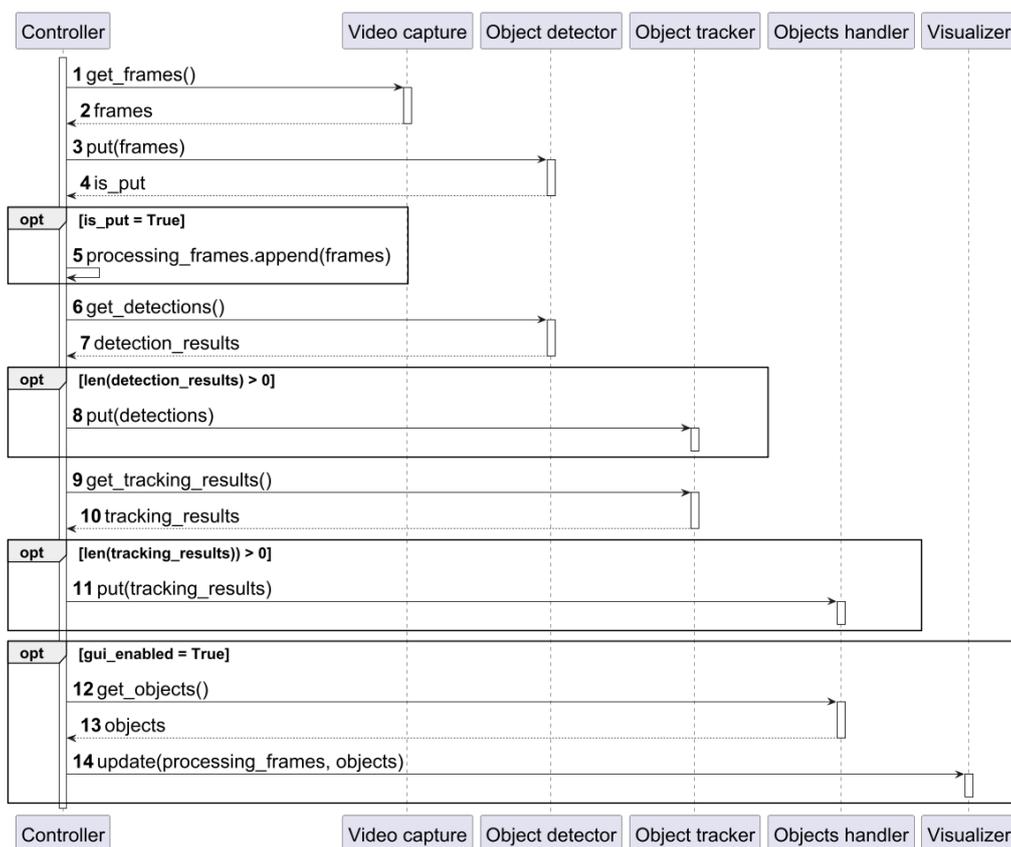


Рис. 2. Диаграмма работы контроллера

### Модуль обнаружения объектов

Диаграмма алгоритма детекции представлена на рисунке 3. Для решения задачи обнаружения объектов на изображениях используется нейросетевая модель YOLOv8n.

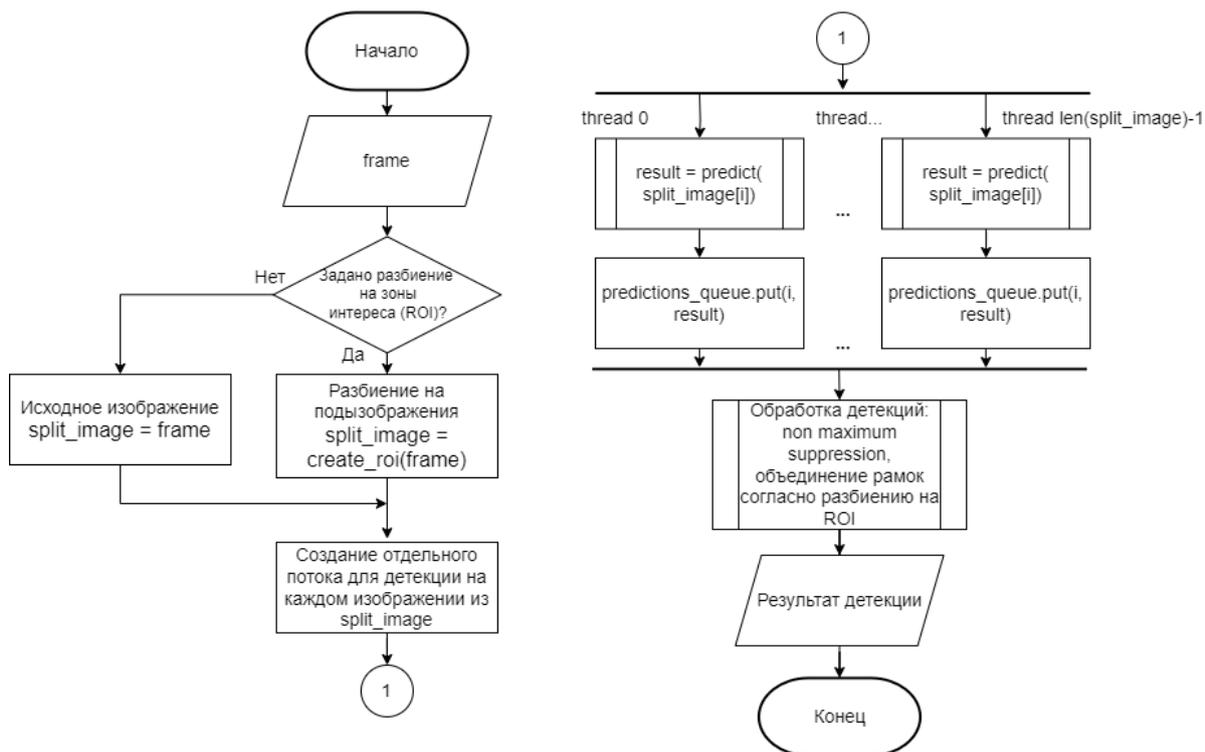


Рис. 3. Схема алгоритма обнаружения объектов

Для снижения уязвимости к изменению масштаба и размеров детектируемых объектов, дополнительно реализована возможность разбиения исходной сцены на регионы интереса, каждый из которых отражает отдельный план. Детектирование на всех регионах интереса осуществляется параллельно за счет выделения отдельного потока под каждый регион. На рисунке 4 представлено различие в работе детектора без разбиения на зоны интереса и с ним при детекции объектов на дальнем плане.



Рис.4. Детекция без разбиения и с разбиением на регионы интереса

### Модуль визуализации

В класс visualizer поступают объекты от класса objects handler, и кадры для обновления изображения камер на графическом интерфейсе. Порядок ра-

боты визуализатора представлен на рисунке 5. Данный класс взаимодействует посредством очереди с классами Video Thread, каждый из которых соответствует одному источнику и содержит поток, осуществляющий обработку полученных данных, отрисовку рамок и маршрутов объектов, перевод изображения в формат, поддерживаемый PyQT. По завершении обработки потоки посылают сигнал и данные для обновления изображения в главное окно интерфейса. В режиме обработки отдельных видеозаписей доступна работа без визуализации.

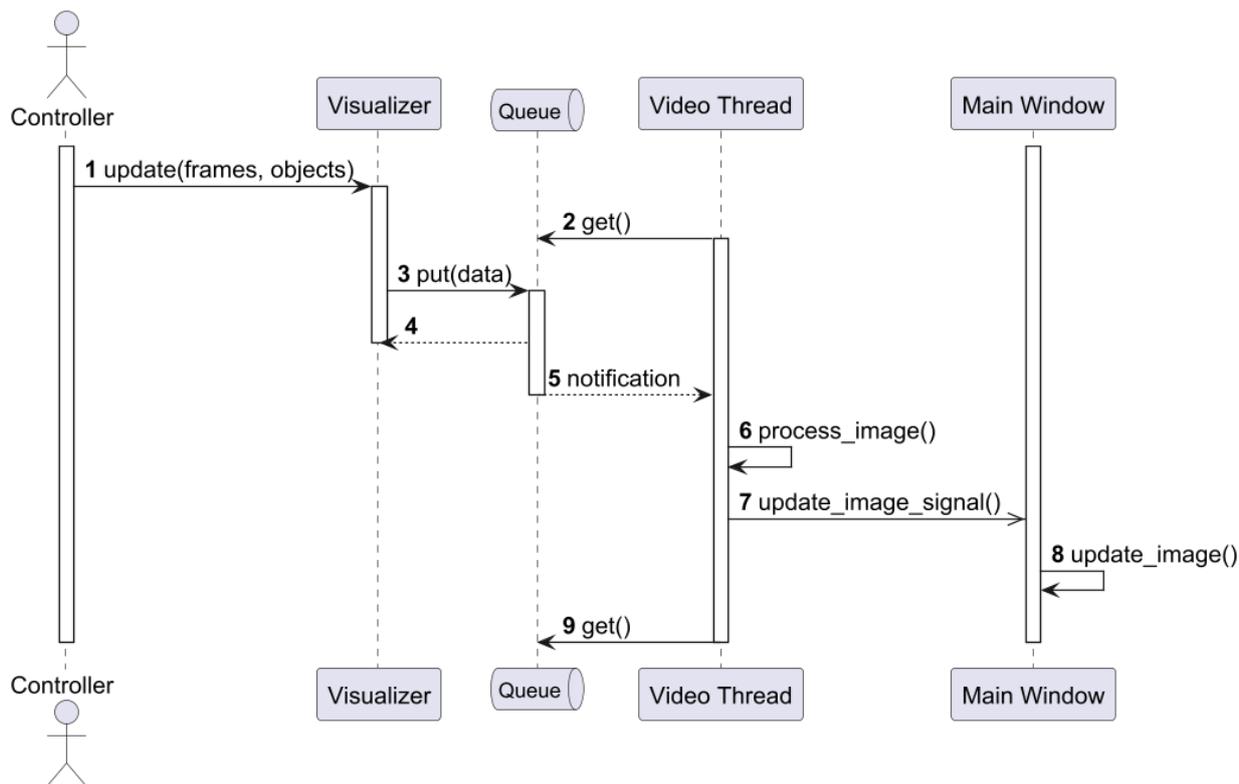


Рис. 5. Диаграмма работы визуализатора

### Структура базы данных

Схема базы данных представлена на рисунке 6. Таблица Objects является основной и содержит данные об объектах, а также информацию о пути, по которому сохраняются кадры. Таблица Camera Information содержит информацию о камерах и других видеисточниках, которые были использованы при запусках системы. Записи в таблице Jobs содержат информацию о конкретных запусках системы. Помимо этого, таблица содержит информацию о конфигурации конкретной сессии, что дает возможность в дальнейшем восстановить условия проведения запусков и экспериментов. Каждая запись Job принадлежит определенному проекту из таблицы Projects, что позволяет объединять отдельные запуски в проекты.

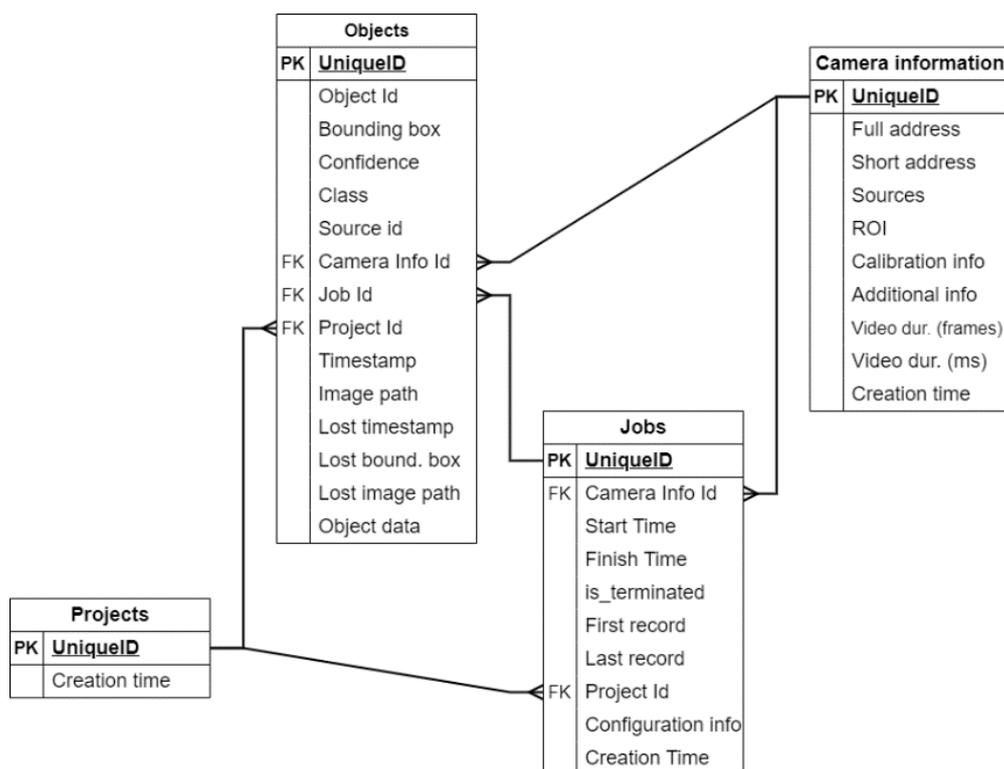


Рис. 6. Схема базы данных

## Заключение

В работе представлена система для прототипирования интеллектуальных решений по контролю хода производственных процессов на конвейерах, обнаружения присутствия работников в опасных зонах, контроля ношения СИЗ, аномального поведения и т.п. Модульная структура системы предполагает возможность встраивания и отработки различных алгоритмов, использующих предлагаемые базовые возможности системы для снижения временных затрат на построение окружения при выполнении экспериментальных исследований.

## Список литературы

1. X. Long et al. Safety Helmet Wearing Detection Based On Deep Learning // 2019 IEEE ITNEC – China: 2019, pp. 2495-2499.
2. N. Filatov, N. Maltseva, A. Bakhshiev. Development of Hard Hat Wearing Monitoring System Using Deep Neural Networks with High Inference Speed // Proceedings of International Russian Automation Conference, RusAutoCon – Sochi, Russia, 2020 – pp. 459–463. doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208155
3. G. Sreenu, M.A. Saleem Durai. Intelligent video surveillance: a review through deep learning techniques for crowd analysis. J Big Data, 2019, 6, 48. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0212-5>

4. Jahan Md et al. A Critical Analysis on Machine Learning Techniques for Video-based Human Activity Recognition of Surveillance Systems: A Review. 2024. 10.48550/arXiv.2409.00731.
5. T. Yunlong et al. Video Understanding with Large Language Models: A Survey. 2023. ArXiv abs/2312.17433.
6. I. Fomin, V. Burin, A. Bakhshiev. Research on Neural Networks Integration for Object Classification in Video Analysis Systems. // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) - Sochi, Russia, 2020 – pp. 1-5. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112011.
7. J. Ahn et al. SafeFac: Video-based smart safety monitoring for preventing industrial work accidents. Expert Systems with Applications, 2023, 215.
8. S. Qiu, Y. Kang. A Personal Protective Equipment Safety Monitoring System in Industrial Scenes // 2022 IEEE 8th ICCS – China: 2022 – pp. 2182-2186.

С.Г. Ферাপонтов, ассистент, ferapontov@bmstu.ru  
И.В. Герасименко, студент, gerasimenkoiv@student.bmstu.ru  
М.В. Мурашов, д.т.н., профессор, murashov@bmstu.ru  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия  
В. И. Ланцов, начальник отдела, vladislav.lantsov@infra.ru  
ООО «Инфраструктура ТК», г. Москва, Россия.

## АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВИРТУАЛЬНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОДУКТОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ГАЗОФРАКЦИОНИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

*Аннотация:* Данная работа посвящена анализу архитектур моделей виртуальных анализаторов (ВА), применяемых для прогнозирования контролируемых показателей качества процесса и являющихся частью системы усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП). Исследуемые модели ВА проанализированы на основе данных, полученных в процессе работы газофракционирующей установки (ГФУ). В качестве базового алгоритма выбрана линейная регрессия, активно применяемая в промышленности. Исследуемые модели программно реализованы и обучены и затем протестированы данных работы установки.

*Ключевые слова:* виртуальный анализатор, система улучшенного управления технологическими процессами, машинное обучение.

S. G. Ferapontov, M.Sc., teaching assistant, ferapontov@bmstu.ru  
I.V. Gerasimenko, student, gerasimenkoiv@student.bmstu.ru  
M.V. Murashov, DSc., professor, murashov@bmstu.ru  
Bauman Moscow State University, Moscow, Russia  
V.I. Lantsov, department chief, vladislav.lantsov@infra.ru  
LLC "Infrastructure TC", Moscow, Russia

## ANALYSIS OF MODELS OF VIRTUAL ANALYZERS OF PRODUCT QUALITY FOR ADVANCED PROCESS CONTROL SYSTEM OF A GAS FRACTIONATING PLANT

*Abstract:* This paper is devoted to the analysis of the architectures of soft sensor models used to predict the controlled process quality parameters and being a part of the advanced process control system (APC). The soft sensor models under study were analyzed based on the data obtained during the operation of a gas fractionating unit. Linear regression, which is actively used in industry, was chosen as the baseline algorithm. The

studied models are implemented in software and trained, and then evaluated using the plant operation data.

*Key words:* Soft sensor, advanced process control system, machine learning.

Современное нефтехимическое производство характеризуется высокими требованиями к стабильности показателя качества продукции, необходимой для максимизации экономической эффективности производства. Для контроля показателей качества процессов на производстве проводятся регулярные лабораторные анализы продукта, но их частота и скорость недостаточны для управления технологическим процессом (ТП) в реальном времени. Одним из способов решения данной проблемы является использование виртуального анализатора (ВА), позволяющего предсказать значение контролируемого показателя качества по текущим значениям параметра ТП. В наше время именно ВА стали стандартом для построения системы усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП) (рис. 1) [1-3].



Рис. 1. Положение ВА в СУУТП

Отметим, что при проектировании модели ВА для нефтехимического производства, в частности для газофракционирующей установки (ГФУ), нужно учитывать следующие особенности. С одной стороны, обучающая выборка сформирована результатами относительно небольшого числа лабораторных исследований. С другой, ГФУ имеет большое число датчиков, формирующих исходные признаки ТП. Таким образом, для построения модели ВА необходимо решить задачу регрессии относительно большой размерности с малым объёмом обучающей выборки [4].

Традиционно данная задача решается за счёт выбора наиболее коррелирующих и объяснимых ТП признаков [5]. После чего на основании выбранных признаков строится модель линейной регрессии, которая позволяет вывести понятную человеку формулу и не так значительно подвержена пере-

обучению, но при этом такая модель не всегда позволяет получить достаточно точные результаты.

В данной работе мы рассмотрим альтернативные подходы к построению модели ВА и сравним их с традиционной линейной регрессией.

Во-первых, рассмотрим усовершенствование линейной регрессии благодаря использованию частичного наименьшего квадратного сингулярного разложения (PLSSVD). Данный метод адаптирован для работы с сильно коррелированными данными, что является особенно актуально при работе с ГФУ. За счёт выделения латентных факторов, максимизирующих объяснимую дисперсию, и последующей регрессии мы сможем сократить размерность задачи, сохраняя точность модели.

Во-вторых, рассмотрим применение алгоритма случайного леса в задаче регрессии. Особенностью данного алгоритма является возможность распознать и учесть режимы работы установки и способность эффективно работать с малыми наборами данных большой размерности.

В-третьих, рассмотрим метод опорных векторов (SVM). Использование данного метода обусловлено тем, что он является одним из наиболее устойчивых к переобучению, что является ключевым критерием при отборе алгоритмов.

В-четвёртых, рассмотрим метод группового учёта аргументов (МГУА). Оптимальная структура, полученная при использовании индуктивного самоорганизующегося процесса МГУА позволяет автоматически выбрать подходящие параметры для построения модели, при этом комбинирование этих параметров на следующих слоях МГУА может позволить получить более точные результаты.

Кроме описанных выше алгоритмов реализуем линейную регрессию, качество работы которой будет служить точкой отсчёта для анализа алгоритмов. Все модели обучены одним набором данных эксплуатации ГФУ. Затем все модели протестированы на новом наборе данных, для анализа качества работы использован коэффициент детерминации ( $R^2$ ). Сведём результаты тестирования моделей в таблицу (табл. 1).

Таблица 1. Сводная таблица моделей ВА

| Модель             | $R^2$ |
|--------------------|-------|
| Линейная регрессия | 0,829 |
| PLSSVD             | 0,864 |
| Случайны лес       | 0,828 |
| SVM                | 0,872 |
| МГУА               | 0,768 |

Как мы видим, нам удалось достичь повышения эффективности работы ВА при использовании методов PLSSVD и SVM, что подтверждает наше предположение, о том, что основанные на этих методах модели могут пока-

зять хороший результат, так как они менее подвержены переобучению. Алгоритм случайного леса показал результаты, незначительно уступающие линейной регрессии, дальнейшее улучшение работы данного алгоритма возможно за счёт тонкой настройки гиперпараметров модели.

Отметим, что так как все предложенные модели позволяют производить автоматическую фильтрацию большого числа входных признаков, все они могут быть адаптированы для автоматического дообучения модели в процессе эксплуатации. Данный факт позволит дополнительно улучшить работу виртуального анализатора и справиться с дрейфом данных.

## Список литературы

1. A Review on Soft Sensors for Monitoring, Control, and Optimization of Industrial Processes / Y. Jiang, S. Yin, J. Dong, O. Kaynak. // *IEEE Sensors Journal*. — 2021. — Vol. 21, I. 11. — pp. 12868-12881. DOI: 10.1109/jsen.2020.3033153.

2. Мухтаруллина Л.А., Кислицын А.А., Толстенов Д.О. Построение моделей виртуальных анализаторов по показателям качества продуктов первичной переработки нефти // *Инновации. Наука. Образование*. — 2021. — № 35. — С. 220-226. — EDN TVIJOB.

3. Soft sensor for continuous product quality estimation (in crude distillation unit) / A. Rogina, I. Šiško, I. Mohler, Ž. Ujević, et al. // *Process Safety and Environmental Protection/Transactions of the Institution of Chemical Engineers. Part B, Process Safety and Environmental Protection / Chemical Engineering Research and Design*. 2011. Vol.89, I.10. pp. 2070–2077.

4. Experience development of product quality virtual analysis for catalytic reforming of gasoline fractions and system of their adjustment real-time / A. Shumikhin, M. Zorin, A. Nemtin, V. Plekhov // *PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology*. — 2017. — I. 2. — pp. 45-61. DOI: 10.15593/2224-9400/2017.2.04.

5. Штакин Д.В., Торгашов А.Ю. Сравнительный анализ методов отбора входных переменных для виртуального анализатора // *Математические методы в технологиях и технике*. — 2023. — № 5. — С. 21-24. — DOI: 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2023\_5\_21.

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВЫЧИСЛЕНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МРТК

*Аннотация:* Особое место в разработке алгоритмов и программных средств занимает такой подход как визуальное программирование или визуальное проектирование. Был разработан ряд подпрограмм, который в том числе может использоваться для симуляции и экспериментального исследования алгоритмов управления МРТК. Для удобства проектирования и настройки разработано средство визуального проектирования на основе блоков. Блоки имеют стандартизованный интерфейс для построения визуальной схемы и расчета. Описывается разработка пользовательского интерфейса (фронтенд) и модели вычислений (бэкэнд).

*Ключевые слова:* управление, роботы, алгоритмы, веб-интерфейс, Python, javascript

## DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TOOL FOR A DESIGN AND CALCULATION OF ROBOT CONTROL ALGORITHMS

*Abstract:* A special place in the development of algorithms and software is occupied by such an approach as visual programming or visual design. A number of subroutines have been developed, which can also be used for simulation and experimental research of MRTC control algorithms. A block-based visual design tool has been developed for ease of design and configuration. The blocks have a standardized interface for building a visual diagram and calculation. The development of a user interface (frontend) and a computing model (backend) is described.

*Key words:* control, robots, algorithms, web-interface, python, javascript

**Введение и мотивация.** В данной работе предлагается создать программное средство, которое позволит создавать блоки для вычислений различной степени сложности реализации, с унифицированным способом задать

входы, выходы и параметры. Также необходимо средство для организации коллекции блоков, выстраивания связей между ними, управления порядком расчета. Отдельно нужен графический интерфейс для наглядного управления связями, параметрами и порядком вычислений.

Основной мотивацией разработки предлагаемого в работе программного средства являлась необходимость сборки сложных схем для построения системы управления мобильным робототехническим комплексом. Был предложен оригинальный способ для определения положения робота в пространстве и осуществления навигации в когнитивной карте ключевых кадров. Сначала выполняется предварительная подготовка для навигации, когда выполняется несколько проездов робота с камерой по будущему предполагаемому маршруту, с небольшими изменениями в обстановке. Затем полученные записи обрабатываются фундаментальными сетями с целью получения аннотаций связанных областей в кадре. Далее, оставляются только области, которые имеют «объектность», то есть стол или монитор – объекты, а пол или потолок – области, слабо локализованные в пространстве.

Полученные связанные области аннотируются (относятся к одному из классов), после чего выполняется обучение нейросетевого классификатора, который учится определять классы по картинкам объектов, вырезанным из полного изображения. Далее (для чего и было разработано программное средство) строятся различные схемы для поиска соответствия между двумя ключевыми кадрами, с использованием спайковых нейронных сетей. Если ввести кодирование спайков для каждого из классов объектов, такое что задержка спайка прямо пропорциональна направлению на объект относительно оптической оси камеры, то посредством сопоставления таких спайковых последовательностей для опорного (текущего) кадра со всеми ключевыми кадрами в карте можно подобрать кадр, наиболее похожий на текущий и таким образом осуществить локализацию в наборе опорных кадров.

В частности, для подтверждения описанной концепции в частности в предлагаемом ПО возможно также реализовать эмуляцию перемещения робототехнического средства в помещении. Для этого был реализован эмулятор движения робота на ортографическом плане помещения, где также эмулировалось наличие у робота камеры с ограниченным полем зрения и ограниченной дальностью видимости. Пример вида эмулятора показан на рисунке 1.

Использование спайковых нейронов предполагает последовательную сборку большого количества похожих схем из однотипных элементов, которые требуется регулярно редактировать. Так как для этого ранее использовалось типовое приложение, написанное на C++, логичным шагом стала разработка аналога для Python.

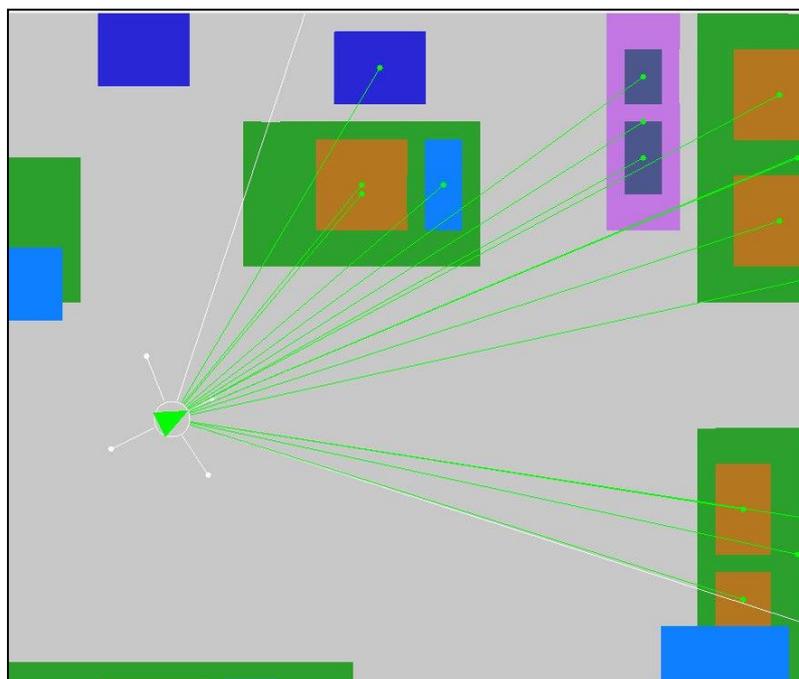


Рис. 1. Пример внешнего вида эмулятора

**Обзор аналогов.** Предлагаемая в работе идея не нова и многие исследователи делали шаги в этом направлении. Ближайшим аналогом и источником идеи является общеизвестное дополнение к программе MATLAB – Simulink [1], которое в том числе позволяет собирать сложные схемы из более простых блоков в несколько уровней. Основные недостатки MATLAB – платность, закрытость, высокая стоимость лицензии и ограниченная доступность на территории Российской Федерации. Можно упомянуть также движок Unreal Engine 5 [2] (как и более ранние версии) – в нем подобные блочные схемы используются как для программирования логики, так и для создания шейдеров и иных эффектов. Он частично вдохновил внешний вид блоков в разрабатываемой системе. Очевидный недостаток движка – он предназначен только для создания игр, а никак не для научной и алгоритмической разработки. Также следует упомянуть нешироко известную программную среду, одинаково хорошо подходящую как для нейросетевых алгоритмов [3], так и для методов обработки изображений [4]. Основное преимущество – среда лишь предоставляет платформу и правила обмена данными между модулями, соответственно позволяет реализовывать алгоритмы фактически любой степени сложности. Основные недостатки – язык разработки C++, разросшаяся кодовая база с почти полным отсутствием документации, вследствие чего – очень высокий порог входа для новых пользователей и большие затраты сил и времени на разработку.

**Общая архитектура системы.** Рассмотрим архитектуру предлагаемого программного средства, схематично представленную на рисунке 2.

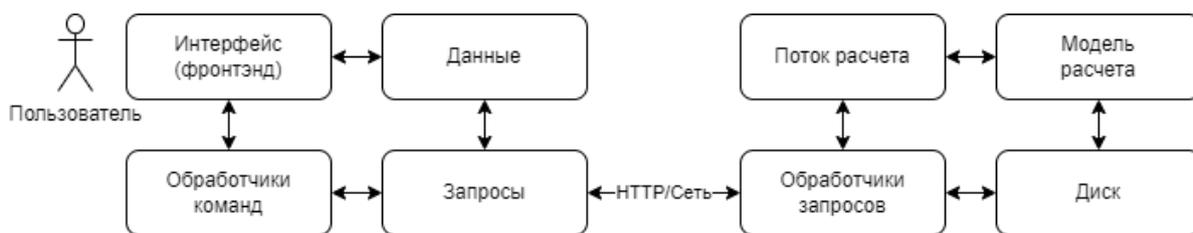


Рис. 2. Общая схема взаимодействия частей системы

Описываемая система наследует стандартную для построения многих программных средств архитектуру «Модель-Вид-Контроллер» (Model-View-Controller, MVC). Здесь за «Вид» отвечает прежде всего интерфейс пользователя (фронтэнд), на котором отображается все необходимое для управления моделью и вычислениями. Данные, которые хранятся в интерфейсе, нужны для упрощения и ускорения отображения. За «Модель» отвечает модель расчета, которая взаимодействует с данными с диска и данными, которые в нее приходят после подачи некоторых команд пользователем. За «Контроллер» отвечает поток расчета, который непосредственно управляет всем функционалом вычисления модели. Также в эту часть следует отнести средства формирования запросов и обработки результатов их выполнения на стороне интерфейса (фронтэнда) и обработчики запросов, которые принимают запросы, передают команды в поток расчета, обрабатывают результаты и формируют ответ на стороне бэкэнда. Обмен запросами между фронтэндом и бэкэндом происходит по протоколу HTTP, через POST и GET запросы с различной наполненностью информацией. В подавляющем большинстве случаев обе части приложения работают в пределах одного ПК, но поддерживается и взаимодействие по сети.

**Архитектура модели.** Важно сказать несколько слов о том, как устроена самая главная часть системы – модель расчета, она занимает большую часть кода и для управления ей необходимо все остальное. Упрощенная архитектура показана на рисунке 3. Здесь совмещены основные классы, принципы организации архитектуры компонентов и принципы организации компонентов в коллекцию. В архитектуре на данный момент существует 2 базовых класса, заслуживающих упоминания. Класс `PyRTVComponent` – базовый класс компонента и реализует все необходимое для обеспечения работы всех дочерних. Здесь реализованы все основные методы управления порядком расчета, добавления и удаления входов, выходов, параметров, методы для задания и чтения значений параметров компонента. «Вход», «Выход» и «Параметр» – важные концепции для системы. «Вход» – это то, что компонент получает с выхода другого компонента, после того как тот закончит свой расчет, «Выход» – это то, куда компонент должен выложить результат своей работы.

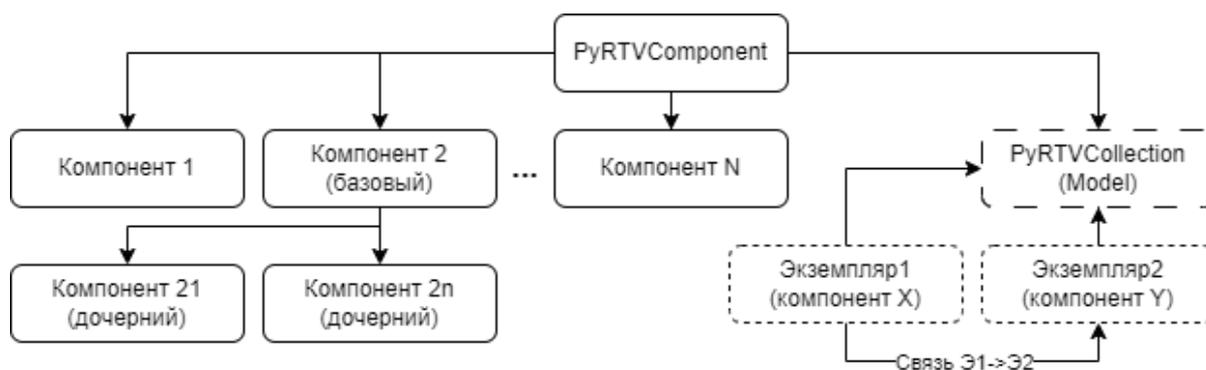


Рис.3. Совмещенная архитектура классов и программная

Бывают компоненты-источники, у которых есть только выходы, и компоненты-приемники, имеющие только входы (см. рис. 4). Входы и выходы типизированные и программно защищены от соединения с неверным типом. Параметры позволяют пользователю влиять на работу алгоритма, заключенного в компоненте. Все компоненты должны наследовать от базового класса, но также можно выстраивать иерархию классов там, где это требуется.

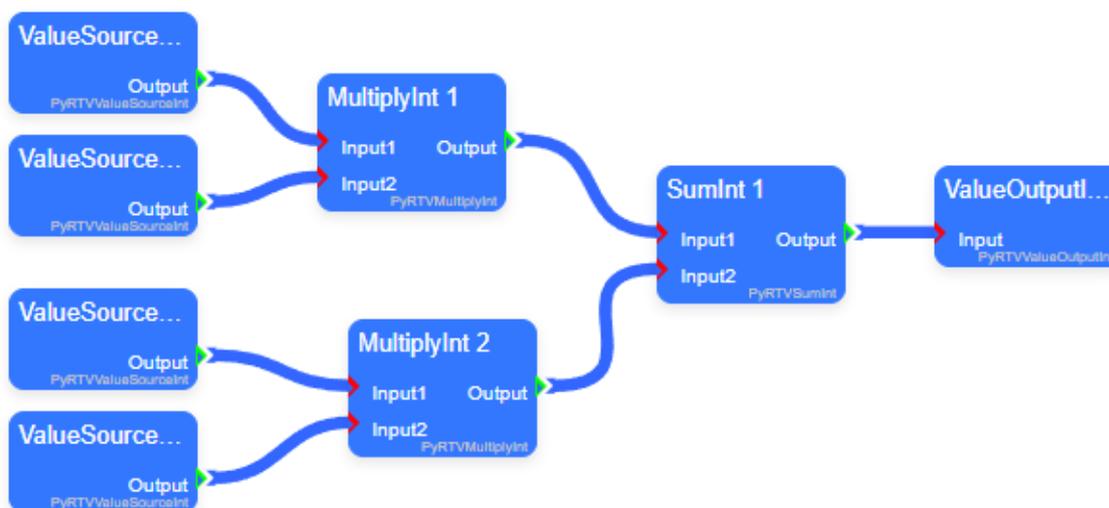


Рис. 4. Пример схемы соединений

Справа на рис. 2 пунктиром показан второй основной класс – PyRTVCollection. Он реализует коллекцию компонентов, туда можно добавлять и удалять компоненты, добавлять и удалять связи между компонентами, менять порядок вычисления компонентов. В коллекции создаются экземпляры классов компонентов, с которыми она работает, и связываются между собой. Один запуск функции расчета коллекции вызовет последовательный расчет всех добавленных в коллекцию компонентов, с передачей выходов на входы согласно системе связей.

**Пользовательский интерфейс (фронтенд).** Фронтенд используется пользователем для непосредственного управления процессом вычислений. Основное поле, в котором осуществляется сборка схем как на рис. 4 окружено элементами, в уменьшенном виде показанными на рис. 5.

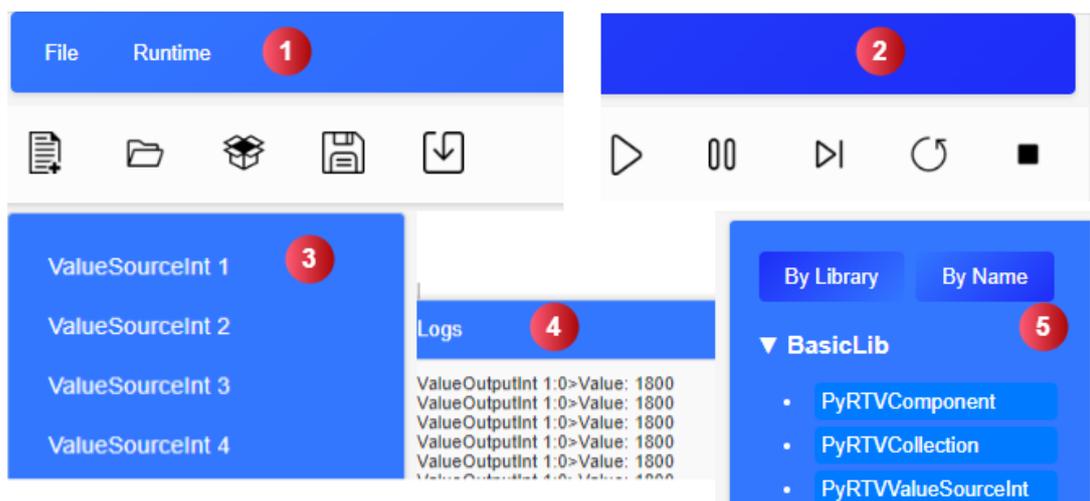


Рис. 5. Элементы пользовательского интерфейса

Элементы меню (1) отвечают за работу с файлами и управление процессом выполнения. Те же функции выполняют элементы панели инструментов под (1) и (2). В поле управления порядком расчета (3) присутствует возможность переставлять порядок вычисления компонентов и настраивать параметры компонента в нижней части окна (здесь не приводится). Окно логов (4) отвечает за последовательный вывод последних строк лога модели, которые перехватываются потоком расчета, сохраняются в стек и передаются в интерфейс по запросу. Справа располагается коллекция компонентов (6) в которой поддерживается наличие нескольких сворачиваемых библиотек, а при перетаскивании компонент будет добавлен на форму с параметрами по умолчанию, готовый к редактированию связей и параметров. Для построения связей между компонентами на их визуальном отображении добавлены соответствующие сокеты (см. рис. 4), перетягивание от выходного сокета к входному формирует связь, если они совпадают по типу, иначе выдается ошибка.

При построении интерфейса используется стек современных веб-технологий, который обеспечивает надежную и гибкую платформу для разработки. HTML5 [5] и CSS [6] обеспечивают структуру и стилизацию веб-страницы, адаптируя интерфейс к различным устройствам. JavaScript, в сочетании с библиотекой jQuery [7], реализует логику взаимодействия с пользователем, упрощая работу с DOM и создание интерактивных элементов. Для сохранения используется библиотека FileSaver.js [8].

**Заключение.** В работе описана разработка средства для визуального построения алгоритмов и их последовательного пошагового расчета. В целом, данный проект демонстрирует эффективное использование современных веб-технологий и библиотек для создания удобного и функционального интерфейса. Благодаря модульной архитектуре и использованию мощных инструментов, разработка и поддержка кода становятся более эффективными, обеспечивая высокую производительность и удобство использования.

*Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00697-24-01 от 03.04.2024 г. «Исследование методов и разработка технологий создания отладочно-моделирующих комплексов для функционального и поведенческого моделирования РТК и групп РТК» (FNRG-2022-0008 1021051101732-4-1.2.1;2.2.2).*

## Список литературы

1. Simulink – Simulation and model-based design. MATLAB [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
2. Unreal Engine 5.5 Documentation [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/understanding-the-basics-of-unreal-engine>
3. Bakhshiev, A.V., Fomin, I.S., Gundelakh, F.V., Demcheva, A.A., Korsakov, A.M. The architecture of a software platform for growing spiking neural networks simulator developing // Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1679(4) DOI 10.1088/1742-6596/1679/4/04200196.
4. Бахшиев А.В., Михайлов В.В. Программный комплекс для разработки систем технического зрения и принятия решений с динамически изменяемой модульной архитектурой / Робототехника и техническая кибернетика. №4(13)/2016. Изд. ЦНИИ РТК, 2016. – С. 38-42.
5. Официальная спецификация HTML5 [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://www.w3.org/TR/html5/>
6. Официальная спецификация CSS [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://www.w3.org/Style/CSS/>
7. Официальный сайт jQuery [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://jquery.com/>
8. Официальный сайт FileSaver.js [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://github.com/eligrey/FileSaver.js/>

**А.В. Чубарь**, к.т.н., доцент, alexchub@mail.ru

**Г.Л. Редкоус**, студент, redkous\_gleb@mail.ru

**А.Д. Мартыненко**, студент, samoletik201@gmail.com

**Е.А. Голубев**, студент, evgeniy\_golubev@internet.ru

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

## УПРАВЛЕНИЕ КОЗЛОВЫМ КРАНОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ, ВЫПОЛНЕННОЙ В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИ- РОВАНИЯ SIMINTECH

*Аннотация:* В статье рассматривается процесс создания математической модели, панели управления и 3D-визуализации козлового крана в среде динамического моделирования SimInTech. Приводится способ интеграции математической модели в SimInTech с системой на микроконтроллере в процесс удаленного управления реальным объектом.

*Ключевые слова:* динамическое моделирование, 3D-визуализация, интеграция, козловой кран, SimInTech, удаленное управление.

**A.V. Chubar**, Ph.D., docent, alexchub@mail.ru

**G.L. Redkous**, student, redkous\_gleb@mail.ru

**A.D. Martynenko**, student, samoletik201@gmail.com

**E.A. Golubev**, student, evgeniy\_golubev@internet.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## GANTRY CRANE CONTROL USING SIMINTECH DYNAMIC SIMU- LATION MODEL

*Abstract:* The article discusses the process of creating a mathematical model, control panel and 3D visualization of a gantry crane in the SimInTech dynamic modeling environment. A method for integrating a mathematical model in SimInTech with a microcontroller system and remote control of a real object is presented.

*Key words:* dynamic modeling, 3D visualization, integration, gantry crane, SimInTech, remote control.

В современном мире исследование практически любого технического объекта включает создание математической модели и процесс моделирования с использованием соответствующего программного обеспечения [1]. Основной задачей математического моделирования является прогнозирование

поведения реального объекта. После построения математической модели проводится проверка её обоснованности, в том числе адекватность воспроизведения на модели интересующих характеристик технического объекта [2].

В том случае, если модель адекватна объекту, на её основе можно синтезировать систему управления самим объектом, а также скорректировать параметры математической модели для получения большей точности теоретических расчетов.

В силу того, что в реальности объект управления находится на удалении от ПК или по другим объективным причинам связь по проводу невозможна, необходимо реализовать дистанционное управление.

Таким образом, целью статьи является показать возможности интеграции среды динамического моделирования SimInTech и системы на микроконтроллере в процесс дистанционного управления объектом с использованием его математической модели.

Для реализации поставленной цели используется примитивная модель козлового крана с функцией перемещения каретки по оси абсцисс и грузозахватного органа по оси аппликат.

Структурная схема объекта в целом показана на рис. 1.

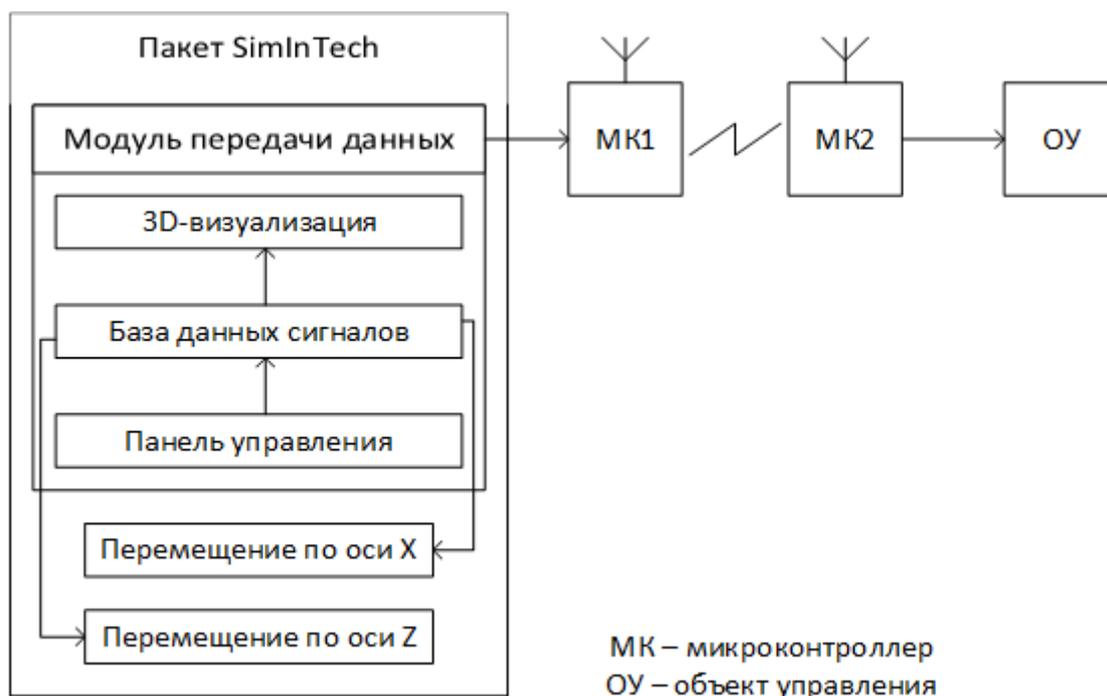


Рис. 1. Структурная схема

Модель SimInTech представляет собой пакет с тремя файлами формата «.prt» (модель автоматики общего вида). Файл «Модуль передачи данных» реализует передачу данных между базой данных проекта и МК1. В свою очередь, управляющие сигналы поступают в базу данных с панели управления, на которой расположены стрелочные приборы, управляющие положением

механизмов козлового крана. Так же из базы данных управляется 3D-модель, на которой в качестве отдельных моделей расположены несущая конструкция, каретка, грузозахватный механизм.

Связь между моделью и МК1 осуществляется со стороны SimInTech с помощью блока «Асинхронный обмен данными», со стороны МК1 используется USB-UART преобразователь, например, CH340.

Для беспроводной передачи данных между микроконтроллерами существует множество протоколов: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee и т.д. [3]. Для реализации дистанционной связи, а также упрощения и удешевления процесса разработки, был выбран модуль nrf24l01+, использующий собственный протокол радиосвязи. Модуль позволяет организовать локальную связь на расстоянии до 1100 метров на скорости 250 кбит/с в условиях прямой видимости [4].

Для программной реализации обмена данными были разработаны программы для МК1 и МК2, блок-схемы алгоритмов которых показаны на рис. 2-а и 2-б соответственно.

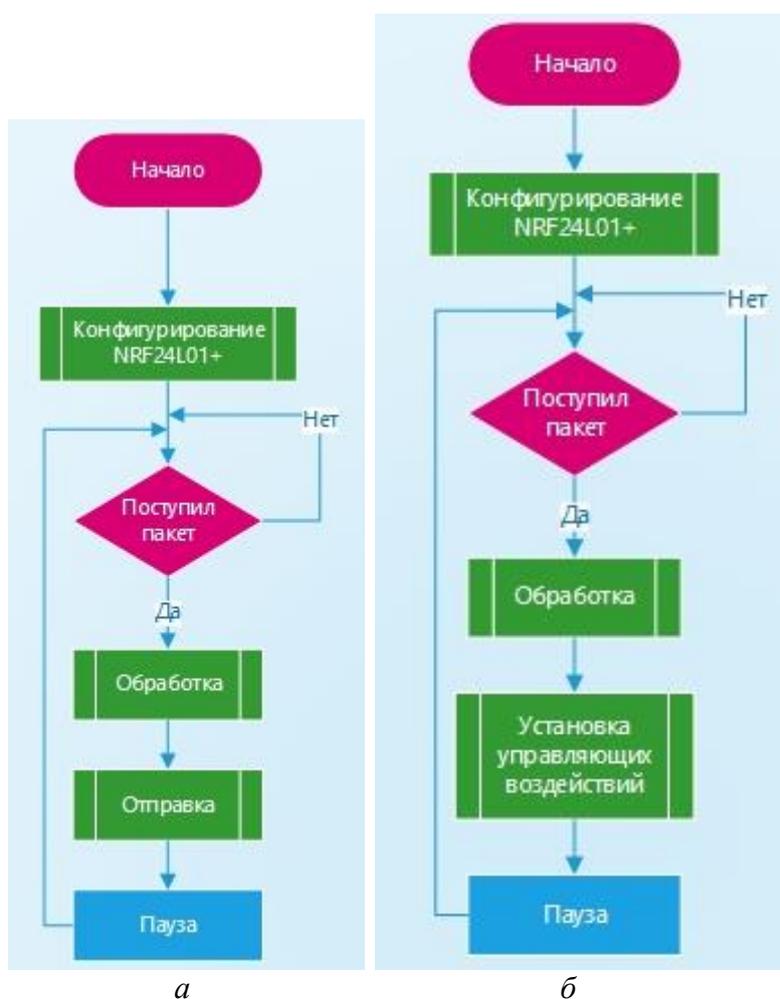


Рис. 2. Блок-схемы алгоритмов МК1 и МК2

Организация пакета в SimInTech показана на рис. 3.

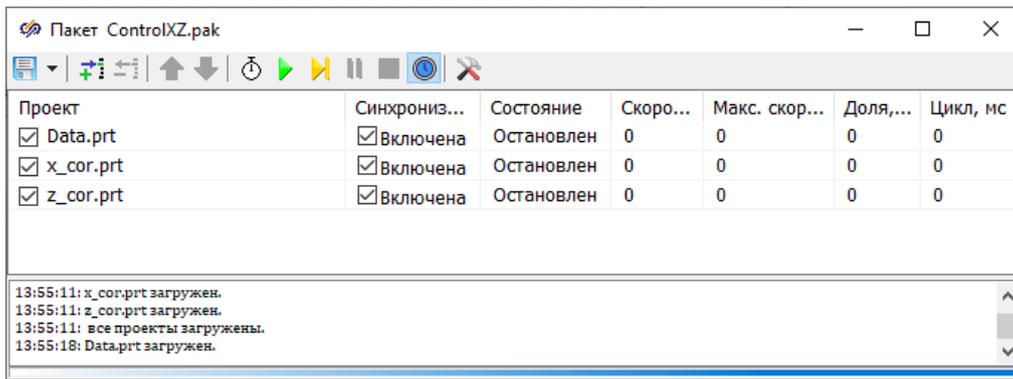


Рис.3. Пакет в SimInTech

Содержимое проектов из пакета (рис. 3.) показано на рис. 4-6.

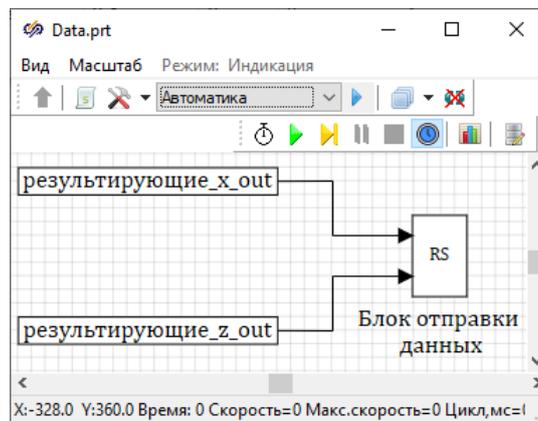


Рис. 4. Проект «Data»

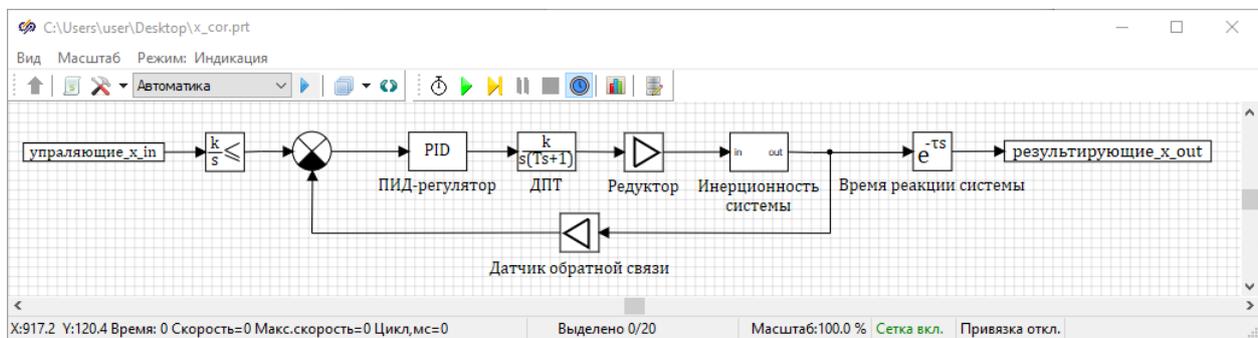


Рис. 5. Проект «x\_cor»

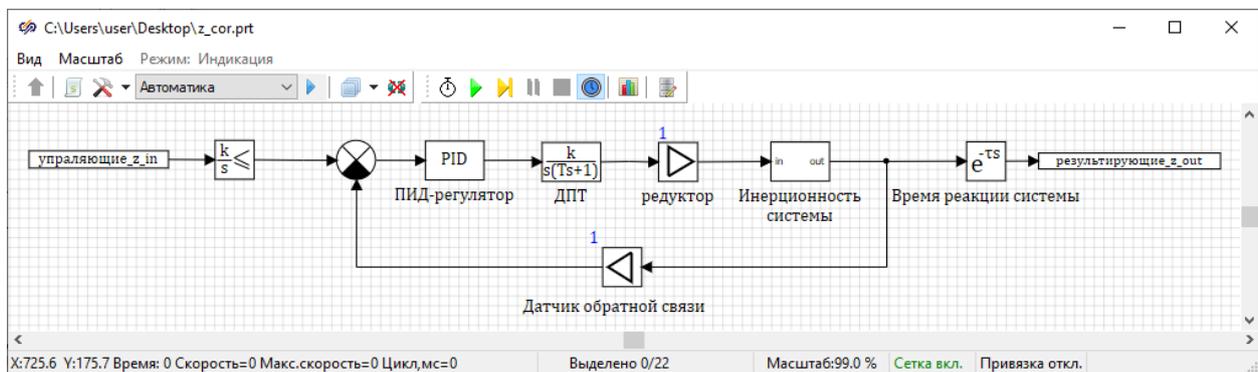


Рис. 6. Проект «z\_cor»

Панель управления и окно визуализации представлены на рис. 7 и рис.8 соответственно.

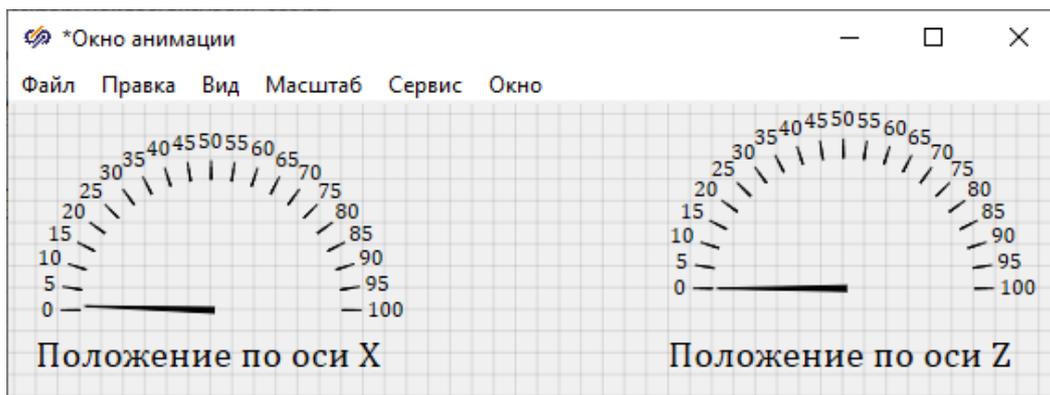


Рис. 7. Панель управления

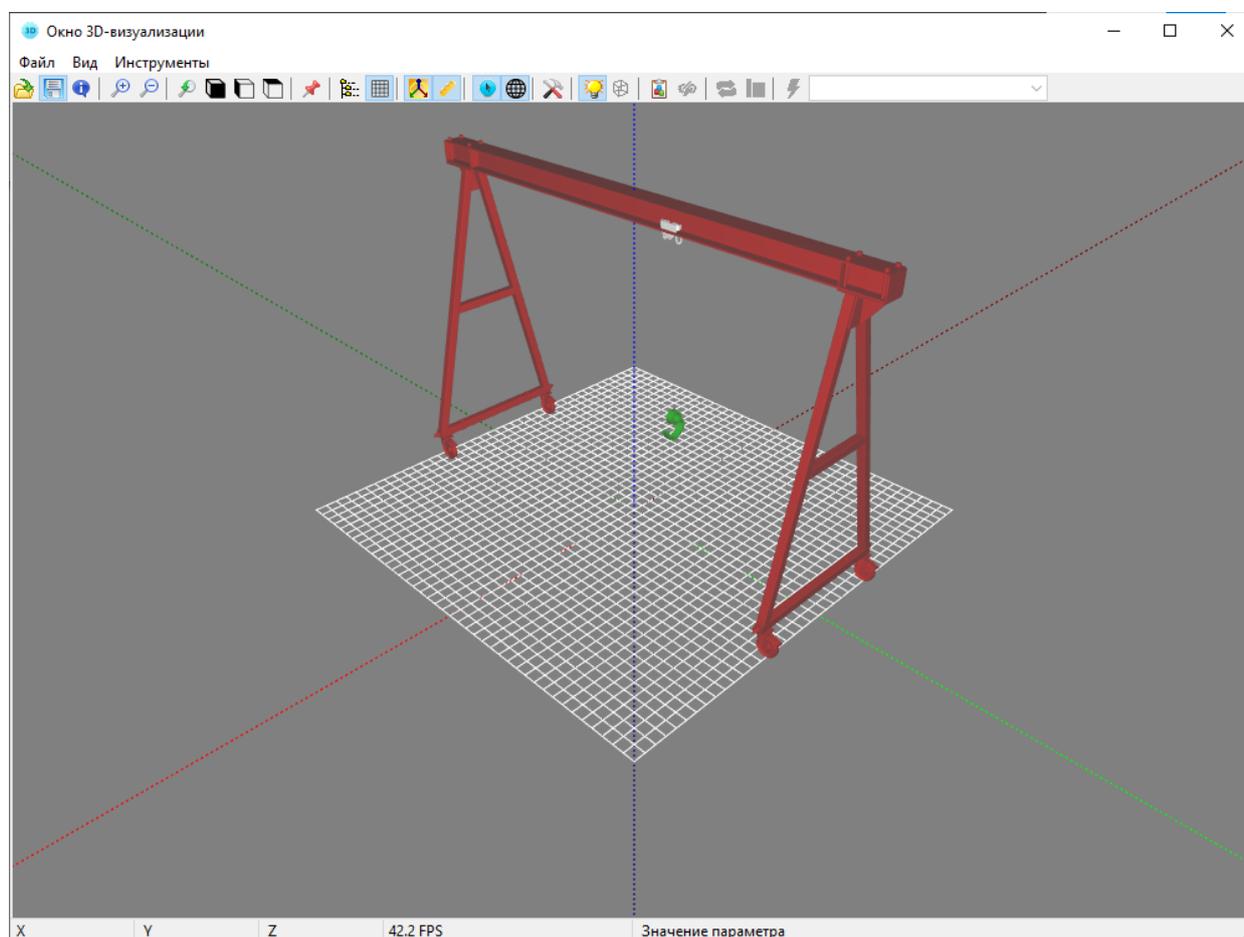


Рис. 8. Окно 3D-визуализации

Таким образом, описан способ интеграции созданной компьютерной модели с системой на микроконтроллере для удалённого управления упрощённой моделью козлового крана.

## Список литературы

1. Яковлева М.С. имитационное моделирование: подходы, этапы, существующие программные средства // актуальные проблемы авиации и космонавтики. - 2016. - №12. - С. 129-131. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_28146302\\_29146096.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_28146302_29146096.pdf)
2. Павлова Е.С. математическое моделирование технических объектов // Карельский научный журнал. - 2014. - №4 (9). - С. 176-178. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_22844524\\_27491280.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_22844524_27491280.pdf)
3. Лихолетова М.В., Устюгов В.А. Обзор современных решений для построения микролокальных сетей // JUVENIS SCIENTIA. — 2017. — № 4. — С. 8-11. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_29127743\\_57614419.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_29127743_57614419.pdf)
4. Лихолетова М.В., Устюгов В.А. Технический обзор микросхемы приемо-передатчика NRF24L01+ // JUVENIS SCIENTIA. — 2016. — № 6. — С. 4-5. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_27344574\\_45990884.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_27344574_45990884.pdf)

**И.В. Шардыко**, научный сотрудник, i.shardyko@rtc.ru  
Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики». г. Санкт-Петербург, Россия

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ ЖЁСТКОСТИ ШАРНИРОВ МАНИПУЛЯТОРА В КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧАХ

*Аннотация:* статья посвящена оптимизации физической жёсткости шарниров манипулятора с возможностью изменения величины жёсткости. С учётом нелинейной связи пространства шарниров и пространства задач манипулятора, реализовать произвольную жёсткость рабочей точки невозможно, так как матрица жёсткости шарниров всегда диагональна. Возникает вопрос, какие значения жёсткости шарниров обеспечат максимальное приближение результирующей жёсткости рабочей точки к заданной, на что также влияет выбор типа регулятора манипулятора. Предложена процедура оптимизации для одного типа регулятора в задаче столкновения с жёсткой стенкой, проведено исследование эффекта от оптимизации методом компьютерного эксперимента.

*Ключевые слова:* робототехника, манипуляторы, система управления, приводы с переменной упругостью, оптимизация, импедансное управление.

**I.V. Shardyko**, research scientist, i.shardyko@rtc.ru  
The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg, Russia

## VARIABLE PHYSICAL STIFFNESS OPTIMIZATION OF ROBOTIC ARM IN CONTACT TASKS

*Abstract:* The article is devoted to stiffness optimization of the robotic arm joints whose physical stiffness can be regulated. Due to nonlinear nature of the relation between the joint space and the Cartesian task space of a robotic arm, arbitrary task space stiffness cannot be realized, because the joint space stiffness matrix is strictly diagonal. So the question arises, which joint stiffness values will make the actual task space stiffness as close to the required task space stiffness as possible, which also depends on the choice of the controller. In the paper an optimization procedure for one widespread type of controller is proposed for the task of collision with a stiff wall, and the effect of optimization is investigated in simulation.

*Key words:* robotics, robotic arms, control system, variable stiffness actuators, optimization, impedance control

Одним из основных направлений развития роботов в последние десятилетия стали роботы с механически упругими шарнирами [1], обеспечивающие бóльшую контактную безопасность при взаимодействии со средой и с человеком. Контактные усилия вместо микродеформаций в традиционных фланцах вызывают деформации пружин, достаточные для измерения датчиками положения. Через управление величиной деформации также удобно реализовывать и импедансное управление [3]. Для повышения адаптивных свойств роботов создаются различные варианты шарниров с переменной жёсткостью, способных изменять выходную жёсткость во время работы, для чего в каждом шарнире требуется два двигателя. Такие шарниры возникли в начале 2000х, получив наименование шарниров с переменной упругостью/жёсткостью, новые прототипы активно предлагались в 2010е и появляются по сей день. Обзор ранних разработок, особенности классификации, технического описания и применения на практике можно найти в [6].

Возможность регулирования жёсткости в физически доступном диапазоне ставит вопрос о выборе оптимальных значений в зависимости от задачи, как правило, путём реализации жёсткости рабочей точки манипулятора в декартовом пространстве. Например, в [7] для манипулятора DLR Hand Arm System был предложен регулятор, при применении которого статическая жёсткость манипулятора определялась совместно значениями физической и виртуальной жёсткости, для чего была предложена двухэтапная оптимизация. Однако, впоследствии был разработан регулятор ESл – импедансный регулятор с сохранением упругой структуры (СУС) [8], - в котором статическая жёсткость определяется исключительно коэффициентами регулятора.

В настоящей работе влияние оптимизированной жёсткости шарниров рассмотрено в задаче столкновения манипулятора с жёсткой стенкой в рабочей точке. Исследование проводилось методом компьютерного моделирования в Matlab-Simuink.

### Математическая модель манипулятора с упругими шарнирами

Упругий манипулятор может быть упрощённо описан моделью с допущениями Спонга [10], представляющей собой систему ДУ:

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = K_J(\theta - q) = \tau \\ B\ddot{\theta} + K_J(\theta - q) = \tau_m \end{cases}, \quad (1)$$

где  $q$  – обобщённые координаты (углы поворота шарниров),  $M(q)$  – матрица инерции жёсткого манипулятора,  $C(q, \dot{q})$  – матрица центробежных и Кориолисовых сил,  $g(q)$  – вектор гравитационных сил,  $K_J$  – матрица жёсткости манипулятора,  $\theta$  – углы поворота двигателей, приведённые к выходному валу шарниров,  $\tau$  – упругий момент,  $B$  – матрица инерции роторов двигателей,  $\tau_m$  – вектор крутящих моментов двигателей.

Жёсткость рабочей точки манипулятора в декартовом пространстве определяется как

$$K_C = -\partial f / \partial x, \quad (2)$$

где  $f$  – внешнее усилие,  $x$  – смещение РТМ.

С другой стороны, матрица жёсткости шарниров определяется как

$$K_J = \partial \tau / \partial q, \quad (3)$$

в то время как момент шарниров и внешнее усилие связаны через якобиан манипулятора  $J$ :

$$\tau = J^T f, \quad J(q) = (\partial x(q)) / \partial q \quad (4)$$

Если взять бесконечно малое смещение рабочей точки  $\Delta x = x_d - x$ , рассчитать соответствующую силу упругости, и с учётом (2) и (4) подставить результат в (3), то жёсткость шарниров можно записать как

$$K_J = J(q)^T K_C J(q) - \frac{\partial J(q)^T}{\partial q} K_C \Delta x, \quad (5)$$

при этом локально вблизи положения равновесия второе слагаемое можно принять равным нулю и использовать формулу только с первым слагаемым. Тогда можно достаточно просто выразить жёсткость рабочей точки:

$$K_C = (J(q)^T K_J^{-1} J(q))^{-1} \quad (6)$$

### Регулятор с сохранением упругой структуры

Так как упругость порождает колебания, для их минимизации и обеспечения удовлетворительного качества движения было разработано множество алгоритмов управления в рамках различных подходов, например, [13]. Для роботов с низкой жёсткостью шарниров интерес представляют алгоритмы с сохранением упругой структуры (рис. 1), отличающиеся минимальным изменением собственной динамики системы, низкой чувствительностью к параметрам модели и интуитивной настройкой, где параметры регулятора аналогичны физическим величинам.

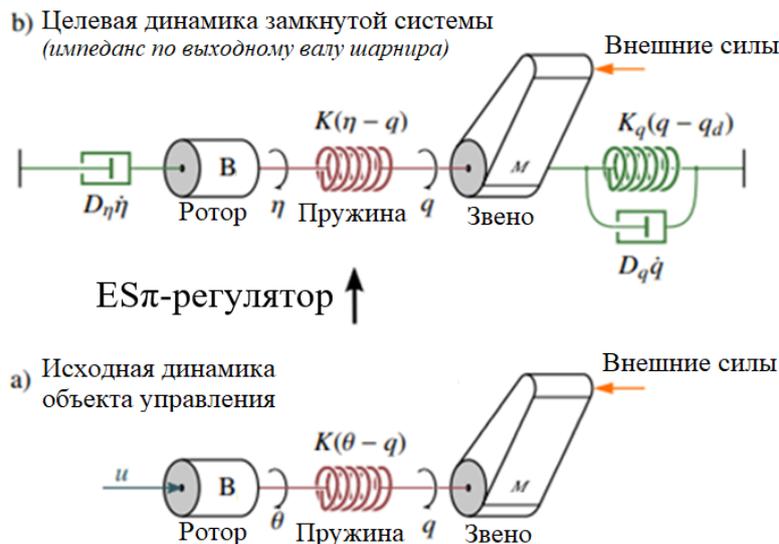


Рис. 1. Визуальное представление преобразования модели

Идея регулятора заключается в переходе к эквивалентной модели, в которой энергия упругих колебаний шарниров диссипируется виртуальным демпфером либо в подсистеме робота, либо в подсистеме двигателя (первое и второе уравнение системы (1) соответственно). В случае импедансного регулятора демпфер размещается в уравнении двигателя. При этом в уравнении робота размещается виртуальная пружина с демпфером, выражающие желаемый импеданс при взаимодействии робота с внешними объектами.

Чтобы перейти к эквивалентной модели, вводится новая переменная ( $\eta$ ) - эквивалентное положение двигателя, а для реализации движения по траектории удобно заменить угол поворота шарниров на отклонение от заданного угла поворота. Тогда замкнутая эквивалентная модель принимает вид:

$$\begin{cases} M\ddot{\varphi} + C\dot{\varphi} + K_J(\eta - \varphi) = \tau_x \\ B\ddot{\eta} + K_J(\eta - \varphi) = u = -D_\eta \dot{\eta} \end{cases} \quad (7)$$

где  $\varphi = q - q_d$  - отклонение от заданного угла,  $\tau_x$  - момент, соответствующий желаемому импедансу,  $u$  - управляющий сигнал,  $D_\eta$  - коэффициент демпфирования в цепи двигателя. Момент импеданса рассчитывается как

$$\tau_x = -K_x \varphi - D_x \dot{\varphi}, \quad (8)$$

где  $K_x, D_x$  - матрицы виртуальной жёсткости и демпфирования рабочей точки.

Сравнение систем (1) и (7) позволяет найти уравнения связи между оригинальной величиной положения двигателя и эквивалентным положением, в результате чего определяется итоговое уравнение работы регулятора:

$$\begin{cases} \tau_m = u + B\ddot{\eta} + BK_J^{-1}(\dot{\eta} + \ddot{\eta}) + n_1 + n_2 \\ n_1 = M\ddot{\eta} + C\dot{\eta}, n_2 = g + \tau_x \end{cases} \quad (9)$$

Как следует из (7), в установившемся режиме отклонение манипулятора определяется коэффициентом виртуальной жёсткости, следовательно, влияние механической жёсткости сохраняется только во время переходного процесса, определяя характер и величину динамической ошибки.

### Оптимизация жёсткости шарниров

Матрица декартовой жёсткости в общем виде недиагональная, а значит таковой должна быть и матрица жёсткости шарниров, что невозможно. Однако, можно определить некий оптимум для конкретных величин жёсткости шарниров, который будет зависеть от выбранного типа регулятора и критериев качества управления. Например, в работе [7], выбирается взвешенная норма Фробениуса, которая преобразуется в евклидову норму для применения метода наименьших квадратов с учётом физических ограничений. При этом при выборе регулятора как в [7] жёсткость шарниров влияет как на динамическую ошибку, так и на ошибку в установившемся режиме в ответ на действие внешней силы, из чего следует необходимость второго этапа оптимизации в виде поиска оптимальной матрицы виртуальной жёсткости.

В случае представленного выше регулятора СУС, статическая ошибка, как следует из (7), определяется только коэффициентами регулятора, но в динамическую ошибку вносит вклад и упругость шарниров. Таким образом, матрица жёсткости  $K_x$  задаётся непосредственно исходя из особенностей задачи, для оптимизации же жёсткости шарниров можно выбрать критерий максимального приближения  $K_C$  к  $K_x$ , т.е. требуется минимизировать функцию

$$\rho = \|K_C(k_J) - K_x\|, \quad (10)$$

где  $k_J$  – вектор значений жёсткости шарниров, с учётом ограничения

$$k_J^{\min} < k_{Ji} < k_J^{\max} \quad (11)$$

Нормой оптимизации также берётся взвешенная норма Фробениуса:

$$\|A\|_F^G = \sqrt{\sum_{i,j} g_{ij} a_{ij}^2}, \quad (12)$$

где  $g_{ij}$  – элементы весовой матрицы  $G$ . Для применения метода наименьших квадратов функция оптимизации представляется в евклидовой норме как

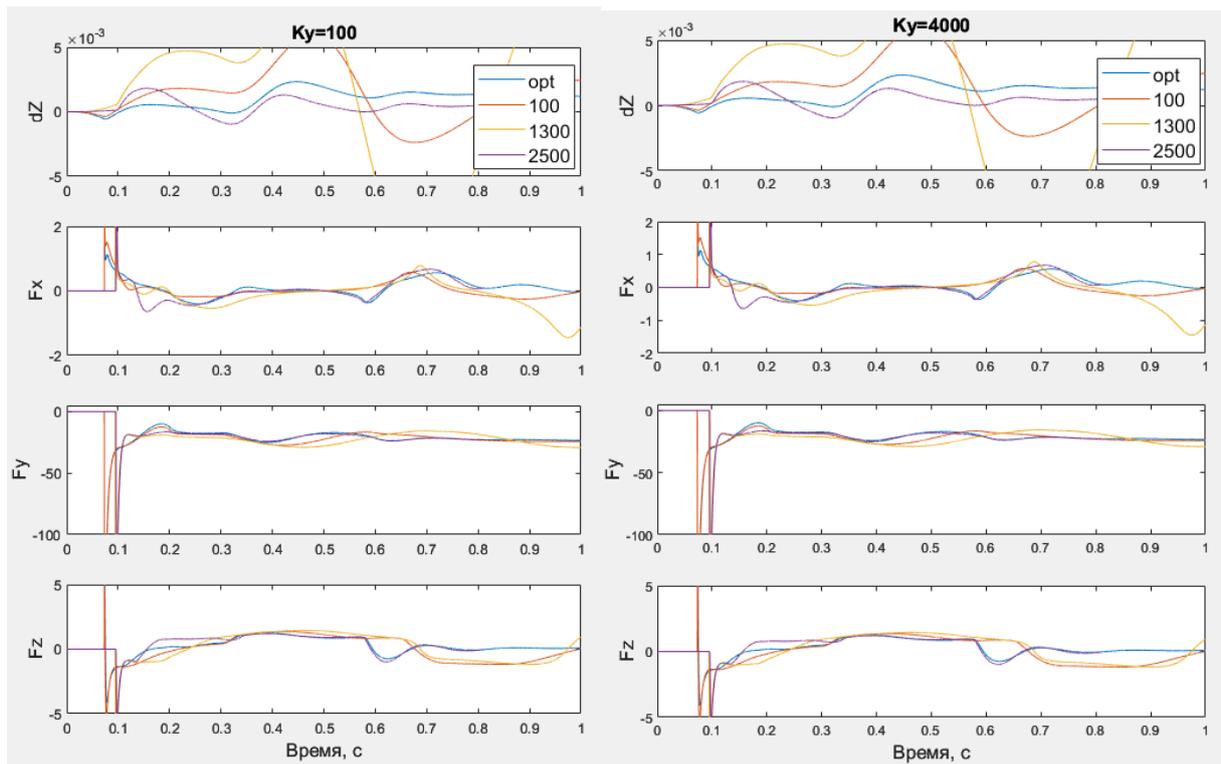
$$\|A \cdot k_J - b\|_2^G. \quad (13)$$

Матрица  $A$  и вектор  $b$  содержат элементы матрицы (6), дифференцированные по вектору жёсткости, и элементы матрицы желаемой декартовой жёсткости, соответственно, записанные в вектор-столбец. Что касается весовой матрицы, возникает желание сформировать матрицу максимально диагональной, максимизировав веса диагональных элементов. Однако из этого следует, что внедиагональные элементы должны стремиться к нулю, что автоматически смещает оптимум в нижние значения допустимого диапазона. В связи с этим, все элементы весовой матрицы приняты равными 1.

### Описание компьютерной модели и эксперимента

В качестве объекта исследования выбран шестистепенной манипулятор с классической угловой кинематической схемой, подобной манипулятору PUMA. Исследование проводилось в среде Matlab-Simulink, где была реализована динамическая модель шестистепенного манипулятора с ШПУ.

Эксперимент заключался в движении манипулятора в направлении жёсткой стенки таким образом, чтобы столкновение произошло вдоль оси  $Y$  рабочей точки, при этом заданное значение контактной силы составляло 20 Н. После столкновения было задано время на приход в установившийся режим (0,05 с). Далее манипулятор должен был обеспечить движение рабочей точки с поддержанием заданного усилия контакта вниз (против оси  $Z$ ) на расстояние 2 см за 0,2 с (скорость 10 см/с). Эксперимент был проведён для двух случаев заданной жёсткости по оси  $Y$  – 100 Н/м и 4000 Н/м, результаты которых показаны на рис. 2. Жёсткость по двум другим линейным осям была задана равной 20000 Н/м, жёсткость по осям вращения – 2000 Н·м/рад. Также рассматривались четыре варианта установки жёсткости шарниров: оптимальный вариант, а также 100, 1300 и 2500 Н·м/рад.



2. Реакция манипулятора на столкновении с жёсткой стенкой в направлении Y с различной заданной жёсткостью

На графиках выше первая строка показывает ошибку исполнения траектории по оси Z, три последующие строки – величину усилия по осям X, Y, Z соответственно. По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы. При низких значениях жёсткости шарниров процесс оказывается медленным и имеет тенденцию к потере устойчивости. Вариант с высокой жёсткостью близок по результатам к оптимальной настройке с незначительными отличиями. Стоит заметить, что несмотря на отсутствие явного выигрыша варианта с оптимальной жёсткостью у «жёсткого» варианта, определить, какие значения жёсткости шарниров будут давать приемлемое качество, возможно только при большом инженерном опыте, при ошибке же можно получить ухудшение качества вплоть до потери устойчивости. Таким образом, оптимизация позволяет обеспечить приемлемое качество, не накладывая требований к квалификации персонала.

## Заключение

В статье рассмотрен вопрос оптимизации жёсткости шарниров последовательного манипулятора, жёсткость которых может регулироваться в определённых пределах, и её практической применимости. Так как оптимизация как таковая зависит от регулятора манипулятора, для определённости был выбран импедансный регулятор с сохранением упругой структуры (ЕСл). Была разработана процедура оптимизации и проверена её работоспособность на примере шестистепенного манипулятора в рамках компьютерного экспе-

римента по столкновению с жёсткой стенкой с поддержанием заданного усилия контакта. Результаты показали, что оптимизация не даёт выигрыша качества по сравнению с лучшими вариантами однородной настройки, но гарантирует стабильно высокое качество вне зависимости от изначальной настройки, не требуя участия квалифицированного специалиста, в том числе допуская автоматическую работу. Дальнейшие исследования предполагается вести в направлении подтверждения результатов на физических макетах.

*Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России на 2024 год № 075-00697-24-00 "Исследования конструкций и разработка методов управления мехатронными узлами с переменной жёсткостью" (FNRG-2022-0009, регистрационный номер 1021060307688-8-2.2.2).*

## Список литературы

1. Pratt J., Krupp B., Morse C. Series elastic actuators for high fidelity force control // *Industrial Robot: An International Journal*. – 2002. – Vol. 29. – №3. – pp. 234-241.
2. Pratt G. A. et al. Late motor processing in low-impedance robots: Impedance control of series-elastic actuators // *Proceedings of the 2004 American control conference*. – IEEE, 2004. – VOL.4. – pp. 3245-3251.
3. Grioli G. et al. Variable stiffness actuators: The user's point of view // *The International Journal of Robotics Research*. – 2015. – Vol. 34. – №6. – pp. 727-743.
4. Petit F., Albu-Schäffer A. Cartesian impedance control for a variable stiffness robot arm // *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. – IEEE, 2011. – С. 4180-4186.
5. Keppler M. et al. Elastic structure preserving impedance (ES $\pi$ ) control for compliantly actuated robots // *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. – IEEE, 2018. – С. 5861-5868.
6. Avila-Becerril S., Loría A., Panteley E. Global position-feedback tracking control of flexible-joint robots // *2016 American Control Conference (ACC)*. – IEEE, 2016. – pp. 3008-3013.

## МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА ПО ЗАШУМЛЕННЫМ ТРЕХМЕРНЫМ МОДЕЛЯМ

*Аннотация:* В докладе описан метод формирования программы движения многозвенных манипуляторов (ММ) с использованием зашумленных трехмерных моделей объектов работ, полученных с помощью СТЗ. Особенностью предложенного метода является автоматическое разбиение траектории движения рабочих инструментов (РИ) ММ, проложенной по поверхности трехмерной модели неизвестного заранее объекта, на набор элементарных траекторий (прямых и дуг окружности). Это позволяет формировать программу движения, состоящую из ограниченного числа команд, что обеспечивает сглаживание шумов, которые содержатся в трехмерной модели объекта работ.

*Ключевые слова:* многозвенный манипулятор, системы технического зрения, трехмерные модели, RANSAC.

D.A. Yukhimets, Dr.of Scn., undim@iacp.dvo.ru  
Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, Russia

## THE METHOD OF AUTOMATIC GENERATION INDUSTRIAL MANIPULATOR PROGRAM BASED ON NOISED THREE-DIMENSIONAL MODELS

*Abstract:* The report describes a method for generation a motion program for multi-link manipulators (MM) using noisy three-dimensional models of robot objects obtained using computer vision system (CVS). A feature of the proposed method is the automatic division of the trajectory of the working tools (WT) MM, laid on the surface of a three-dimensional model of an object unknown in advance, into a set of elementary trajectories (straight lines and circular arcs). This allows forming a motion program consisting of a limited number of commands, which ensures the smoothing of noise contained in the three-dimensional model of the object of work.

*Key words:* multy-link manipulator, computer vision system, 3D-models, RANSAC.

В настоящее время актуальной является задача использования промышленной робототехники для автоматизации выполнения различных технологических операций (сварка, шлифовка, механообработка и т.д.) для мелкосерийных или уникальных объектов. Одна из проблем, которые возникают в этом случае – это сложность подготовки рабочего пространства промышленного манипулятора (ПМ) при частой смене объектов работ, которые заранее могут быть неизвестны, а также неизвестны их САД-модели. В этом случае возникает задача формирования программы движения на основе трехмерной модели рабочего пространства ПМ, которую формирует система технического зрения (СТЗ) ПМ. При этом проблемой является большое количество вершин в полученной модели и наличие шумов измерений, что не позволяет напрямую формировать программу движения рабочего инструмента (РИ), используя полученные вершины модели.

Одним типом подходов, позволяющих формировать траектории движения РИ ПМ на основе зашумленных моделей является использование различных модификаций алгоритма ICP (Iteration closest point) [1]. Однако такие методы могут быть слабо применимы для моделей, имеющих большое количество пропусков. Кроме того, часто различные операции требуется выполнять с объектами, модель которых заранее неизвестна, что делает указанные методы неприменимыми.

В случае, когда модель объекта работ заранее неизвестна, возникает задача формирования траекторий движения РИ вдоль поверхности этого объекта с использованием его трехмерной модели, полученной с помощью СТЗ. При этом основной сложностью является то, что сформированные траектории будут содержать множество базовых точек, соответствующих количеству полигонов модели, по которым проходят траектории. Это негативно сказывается на точности выполнения операций, так как указанная траектория будет содержать шумы модели, а ориентация нормали к поверхности этой модели, на основе которой будет задаваться ориентация РИ, будет произвольно меняться. Кроме того, частая смена направления движения и ориентации РИ будет приводить к сложностям в стабилизации ПА в процессе работы ММ и тем самым ухудшать качество выполняемых технологических операций. Существующие подходы к автоматическому формированию траекторий движения РИ ПМ вдоль поверхности трехмерных моделей [2-4], либо имеют сложную реализацию, требующую настройку для каждого типа модели, или чувствительны к шумам, содержащимся в моделях, что не позволяет обеспечить заданную точность формирования траекторий.

Поэтому для обеспечения точного выполнения операций необходимо формировать траекторию движения РИ ММ на основе небольшого количества участков, которые аппроксимируют требуемую траекторию движения

вдоль поверхности трехмерной модели с помощью элементарных траекторий, и которые могут быть точно отработаны ММ.

### Постановка задачи

В работе рассматривается трехмерная полигональная модель обрабатываемой детали, полученная с помощью системы технического зрения АНПА. Указанная модель в общем виде описывается с помощью двух массивов данных:

- 1) массив  $V \in R^N, V_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ , содержащий координаты вершин трехмерной модели в системе координат, связанной с базой подводного ММ;
- 2) массив  $P \in R^M, P_i = (n_i, m_i, l_i)$ , содержащий тройки с номерами вершин из массива  $V$ , составляющих треугольники модели.

Трехмерная модель содержит шумы, которые определяются точностью СТЗ ПА, а также точность стабилизации АНПА в процессе получения модели. При этом будем считать, что исходная трехмерная модель подводного объекта неизвестна.

Начало и конец траектории движения РИ задается оператором. Для этого на сформированной с помощью СТЗ модели задаются две точки  $X_s$  и  $X_f$ , которые соответствуют начальной и конечной точке траектории (рис. 1а). Сама траектория задается как линия пересечения секущей плоскости с поверхностью сканированной детали. Расположение указанной плоскости задается начальной и конечной точкой траектории, а также дополнительной точкой  $X_a$ , задающей ориентацию этой плоскости.

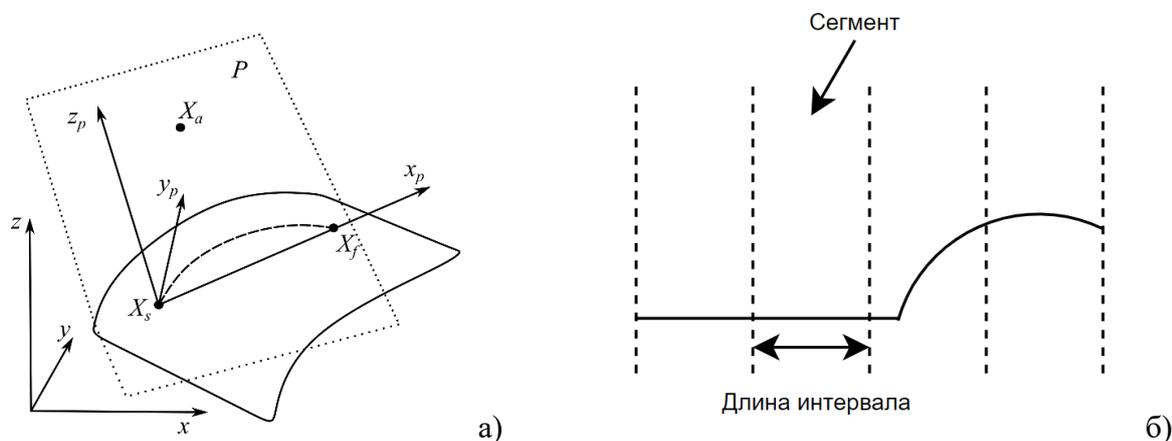


Рис.1. Принцип задания траектории движения РИ вдоль поверхности сканированной модели (а), разбиение исходного массива точек на интервалы.

Указанная траектория состоит из набора точек, находящихся на пересечении секущей плоскости и ребер полигонов трехмерной модели, количество которых может быть велико. Это усложняет формирование программы движения ПМ, содержащей большое количество точек, а также ее отработку, так как ПМ будет часто менять характер движения, что существенно снизит

качество выполнения операций. Кроме того, шумы модели приводят к тому, что ориентация ее полигонов может меняться случайным образом и, соответственно, становится сложно сформировать корректную ориентацию РИ используя нормали к поверхности сканированной модели.

Для решения описанной проблемы необходимо всю траекторию представить в виде отдельных участков (рис 1б), которые могут быть аппроксимированы элементарными траекториями (прямые и дуги окружностей), что позволит представить их в программе движения РИ с помощью команд, реализующих стандартные интерполяционные алгоритмы, обеспечивающие плавное и непрерывное движение РИ.

### Описание алгоритма формирования траекторий движения РИ

Предлагаемый алгоритм формирования траекторий движения РИ ПМ состоит из следующих последовательно выполняющихся шагов.

1. Поиск всех точек пересечения секущей плоскости с ребрами полигонов трехмерной модели подводного объекта.
2. Сортировка найденных точек траектории в порядке следования от начальной до конечной точки траектории.
3. Разбиение траектории на участки заданной длины и определение характера аппроксимирующей траектории для каждого участка.
4. Укрупнение полученных участков и расчет точек сопряжения отдельных элементарных траекторий.
5. Пересчет координат элементарных траекторий в систему координат ПМ.

Далее рассмотрим все указанные этапы.

Для упрощения всех расчетов координаты точек из массива  $V$  пересчитываются в систему координат, связанную с секущей плоскостью. Начало этой системы координат совпадает с начальной точкой  $X_s$ , ее ось  $x_p$  направлена от начальной точки  $X_s$  траектории к конечной точке  $X_f$ , ось  $z_p$  направлена в сторону дополнительной точки  $X_a$ , а ось  $y_p$  дополняет систему координат до правой.

$$I = \frac{X_f - X_s}{\|X_f - X_s\|}, J = \frac{[A_p, B_p, C_p]^T}{\|(A_p, B_p, C_p)\|}, K = I \times J, A_p = \begin{vmatrix} y_s & z_s & 1 \\ y_f & z_f & 1 \\ y_a & z_a & 1 \end{vmatrix}, B_p = \begin{vmatrix} z_s & x_s & 1 \\ z_f & x_f & 1 \\ z_a & x_a & 1 \end{vmatrix},$$

$$C_p = \begin{vmatrix} x_s & y_s & 1 \\ x_f & y_f & 1 \\ x_a & y_a & 1 \end{vmatrix}, R = [I \quad J \quad K], \quad (1)$$

где  $X_s = (x_s, y_s, z_s)^T$ ,  $X_f = (x_f, y_s, z_f)^T$ ,  $X_a = (x_a, y_a, z_a)^T$ .

Пересчет координат точек из массива  $V$  осуществляется с помощью выражений:

$$V_{pi} = R^T(V_i - X_s).$$

В результате формируется новый массив  $V_p$  который далее используется в расчетах. Особенностью выбранной системы координат является то, что траектория движения РИ образованная пересечением секущей плоскости с поверхностью сканированной модели в этой системе координат расположена в плоскости  $x_p z_p$ . Поэтому поиск ребер модели, которые пересекают указанную плоскость, заключается в поиске таких ребер, вершины которых имеют разные знаки по координате  $y_p$ .

Расчет координат точки  $X_c = (x_c, y_c, z_c)^T$  пересечения ребра модели с секущей плоскостью, уравнение которой в системе координат  $x_p y_p z_p$  имеет вид  $y_p = 0$ , выполняется по следующим формулам:

$$x_c = x_{p1} - \frac{y_{p1} a_x}{a_y}, y_c = 0, z_c = z_{p1} - \frac{y_{p1} a_z}{a_y}, \quad (3)$$

где  $a_x = x_{p2} - x_{p1}$ ,  $a_y = y_{p2} - y_{p1}$ ,  $a_z = z_{p2} - z_{p1}$ .

Полученные точки формируют массив  $T_p$ , в котором они расположены в случайном порядке, что не дает возможности анализировать характер траектории. Поэтому на следующем шаге точки массива  $T_p$  должны быть упорядочены в порядке следования от начальной точки траектории к последней и формируется массив  $T_p^S$ .

Далее из массива  $T_p^S$  необходимо выделить ограниченное количество элементарных траекторий, которые будут соответствовать командам движения ММ ПА. То есть траектория должна представлять из себя набор последовательно соединенных отрезков и дуг окружности, которые будут считаться элементарными траекториями.

Для этого траектория, заданная массивом  $T_p^S$ , разбивается на участки заданной длины (сегменты) и вычислим начала и концы этих интервалов.

После этого последовательно проводится анализ полученных сегментов и формируются параметры наиболее подходящей элементарной траектории для каждого сегмента. Указанный анализ и выбор параметров траекторий проводятся с помощью алгоритма RANSAC [5].

Набор точек, составляющих сегмент, подается на вход алгоритма RANSAC, который определяет соответствие заданного набора зашумленных данных определенной гипотезе, т.е. соответствие сегмента отрезку прямой линии или дуге окружности. Более достоверной считается та гипотеза, которой соответствует большее количество точек сегмента. Алгоритм выдает на выходе параметры наиболее подходящей модели, удовлетворяющей данной гипотезе, и соответствующую ошибку – суммарное отклонение от модели каждой точки по модулю. Принцип работы алгоритма RANSAC для выявления наиболее подходящей модели для каждого сегмента показан на рис. 2.

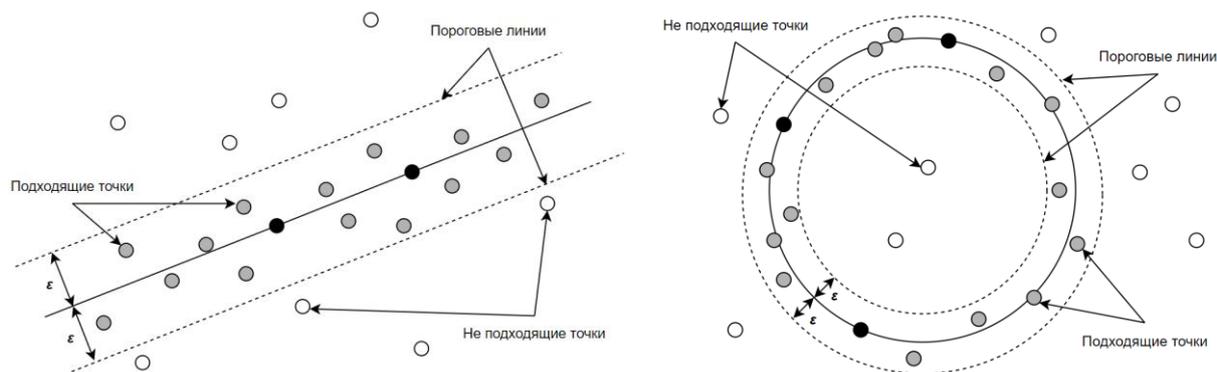


Рис.2. Пример работы алгоритма RANSAC

Таким образом, после последовательного прохождения по всем сегментам, получится список сегментов со своими параметрами, каждый из которых представляет свою элементарную траекторию.

Для проверки предложенного алгоритма было проведено математическое моделирование на трехмерных моделях, полученных с помощью реальной СТЗ ПМ.

Результаты моделирования показали, что предложенный метод позволяет в автоматическом режиме находить особенности в трехмерных моделях заранее неизвестных объектах, полученных с помощью СТЗ ПМ, и формировать на основе этих особенностей программы движения РИ ПМ с минимальным числом команд.

## Заключение

В докладе представлен формирование программы движения РИ ПМ с использованием зашумленных трехмерных моделей подводных объектов, полученных их СТЗ. Особенностью предложенного метода является автоматическое выделение в траектории движения РИ ПМ, проложенной по поверхности трехмерной модели неизвестного заранее объекта, набора элементарных траекторий (прямых и дуг окружности). Это позволяет увеличить точность выполнения подводных технологических операций с помощью ММ за счет обеспечения более точной стабилизации АНПА в процессе работы ММ.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FWW-2021-0003)*

## Список литературы

1. V. Filaretov, A. Zuev, D. Yukhimets, A. Gubankov, E. Mursalimov. The Automation Method of Processing of Flexible Parts without their Rigid Fixation, Procedia Engineering, pp. 4-13, 2015.

2. U. Ramer. An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves, *Computer Graphics and Image Processing*, No.1, 1972.
3. D. Douglas, T. Peucker. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature, *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, No.10, 1973.
4. D. Yukhimets, Tool Path Planning Method for Industrial Manipulators Based on 3D-Model Obtained From Computer Vision Systems, 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2022, pp. 165-170.
5. M.A.Fischler and R.C. Bolles, “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography”, *Communications of the ACM*, vol. 24, no. 6, pp.381–395, 1981.

**Д.А. Юхимец**, д.т.н., доцент, undim@iacp.dvo.ru

Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

**А.С. Губанков**, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, gubankov@iacp.dvo.ru

Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

**В.А. Горин**, магистрант, лаборант, gorin.va@dvfu.ru

МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*Аннотация:* В докладе рассматривается метод синтеза нелинейной системы управления (СУ) пространственным движением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) мультироторного типа, позволяющей придать БПЛА желаемые динамические свойства при его работе в различных режимах. Представлены результаты моделирования работы предложенной системы управления при движении БПЛА в заданную точку и по заданной траектории, подтверждающие работоспособность системы.

*Ключевые слова:* система управления, БПЛА, нелинейный регулятор, математическая модель.

**D.A. Yukhimets**, Dr. Sc., associate professor, undim@iacp.dvo.ru

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

**A.S. Gubankov**, PhD, associate professor, Head of laboratory, gubankov@iacp.dvo.ru

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

**V.A. Gorin**, student, laboratory assistant, gorin.va@dvfu.ru

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

## DEVELOPMENT OF THE METHOD OF SYNTHESIS OF NONLINEAR SYSTEM OF SPATIAL MOTION CONTROL OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

*Abstract:* The paper deals with the method of synthesis of a nonlinear control system for spatial motion of a multicopter type unmanned aerial vehicle (UAV), which makes it possible to give the UAV the desired dynamic properties when it operates in different modes. The results of modelling the operation of the proposed control system when the

UAV moves to a given point and along a given trajectory are presented, confirming the performance of the system.

*Key words:* control system, UAV, nonlinear regulator, mathematical model.

## Введение

Одним из главных требований, предъявляемых к современным БПЛА, является наличие автономных функций, позволяющих им выполнять поставленные задачи без участия человека. При этом для реализации таких функций крайне важно качество управления движением БПЛА, так как его система автономного управления может формировать траектории разного типа, которые должны быть точно отработаны с максимальной скоростью для того, чтобы избежать столкновений с препятствиями или другими БПЛА при движении в группе [1,2].

В настоящее время в большинстве случаев для управления пространственным движением БПЛА используются линейные системы управления на основе типовых ПИД-регуляторов [3-5]. Такие системы просты в реализации, однако не способны обеспечить высококачественное управление при движении БПЛА по сложным пространственным траекториям с высокой скоростью в связи с возникающими при таком движении негативными эффектами, обусловленными взаимосвязями между степенями свободы и нелинейными характеристиками БПЛА, которые типовые линейные регуляторы не позволяют быстро компенсировать. Помимо этого, системы на основе ПИД-регуляторов требуют сложной и точной настройки, осуществить которую не всегда представляется возможным.

В литературе для управления пространственным движением БПЛА можно встретить как применение линейно-квадратичных регуляторов [6], так и регуляторов с переменной структурой [7], а также их модификаций с применением нечёткой логики [8]. При этом линейно-квадратичные регуляторы, как и ПИД-регуляторы, не позволяют обеспечить высокое качество управления нелинейными объектами, каковыми являются БПЛА, а регуляторы с переменной структурой имеют недостаток, связанный с большой амплитудой формируемых ими разрывных сигналов управления, которая может негативно влиять на механические части движителей БПЛА, и сложностью их реализации.

В связи с этим в настоящей работе решается задача синтеза нелинейной СУ пространственным движением, позволяющей придать БПЛА желаемые динамические свойства при перемещении в пространстве для обеспечения его точного управления в режиме автономного движения.

## Описание метода синтеза системы управления

Для управления движением БПЛА предлагается использовать двухконтурную систему управления, структурная схема которой показана на рис. 1.

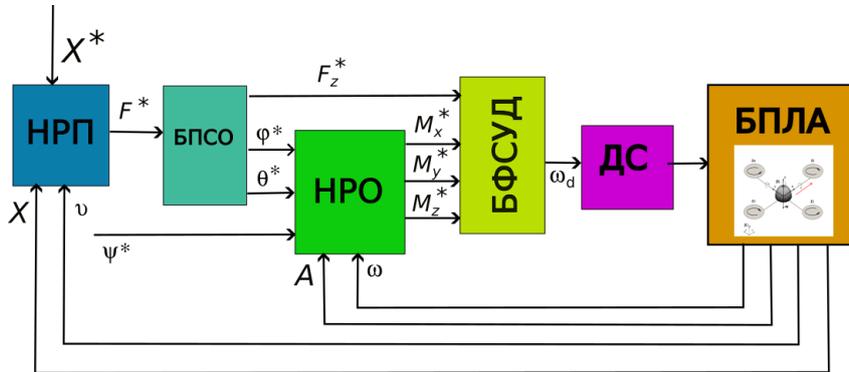


Рис. 1. Структурная схема системы управления движением БПЛА

СУ содержит два регулятора: нелинейный регулятор положения (НРП) и нелинейный регулятор ориентации (НРО). НРП на основе информации о рассогласовании текущего и желаемого положения БПЛА формирует желаемый вектор силы, который позволит обеспечить движение БПЛА по заданной траектории с желаемой динамикой. Сформированный вектор желаемой силы пересчитывается в желаемую тягу по оси  $z$  связанной системы координат (ССК) и желаемые углы крена и тангажа (блок преобразования силы в ориентацию (БПСО)). Сформированные величины желаемых углов ориентации поступают на вход НРО, который формирует желаемые моменты, обеспечивающие отработку желаемых углов ориентации. Сформированные НРП и НРО значения управляющих сил и моментов передаются в блок формирования сигналов управления двигателями (БФСУД), на выходе которого формируются желаемые значения скорости вращения для каждого двигателя. Эти значения подаются в двигательную систему (ДС) БПЛА, которая обеспечивает их реализацию и непосредственно движение БПЛА.

Синтез СУ осуществляется на основе следующей модели движения БПЛА:

$$\dot{v} = Rv + D + G + m_{UAV}^{-1}F, \quad \dot{X} = J_v v, \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = I^{-1}Rl\omega + I^{-1}M, \quad \dot{A} = J_\omega \omega, \quad (2)$$

$$J_v = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\theta + c_\psi s_\theta s_\varphi & s_\psi s_\theta + c_\psi c_\theta s_\varphi \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\theta + s_\psi s_\theta s_\varphi & -c_\psi s_\theta + s_\psi s_\theta s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\theta c_\varphi \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0 & r & -q \\ -r & 0 & p \\ q & -p & 0 \end{bmatrix},$$

$$J_\omega = \begin{bmatrix} 1 & s_\varphi t g_\theta & c_\varphi t g_\theta \\ 0 & c_\varphi & -s_\varphi \\ 0 & s_\varphi / c_\theta & c_\varphi / c_\theta \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} g \sin \theta \\ -g \cos \theta \sin \varphi \\ -g \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} d_x(u_r + u_r |u_r|) & 0 & 0 \\ 0 & d_y(v_r + v_r |v_r|) & 0 \\ 0 & 0 & d_z(w_r + w_r |w_r|) \end{bmatrix},$$

где  $X = [x, y, z]^T$  – вектор координат БПЛА в абсолютной системе координат (АСК);  $v = [u, v, w]^T$  – вектор линейных скоростей БПЛА в ССК;  $\omega = [p, q, r]^T$  – вектор угловых скоростей БПЛА в ССК;  $\varphi, \theta, \psi$  – углы крена, дифферента и курса БПЛА;  $m_{UAV}$  – масса БПЛА;  $d_x, d_y, d_z$  – коэффициенты сил сопротивления воздуха вдоль осей ССК БПЛА;  $v_r = [u_r, v_r, w_r]^T$  – вектор линейной скорости БПЛА относительно воздуха, рассчитываемый по формуле  $v_r = v - v_a^b$ ,  $v_a^b = [v_{ax}^b, v_{ay}^b, v_{az}^b]$  – вектор скорости ветра в ССК;  $g$  – ускорение свободного падения;  $I \in R^{3 \times 3}$  – матрица инерции БПЛА, которая в случае его симметричности может считаться диагональной,  $M = [M_x, M_y, M_z]^T$  – моменты, действующие на БПЛА со стороны движителей.

Зависимость сил и моментов, действующих на БПЛА в ССК от скоростей вращения винтов движителей БПЛА описывается следующим матричным выражением:

$$\begin{bmatrix} F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_t & k_t & k_t & k_t \\ 0 & -k_t L & 0 & k_t L \\ k_t L & 0 & -k_t L & 0 \\ -k_d & k_d & -k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{a1}^2 \\ \omega_{a2}^2 \\ \omega_{a3}^2 \\ \omega_{a4}^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $L$  – половина расстояния между осями вращения диагонально расположенных двигателей БПЛА,  $k_t, k_d$  – положительные коэффициенты.

Для синтеза НРП систему (1) можно представить в виде одного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\ddot{X} = \dot{J}_v v + J_v \dot{v} = \dot{J}_v v + J_v (Rv + D + G + m_{UAV}^{-1} F). \quad (4)$$

Желаемые динамические свойства БПЛА при движении по линейным координатам в АСК зададим с помощью линейного дифференциального уравнения вида:

$$\ddot{X} + \Lambda \dot{X} + \delta X = \Lambda \dot{X}^* + \delta X^*, \quad (5)$$

где  $\Lambda \in R^{3 \times 3}$ ,  $\delta \in R^{3 \times 3}$  – диагональные матрицы положительных коэффициентов,  $X^* = [x^*, y^*, z^*]^T$  – желаемые значения координат БПЛА в АСК.

Выразим  $\ddot{X}$  из (5) и приравняем правые части получившегося уравнения и уравнения (4). Из получившегося уравнения выразим вектор желаемой силы  $F^*$ :

$$F^* = m_{UAV} J_v^{-1} (\Lambda \dot{E}_x + \delta E_x - \dot{J}_v v) - m_{UAV} (Rv + G + D). \quad (6)$$

На основе полученного вектора желаемой силы в БПСО производится расчёт желаемой тяги по оси  $z$  ССК и желаемых углов крена и тангажа по формулам:

$$F_a^* = J_\psi^{-1} J_v F^*, \varphi^* = -\operatorname{atan}\left(\frac{F_{ay}^*}{F_{az}^*}\right), \theta^* = \operatorname{atan}\left(\frac{F_{ax}^*}{F_{az}^*}\right), F_z^* = \frac{F_{az}^*}{\cos(\varphi^*) \cos(\theta^*)}, \quad (7)$$

где  $F_a^* = [F_{ax}^*, F_{ay}^*, F_{az}^*]^T$  – вектор желаемых сил в полусвязанной системе координат, направление оси  $z$  которой совпадает с вертикальной осью АСК, а направление её оси  $x$  совпадает с направлением оси  $x$  ССК.

Желаемое значение угла курса  $\psi^*$  формируется независимо от других углов.

Вектор желаемых углов ориентации подается на вход НРО, который формирует на выходе вектор управляющих моментов, сформированный аналогично (4)-(6):

$$M^* = (J_\omega I^{-1})^{-1}(\Lambda_\alpha \dot{E}_\alpha + \delta_\alpha E_\alpha - j_\omega) - Rl\omega, \quad (8)$$

где  $M^* = [M_x^*, M_y^*, M_z^*]^T$  – вектор желаемых моментов в ССК,  $\Lambda_\alpha \in R^{3 \times 3}$ ,  $\delta_\alpha \in R^{3 \times 3}$  – диагональные матрицы положительных коэффициентов,  $E_\alpha = A^* - A$  – ошибка по углам ориентации БПЛА.

В результате формируется вектор управляющих воздействий  $[F_z^*, M_x^*, M_y^*, M_z^*]^T$ , для реализации которого рассчитываются скорости вращения винтов двигателей БПЛА, используя выражение, полученное из (3):

$$\begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(4k_t) & 0 & 1/(2Lk_t) & 1/(4k_d) \\ 1/(4k_t) & -1/(2Lk_t) & 0 & 1/(4k_d) \\ 1/(4k_t) & 0 & -1/(2Lk_t) & 1/(4k_d) \\ 1/(4k_t) & 1/(2Lk_t) & 0 & 1/(4k_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_z^* \\ M_x^* \\ M_y^* \\ M_z^* \end{bmatrix}. \quad (9)$$

## Результаты моделирования

Для исследования качества разработанной системы управления было проведено компьютерное моделирование. Для моделирования движения БПЛА использовалась математическая модель (1)-(3).

На рис. 2-а показано движение БПЛА в точку в точку с координатами (200, -200, 50)м, при этом БПЛА ориентировался на заданную точку. На рис. 2-б показан процесс движения БПЛА по круговой траектории, описываемой функциями  $x = 50 \sin(0.1t)$ ,  $y = 50 \cos(0.1t)$ . При этом БПЛА в процессе движения ориентировался вдоль траектории. Синяя кривая – процесс изменения координаты  $x$ , зеленая кривая – процесс изменения координаты  $y$ , красная кривая – процесс изменения координаты  $z$ .

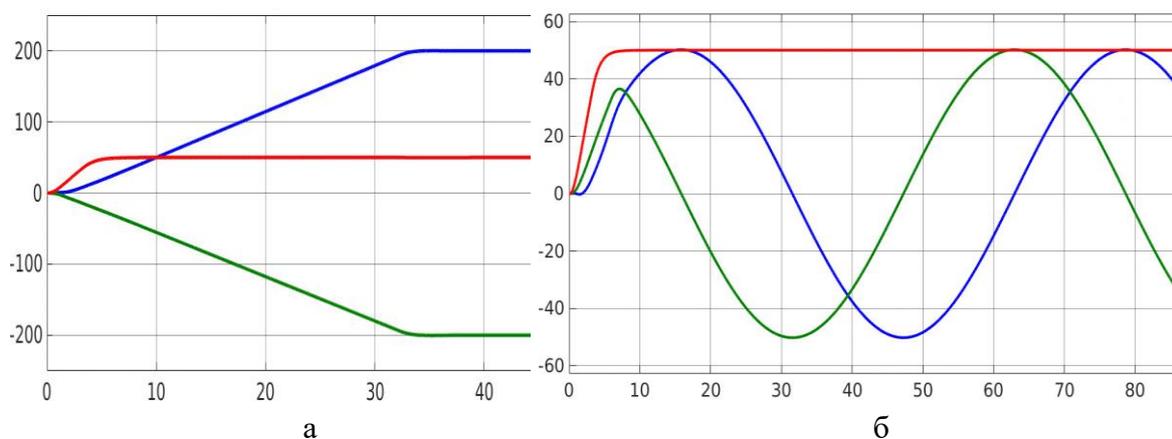


Рис. 2. Результат моделирования работы СУ

Как видно из приведенных рисунков, система управления позволяет придать БПЛА желаемые динамические свойства при его движении в различных режимах, за счёт чего обеспечивается точный подход БПЛА без перерегулирования к заданной точке и минимальная динамическая ошибка слежения, не превышавшая при моделировании 0.15м, при движении БПЛА по траектории.

Таким образом, результаты моделирования показывают высокое качество работы предложенной СУ в различных режимах её работы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 24-61-00025.*

## Список литературы

1. Губанков А.С., Ермолов И.Л., Минаев Д.Д., Силкин А.А., Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов на суда морского и внутреннего водного транспорта // Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции и XIV молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог: ООО Издательство «Лукоморье», 2023. – С. 509-513.

2. Gubankov A., Gornostaev I. Development of a Method for Generating Extremely High Reference Motion Speeds of Mechatronic Objects Moving Alone or in a Group. Proc. of the International Russian Smart Industry Conference, Vladivostok, Russia, 2024, 574–579 pp.

3. Zuo Z. Trajectory tracking control design with command-filtered compensation for a quadrotor. IET Control Theory and Applications, 2010, 4, 2343-2355pp.

4. Bouabdallah S., Noth A., Siegwart R. PID vs. LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor. In Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2004, 3, 2451-2456 pp. <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2004.1389776>

5. Chen L., Liu Z., Gao H., Wang G. Robust adaptive recursive sliding mode attitude control for a quadrotor with unknown disturbances. ISA Transactions, 2022, 122, 114–125 pp. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2021.04.046>

6. Rinaldi F., Chiesa S., Quagliotti F. Linear Quadratic Control for Quadrotors UAVs Dynamics and Formation Flight. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2013, 70, 203–220 pp. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-012-9708-3>

7. Zeghlache S., Saigaa D., Kara K., Harrag A., Bouguerra A. Fuzzy based sliding mode control strategy for an UAV type-quadrotor. Mediterranean Journal of Measurement and Control, 2012, 8, 436–446 pp.

8. Ghanai M., Medjghou A., Chafaa K. Extended Kalman filter based states estimation of unmanned quadrotors for altitude-attitude tracking control. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2018, 16, 446-458 pp. <http://dx.doi.org/10.15598/aeer.v16i4.2911>

*Секция 7*

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ И  
СОЦИОГУМАНИТАРНЫЕ  
АСПЕКТЫ ИСКУССТВЕННОГО  
ИНТЕЛЛЕКТА И  
РОБОТОТЕХНИКИ**

**Е.В. Боржигон**, магистрант, [katrinerussia@gmail.com](mailto:katrinerussia@gmail.com)  
Сибирский федеральный университет, г. Железногорск, Россия  
НПО «Прикладная механика», г. Железногорск, Россия

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫБОРА РЕШЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ НА БАЗЕ МЕХАНИЗМА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ**

*Аннотация:* В статье рассмотрена проблема обеспечения качества и гибкости решений в интеллектуальных автоматизированных обучающих системах. Проведен сравнительный анализ с целью выявления наиболее хорошо проработанных механизмов по сопровождению электронного учебного процесса. Рассмотрены и описаны такие системы, как Geekie, MyLab & Mastering series, Aero, Stepik. Показаны преимущества при решении данной задачи такого механизма искусственного интеллекта, как экспертные (рекомендательные) системы с доской объявлений.

*Ключевые слова:* интеллектуальная автоматизированная обучающая система, экспертная система, blackboard.

**E.V. Borzhigon**, student, [katrinerussia@gmail.com](mailto:katrinerussia@gmail.com)  
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia  
SMC «Applied Mechanic», Zheleznogorsk, Russia

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF DECISION SELECTION METHODS IN AN INTELLIGENT TUTORING SYSTEM BASED ON THE EXPERT SYSTEM MECHANISM**

*Abstract:* The article discusses the problem of ensuring the quality and flexibility of solutions in Intelligent Tutoring Systems. A comparative analysis was carried out in order to identify the most well-developed mechanisms for supporting the electronic educational process. Such systems as Geekie, MyLab & Mastering series, Aero, Stepik are considered and described. The advantages of such an artificial intelligence mechanism as expert (recommendation) blackboard systems in solving this problem are shown.

*Key words:* Intelligent Tutoring Systems, expert system, blackboard.

В современном стремительно развивающемся мире, где проходит повсеместное развитие технологий, все более высокие требования ставятся

к квалификации специалистов. От них требуется не только иметь глубокие и актуальные знания в своей специализации, но и усвоить их в наиболее короткие сроки. Достижение таких целей можно обеспечить с помощью дополнительного обучения, как в формате очного проведения, так и в формате дистанционного. Одним из видов данного направлений можно выделить обучение с помощью автоматизированных обучающих систем.

Автоматизированная обучающая система – это совокупность связанных в единое целое учебно-методических, информационных, программных и инженерно-технических средств, базирующихся на основе ЭВМ и предназначенных для автоматизации обучения [1]. С внедрением технологии искусственного интеллекта, данный тип систем получил новый импульс к развитию и стал называться интеллектуальными автоматизированными обучающими системами (ИАОС). ИАОС – это обучающая система, обеспечивающая реализацию всех базовых моделей учебного процесса, а также решение комплекса задач интеллектуального обучения [2]. Учитывая, актуальность внедрения таких систем при организации электронного обучения, среди них можно выделить лидеров: к ним можно отнести Geekie, MyLab & Mastering series (платформа Knewton), Aero, а в России – Stepik [3].

Geekie – бразильская платформа, позволяет повысить эффективность подготовки к сдаче экзаменов в школе. Платформа позволяет добавлять видеуроки, тесты, практические занятия и другие учебные материалы. Для начала использования учащемуся необходимо пройти входной тест, на основе которого программа самостоятельно проводит подбор соответствующего контента для достижения поставленной цели. В случае затруднения, портал позволяет повторно изучить материал. Учитель также может вносить изменения в учебный план, тем самым обучая систему, что позволит ей подбирать дальнейшего материала с большей эффективностью.

MyLab & Mastering series – проект платформы Knewton. Система анализирует знания учащегося, позволяет объяснить причину ошибки, выделить интересующие темы обучения, а также спрогнозировать результаты прохождения текущего этапа.

Aero – образовательный портал, нацеленный на обучение студентов колледжей. Портал позволяет определить цели обучения, темы заданий и тесты. Программа анализирует частоту запросов к определенному курсу, а также собирают информацию о прохождении обучения учащихся. Сервис позволяет учителю персонализировать обучение в группе, спланировать лекции на основе уровня знаний учащихся.

Stepik – российская платформа, разработанная в 2015г, которая способна подобрать учебный материал в зависимости от уровня знания учащихся, а также способна советовать наиболее важный материал на текущий момент обучения. Достоинствами можно выделить возможность ее бесплатного использования, наличие конструктора курсов с возможностью организации автоматической проверки заданий.

Однако, кроме возможности создания и сопровождения учебных курсов, ИАОС должна обеспечить реализацию рефлексивной оценки учебного процесса, что может реализоваться с использованием механизма экспертных (рекомендательных) систем. Экспертная система (ЭС) – программное средство, использующее экспертные знания для обеспечения высокоэффективного решения неформализованных задач в узкой предметной области [4]. Различными типами ЭС являются:

- продукционные экспертные системы;
- экспертные системы на прецедентах;
- гибридные системы, включая интеграцию с методами Data Mining и искусственными нейронными сетями

Помимо вышеперечисленных можно выделить системы с доской объявлений (blackboard systems) [5]. Основным назначением такой архитектуры является возможность решения плохо определенных, сложных задач.

С точки зрения организации процесса вычисления в системе можно выделить знания о предметной области, хранящиеся в базах знаний, и непосредственно доску объявления, в которой и формируется решение [6]. Недостатками систем с доской объявления является сложность реализации и внедрения таких систем, а также более высокие требования, выставляемые к вычислительным ресурсам, нежели к более простым типам ЭС. Преимуществами ЭС с доской объявлений являются:

1. использование для решения сложных задач разнопрофильных баз знаний;
2. гибкость адаптации механизма данного типа ЭС для различных предметных областей;
3. модульность – управляющие знания (правила) и специфические знания о предметной области разделены друг от друга;
4. архитектура такой ЭС позволяет формировать пояснение выбранных решений.

Учитывая приведенные преимущества, для реализации метода выбора решения в ИАОС с использованием механизма blackboard, подобные ЭС позволяют получить компромиссные решения. Произведем сравнительный анализ существующих обучающих систем на предмет возможности реализовать гибкий механизм принятия решений в задаче сопровождения персонализированного обучения на базе ИАОС.

Критерии сравнения систем приведены в первом столбце таблицы. Последний столбец рассматривается для ИАОС, использующей механизм blackboard по [7]. Предполагается, что в рамках ИАОС могут быть реализованы модели учащегося, ученика и тьютора, базы знаний которых и выступают в качестве сторон поиска компромисса.

Таблица. Критерии сравнения обучающих систем

| Критерий сравнения  | Geekie | MyLab & Mastering series (Knewton) | Aero | Stepik | ИАОС с доской объявлений |
|---|--------|------------------------------------|------|--------|--------------------------|
| Соблюдение требований учебного плана обучения системой            | +      | +                                  | +    | +      | +                        |
| Возможность замещения учителя ИИ                                  | +      | +                                  | +    | -      | +                        |
| Предсказание поведения учащегося                                  | +      | +                                  | +    | -      | +                        |
| Модель учащегося  | +      | +                                  | +    | +      | +                        |
| Модель учителя  | +      | +                                  | +    | +      | +                        |
| Модель тьютора  | -      | -                                  | -    | -      | +                        |
| Обоснование принятого решения                                     | -      | -                                  | -    | -      | +                        |
| Возможность корректировки индивидуального учебного плана учащимся | -      | -                                  | -    | -      | +                        |
| Оценка баланса учебной нагрузки                                   | -      | -                                  | -    | -      | +                        |
| Компромиссный результат взаимодействия моделей                    | -      | -                                  | -    | -      | +                        |

Результат анализа показывает, что интеллектуальная автоматизированная обучающая система на базе экспертных систем с доской объявлений позволяет реализовать более широкие возможности при сопровождении индивидуализированного электронного обучения.

### Список литературы

1. Российская педагогическая энциклопедия / Э. Д. Днепров, В. П. Зинченко, В. Г. Панов; под редакцией В. Г. Панов. – М.: Большая Российская Энциклопедия, 1993. – 608 с.
2. Рыбина Г. В. Интеллектуальные обучающие системы на основе интегрированных экспертных систем: учебное пособие. – Москва: Директ-Медиа, 2023. – С. 132.
3. Добрица В. П., Горюшкин Е. И. Применение интеллектуальной адаптивной платформы в образовании // Auditorium. - №1. – 2019. Электронный ресурс]: режим доступа - <https://cyberleninka.ru/article/n /primenenie-intellektualnoy-adaptivnoy-platformy-v-obrazovanii/viewer>.
4. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.

5. Corkill D.D. Blackboard systems. *Artificial Intelligence Review*, 1988, №2, pp.103-118

6. Джексон П. Введение в экспертные системы. 3-е изд. – М.: Вильямс, 2001. – 623 с.

7. Углев В.А. Реализация механизма принятия решений в интеллектуальной автоматизированной обучающей системе на базе модуля экспертных систем // XXI Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, КИИ-2023. В 2 т. Т. 2. – Смоленск: Принт-Экспресс, 2023. - С. 255-266.

## ВОПРОСЫ ПРЕПОДАВАНИЯ РОБОТОТЕХНИКИ В ВУЗЕ

*Аннотация:* Работа посвящена обзору существующего опыта преподавания робототехники в ННГУ. Рассматривается проблематика программирования современных роботов, существующие стандарты и средства. Приводится обзор разработанного и внедрённого в ННГУ учебного курса по робототехнике для студентов магистратуры.

*Ключевые слова:* робототехника, беспилотные транспортные средства, алгоритмы картографирования, учебная робототехника.

**N.A.Borisov**, Ph.D., associate professor, nborisov.itmm@yandex.ru  
**K.S.Egorov**, postgraduate student, egorov.itmm@gmail.com  
UNN, Nizhniy Novgorod, Russia

## ISSUES OF TEACHING ROBOTICS IN UNIVERSITY

*Abstract:* The goal of this work is to make a review of the existing experience of teaching robotics at UNN. The problems of programming modern robots, existing standards and tools are considered. An overview of the robotics course developed and implemented at UNN for master's students is given.

*Key words:* robotics, autonomous transport vehicle, mapping algorithms, educational robotics

Автоматизация технологических процессов в современном мире играет всё большую роль. Это связано с такими факторами, как недостаток квалифицированных кадров рабочих профессий и стремлением удешевить производство при увеличении его масштабов. Робототехника в данном случае занимает одну из ключевых ниш. Автоматизированные конвейеры, роботы-доставщики, беспилотники – можно привести примеры из практически любой сферы деятельности человека, где роботы так или иначе себя проявили.

Закономерно возникает задача подготовки квалифицированных кадров для разработки робототехнических систем и комплексов, а также поддержки уже существующих. В ННГУ им. Лобачевского уже существовал курс под названием «Программирование роботов» для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки «Программная инженерия». Однако этот курс был рассчитан скорее на освоение базовых навы-

ков программирования на простых для понимания задачах. Широко использовалась платформа Lego Mindstorms в связке с ЯП RobotC.

В качестве одной из таких задач предлагалось написать программу, позволяющую роботу пройти лабиринт, запомнить пройденный путь, а затем оптимизировать его, чтобы впоследствии данный маршрут занимал меньше времени [1].

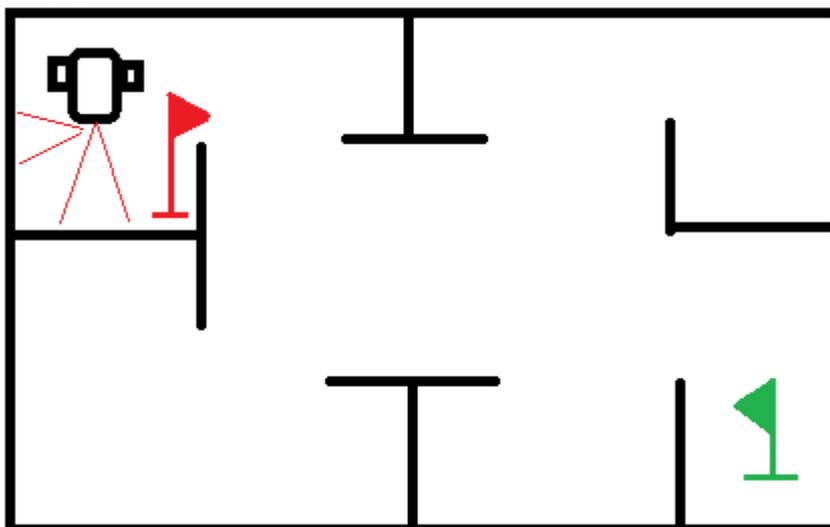


Рис.1. Задача прохождения лабиринта с использованием алгоритма правой руки (от красного флага к зелёному)

В рамках этой задачи рассматривались (в сильно упрощённом виде) задачи автономной навигации на заранее неизвестной местности и построение маршрута по построенной карте местности. Однако задачи современной робототехники намного сложнее и обширнее, поэтому этого курса было недостаточно.

В связи с этим было принято решение, основываясь на изучении современных стандартов и методов программирования промышленных робототехнических систем, разработать курс для студентов магистратуры, в котором упор уже был бы сделан не на освоение базовых навыков программирования и простейших алгоритмов автоматического управления, а на изучении задач современной робототехники.

Поскольку целью курса была подготовка специалистов практиков, то основной упор был сделан на изучении ROS (англ. Robot Operating System) – экосистемы, де-факто являющейся стандартом в разработке современных робототехнических комплексов [2]. Это система распределённой обработки данных, инкапсулирующая в себя такие свойства обычной ОС, как:

- синхронизация потоков исполнения
- низкоуровневая поддержка устройств
- обмен сообщениями между процессами

Т.о. программисту, использующему ROS, не нужно думать о задачах синхронизации, самостоятельно писать драйверы устройств и т.д. – всё это уже сделано за него (рис. 2). Остаётся лишь написать набор небольших, простых программ и расположить их в правильной иерархии.



Рис.2. Простейший программный комплекс с использованием ROS: два узла и один общий топик для обмена информацией

Вторая сторона ROS, направленная на ещё большее упрощение разработки – это встроенный менеджер пакетов. Каждая программа, исполняемая в среде ROS, должна быть частью некоторого пакета – совокупности файлов исходного кода и вспомогательных файлов для сборки программ в пакете, информацию о разработчиках и файлов для автоматизации запуска.

Всё это вместе делает ROS крайне мощным и удобным инструментом для решения самых разнообразных задач, возникающих в области робототехники сегодня; и именно поэтому изучение этой экосистемы, по мнению авторов, очень важно для развития сферы робототехники в России в целом.

Для практической работы в данном курсе было принято решение использовать виртуальную машину с установленной на ней ОС Ubuntu. Выбор в пользу виртуальной машины был сделан по причине того, что большинство студентов не используют Ubuntu как основную операционную систему.

Рассматриваемы в курсе задачи строятся по принципу «от простого к сложному». Для начала студентам даются материалы по использованию ОС Linux, поскольку не все к началу обучения в магистратуре имеют опыт работы с данной ОС. Далее предлагается простая, стандартная задача написания программы «читатели-писатели», в которой задействованы два узла ROS: на одном из них запущена программа, пишущая в топик сообщения, в то время как другая их из него считывает и выводит их на экран. Данная задача направлена на изучение основ ROS, принципов написания программ под данную экосистему, а также основным принципам работы с ОС Linux.

Далее рассматривается задача написания PID-регулятора для управления перемещениями простого робота из начальной в некоторую целевую точку на плоскости. Чтобы сконцентрироваться на реализации непосредственно самого алгоритма было принято решение использовать симулятор turtlesim. Благодаря этому отпадает необходимость изучения работы с датчиками робота, управлению моторами и т.д.

Программа, реализующая PID-регулятор, считывает с терминала введённые пользователем координаты, сравнивает их с текущими координатами при помощи данных, получаемых из специального топика симулятора turtlesim и вырабатывает управляющее воздействие. После этого оно передаётся в соответствующий топик, после чего черепаха приходит в движение, оставляя за собой след.

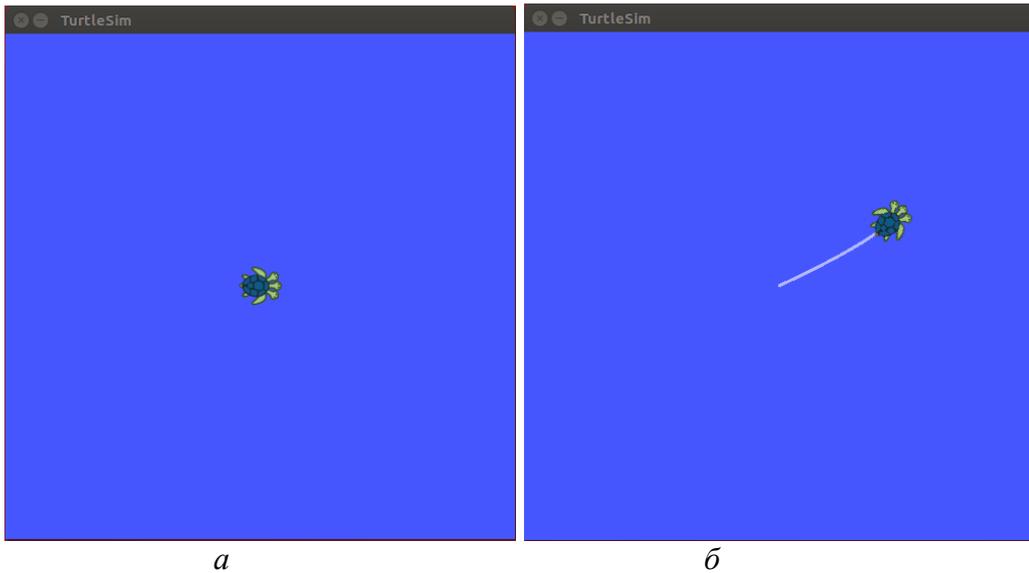


Рис.3. Процесс перемещения черепахи

В turtlesim движение черепахи задаётся с помощью трёхмерного вектора, хранящего в себе линейную составляющую по оси X и угловую по оси Z для поворота. Используются полярные координаты, поскольку таким образом движение робота математически описывать намного проще.

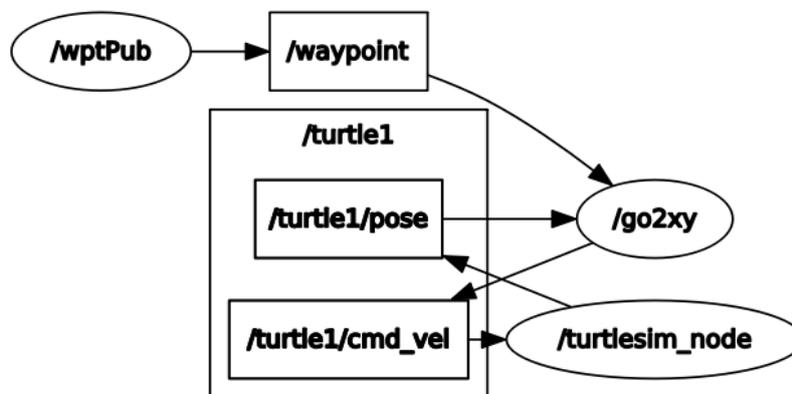


Рис.4. Схема программного комплекса, реализующего PID-регулятор для управления простым роботом

Далее рассматриваются задачи автономной навигации на примере работы с роботами Turtlebot3 (рис. 5). Это роботы, предназначенные для решения таких задач, как автономное ориентирование и движение на заранее неизвестной местности, использование машинного зрения и искусственного интеллекта для управления роботом и т.д. Поскольку курс продолжает активно дорабатываться, то список задач, которые можно решать с помощью данной платформы постоянно пополняется.

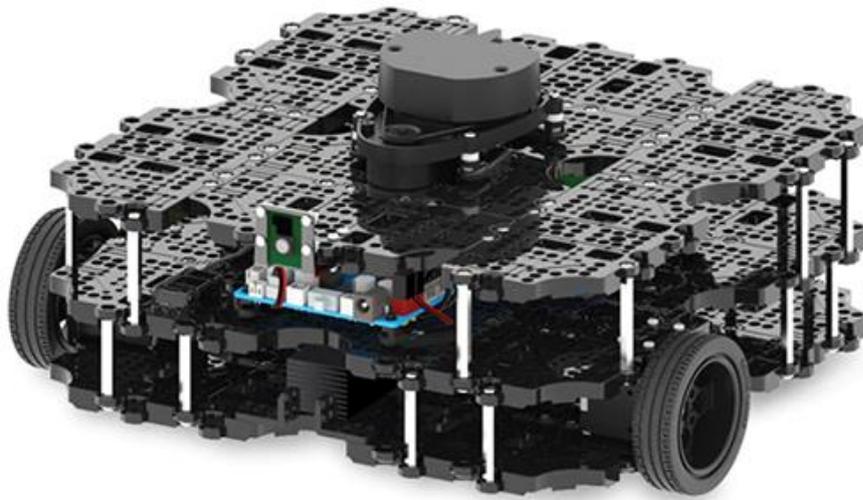


Рис.5. Робот Turtlebot3

К большому сожалению, такие роботы очень дорогие, поэтому нет возможности обеспечить ими всех студентов. Решение было найдено в использовании симулятора Gazebo (рис. 6). Это профессиональный симулятор, использующийся для отладки ПО для роботов. Его главным преимуществом является то, что с точки зрения интерфейса взаимодействия робота с управляющим компьютером или другими роботами он полностью идентичен настоящим роботам и робототехническим системам, что позволяет использовать ПО, написанное и протестированное с помощью данного симулятора на настоящих роботах безо всяких изменений.

Одна из задач, предлагаемых студентам для самостоятельного выполнения – это написание программы для автоматизации объезда виртуального мира, избегая препятствий и составляя карту местности этого мира. Для картографирования используется алгоритм SLAM[3-6]. Данный алгоритм, имеющий множество различных реализаций, предназначен для ориентирования робота в заранее неизвестном пространстве. Алгоритм не требует никаких дополнительных меток(цветовых линий, магнитных меток и т.д.) и находит всё большее применение в современной робототехнике.

В ближайших планах на будущее является переход на более новую, актуальную версию ROS – ROS2. В рамках переработки курса с целью внедрения на специальности «Математическая робототехника» также предусмотрено более подробное изучение работы с микроконтроллерами при помощи microROS, а также решение задач использования искусственного интеллекта для управления роботом.

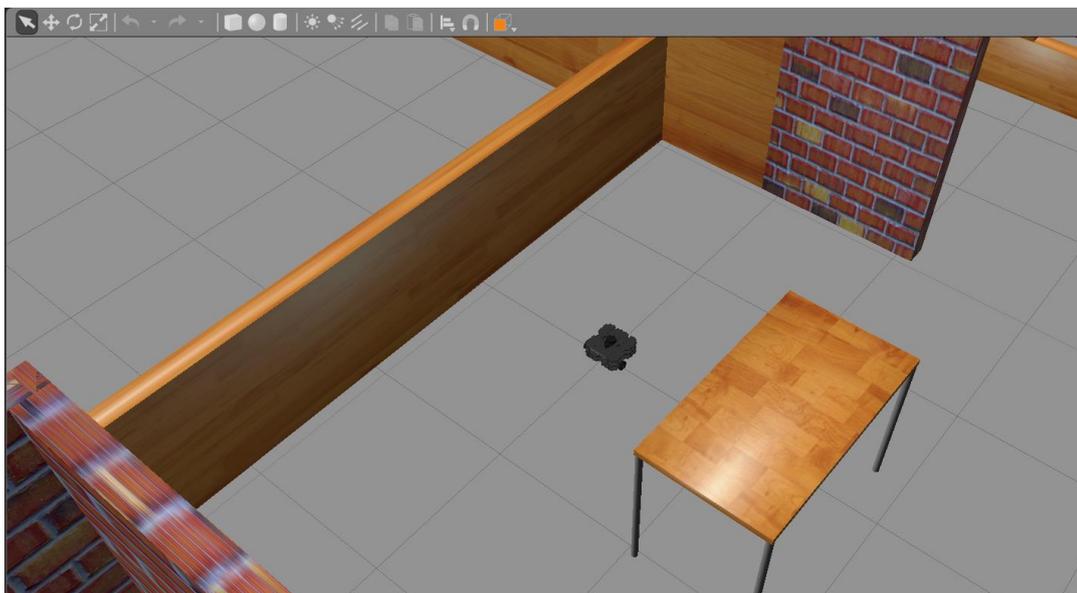


Рис.6. Робот Turtlebot3 в симуляторе Gazebo

*Работа выполнена при поддержке научно-образовательного математического центра «Математика технологий будущего» (проект № 075-02-2024-1439).*

## Список литературы

1. Прохождение лабиринта: правила и алгоритмы [Электронный ресурс] URL: [https://myrobot.ru/articles/logo\\_mazesolving.php](https://myrobot.ru/articles/logo_mazesolving.php), свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык рус. Дата обращения: 29.06.2007 г.
2. ROS/Introduction [Электронный ресурс] URL: <https://wiki.ros.org/ROS/Introduction>, свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 08.08.2018 г.
3. Жигалов К.Ю., Ключкова Е.Н. Решение задачи построения оптимального маршрута движения транспорта по пересеченной местности с использованием ГИС // Московский экономический журнал. 2020, №1. С. 71-81. DOI 10.24411/2413-046X-2020-10039
4. Gao, X., & Zhang, T. (2021). Introduction to Visual SLAM. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-4939-4>
5. Pedrosa, E., L. Reis, C. M. D. Silva and H. S. Ferreira. Autonomous Navigation with Simultaneous Localization and Mapping in/outdoor. 2020.
6. Gmapping [Электронный ресурс] URL: <http://wiki.ros.org/gmapping>, свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 14.08.2020 г.
7. ROS2 Documentation: Iron [Электронный ресурс] URL: <https://docs.ros.org/en/iron/index.html>, свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 2024 г.

Р.А. Бутаков, аспирант, r.a.butakov@urfu.ru  
Ю.Е. Каюмова, магистрант, lulia.Kaiumova@urfu.ru  
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
г. Екатеринбург, Россия

## ВЛИЯНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ SOFT SKILLS У СТУДЕНТОВ

*Аннотация:* В статье рассматривается роль образовательной робототехники в развитии инновационного потенциала школьников, акцентируя внимание на формировании soft skills, таких как коммуникация, креативность и критическое мышление. Подчеркнута важность групповых проектов, которые требуют координации действий и эффективного общения между участниками. Также обсуждаются преимущества использования платформ LEGO Mindstorms и Arduino в учебном процессе, которые помогают учащимся применять теоретические знания на практике. В заключение подчеркивается важность интеграции робототехники в образовательные программы для подготовки студентов к вызовам современного рынка труда.

*Ключевые слова:* образовательная робототехника, мягкие навыки, командная работа, креативное мышление, проектная деятельность.

R.A. Butakov, graduate student, r.a.butakov@urfu.ru  
I.E. Kaiumova, master's student, lulia.Kaiumova@urfu.ru  
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia

## THE INFLUENCE OF EDUCATIONAL ROBOTICS ON THE FORMATION OF SOFT SKILLS AMONG STUDENTS

*Abstract:* The article examines the role of educational robotics in developing the innovative potential of schoolchildren, focusing on the formation of soft skills, such as communication, creativity and critical thinking. The importance of group projects that require coordination of actions and effective communication between participants is emphasized. The advantages of using LEGO Mindstorms and Arduino platforms in the educational process, which help students apply theoretical knowledge in practice, are also discussed. In conclusion, the importance of integrating robotics into educational programs is emphasized to prepare students for the challenges of the modern labor market.

*Key words:* educational robotics, soft skills, teamwork, creative thinking, project activities.

Современное образование направлено не только на передачу знаний в предметной области, но и на развитие универсальных навыков, необходимых для профессиональной и личной успешности. Одной из ключевых компетенций XXI века является развитие soft skills – мягких навыков, таких как коммуникация, креативность, критическое мышление, управление временем, умение работать в команде и решать сложные задачи. В условиях быстро меняющегося мира робототехника становится эффективным инструментом, позволяющим развивать эти навыки.

Образовательная робототехника, сочетая элементы инженерии, программирования и проектного подхода, способствует формированию у учеников как технических, так и межличностных компетенций [1]. В данной статье рассмотрено, как образовательная робототехника влияет на формирование soft skills у студентов, и какие аспекты этого подхода наиболее значимы для современного обучения.

### Робототехника как платформа для развития soft skills

Проекты в области образовательной робототехники зачастую выполняются в группе. Это требует от студентов координации действий, распределения ролей и эффективного общения. В команде каждый член выполняет определенную функцию: кто-то отвечает за программирование, кто-то за конструирование, а кто-то за тестирование. Такой подход учит:

- работать в команде, то есть учитывать мнение других, находить компромиссы и совместно принимать решения;
- коммуницировать, то есть четко формулировать свои идеи, слушать других и грамотно аргументировать свою позицию;
- распределять задачи, определять приоритеты, делегировать и организовывать процесс для достижения общей цели.

Эти навыки особенно важны в профессиональной деятельности, где успешная работа часто зависит от умения взаимодействовать с коллегами.

Робототехника – это область, где студентам предоставляется возможность экспериментировать и находить творческие решения. При проектировании робота учащиеся сталкиваются с реальными инженерными задачами, требующими нестандартного подхода. Например, необходимо:

- разработать конструкцию, соответствующую определённым условиям;
- запрограммировать робота для выполнения сложных последовательностей действий;
- решать возникающие проблемы, например, если робот не выполняет задуманное.

Этот процесс развивает креативное мышление и умение решать проблемы, что особенно ценно в условиях неопределённости, характерных для современного мира.

Работа с образовательной робототехникой включает анализ и оценку собственных действий. Например, если робот не справляется с поставленной задачей, студенты должны понять, что именно пошло не так: программный код, конструкция или условия окружающей среды. Постоянный анализ и внесение изменений в проект развивают у студентов критическое мышление, позволяющее:

- оценивать информацию и выделять главное;
- искать причины ошибок и устранять их;
- принимать обоснованные решения на основе анализа данных.

Реализация проектов в области робототехники часто ограничена временем: участие в соревнованиях, дедлайны по сдаче проекта и прочие временные рамки требуют от студентов умения планировать свою работу. Это способствует развитию навыков тайм-менеджмента, включая:

- распределение времени на выполнение различных задач;
- оптимизацию процессов для повышения эффективности;
- сохранение концентрации даже в стрессовых ситуациях.

В условиях дедлайнов студенты также учатся справляться с эмоциональным напряжением, что помогает им сохранять продуктивность в сложных ситуациях.

### **Практическое применение образовательной робототехники**

Робототехнические кружки, школьные и студенческие соревнования, а также специализированные образовательные программы являются отличной площадкой для формирования soft skills. Такие мероприятия, как World Robot Olympiad и FIRST Robotics Competition, стимулируют развитие навыков, полезных не только во время учебы, но и в будущем:

- студенты работают над реальными проектами, которые требуют междисциплинарного подхода;
- участие в международных соревнованиях помогает развивать навыки межкультурной коммуникации;
- соревнования учат справляться с неудачами, работать над ошибками и добиваться поставленных целей.

Основной целью интеграции робототехники в образовательный процесс является развитие инженерного мышления и практических навыков у студентов. Робототехника позволяет обучающимся:

- понимать основные принципы механики, электроники и программирования;
- применять знания математики и физики для решения прикладных задач;
- работать в команде, развивая навыки проектной деятельности.

Процесс интеграции робототехники в учебный процесс включает следующие этапы:

1. определение целей курса, формирование учебного плана и списка тем;

2. выбор оборудования (LEGO Mindstorms [2], Arduino [3]) в зависимости от возраста и уровня подготовки студентов);

3. оснащение учебных аудиторий необходимым оборудованием, включая компьютеры, конструкторы и дополнительные датчики;

4. обучение педагогов работе с робототехническими платформами и методам проектного обучения;

5. реализация теоретических и практических модулей, интеграция проектной работы.

Интеграция робототехники в учебные процессы с использованием конструкторов LEGO Mindstorms и Arduino позволяет создать практико-ориентированную образовательную среду, которая сочетает обучение техническим дисциплинам и развитие универсальных навыков. LEGO Mindstorms подходит для начального этапа обучения благодаря простоте визуального программирования и интуитивно понятной конструкции, что делает его популярным среди школьников и студентов начальных курсов. Платформа позволяет изучать основы робототехники, механики и программирования через создание автономных роботов и участие в соревнованиях. Arduino, в свою очередь, предлагает более широкий спектр возможностей для реализации сложных инженерных и программных проектов. Она подходит для студентов старших курсов и технических специальностей, поскольку требует знания текстового программирования и основ электроники. Использование этих платформ в учебных курсах помогает обучающимся не только понять принципы работы современных технологий, но и развить навыки критического мышления, креативности, управления проектами и работы в команде. Сравнительная характеристика платформ LEGO Mindstorms и Arduino, применяемых в образовательном процессе, представлена в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение LEGO Mindstorms и Arduino

| Характеристика    | LEGO Mindstorms                           | Arduino                                  |
|-------------------|---|--|
| Целевая аудитория | Начинающие и школьники                    | Студенты, продвинутые пользователи       |
| Простота освоения | Высокая (визуальное программирование)     | Средняя (текстовое программирование)     |
| Гибкость          | Ограничена набором элементов конструктора | Высокая (можно подключать разные модули) |
| Стоимость         | Выше                                      | Ниже                                     |
| Примеры проектов  | Роботы для соревнований, учебные роботы   | Сложные проекты: умные устройства, IoT   |

### Преимущества образовательной робототехники

Интеграция робототехники в образовательный процесс имеет множество преимуществ, среди которых:

- мотивация к обучению: студенты вовлекаются в процесс, так как робототехника предоставляет практическое применение теоретических знаний;

- интеграция навыков: одновременное развитие как технических, так и межличностных навыков;

- готовность к профессии будущего: навыки, полученные при обучении робототехнике, востребованы на рынке труда и соответствуют запросам работодателей.

### **Проблемы и вызовы внедрения робототехники**

Несмотря на очевидные преимущества, образовательная робототехника сталкивается с рядом трудностей, представленных в таблице 2.

Таблица 2. **Проблемы внедрения робототехники**

| Проблема                               | Описание   |
|--|--|
| Финансовые ограничения                 | Обеспечение школ и университетов робототехническим оборудованием требует значительных затрат   |
| Недостаток квалифицированных педагогов | Не все учителя и преподаватели обладают достаточными знаниями для эффективного обучения робототехнике  |
| Неравный доступ к образованию          | В сельских школах и институтах, не имеющих государственную аккредитацию, зачастую отсутствует доступ к современным образовательным технологиям |

Для преодоления этих трудностей требуется системный подход со стороны государства, образовательных организаций и бизнеса.

### **Заключение**

Образовательная робототехника – это мощный инструмент, который не только развивает технические навыки, но и способствует формированию важных *soft skills* у студентов. Занятия робототехникой способствуют развитию креативности, коммуникации, критического мышления, управления временем и стрессом, учат работать в команде, решать проблемы и справляться с трудностями. В эпоху цифровой экономики такие навыки становятся ключевыми для успешной адаптации молодых специалистов на рынке труда. Внедрение робототехники в образовательный процесс способствует подготовке студентов к профессиональной и личной успешности, что делает её важным компонентом современной образовательной системы.

Развитие образовательной робототехники должно стать приоритетной задачей для системы образования, так как её влияние на подготовку компетентных и всесторонне развитых профессионалов невозможно переоценить.

## Список литературы

1. Юртаева, О. А. Образовательная робототехника как инструментарий развития инновационного потенциала школьников. – Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, 2019. – Т. 5 (71), № 3. – С. 72-83.
2. Eun Jung Park. Exploring LEGO Mindstorms EV3: Tools and Techniques for Building and Programming Robots. – Apress, 2016. – 300 с.
3. Блум Дж. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства. 2-е изд.: пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. – 529 с.: ил.

## УРОКИ БУДУЩЕГО: ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА УРОКАХ ЛИТЕРАТУРЫ

*Аннотация:* Искусственный интеллект (ИИ) стал важной составляющей современного образовательного процесса. Его внедрение не только улучшает методы обучения, но и делает их более адаптированными к потребностям учащихся. ИИ способствует индивидуализации, предоставляя мгновенную обратную связь и интерактивные форматы, которые активно вовлекают студентов в учебный процесс. Несмотря на автоматизацию рутинных задач, ответственность за качество образования по-прежнему лежит на плечах преподавателей. Целью статьи является определить влияние нейросетевых технологий на деятельность учителей литературы, а также аспектам интеграции этих технологий в образовательный процесс.

*Ключевые слова:* искусственный интеллект, нейросеть, нейросетевые технологии, социогуманитарный аспект, критическое мышление, аналитические навыки.

Irina V.I., master's degree, iren.izo@yandex.ru  
Secondary school № 58, Mariupol, Russia

## THE FUTURE: FEATURES OF THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN LITERATURE LESSONS

*Abstract:* Artificial intelligence (AI) has become an important component of the modern educational process. Its implementation not only improves teaching methods, but also makes them more adapted to the needs of students. AI promotes individualization by providing instant feedback and interactive formats that actively involve students in the learning process. Despite the automation of routine tasks, the responsibility for the quality of education still rests on the shoulders of teachers. The purpose of the article is to determine the impact of neural network technologies on the activities of literature teachers, as well as aspects of the integration of these technologies into the educational process.

*Key words:* artificial intelligence, neural network, neural network technologies, social and humanitarian aspect, critical thinking, analytical skills.

В последние десятилетия искусственный интеллект (ИИ) стал неотъемлемой частью нашей повседневной жизни, проникая в различные сферы деятельности, включая медицину, бизнес, транспорт и, конечно же, обра-

зование. В условиях стремительного технологического прогресса и глобализации образовательные учреждения сталкиваются с необходимостью адаптации к новым реалиям, что делает изучение применения ИИ в образовательном процессе особенно актуальным. В частности, использование ИИ на уроках литературы открывает новые горизонты для педагогов и учащихся, позволяя не только повысить уровень вовлеченности и интереса к предмету, но и развивать критическое мышление, креативность и аналитические способности.

Литература, как одна из важнейших гуманитарных дисциплин, требует от учащихся не только понимания текста, но и способности к интерпретации, сопоставлению различных точек зрения и формированию собственных суждений. В этом контексте ИИ может стать мощным инструментом, способствующим более глубокому осмыслению литературных произведений. Например, алгоритмы обработки естественного языка могут помочь учащимся анализировать тексты, выявлять ключевые темы и мотивы, а также предлагать альтернативные интерпретации. Это, в свою очередь, может способствовать развитию критического мышления и способности к аргументации, что является важным аспектом литературного образования.

Однако внедрение ИИ в образовательный процесс не лишено рисков и вызовов. С одной стороны, нейросетевые технологии могут значительно облегчить работу учителей, предоставляя им инструменты для более эффективного планирования уроков и оценки успеваемости учащихся. С другой стороны, существует опасение, что чрезмерная зависимость от технологий может привести к снижению уровня личной ответственности учащихся за собственное обучение и к уменьшению их способности к самостоятельному мышлению. Кроме того, необходимо учитывать этические аспекты использования ИИ, такие как защита личных данных учащихся и возможность возникновения предвзятости в алгоритмах.

В данной статье мы рассмотрим несколько ключевых аспектов применения ИИ на уроках литературы. В первую очередь, будет проведен обзор основных понятий и принципов работы ИИ, а также его роли в образовательном процессе. Далее мы проанализируем, как ИИ может быть использован для повышения учебной мотивации и интереса к литературе, а также для развития критического мышления и творческого потенциала учащихся. Особое внимание будет уделено социогуманитарным аспектам, связанным с внедрением технологий в образовательную среду, включая вопросы этики, безопасности и возможных социальных последствий.

Также в статье будет рассмотрен опыт применения ИИ в различных образовательных учреждениях, что позволит выявить успешные практики и возможные трудности, с которыми сталкиваются педагоги. Мы проанализируем существующие исследования и публикации на эту тему, чтобы понять, какие подходы к внедрению ИИ в уроки литературы уже зарекомендовали себя, а какие еще требуют дальнейшего изучения и доработки.

Таким образом, данная статья направлена на всестороннее освещение темы применения искусственного интеллекта на уроках литературы, что позволит не только выявить его образовательные и социогуманитарные аспекты, но и предложить рекомендации для эффективного использования технологий в учебном процессе. В условиях постоянных изменений в образовательной среде важно не только адаптироваться к новым вызовам, но и активно использовать возможности, которые предоставляет современная технология, для создания более привлекательной и эффективной образовательной среды.

Развитие нейросетевых технологий в последние десятилетия оказывают серьезное влияние на сферу образования, в том числе на преподавание гуманитарных дисциплин, таких как литература. Искусственный интеллект (ИИ) стал значительным инструментом, способствующим улучшению образовательного процесса, его адаптации под потребности различных категорий учащихся и введению инновационных методов обучения.

В контексте уроков литературы ИИ предлагает уникальные возможности для анализа текста, критического восприятия художественных произведений и формирования творческих навыков. Например, технологии обработки естественного языка позволяют анализировать литературные произведения на уровне семантики, выявляя ключевые темы, мотивы и стилистические особенности. Это открывает новые горизонты для обсуждения классических и современных текстов, расширяя горизонты понимания, как для учеников, так и для учителей.

С помощью ИИ можно создавать интерактивные обучающие платформы, которые учитывают индивидуальные особенности и интересы учащихся. Эти платформы могут предоставлять персонализированные задания, адаптированные к уровню подготовки каждого ученика, что особенно актуально в многоуровневых классах. Кроме того, такие системы могут сопровождать изучение литературных произведений различными мультимедийными материалами — фильмами, аудиокнигами, иллюстрациями, что делает процесс обучения более увлекательным и познавательным.

Искусственный интеллект также может способствовать развитию критического мышления и аналитических навыков у учащихся. За счет применения ИИ для генерирования вопросов к тексту или создать задания на сопоставление разных литературных стилей, учителя могут стимулировать дискуссии, углубляющие понимание произведений. Такие подходы формируют у учащихся не только умение воспринимать текст, но и навык его анализа, что крайне важно в процессе литературы.

Важным направлением в контексте применения ИИ на уроках литературы является автоматизированное оценивание письменных работ. Современные технологии позволяют не только проверять работы на наличие языковых ошибок, но и оценивать структуру аргументации, выявлять оригинальность идей и богатство словарного запаса. Это может значительно

снизить нагрузку на учителей, позволяя им сосредоточиться на более глубоких аспектах работы учащихся, таких как творческий подход или эмоциональное восприятие текста.

Однако использование ИИ в образовании не лишено рисков. Одним из таких рисков является зависимость от технологий, что может привести к утрате умений самостоятельно мыслить и анализировать. Сложные алгоритмы могут иногда давать некорректные результаты, что, в свою очередь, может исказить восприятие литературных произведений. Учителя должны оставаться главными фигурами процесса обучения, использующими ИИ как вспомогательный инструмент, а не заменяющий человеческий интеллект.

Нельзя не обратить внимание на этические аспекты применения ИИ в образовании. Вопросы приватности, защиты данных и обеспечения равного доступа к образовательным ресурсам становятся крайне актуальными. При разработке новых технологий важно учитывать потребности и права учащихся, создавая безопасную и инклюзивную образовательную среду.

Искусственный интеллект в уроках литературы способен трансформировать традиционные подходы к обучению, делая их более динамичными и интерактивными. Ученики, которые имеют возможность взаимодействовать с технологией, могут лучше осваивать материалы, получая более глубокое понимание прочитанного.

Воля к экспериментам и внедрение новых технологий в образовательный процесс могут сыграть решающую роль в формировании компетентного поколения, готового к вызовам современности. Применение ИИ позволяет развивать не только академические, но и социокультурные навыки, такие как способность работать в команде, принимать во внимание различные точки зрения и уважать разнообразие мнений.

С интеграцией ИИ в учебный процесс следует также учитывать необходимость профессионального роста педагогов. Учителя должны быть готовы к обучению и адаптации новых технологий, а также внедрению их в свою практику. Это требует как технической, так и методической подготовки, которая должна стать неотъемлемой частью педагогической программы.

Использование искусственного интеллекта в обучении литературе открывает новые горизонты для учеников и учителей, подтверждая, что это только начало долгого пути, который предположительно претерпит множество изменений и дополнений. С правильным подходом к внедрению технологий можно значительно повысить уровень образования, расширяя его гуманитарные и культурные аспекты.

В заключение, можно сказать, что искусственный интеллект имеет огромный потенциал для преобразования уроков литературы и повышения качества образования в целом. Однако для успешной интеграции ИИ в образовательный процесс необходимо учитывать как его преимущества, так и возможные риски. Важно вести открытый диалог о внедрении тех-

нологий в образование, привлекая к обсуждению всех заинтересованных сторон: учителей, учеников, родителей и экспертов в области технологий. Только так можно создать гармоничную образовательную среду, где искусственный интеллект будет служить инструментом для развития творческого потенциала и критического мышления, а не заменой традиционным методам обучения. В конечном итоге, задача состоит в том, чтобы найти баланс между использованием современных технологий и сохранением человеческого аспекта в образовании, что является особенно важным в контексте изучения литературы, где эмоции, чувства и личные интерпретации играют ключевую роль.

## Список литературы

1. Бадыков Р.И., Лёхин А.С., Чернова С.В. Внедрение технологий искусственного интеллекта в образование // Вопросы студенческой науки. – 2019. – № 9 (37). – С. 52-55. - URL <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tehnologii-iskusstvennogo-intellekta-v-obrazovanie/viewer> (дата обращения: 30.10.2024)

2. Долгая О.И. Искусственный интеллект и обучение в школе: ответ на современные вызовы // Школьные технологии. – 202. - № 4. – С.29 – 37. – URL <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-i-obuchenie-v-shkole-otvet-na-sovremennye-vyzovy/viewer> (дата обращения: 30.10.2024)

Исламгереева Я.С., Мерзликина И.В. Искусственный интеллект и его роль в образовании // TECHNICAL SCIENCE. – 2022. - № 31. – С. 42 – 46. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-i-ego-rol-v-obrazovanii/viewer> (дата обращения 29.10.2024)

3. Челюков В.А., Дубов В.М. Искусственный интеллект и будущее образование // Современное педагогическое образование. – 2020. – С. 27-31. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-i-budushee-obrazovaniya/viewer> (дата обращения: 02.11.2024)

4. Хабибуллин И.Р., Азовцева О.В., Гареев А.Д. Актуальность использования нейронных сетей в образовательных целях // Молодой ученый. – 2023. – № 13. – С. 176 – 178

**И.Н. Литовченко**, вед. науч. сотруд., litovira@rambler.ru  
**В.С. Лютикова**, младш. науч. сотруд., магистр техники и технологий,  
nikki\_valo16@gmail.com  
Национальный научный центр сейсмологических наблюдений  
и исследований МЧС РК, г. Алматы, Казахстан

## **ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ АСПЕКТ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

*Аннотация:* В статье рассматривается образовательный аспект применения Искусственного Интеллекта в сейсмологических исследованиях. Описываются этапы машинного обучения в сейсмологии и распознавания образов. Конкретно излагаются практические подходы к реализации некоторых интеллектуальных процессов в распознавании образов в сейсмоданных.

*Ключевые слова:* Искусственный Интеллект (ИИ), сейсмологические исследования, распознавание образов, машинное обучение, сейсмоданные.

**I.N. Litovchenko**, Leading Researcher, litovira@rambler.ru  
**V.S. Lyutikova**, Junior Research Fellow, Master of Engineering and Technology,  
nikki\_valo16@gmail.com  
National Scientific Center for Seismological Observations  
and Research of the Ministry of Emergency  
Situations of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

## **EDUCATIONAL ASPECT OF APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SEISMOLOGICAL RESEARCH**

*Abstract:* The article considers the educational aspect of the application of Artificial Intelligence in seismological research. The stages of machine learning in seismology and pattern recognition are described. Practical approaches to the implementation of some intelligent processes in pattern recognition in seismic data are specifically outlined.

*Key words:* Artificial Intelligence (AI), seismological research, pattern recognition, machine learning, seismic data.

В современных условиях активного применения Искусственного Интеллекта (ИИ) во всех сферах жизни, образовательный аспект применения ИИ в сейсмологических исследованиях имеет особое значение. Использование подхода искусственного интеллекта для извлечения, обработки и анализа данных существенно повышает точность и эффективность обнаружения землетрясений [1].

Несмотря на то, что ИИ является новой отраслью, он дает технологический рывок и ускоряет прогресс в исследованиях сейсмичности. Имеется, конечно, и ограниченность в практическом применении его методов. Однако в целом методы искусственного интеллекта показали отличную эффективность при анализе огромных и сложных наборов сейсмических данных и получении значимых результатов в этой области [1].

В последнее время, в частности, возрос интерес к использованию методик распознавания образов [2-4, 5, 6-10], глубокое обучение в сейсмологии. Одним из направлений является машинное обучение в сейсмологии.

В сейсмологии машинное обучение использует различные методы для поиска внутренних правил и зависимостей между данными, а затем их классификации или регрессии. Кроме того, машинное обучение обычно используется для классификации и анализа новых закономерностей или особенностей обнаруженных данных, поскольку, в отличие от сейсмологов, которые анализируют данные, используя интуицию и логику, оно обнаруживает особенности, выходящие за рамки человеческих возможностей [1].

Машинное обучение в сейсмологии основано на теории вероятности его применение в пять этапов [1]:

1. Сбор и разделение сейсмических данных для обучения и тестирования.
2. Предварительная обработка для очистки, форматирования и удаления/восстановления сейсмических данных.
3. В обучающей модели используются алгоритмы численной оптимизации для настройки сейсмических переменных.
4. Оцените модель на точность прогноза, используя тестовые данные.
5. Генерация новых данных для прогнозирования с использованием алгоритма машинного обучения.

Методы искусственного интеллекта показали отличную эффективность при анализе огромных и сложных наборов сейсмических данных и получении значимых результатов в сейсмологии.

Распознавание образов — важная задача компьютерного зрения, используемая для обнаружения экземпляров визуальных объектов определенных классов (например, людей, животных, автомобилей и зданий) в цифровых изображениях, таких как фотографии или видеокадры. Целью обнаружения объектов является разработка вычислительных моделей, которые предоставляют наиболее фундаментальную информацию, необходимую приложениям компьютерного зрения [11]. В этом плане методы обработки изображений не требуют исторических данных для обучения и по своей природе неконтролируемы. Эти методы ограничены несколькими факторами, такими как сложные сценарии и т.п.

Методы глубокого обучения обычно зависят от контролируемого или неконтролируемого обучения, при этом контролируемые методы являются стандартом в задачах компьютерного зрения. Производительность ограничена вычислительной мощностью графических процессоров, которая стре-

нительно растет с каждым годом [11]. Обнаружение объектов с помощью глубокого обучения значительно более устойчиво к окклюзии, сложным сценам и сложному освещению. Отметим, что требуется огромное количество обучающих данных; процесс аннотации изображений является трудоемким и дорогостоящим. Сегодня обнаружение объектов глубокого обучения широко признано исследователями и используется компаниями, занимающимися компьютерным зрением, для создания коммерческих продуктов [11].

Все перечисленные образовательные аспекты применения ИИ в сейсмологических исследованиях не исчерпывают полного класса задач, в решении которых могут применяться методы ИИ. На конкретном практическом образовательном аспекте в реализации некоторых интеллектуальных процессов с сейсмоданными, остановимся подробнее.

Например, имеется мировой каталог землетрясений, из которого можно выделить любые сейсмоактивные участки (регионы). Он выступает в качестве исходных данных (сейсмоданных). Формат сейсмоданных может быть любой, наиболее простой, \*.txt формат. Существует алгоритм и метод распознавания образов (роев землетрясений) [6,7,8]. Тогда, можно применить распознавание образов (роев) для любого выделенного участка на Земле. Этот этап является интеллектуальным процессом при визуализации сейсмоданных в Программной среде и имеет образовательный характер. Цепочка реализации метода ИИ по распознаванию роев для любого участка Земли по выбранным сейсмоданным (см. рис. 1, 2) помогают визуализировать данные в 3-D формате и на виртуальном глобусе.

В заключение можно сказать, что образовательные аспекты применения ИИ в сейсмологических исследованиях показал научный прогресс в применении современных технологий, переведя исследования и расчеты в интеллектуальные системы визуализации.

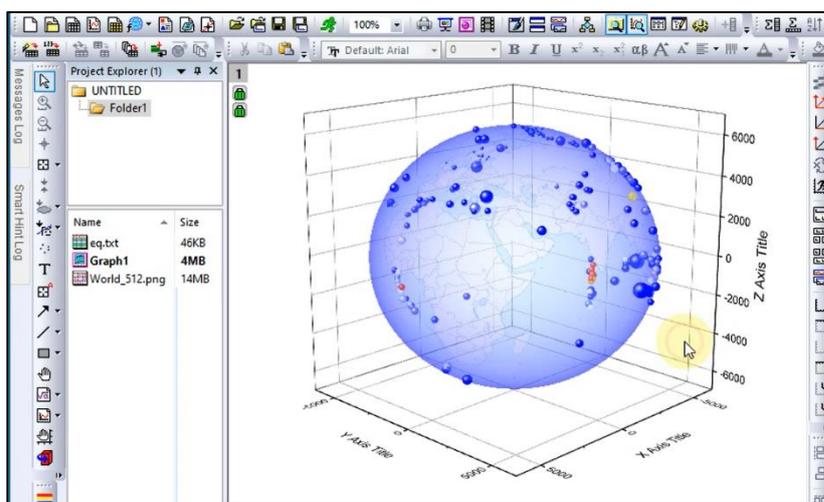


Рис. 1. 3-D модель Земли с сейсмоданными (составила: Лютикова В.С.)

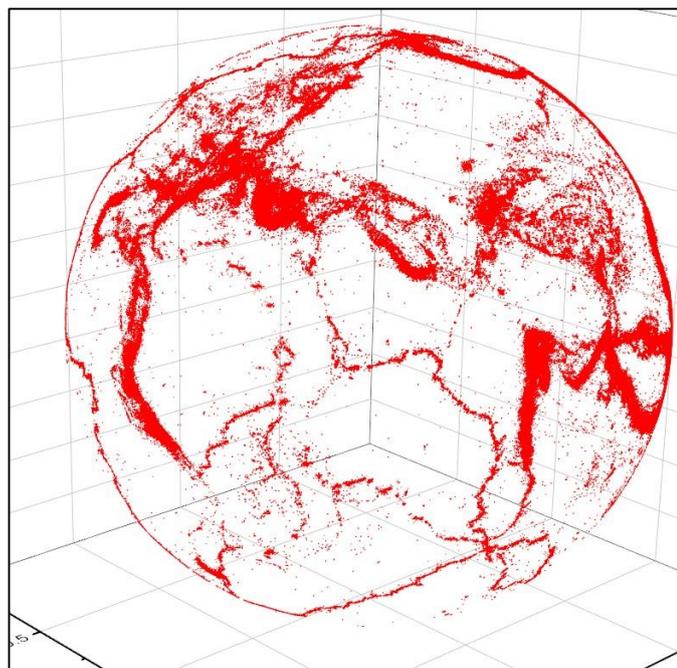


Рис. 2. Имитационная модель Земли с сейсмоданными (составила: Лютикова В.С.)

*Исследование выполнено в лаборатории физики геодинамических и сейсмических процессов «Национального научно-исследовательского центра сейсмологических наблюдений и исследований» МЧС РК в рамках фундаментальных исследований.*

## Список литературы

1. Искусственный Интеллект и антисейсмика // [Электронный ресурс]: режим доступа- <https://isaacantisismica.com/ru>
2. Философия искусственного интеллекта // Электронный ресурс. - [режим доступа]: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
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 // Инновационные технологии в геопространственной цифровой инженерии: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной к 115-летию член-корр. АН КазССР А.Ж.Машанова и 100-летию Академика АН КазССР Ж.С.Ержанова, г. 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, искусствен-

ному интеллекту и нейроинформатике. Девятая международная конференция по когнитивной науке. В 2 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. Распознавание образов с помощью искусственного интеллекта/ Электронный ресурс. - [режим доступа]: <https://habr.com/ru/articles/709432/>

12. Солнцева О.Г. Аспекты применения технологий искусственного интеллекта // E-Management. – Т 1. № 1. – 2018. – С. 43–51 // Электронный ресурс. - [режим доступа]: <https://guu.ru/wp-content/uploads/%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%B2%D0%B0-%D0%9E.%D0%93.pdf>

## КОМПЕТЕНТНОСТЬ НЕЙРОСЕТЕЙ ТРЕБУЕТ ПРОВЕРКИ

*Аннотация:* Обнаружено, что нейросети значительно различаются по возможностям и компетенции. В частности, некоторые нейросети, обученные на большом количестве текстовых источников, выдают полезную информацию, в то время как нейросети-художники оказались заикленными на создании гламурных персонажей и образов анимэ.

*Ключевые слова:* нейросети, тексты, изображения, психолингвистика

V.A. Filimonov, Ph.D., professor, filimonov-v-a@yandex.ru  
Sobolev Institute of Mathematics, Novosibirsk, Russia

## THE COMPETENCE OF NEURAL NETWORKS REQUIRES VERIFICATION

*Abstract:* It was found that neural networks vary significantly in capabilities and competencies. In particular, some neural networks trained on a large number of text sources provide useful information, while neural network artists turned out to be fixated on creating glamorous characters and anime images.

*Key words:* neural networks, texts, images, psycholinguistics

К настоящему времени нейросети уверенно вышли на рынок услуг по написанию текстов и созданию изображений. Сам термин «нейросеть» на текущую дату (21.12.2024) найден Яндексом на 537 000 страницах, а Гугл термин «neural network» фиксирует на 391 000 000 страницах. Задачей настоящей статьи является информация потенциальных пользователей о возможностях и проблемах, которые обнаружил автор при работе с обученными нейросетями.

Одной из задач был системный анализ действий лиц, принимающих решения в условиях чрезвычайных ситуаций [1]. После обычного завершения текста, содержащего рекомендации, было решено сравнить результаты автора с рекомендациями нейросети *aigital*. В результате диалога была получена стенограмма около 15 страниц текста, содержащая интересные дополнения, примеры и ссылки. Дополнительная проверка показала, что в Интернете нет источника, с которого могла быть скопирована стенограмма

и наборы рекомендаций. Иными словами, нейросеть успешно синтезировала доступную информацию по запрошенной теме.

Другой задачей было конструирование эксперимента по исследованию эффекта «приманки», который состоит в том, что в ситуации выбора в определённой популяции с целью увеличения частоты выбора целевой альтернативы организаторами дополнительно вводится более слабая альтернатива, похожая на целевую [2]. Известные эксперименты проводились для ситуаций политических выборов. Поскольку предполагалось работать со школьниками и студентами, потребовалось сконструировать новый эксперимент. Было решено использовать визуализацию, успешно применённую в психолингвистике [3], где исследовалась связь визуальных образов с терминами определённого языка. Пример классического экспериментального материала приведён на Рис. 1, где изображены мамлына, жаваруга, плюк, лиар, а также визуализирована известная филологам классическая фраза «Глокая куздра штеко будланула бокра и курдячит бокрёнка».

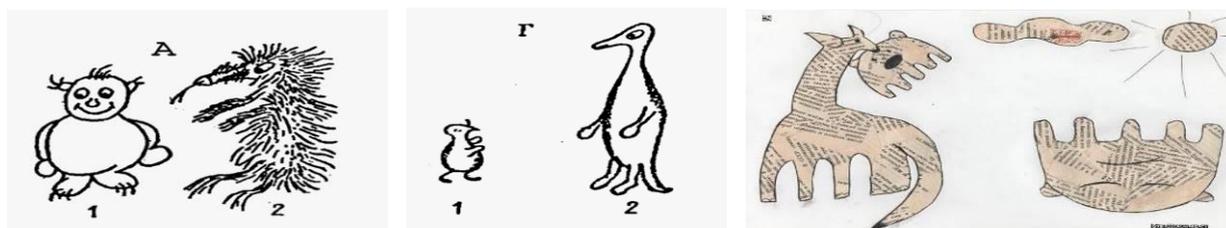


Рис. 1. Классические персонажи

В нашем эксперименте ставилась задача выбора существа для космического зоопарка. Чтобы исключить возможность найти ответ в Интернете, было решено создать новые изображения для известных персонажей. Кроме того, необходимы были изображения-приманки, иначе, гибриды нескольких существ. Для создания изображений была сделана попытка использовать нейросеть-художника ArtGeneration. Изображения оказались крайне неудовлетворительными. На Рис. 2 приведены результаты для персонажей «мамлына» (два изображения слева) и «жаваруга» (два изображения справа).

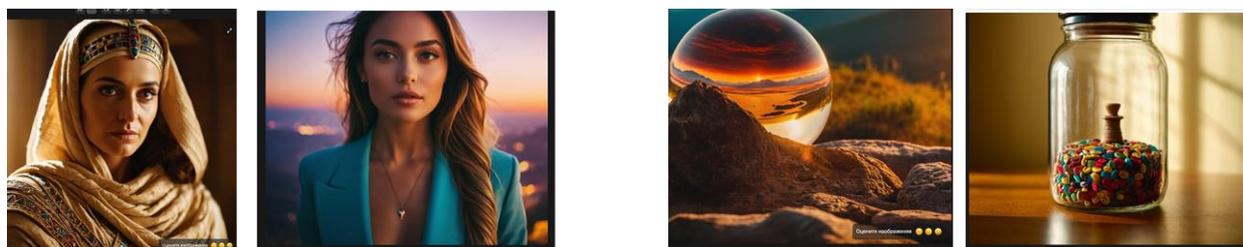


Рис. 2. Мамлына и жаваруга в представлении нейросети ArtGeneration

Попытка использовать нейросеть-художника той же платформы, что и нейросеть-текстовый консультант, также оказалась неудачной. Для наглядности приведём результаты эксперимента по визуализации произве-

дения «Дед Мазай и зайцы». Нейросеть-консультант по запросу «нарисовать карикатуру» на эту тему выдаёт вполне приемлемый результат (приведён ниже) с рекомендацией: «Я не умею рисовать, обратитесь к нейросети-художнику». Ниже текст нейросети.

*Представьте себе лодку, переполненную зайцами, которые забавно выглядывают из всех возможных мест. Дед Мазай сидит в центре, держа весло, его лицо выражает смесь серьезности и легкой усталости. Один заяц сидит у него на плече, другой обвивает весло, а третий держится за край лодки и смотрит вниз, будто бы боится упасть. На заднем плане можно изобразить лес и слегка затопленную местность, чтобы передать атмосферу весеннего разлива реки. Этот образ можно сделать особенно комичным, добавив мелкие детали, например, зайца, который случайно наступил деду на шляпу или пытается украсть морковку из его сумки. Художник наверняка сможет воплотить эту идею в жизнь с юмором и теплотой!*

Однако эта подсказка не помогла. Изображения, приведённые на Рис. 3, напоминают, скорее, иллюстрации к произведениям Л. Кэррола.



Рис. 3. Иллюстрации нейросети на тему «Дед Мазай и зайцы»

Аналогичная ситуация имела место и для других произведений. Текстовая нейросеть адекватно воспроизводила, например, сказку про репку и трёхголового Змея-Горыныча. Нейросеть художник рисовала картины, даже отдалённо не соответствующие заданным темам. Анализ галерей изображений, созданных разными системами-художниками по запросам пользователей, показал их заикленность на создании гламурных персонажей, образов анимэ, драконов, чудовищ, космических пейзажей и т.п.

Здесь возникает исследовательская задача, продолжающая исследования в области субъектности нейросетей [4], аналогичная задаче Молине: «Сколько времени потребуется человеку, слепому от рождения, но которому вернули зрение, чтобы связать тактильные ощущения с визуальными?» Иными словами, необходимо исследовать кросс-сенсорные карты [5]. Добавим, что может потребоваться работа, аналогичная работе Я.А. Коменского по созданию учебника для детей *Orbis Sensualium Pictus* («Наблюдаемый мир в картинках», 1658 г.)

Результаты можно сформулировать следующим образом.

1. Целесообразно проводить тестирование нейросети с использованием запросов по аналогичным ситуациям, а после получения ответа нейросети производить поиск документов и сайтов, с которых мог быть скопирован полученный ответ.

2. Прогресс нейросетей идёт чрезвычайно быстро, и они способны давать полезные рекомендации.

3. Существенно различается «интеллект» нейросетей, предназначенных для обмена текстами, и нейросетей, предназначенных для генерации изображений по текстовому описанию и рисунку-образцу. Последние требуют существенных корректировок указанных описаний и образцов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института математики СО РАН, проект FWNF-2022-0016.*

## Список литературы

1. Филимонов В. А. Математика для чрезвычайных ситуаций. Краткий курс эксперта // Методика преподавания математических и естественно-научных дисциплин: современные проблемы и тенденции развития: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. – Омск: Омский гос. университет им. Ф.М. Достоевского, 2024. – С. 196-200.

2. Элленберг Дж. Как не ошибаться. Сила математического мышления. – М.: МИФ, 2018. – 576 с.

3. Горелов И.Н., Седов К.Ф. Основы психолингвистики: Учебное пособие. – М.: Лабиринт, 2010. – 320 с.

4. Филимонов В. А. Парадокс субъектности нейросетей // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2023. – С. 247-250.

5. Филимонов В.А., Чернявская В.С. Формализация одушевлённости на примере понятия «любовь» // Онтология проектирования. – 2022. – Т. 12, №1(43). - С. 11-24. – DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-1-11-24.

## Секция 1

**Робототехнические системы и комплексы, мехатроника ..... 4***Горобцов А.С., Тарасов П.С., Данилевич В.М. (Волгоград)*

Синтез управления зооморфных роботов с податливыми звеньями ..... 5

*Кацурин А.А., Моисеенко А.В. (Владивосток)*

Система согласованной работы двух манипуляционных мобильных роботов ..... 10

*Лебедев А.В. (Владивосток)*

Разработка и исследование системы со скользящим режимом для нестационарного робототехнического объекта при ограничениях управляющего сигнала ..... 16

*Осман С.Ш., Аксенов К.А. (Екатеринбург)*

Измерение времени прохождения сигналов по петле обратной связи робота ..... 22

*Плотников А.В. (Москва)*

Использование кинестатического анализа в системе управления мобильными сервисными роботами ..... 26

## Секция 2

**Специальная робототехника ..... 32***Бочарова В.В., Кожевников О.В., Кравченко Д.Г. (Москва)*

Когнитивные карты в составе интеллектуального интерфейса для визуальной навигации автономных мобильных роботов при совместном управлении человеком и машиной ..... 33

*Довженко В.А., Крючков Б.И., Куликов И.Н., Усов В.М. (Звездный городок)*

Когнитивные карты в составе интеллектуального интерфейса для визуальной навигации автономных мобильных роботов при совместном управлении человеком и машиной ..... 39

*Серов Д.К. (Санкт-Петербург)*

Модификация гидродинамической модели подводного робота с использованием аналитической модели руля ..... 45

*Серов Д.К. (Санкт-Петербург)*

Подход к математическому моделированию динамики гидравлического подводного манипулятора ..... 51

|   |    |
|---|----|
| <i>Шекелашвили С.Т. (Санкт-Петербург)</i><br>Численное моделирование плавания рыбоподобного робота с двухплавниковым двигателем ..... | 57 |
|---|----|

### Секция 3

#### **Инженерия знаний и базы знаний..... 62**

|  |    |
|--|----|
| <i>Аксенов К.А., Боярская А.А., Калинин И.А., Аксенова О.П. (Екатеринбург)</i><br>Учебный модуль приложения для анализа текста на основе методов тематического моделирования ..... | 63 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <i>Артемьева И.Л., Сусоева А.Д. (Владивосток)</i><br>Алгоритмы модификации семантических связей тематического тезауруса при обработке текстов научных публикаций ..... | 69 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <i>Колганов Р.О., Чукунов О.П., Ларионов В.В., Тянь Д.Е., Михалев А.С. (Красноярск)</i><br>Проектирование информационной системы классификации крови для анализа иммуномодулирующих параметров ..... | 73 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <i>Крючкова Е.Н., Вопилова Е.В. (Барнаул)</i><br>Алгоритмы модификации семантических связей тематического тезауруса при обработке текстов научных публикаций ..... | 81 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <i>Созинова Е.А., Попова М.И., Парфенова А.И., Михалев А.С. (Красноярск)</i><br>Методы формализации знаний для автоматического анализа клеток крови: разработка и применение базы знаний ..... | 86 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| <i>Углев В.А. (Железногорск)</i><br>Задача формализации модели поведения учащегося для формирования базы знаний интеллектуальной автоматизированной обучающей системы ..... | 93 |
|---|----|

|  |     |
|--|-----|
| <i>Углев В.А. (Железногорск)</i><br>Различия в подходе к формализации знаний И.А. Умова и Д.А. Поспелова на примере сложных технических объектов с повышенными требованиями к надёжности ..... | 101 |
|--|-----|

### Секция 4

#### **Модели и методы анализа данных в интеллектуальных системах ..... 109**

|   |     |
|---|-----|
| <i>Васькин К.В., Аксенов К. А. (Екатеринбург)</i><br>Анализ применимости генеративных нейронных сетей к задаче формирования требований к программному обеспечению ..... | 110 |
|---|-----|

|   |     |
|---|-----|
| <i>Гудков Д.С., Альсова О.К. (Новосибирск)</i><br>Учебный модуль приложения для анализа текста на основе методов тематического моделирования .....                                    | 113 |
| <i>Гуськов П.О., Брежнев Р.В. (Красноярск)</i><br>Учебный модуль приложения для анализа текста на основе методов тематического моделирования .....                                    | 119 |
| <i>Клушина А.А., Мурашов М.В. (Москва)</i><br>Использование современных нейронных сетей для прогнозирования цен на недвижимость .....   | 124 |
| <i>Кобаченко А.А., Паротькина М.А., Егоров С.В., Волынчиков М.А. (Москва)</i><br>Предобработка данных, поступающих на виртуальный анализатор нефтеперерабатывающего предприятия ..... | 130 |
| <i>Ларионова А.А., Альсова О.К. (Новосибирск)</i><br>Разработка модуля "Кластерный анализ" учебного тренажера.....  | 134 |

## Секция 5

### **Алгоритмы и системы искусственного интеллекта ..... 141**

|   |     |
|---|-----|
| <i>Артемьев А.В., Оськин Д.А., Якименко Е.А. (Владивосток)</i><br>Развитие интеллектуальных методов, основанных на использовании нечеткой логики для реализации алгоритма расхождения морских судов ..... | 142 |
| <i>Архипов А.Е., Кобзарь Д.С., Забелло К.К., Пожилов А.А. (Санкт-Петербург)</i><br>Применение нейронной сети для численного моделирования обтеканий препятствий различных форм .....                      | 147 |
| <i>Беззубов А.А., Аксенов К.А. (Екатеринбург)</i><br>Обзор методов оптимизации и прогнозирования режимов работы виртуальных электрических станций .....   | 153 |
| <i>Васильев П.В., Даринцев О.В., Мунасыпов Р.А. (Уфа)</i><br>Сравнительный анализ нечеткой логики и ассоциативной памяти в задачах интеллектуального управления .....                                     | 159 |
| <i>Кузьменков М.Ю. (Москва), Жаворонков А.Е. (Уфа)</i><br>Выделение региона интереса для целей распознавания повреждений дорожного покрытия .....   | 164 |
| <i>Лелюшкин Д.И., Гаврилов А.В. (Новосибирск)</i><br>Применение технологий компьютерного зрения для сбора статистики визуального контакта и жестикуляции преподавателя в онлайн-обучении .....            | 171 |
| <i>Матвеев В.Д., Архипов А.Е. (Санкт-Петербург)</i><br>Исследование быстродействия модели сегментации SAM на мобильном вычислителе .....  | 177 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Перфильев Д.А. (Красноярск)</i><br>Стратегия корректировки угла упреждения на основе анализа ошибки прогноза .....                              | 183 |
| <i>Самигулина З.И., Дюсенкулова Б.Ж. (Алматы)</i><br>Разработка архитектуры умной производственной системы для управления сложными объектами ..... | 189 |

## Секция 6

### Управление роботами и интеллектуальная автоматизация ..... 195

|  |     |
|--|-----|
| <i>Губанков А.С., Горностаев И.В. (Владивосток)</i><br>Разработка метода формирования программной скорости движения БПЛА квадрокоптерного типа .....   | 196 |
| <i>Добрынин Д.А. (Москва)</i><br>Выбор походок для шагающего домашнего робота .....  | 202 |
| <i>Зинина А.А., Котов А.А. (Москва)</i><br>Влияние эмоциональности робота на эффективность изучения английского языка школьниками .....  | 208 |
| <i>Которженко С.А., Мутовин М.А., Чубарь А.В. (Красноярск)</i><br>Система тепло-водоснабжения автономного помещения в концепции умного дома .....  | 216 |
| <i>Мутовин М.А., Самохов Д.А., Чубарь А.В. (Красноярск)</i><br>Построение системы управления промышленным роботом в среде динамического моделирования технических систем SimInTech .....   | 222 |
| <i>Окромелидзе В.Г. (Санкт-Петербург)</i><br>Адаптивное управление захватным устройством двурукого манипулятора при силовом взаимодействии с объектами .....   | 228 |
| <i>Самохов Д.А., Которженко С.А., Чубарь А.В. (Красноярск)</i><br>Построение нечетких регуляторов в АСУТП в среде динамического моделирования технических систем SimInTech .....   | 234 |
| <i>Скрипниченко Н.А. (Санкт-Петербург)</i><br>Алгоритм пирамидального формирования управления роем мобильных роботов в трехмерной среде .....  | 240 |
| <i>Скрыль М.И., Бахшиев А.В., Черников А.В. (Санкт-Петербург)</i><br>Разработка системы прототипирования интеллектуальной видеоаналитики для производств .....   | 246 |
| <i>Ферапонтов С.Г., Герасименко И.В., Мурашов М.В., Ланцов В.И. (Москва)</i><br>Анализ моделей виртуальных анализаторов показателей качества продуктов для системы усовершенствованного управления технологическим процессом газофракционирующей установки ..... | 254 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Фомин И.С., Зажарская А.В. (Санкт-Петербург)</i><br>Разработка программного средства для проектирования и вычисления алгоритмов управления МРТК .....  | 258 |
| <i>Чубарь А.В., Редкоус Г.Л., Мартыненко А.Д., Голубев Е.А. (Красноярск)</i><br>Управление козловым краном с использованием модели, выполненной в среде динамического моделирования SimInTech ..... | 265 |
| <i>Шардыко И.В. (Санкт-Петербург)</i><br>Оптимизация регулируемой жёсткости шарниров манипулятора в контактных задачах .....  | 271 |
| <i>Юхимец Д.А. (Владивосток)</i><br>Метод автоматического формирования программы движения манипулятора по зашумленным трехмерным моделям .....  | 278 |
| <i>Юхимец Д.А., Губанков А.С., Горин В.А. (Владивосток)</i><br>Разработка метода синтеза нелинейной системы управления пространственным движением беспилотного летательного аппарата .....          | 285 |

## Секция 7

### **Образовательные и социогуманитарные аспекты искусственного интеллекта и робототехники .....**

291

|   |     |
|---|-----|
| <i>Боржигон Е.В. (Железногорск)</i><br>Сравнительный анализ методов выбора решений в интеллектуальной автоматизированной обучающей системе на базе механизма экспертной системы ..... | 292 |
| <i>Борисов Н.А., Егоров К.С. (Нижний Новгород)</i><br>Вопросы преподавания робототехники в ВУЗе .....   | 297 |
| <i>Бутаков Р.А., Каюмова Ю.Е. (Екатеринбург)</i><br>Влияние образовательной робототехники на формирование soft skills у студентов .....   | 303 |
| <i>Изъо И.В. (Мариуполь)</i><br>Уроки будущего: особенности использования искусственного интеллекта на уроках литературы .....  | 309 |
| <i>Литовченко И.Н., Лютикова В.С. (Алматы)</i><br>Образовательный аспект применения искусственного интеллекта в сейсмологических исследованиях .....                                  | 314 |
| <i>Филимонов В.А. (Новосибирск)</i><br>Компетентность нейросетей требует проверки .....   | 319 |