

УДК 004.896, 004.3, 372.862

doi:10.18720/SPBPU/2/id-95

А. Д. Клиновицкий¹, М.С.Ананьевский²

ФОРМИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ В ШКОЛЕ И ВУЗЕ



¹Андрей Дмитриевич Клиновицкий,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (995)596-2767, E-mail: adk160501@gmail.com.



²Михаил Сергеевич Ананьевский,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия, Санкт-Петербург
Институт проблем машиноведения РАН, Россия, Санкт-
Петербург, E-mail: msaipme@gmail.com.

Аннотация

В работе, на основе опыта преподавания в школах, кружках и вузах, излагаются подходы к формированию лабораторной базы для решения задачи обучения будущих инженеров мобильной робототехнике. Рассматриваются типичные проблемы и предлагаются апробированные варианты их решения. Представлено несколько опорных учебных задач, моделирующих реальные промышленные приложения. Представлены результаты ОКР для создания лабораторной базы и перечень необходимого оборудования.

Ключевые слова: робототехника, обучение робототехнике, колесные роботы, управление роботами.

Введение

Сегодня сложно найти отрасль промышленности, в которой не использовались бы робототехнические решения. Роботы используются повсеместно: роботизированные склады [1], беспилотники для

мониторинга местности [2] и грузоперевозок [3], манипуляторы на конвейерном производстве [4] и т. д. Нарастающий кадровый голод уже привел к тому, что робототехнику ввели как обязательный модуль в школьный предмет «Труд» в 5-9 классах (273-й Федеральный закон «Об образовании»). Постепенно формируется лабораторная база для обучения робототехники в школах, как в Российской Федерации, так и за рубежом [5-9]. Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта, происходящее в последнее десятилетие, добавляет новые требования к содержанию учебных курсов, которые, в свою очередь, создают требования к лабораторной базе.

Роботы из подручных материалов

Несмотря на кажущуюся простоту и несовершенство, роботы собранные «на коленке» из подручных материалов обладают большим потенциалом и способны показывать хорошие результаты на студенческих соревнованиях: так, например, робот изображенный на рисунке 1, победил на соревнованиях "Кубок РТК Высшая Лига: Доставка лекарств 2024" оставив далеко позади хорошо спроектированных роботов. В изображенном роботе используется Raspberry Pi, что расширяет его возможности с точки зрения обучения в вузах.

Робот, полностью собранный обучающимся из недорогих и доступных ресурсов, позволяет учащимся освоить основы робототехники без необходимости в сложных технических навыках и дорогостоящем оборудовании.

К примеру, в таком роботе можно использовать в качестве шасси систему питания робота, а именно готовый повербанк. Это удешевляет конструкцию и убирает необходимость в создании корпуса. Шасси включает два приводных и одно флюгерное колесо. На шасси легко внедрить любые датчики по необходимости, без дополнительного оборудования, используя двусторонний скотч. Датчики повышают интерактивности роботов, к примеру, датчик линии или датчики расстояния. В качестве микроконтроллера также используется Arduino.

Список минимальных комплектующих:

Повербанк – в качестве шасси и АкБ.

2 сервопривода MG996 и колес для него, в качестве приводных колес.

Флюгерное колесо, сделанное из шарика от подшипника.

Набор датчиков, включающих датчики линии и расстояния по необходимости.

Для создания робота с нуля не требуются какое-либо оборудование, все части закупаются готовыми и соединяются посредством двустороннего скотча.

Стимулирование учащихся к экспериментированию с материалами и конструкциями для развития инженерного мышления, а возможность создания уникальных деталей при помощи 3D-принтера (опционально) расширяет возможности образовательного процесса.

Недостатками такого решения являются:

1) Длительный процесс сборки — каждый робот уникален, что требует дополнительного времени преподавателю на поиск ошибок у обучающихся.

2) Ограниченная надежность — использование подручных материалов (например, двустороннего скотча) может привести к нестабильности конструкции

Преимущества:

1) Образовательная ценность — обучающиеся осваивают основы робототехники, микроэлектроники и программирования.

2) Низкая себестоимость — используются доступные материалы, что делает проект бюджетным.

3) Стимул для экспериментов — возможность использовать 3D-печать для уникальных деталей развивает инженерное мышление.

4) Междисциплинарность — интеграция механики, электроники и программирования в одном проекте.

5) Доступность для начинающих — отсутствие сложных инструментов позволяет сосредоточиться на творчестве и логике решения задач.



Рис. 1. Пример самодельного робота

Готовые решения

Главным преимуществом готовых роботов, это отсутствие необходимости в их разработке и сборке, настройки или поиска компонентов. Их можно использовать сразу после распаковки, что

экономит время и позволяет сосредоточиться на программировании, алгоритмах и решении задач, а не на технических нюансах конструкции.

Рассматривая готовые робототехнические решения с коммерчески доступными аналогами, доминирующими на отечественном рынке образовательной робототехники, такие как OmegaBot, представленный на рисунке 2, и Lego Mindstorms EV3, изображенный на рисунке 3.



Рис. 2. OmegaBot [10]



Рис. 3. Lego Mindstorms EV3 [11]

OmegaBot легко оперировать роботом, благодаря Arduino на борту, но с ограниченным количеством заданий из-за малого количества датчиков. Два датчика линии не позволяют обучающемуся изучать сложные регуляторы движения, а магнитные крепления для датчиков не позволяет легко модифицировать платформу своими силами. Наличие Bluetooth

модуля позволяет использовать данного робота в режиме телеуправления, а возможность модификации с техническим зрением – использовать его для обучения в вузе. В производственном процессе используется лазерная резка, фрезеровка и 3D-печать.

Lego Mindstorms EV3 демонстрирует высокую эффективность в интеграции конструкторских и программно-алгоритмических аспектов обучения. Его модульная архитектура, основанная на стандартизированных элементах крепления, обеспечивает быстрое прототипирование и адаптацию под разноуровневые учебные задачи. Однако EV3 обладает рядом ограничений, главным из которых является закрытая экосистема, а именно совместимость только с оригинальными датчиками и актуаторами Lego, что повышает стоимость расширения функционала. В производственном процессе используется термопластавтомат, лазерная резка.

Преимуществом готовых решений является:

- 1) Модульность и скорость сборки.
- 2) Поддержка образовательных программ.

Недостатками является:

- 1) Ограниченный функционал и трудности в его расширении.
- 2) Высокая стоимость.
- 3) Закрытая экосистема.
- 4) Узкая специализация.

При проектировании образовательных программ по робототехнике ключевым вопросом становится выбор платформы, которая обеспечивает не только решение текущих учебных задач, но и формирует навыки, актуальные для будущей профессиональной деятельности. К примеру, следует отдавать предпочтения платформам на основе STM32 или Arduino, по сравнению с проприетарными микроконтроллерами.

Собственные разработки

Собственные разработки с одной стороны позволяют построить робототехническую базу под задачи, под которые обучают студентов, возможно продиктованные индустриальным партнером, с другой – позволяют расширить подготовку студентов с точки зрения конструирования и разработки робототехнических систем.

Для лабораторной базы был разработан мобильный робот, спроектированный для максимальной гибкости и адаптивности в обучении. В основном, робот разрабатывался как платформа, которую легко модифицировать под необходимые задачи в обучении, показанный на рисунке 4. Его базовая конструкция включает:

Шасси: состоит из двух опорных колес с независимым управлением и флюгерное колесо, обеспечивающих устойчивость и маневренность.

Микроконтроллер: используется микроконтроллер Arduino Uno, являющийся легким в освоении и не требующим специализируемых навыков для работы с ним [12].

Датчики:

Модуль движения по линии, состоящий из 4 оптопар TCRT5000 и датчика цвета TCS3200, позволяющий распознавать оттенки, что актуально для задач сортировки и логистики. Наличие больше двух датчиков позволяет создавать сложные регуляторы, на подобии ПИД. Датчик движения по линии показан на рисунке 5.

Лазерные дальномеры VL53L0X для измерения расстояний и решения задач навигации в лабиринтах.

Датчик освещенности (фоторезисторы), расширяющий возможности навигации в изменяющихся условиях.

Двигатели: два сервопривода постоянного вращения (MG996), выбранные за их преимущества перед традиционными двигателями постоянного тока, благодаря интеграции энкодера, двигателя и драйвера в одном корпусе [13]. Возможность плавного регулирования скорости и момента без дополнительных схем управления делают их лучшим выбором в качестве двигателей для робототехнических платформ в обучении.

Визуализация: Две индикаторные полосы на адресных светодиодах (по 9 элементов каждая), отображающие стрелки и поддерживающие цветовые сигналы. Это не только упрощает отладку, но и имитирует интерфейсы промышленных роботов, позволяя выводить информацию от робота пользователю.

Модульность: Возможность интеграции дополнительных датчиков (например, гироскопов) или манипуляторов через универсальные интерфейсы (UART, I2C), либо цифровые или аналоговые пины.

Для создания робота с нуля необходимо использовать 3D-принтер, СО2 лазерный станок, паяльную станцию и иметь базовые навыки в САПР, к примеру, в Компас-3D. Для подключения всей электроники используется схема, показанная на рисунке 6, с указанными интерфейсами подключения устройств.

Преимуществами собственных решений является:

- 1) Образовательная ценность.
- 2) Стимул для экспериментов.
- 3) Междисциплинарность.

Недостатками является:

- 1) Необходимость в станках.
- 2) Длительный процесс разработки и тестирования.
- 3) Необходимость в многопрофильных преподавателях.



Рис. 4. Платформа для обучения

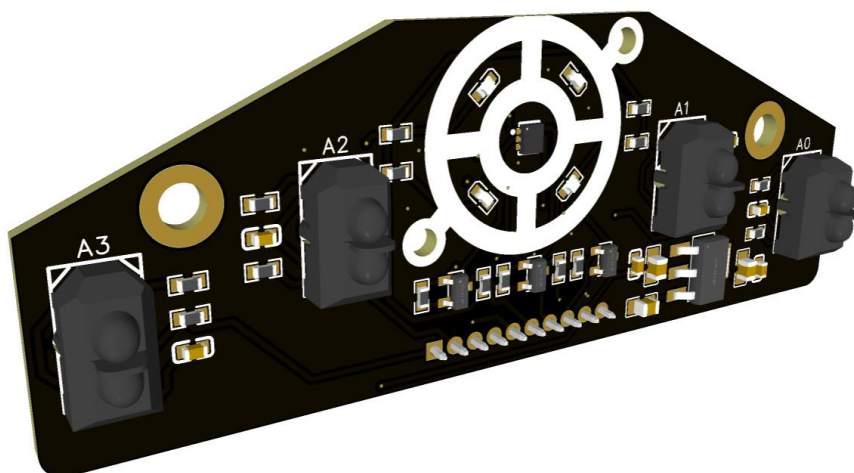


Рис. 5. Датчик движения по линии

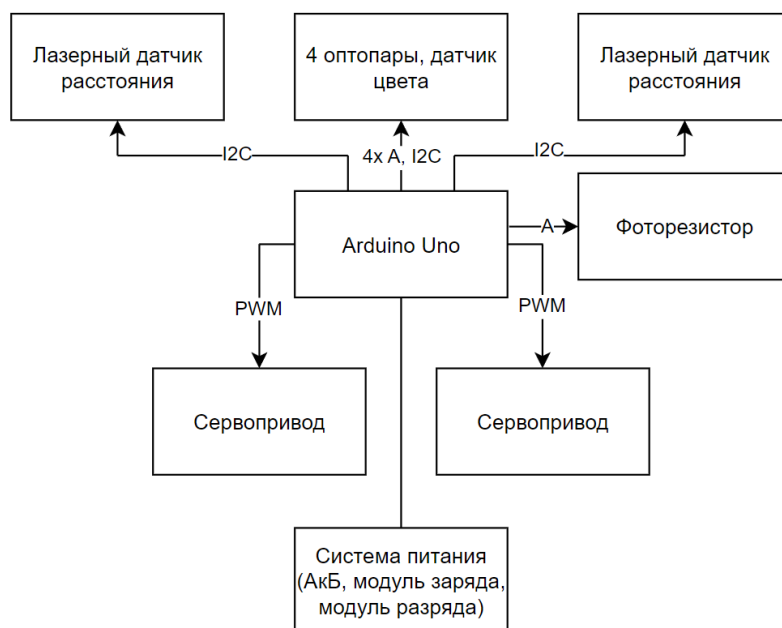


Рис. 6. Схема управляющей платы

В образовательном процессе ключевыми модельными задачами, отражающими реальные инженерные задачи, являются движение по линии и телеуправление роботом.

Первая задача имитирует навигацию складских роботов, требующую разработки алгоритмов следования по траектории (например, ПИД-регуляторы) и интеграции систем локализации (датчики линии, ИК-камеры). Ее усложненная версия включает координацию группы роботов, что актуально для изучения распределенных систем управления и предотвращения коллизий.

Вторая задача — телеуправление — направлена на освоение дистанционного взаимодействия с роботом через Bluetooth, Wi-Fi или радиоканалы. Она охватывает сценарии исследования труднодоступных зон: прохождение лабиринта (наземный робот), картографирование морского дна (подводный дрон) или мониторинг территорий (квадрокоптер).

Такие задачи развивают навыки работы с системами «робот-оператор», обработки данных с сенсоров и адаптации к изменяющимся условиям среды. Обе задачи служат основой для междисциплинарного обучения, объединяя механику, электронику и программирование, а также готовят студентов к решению прикладных проблем в логистике, экологическом мониторинге и роботизированной разведке.

Проблемы современного образования

В современных образовательных системах наблюдается тенденция приобретения высокотехнологичных образовательных роботов, которые не

интегрируются в учебный процесс. Основными барьерами выступают высокая стоимость оборудования и риски его повреждения, что приводит к его хранению в не распакованной упаковке. Данная практика усугубляется отсутствием гарантированного сервисного обслуживания, что возлагает на педагогический персонал ответственность за сохранность устройств без предоставления инструментов для их восстановления, а образовательные наборы выходят из строя примерно в течение 6-18 месяцев активной эксплуатации. Как следствие, образовательные организации сталкиваются с ситуацией, когда инвестиции в новые технологии не повышают качество обучения, а полученное оборудование превращается в актив, используемый преимущественно для демонстрации технологической оснащённости учреждения.

Ключевым решением обозначенной проблемы является использование робототехнических комплексов с модульной архитектурой и открытой элементной базой, представленные выше. Такие устройства обладают значимым преимуществом: их ремонтпригодность обеспечивается за счет замены компонентов стандартными инструментами и доступными материалами, что исключает зависимость от необходимости в постоянном дорогостоящем обслуживании. В условиях школы, где отсутствуют специализированные станки для технического обслуживания, а из оборудования есть обычно только 3D-принтер, эта характеристика становится критически важной. Упрощенная конструкция позволяет учащимся самостоятельно участвовать в восстановлении работоспособности устройств, превращая поломку в образовательный процесс.

Таким образом, выбор простых роботов не только снижает эксплуатационные риски, но и способствует формированию практических инженерных навыков, обеспечивая устойчивое внедрение технологий в учебный процесс без страха их преждевременного выхода из строя.

Результаты

В результате работы можно выделить преимущества и недостатки обсужденных решений, показанные в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение образовательных робототехнических платформ

Вариант робота	Преимущества	Недостатки
Робот из подручных средств	1) Образовательная ценность 2) Низкая себестоимость 3) Стимул для экспериментов 4) Междисциплинарность 5) Доступность для начинающих	1) Длительный процесс сборки 2) Ограниченная надежность

Готовое решение	1) Модульность и скорость сборки 2) Поддержка образовательных программ	1) Ограниченный функционал и трудности в его расширении 2) Высокая стоимость 3) Закрытая экосистема 4) Узкая специализация
Самодельный робот	1) Образовательная ценность 2) Стимул для экспериментов 3) Междисциплинарность	1) Необходимость в станках 2) Длительный процесс разработки и тестирования 3) Необходимость в многопрофильных преподавателях

Использование самодельных роботов в обучении продемонстрировало значительное повышение интереса обучающихся к робототехнике. Апробация методики проходила на обучающихся 10-11 и 5-9 классов. В результате у обучающихся возросла мотивация (по сравнению с обучением на существующих робототехнических наборах) благодаря возможности самостоятельно собрать робота из доступных компонентов, который остается у обучающихся, а не у учебного заведения. Низкая стоимость комплектующих и отсутствие необходимости в специализированном оборудовании сделали возможным модифицировать робота после окончания обучения.

Ключевые результаты включают:

- Повышение вовлеченности. Многие из обучающихся не встречались в жизни с робототехникой, а возможность оставить робота себе повысила их мотивацию и вовлеченность в процесс.
- Улучшение практических навыков. Обучающиеся освоили базовые навыки, такие как 3D-моделирование и базовое программирование C/C++.
- Креативность и адаптивность. Обучающиеся экспериментировали с конструкциями, используя подручные материалы (например, картон для корпусов), что подтвердило гипотезу о важности гибкости в инженерном проектировании.

Обсуждение

Требуется формирование лабораторной базы, которая позволит создавать роботов как «на коленке», так и профессиональным уровнем, в зависимости от образовательного учреждения и какого специалиста готовят и подобные вещи должны централизованно финансироваться.

Также инженерных компетенций могут формироваться как при изучении базовых профессиональных дисциплин (к примеру инженерная графика, начертательная геометрия), так и при комплексных, таких как робототехника [14], [15].

Полученные результаты согласуются с исследованиями, подчеркивающими роль доступности ресурсов в образовательной робототехнике. Например, в работах [16], [17] указывают, что снижение финансовых и технических барьеров повышает вовлеченность учащихся из менее обеспеченных регионов. Использование дешевых роботов дополняет эти выводы, предлагая конкретный алгоритм действий.

Значимость результатов:

- Доступность дополнительного образования. Подход устраняет зависимость от дорогостоящих наборов (например, LEGO Mindstorms), делая робототехнику доступной для школ и учеников с ограниченным бюджетом.
- Формирование инженерного мышления. Акцент на экспериментировании развивает навыки решения реальных задач, что соответствует трендам STEM-образования [18].
- Подготовка кадров. Упрощение начальных этапов обучения создает базу для углубленного изучения робототехники, что критически важно в условиях цифровой трансформации промышленности [19].

Ограничением исследования является фокус на базовых проектах. Однако, даже простые системы служат эффективным инструментом для формирования системного мышления.

Заключение

В статье рассмотрены различные робототехнические наборы, используемые в образовании и предложена методика обучения робототехнике с использованием доступных компонентов, которая доказала свою эффективность в повышении мотивации и практических навыков учащихся. Ключевые преимущества подхода включают низкую стоимость, простоту реализации и акцент на творчестве обучающихся, что позволяет интегрировать его в учебные программы школ и вузов без значительных ресурсных затрат, а также для индивидуального обучения.

Практическим применением методики может быть:

- Внедрение в курсы технологии и информатики для формирования базовых компетенций.
- Использование в программах дополнительного образования для профориентации.

Перспективы методики:

- Расширение функциональности роботов за счет интеграции IoT и машинного обучения.
- Разработка открытых библиотек 3D-моделей для печати деталей для роботов такого типа.

- Исследование долгосрочного влияния методики на профессиональный выбор учащихся.

Предложенный подход не только расширяет доступ к робототехнике, но и увеличивает количество обучающихся, способных мыслить нестандартно и адаптироваться к быстро меняющимся технологическим реалиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Мельников С. Е., Панюшкина А. А., Чертовских А. С. Преимущества и недостатки роботизированных складов //Тенденции развития науки и образования. – 2021. – №. 75-1. – С. 133-136.
- [2] Никитина А. А., Уланов С. И. Обнаружение объектов на местности интеллектуальными роботами в быстроменяющейся обстановке //Проблемы искусственного интеллекта. – 2023. – №. 3 (30). – С. 36-43.
- [3] Хайбуллина Э. Э., Мазуренко О. И., Русинов И. В. Применение современных информационных технологий в транспортной логистике и их влияние на эффективность грузоперевозок //Транспортное дело России. – 2021. – №. 1. – С. 130-134.
- [4] Ахметзянов К. Р. Нейро-сетевые методы и алгоритмы самообучения при обработке данных в системе автоматизации процесса сортировки бытовых отходов. – 2021.
- [5] Пустыльник П. Н. Инженерное образование и робототехника в школе: профессиональная ориентация школьников //Инженерное образование. – 2023. – №. 33. – С. 49-61.
- [6] Topalov A. et al. Analysis of Software for Development and 2D/3D Modeling of Robotic Systems in Academia and Industry //International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – С. 109-120.
- [7] Tzagkaraki E., Papadakis S., Kalogiannakis M. Exploring the Use of Educational Robotics in primary school and its possible place in the curricula //Educational Robotics International Conference. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – С. 216-229.
- [8] Darmawansah D. et al. Trends and research foci of robotics-based STEM education: A systematic review from diverse angles based on the technology-based learning model //International Journal of STEM Education. – 2023. – Т. 10. – №. 1. – С. 12.
- [9] Chaidi E. et al. Educational robotics in Primary Education. A case in Greece //Research, Society and Development. – 2021. – Т. 10. – №. 9. – С. e17110916371-e17110916371.

- [10] Базовый набор OmegaBot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://robotbaza.ru/product/bazovyy-nabor-omegabot> (дата обращения: 1.04.2025).
- [11] Конструктор Lego Mindstorms EV3 (31313) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.banggood.com/601-Pieces-LEGO-MINDSTORMS-EV3-31313-Robot-Kit-with-Remote-Control-for-Kids-Educational-STEM-Toy-for-Programming-and-Learning-How-to-Code-p-1732619.html?cur_warehouse=CN (дата обращения: 1.04.2025).
- [12] Hurtuk J., Chovanec M., Adam N. The Arduino platform connected to education process //2017 IEEE 21st International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). – IEEE, 2017. – С. 000071-000076.
- [13] Елесеєв И. М., Турлубєков Д. Т. Основы управления движением сервопривода //Рецензент. – 2023. – С. 286.
- [14] Маркова Т. В., Третьяков В. П. Формирование инженерных компетенций при изучении базовых профессиональных дисциплин. – 2024.
- [15] Толстова Н. А., Бондаренко Д. А., Ганьшин К. Ю. Образовательная робототехника как составляющая инженерно-технического образования //Наука. Инновации. Технологии. – 2013. – №. 3. – С. 171-177.
- [16] Наумов А. Социокультурный барьер и доступность дополнительного образования //Образовательная политика. – 2022. – №. 3 (91). – С. 84-94
- [17] Filmer D. P., Rogers F. H. World Development Report 2018: Learning to Realize Education's Promise. – 2019.
- [18] Каримова Б. Т. STEM-обучение-инновационный подход в современном образовании //Innovation Management and Technology in the Era of Globalization. – 2018. – С. 107-111.
- [19] Акбердина В. В., Пьянкова С. Г. Методологические аспекты цифровой трансформации промышленности //Научные труды Вольного экономического общества России. – 2021. – Т. 227. – №. 1. – С. 292-313.

A.D.Klinovitskiy¹, M.S.Ananyevskiy²

FORMATION OF A LABORATORY BASE FOR TEACHING MOBILE ROBOTICS IN SCHOOLS AND UNIVERSITIES

^{1,2}Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

²Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences.

Abstract

In this work, based on the experience of teaching in schools, clubs, and universities, approaches to the formation of a laboratory base for training future engineers in mobile robotics are presented. Typical problems are discussed, and proven solutions are suggested. Several foundational educational tasks modeling real industrial applications are presented. The results of R&D for the creation of a laboratory base and a list of necessary equipment are also provided.

Key words: robotics, robotics education, wheeled robots, robot control.

REFERENCES

- [1] Melnikov S. E., Panyushkina A. A., Chertovskikh A. S. Advantages and Disadvantages of Robotic Warehouses // Trends in the Development of Science and Education. – 2021. – No. 75-1. – P. 133-136.
- [2] Nikitina A. A., Ulanov S. I. Detection of objects in the environment by intelligent robots in a rapidly changing situation // Problems of Artificial Intelligence. – 2023. – No. 3 (30). – P. 36-43.
- [3] Khaibullina E. E., Mazurenko O. I., Rusinov I. V. Application of modern information technologies in transport logistics and their impact on the efficiency of cargo transportation // Transport Business of Russia. – 2021. – No. 1. – P. 130-134.
- [4] Akhmetzyanov K. R. Neural network methods and self-learning algorithms for data processing in the automation system of household waste sorting process. – 2021.
- [5] Pustyl'nik P. N. Engineering Education and Robotics in Schools: Career Guidance for Students // Engineering Education. – 2023. – No. 33. – pp. 49-61.
- [6] Topalov A. et al. Analysis of Software for Development and 2D/3D Modeling of Robotic Systems in Academia and Industry //International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – C. 109-120.
- [7] Tzagkaraki E., Papadakis S., Kalogiannakis M. Exploring the Use of Educational Robotics in primary school and its possible place in the curricula //Educational Robotics International Conference. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – C. 216-229.
- [8] Darmawansah D. et al. Trends and research foci of robotics-based STEM education: A systematic review from diverse angles based on the technology-based learning model //International Journal of STEM Education. – 2023. – T. 10. – №. 1. – C. 12.

- [9] Chaidi E. et al. Educational robotics in Primary Education. A case in Greece // Research, Society and Development. – 2021. – T. 10. – №. 9. – C. e17110916371-e17110916371.
- [10] OmegaBot Basic Kit [Electronic resource]. – Access mode: <https://robotbaza.ru/product/bazovyy-nabor-omegabot> (accessed: April 1, 2025).
- [11] Lego Mindstorms EV3 (31313) Kit [Electronic resource]. – Access mode: https://ru.banggood.com/601-Pieces-LEGO-MINDSTORMS-EV3-31313-Robot-Kit-with-Remote-Control-for-Kids-Educational-STEM-Toy-for-Programming-and-Learning-How-to-Code-p-1732619.html?cur_warehouse=CN (accessed: April 1, 2025).
- [12] Hurtuk J., Chovanec M., Adam N. The Arduino platform connected to education process // 2017 IEEE 21st International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). – IEEE, 2017. – C. 000071-000076.
- [13] Yeleseyev I. M., Turlubekov D. T. BASICS OF SERVO DRIVE MOTION CONTROL // Reviewer. – 2023. – P. 286.
- [14] Markova T. V., Tretyakov V. P. Formation of engineering competencies in the study of basic professional disciplines. – 2024.
- [15] Tolstova N. A., Bondarenko D. A., Ganshin K. Yu. Educational Robotics as a Component of Engineering and Technical Education // Science. Innovations. Technologies. – 2013. – No. 3. – pp. 171-177.
- [16] Naumov A. Sociocultural Barrier and Accessibility of Additional Education // Educational Policy. – 2022. – No. 3 (91). – pp. 84-94.
- [17] Filmer D. P., Rogers F. H. World Development Report 2018: Learning to Realize Education's Promise. – 2019.
- [18] Karimova B. T. STEM education - an innovative approach in modern education // Innovation Management and Technology in the Era of Globalization. – 2018. – P. 107-111.
- [19] Akberdina V. V., P'yankova S. G. Methodological aspects of the digital transformation of industry // Scientific Works of the Free Economic Society of Russia. – 2021. – Vol. 227. – No. 1. – P. 292-313.