

Балжан Темірболатқызы Смаилова – магистр, заведующая кафедрой математики, Шәкәрім университет, Семей, Республика Казакстан; e-mail: st.balzhan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4932-1774>.

Авторлар туралы мәліметтер

Дана Болатқызы Тюлемисова – 8D06306 – Ақпараттық қауіпсіздік жүйелері мамандығы бойынша инженерия ғылымдарының магистрі, PhD докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: tyulemissova_db_3@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5319-7742>.

Айгүл Кайрулақызы Шайханова* – PhD докторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының профессоры, Астана, Қазақстан Республикасы; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6006-4813>.

Васыл Марценюк – инженерия ғылымдарының докторы, Бельско-Бяла университетінің есептеу техникасы және автоматика кафедрасының профессоры, Бельско-Бяла, Польша; e-mail: vmartsenyuk@ath.bielsko.pl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5622-1038>.

Гүлвира Бауржанқызы Бекешова – техника ғылымдарының магистрі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының аға оқытушысы, Астана қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: bekeshova_gb@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1635-4693>.

Балжан Темірболатқызы Смаилова – магистр, математика кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті; Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: st.balzhan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4932-1774>.

Information about the authors

Dana Tyulemissova – Master of Science (Engineering), PhD candidate in the specialty 8D06306 – Information Security Systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: tyulemissova_db_3@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5319-7742>.

Aigul Shaikhanova* – PhD, Professor, Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6006-4813>.

Vasyl Martsenyuk – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Computer Science and Automation, Bielsko-Biala University, Bielsko-Biala, Poland; e-mail: vmartsenyuk@ath.bielsko.pl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5622-1038>.

Gulvira Baurzhanovna Bekeshova – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University; Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: bekeshova_gb@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1635-4693>.

Balzhan Smailova – Master of Science, Head of Mathematics Department, Shakarim University; Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: st.balzhan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4932-1774>.

Поступила в редакцию 09.01.2026

Поступила после доработки 19.02.2026

Принята к публикации 20.02.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-10](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-10)

МРНТИ: 55.30.03



Т.С. Жылқыбаев*, Е.Р. Советбаев, А.Д. Золотов, Д.В. Мясоедов, К.У. Зенкович

Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ

Аннотация: В статье представлены результаты разработки и исследования цифрового двойника учебного манипулятора в двумя звеньями длинами 230 и 170 мм и рабочим диапазоном 170-400 мм. Целью работы является создание виртуальной модели, позволяющая адекватно воспроизводить кинематическое и функциональное поведение реального устройства. Дополнительно проводить оценку возможностей ее применения в образовательном процессе. В

©Т.С. Жылқыбаев, Е.Р. Советбаев, А.Д. Золотов, Д.В. Мясоедов, К.У. Зенкович, 2026

качестве методов использованы математическое моделирование прямой кинематики, численный анализ рабочей области, визуализация траектории движения.

Полученные результаты показали, что среднеквадратическая ошибка позиционирования цифрового двойника не превышает 3-4 мм, что составляет менее 1% от максимального рабочего радиуса и подтверждает высокую точность модели. Рабочая область манипулятора, вычисленная методом случайной аппроксимации, полностью соответствует паспортным ограничениям реального устройства.

Педагогический эксперимент показал, что использование цифрового двойника способствует значительному повышению качества усвоения студентами принципов робототехники и кинематики манипуляторов. Разработанная модель может быть использована как эффективный инструмент для проведения лабораторных работ, подготовки специалистов в области автоматизации и робототехнических систем, а также для последующего расширения с включением динамических характеристик и алгоритмов автоматического планирования движения.

Ключевые слова: манипулятор, цифровая модель, учебная лаборатория, Python, прямая кинематика, среднеквадратическая ошибка.

Введение

Инженерное образование современного времени требует использование цифровых технологий, позволяющих безопасно отрабатывать практические навыки студентов. В промышленности активно развивается концепция цифровых двойников [1-3], основанные на моделировании физических объектов, процессов, и систем в виртуальной среде. Применение таких технологий позволяет сократить риски аварий, оптимизировать работу оборудования и ускорить внедрение инноваций.

В учебных лабораториях существует проблема ограниченного доступа студентов к реальному оборудованию, что связано с износом стендов, высокой стоимостью комплектующих, необходимостью соблюдения мер безопасности и ограничения времени лабораторных занятий. В данных условиях цифровой двойник [2-4] становится эффективным инструментом для моделирования поведения реальной системы, проведения экспериментов, обработки навыков программирования и анализа параметров управления без риска повреждения оборудования.

Несмотря на широкое развитие цифровых двойников в промышленности, их применение в образовании пока ограничено. Большинство учебных заведений используют традиционные лабораторные работы, где студенты работают только с реальным физическим оборудованием. Это приводит к:

1. Недостаточному количеству практики у студентов;
2. Невозможности проведения экспериментов, которые могут повредить оборудование;
3. Отсутствию возможности моделирования аварийной ситуации;
4. Низкая вариативность лабораторных сценариев;
5. Ограниченные возможности дистанционного обучения.

Тем самым возникает научная и образовательная задача адаптировать технологии цифровых двойников для учебных лабораторий.

В научной литературе [1-4] активно рассматривается использование цифровых двойников в промышленности: для проведения диагностических работ, оптимизация производственных процессов, прогнозирования отказов, анализа энергоэффективности и интеграции систем промышленных интернет вещей (IIoT). Однако исследования по внедрению цифровых двойников именно в образовательный процесс встречаются значительно реже. Чаще всего ограничиваются демонстрационными моделями, не связанными с реальными учебными стендами или задачами автоматизации.

Таким образом, существует недостаток исследований, ориентированных на создание цифровых двойников конкретных учебных установок с целью повышения качества подготовки студентов инженерного направления подготовки.

Условия и методы исследования

Исследование выполнено в условиях учебной лаборатории, оснащенной типовым учебным стендом манипулятора-сортировщика [5], предназначенным для выполнения операций перемещения и идентификации объектов (рис. 1).



Рисунок 1 – Стенд «Автосортировщик»

Стенд включает два последовательно соединенных звена с вращательными степенями свободы, вакуумный исполнительный механизм (ИМ) (рис. 2) и оптический датчик цвета (рис. 3).



Рисунок 2 – Манипулятор-сортировщик с вакуумным ИМ



Рисунок 3 – датчик цвета

Эксперименты проводились в стандартных лабораторных условиях при стабильном освещенности и фиксированном положении рабочего стола, что обеспечило воспроизводимость измерений и минимизацию внешних факторов, влияющих на работу датчиков и механических узлов.

Целью разработки цифрового двойника являлось моделирование кинематических и функциональных характеристик манипулятора [6-8] для последующего применения в учебном процессе. Геометрические параметры звеньев, диапазоны угловых перемещений и предельные положения рабочего органа исходные при построении математической модели. В основу модели положена прямая кинематика двухзвенного манипулятора, позволяющего вычислять положение захватного механизма в декартовой системе координат на основании текущих значений углов поворота звеньев. Координаты рабочей точки определялись выражениями (1) и (2).

$$X = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$Y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

где L_1 , L_2 – длины звеньев, θ_1 , θ_2 – углы поворота

Достижимая область рабочей зоны определяется условием с помощью выражения (3) и (4).

$$|L_1 - L_2| \leq r \leq L_1 + L_2 \quad (3)$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) использовались для проверки корректности работы цифровой модели и ограничения пространственных конфигураций, выдаваемых алгоритмом управления.

Программная реализация цифрового двойника [9] осуществлялась в среде Python с использованием библиотек:

1. numpy для вычислительных операций;
2. matplotlib для визуального-аналитического сопровождения эксперимента;
3. tkinter/pygame для интерактивного графического отображения положения манипулятора.

Структура программного комплекса включает модули расчета кинематики, визуализации, моделирования сенсорных данных и реализации логики сортировочных операций. Такой подход обеспечивает функциональное соответствие цифровой модели реальному стенду и позволяет проводить численные и визуальные эксперименты в интерактивном режиме.

Методика исследования предусматривает пошаговое сравнение работы цифрового двойника и реального манипулятора. Для фиксированного набора угловых положений (θ_1 , θ_2) вычислялись координаты рабочего органа в цифровом двойнике, после чего аналогичные координаты определялись экспериментально на физическом стенде. Для количественной оценки точности моделирования использовались показатели абсолютной и относительной погрешности (5) и (6).

$$\Delta r = \sqrt{(X_{real} - X_{model})^2 + (Y_{real} - Y_{model})^2} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\Delta r}{\sqrt{X_{real}^2 + Y_{real}^2}} * 100\% \quad (6)$$

Дополнительно проводился анализ временных характеристик выполнения операций сортировки и устойчивости распознавания цвета объекта, что позволило оценить степень соответствия цифровой модели функциональным возможностям реального оборудования.

В рамках педагогического эксперимента осуществлялся устный опрос студентов, направленный на оценку удобства использования цифрового двойника, его влияния на понимание кинематических принципов работы манипулятора и снижение количества ошибок при последующей работе с реальным стендом.

Обработка полученных данных выполнялась методами статистического анализа, включая вычисление среднеквадратичной ошибки (7), оценку повторяемости измерений и визуализации траекторий движения.

$$r^2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(X_i^{real} - X_i^{model})^2 + (Y_i^{real} - Y_i^{model})^2]} \quad (7)$$

Совокупность проведенных экспериментов обеспечила комплексную оценку корректности математических моделей и практической применимости разработанного цифрового двойника в образовательном процессе.

Результаты исследований

В ходе исследования была проведена серия экспериментов, направленных на количественную и качественную оценку корректности цифрового двойника учебного манипулятора-сортировщика. Анализ включал:

1. Сравнение координат конца манипулятора, рассчитанных цифровой моделью, с координатами, измеренными на реальном стенде;
2. Оценку временных характеристик выполнения операций;
3. Визуальный анализ траекторий движения.

Экспериментальные измерения выполнялись для набора угловых положений (θ_1 , θ_2), охватывающих типовые рабочие конфигурации манипулятора [5]. Длина звеньев манипулятора $L_1=230$ мм и $L_2=170$ мм, что соответствует максимальному рабочему плечу 400 мм и минимальному расстоянию до рабочей зоны около 170 мм.

В таблице 1 представлены значения координат, рассчитанных моделью прямой кинематики, и координат, полученных экспериментальным путем.

Таблица 1 – Сравнение модельных и реальных координат конца манипулятора

№	$\theta_1, ^\circ$	$\theta_2, ^\circ$	$X_{model}, \text{ мм}$	$Y_{model}, \text{ мм}$	$X_{real}, \text{ мм}$	$Y_{real}, \text{ мм}$	Абсолютная ошибка, мм
1	30	20	308.5	245.2	305.5	248	4.04
2	45	-10	301.9	260.1	304	258.2	2.88
3	0	60	315.0	147.2	315	146.8	0.41
4	-20	40	375.9	-20.5	377.1	-18.2	2.61
5	60	-30	262.2	284.2	259	280.4	4.98

Среднеквадратичная ошибка, при $N=5$, рассчитанная по формуле (7), получилась 3.4 мм. Что составляет менее 1% от максимального рабочего радиуса манипулятора (400 мм), и подтверждает высокую достоверность математической модели [10].

Дополнительно были исследованы временные характеристики выполнения сортировочного цикла на реальном стенде и в цифровом двойнике. По результатам серии из 20 испытаний определены следующие показатели, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Время выполнения сортировочного цикла

Показатель	Реальный стенд	Цифровой двойник	Отклонение
Среднее время цикла, с	1.88	1.80	-4.3%
Минимальное время, с	1.75	1.69	-3.4%
Максимальное время, с	2.02	1.92	-5%

Систематическое снижение времени цикла в цифровом двойнике объясняется отсутствием механической инерции, люфтов и ограничения по скорости привода. В тоже время относительное расхождение не превышает 5%, что можно считать приемлемым для ученых задач моделирования.

Внешний вид цифрового двойника показан на рисунке 4.

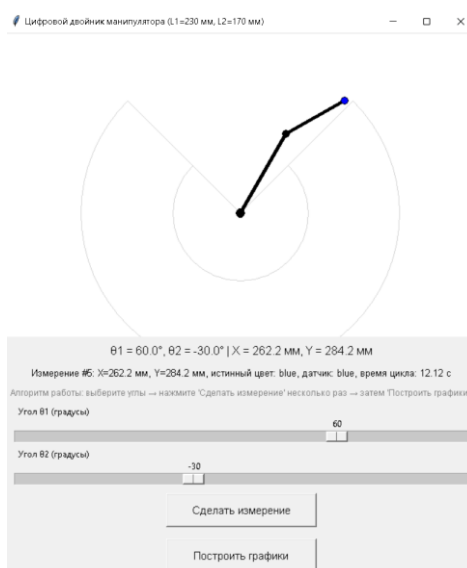


Рисунок 4 – Цифровой двойник манипулятора

Рабочая область манипулятора определена методом численной аппроксимации путем генерации большого числа случайных комбинаций углов θ_1 и θ_2 в диапазоне $[-135^\circ; 135^\circ]$ с последующим вычислением декартовых координат исполнительного механизма. На рисунке 5 представлена область, образованная точками, удовлетворяющими ограничению по радиусу рабочего диапазона $170 \leq r \leq 400$ мм, что соответствует кинематическим ограничениям реального манипулятора [5].



Рисунок 5 – Рабочая область манипулятора

Полученная форма рабочего пространства представляет собой несимметричный сектор кольцевой области, вытянутый в направлении максимального раскрытия звеньев [11].

Наблюдается характерная эллипсоидно-дугообразная структура: точки плотнее расположены в правой части сектора, что объясняется большой достижимостью позиций при положительных углах основного звена. Пространство вблизи минимального радиуса (≈ 170 мм) практически не содержит точек, что подтверждает ограничение на складывание звеньев.

Геометрическая структура графика подтверждает, что:

1. Полный рабочий радиус манипулятора составляет 400 мм, что соответствует паспортным данным оборудования;
2. Минимальный рабочий радиус около 170 мм также совпадает с техническими характеристиками реального устройства;
3. Рабочая область фактически занимает около 270° , что подтверждается многоугольным распределением точек и полукольцевой структурой.

Таким образом численно аппроксимированная рабочая область полностью согласуется с теоретической моделью и визуальными параметрами манипулятора, а также может служить основой для анализа доступности позиций, планирования траекторий.

На графике (рис. 6) представлена реальная траектория исполнительного механизма манипулятора, сформированного на основе экспериментальных измерений, выполнявшихся при пошаговом изменении угловых координат θ_1 и θ_2 .

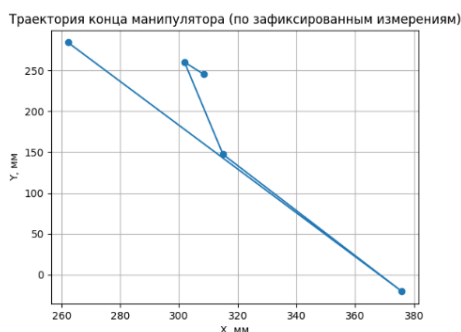


Рисунок 6 – Траектория конца ИМ

Каждая точка траектории соответствует фиксированному угловому положению, полученному в процессе взаимодействия пользователя с симулятором, имитирующим реальную работу манипулятора. Форма траектории иллюстрирует чувствительность положения рабочего органа к углам звеньев, что является характерной особенностью двухзвенных механизмов. Данный график позволяет убедиться в том, что:

1. Цифровой двойник корректно отображает изменения положения конца манипулятора при варьировании углов;
2. Направление и характер движения соответствуют реальной кинематике устройства;
3. Поведение системы воспроизводит особенности, наблюдаемые у физического манипулятора (резкие переходы, зависимость от взаимного расположения звеньев).

Таким образом, представленный результат подтверждает адекватность построенного цифрового двойника и демонстрирует возможность использования разработанной модели как инструмента для кинематического анализа и обучения студентов.

Обсуждение научных результатов

Полученные в ходе исследования результаты позволяют оценить степень соответствия предложенного цифрового двойника реальным кинематическим и функциональным характеристикам учебного манипулятора. Сопоставление модельных данных с экспериментальными измерениями показало, что среднеквадратическая ошибка позиционирования составляет около 3.4 мм, что соответствует менее 1% от максимального рабочего радиуса (400 мм) [6-11]. Такое значение ошибки можно считать незначительным для учебных и демонстрационных задач, что подтверждает корректность математической модели прямой кинематики, использованной при разработке цифрового двойника.

Графический анализ рабочей области манипулятора подтвердил соответствие полученной численной аппроксимации паспортным геометрическим ограничениям устройства. Форма области, представляющая собой сектор кольца с радиусами от 170 до 400

мм и углом охвата около 270° , совпадает с фактической кинематической конфигурацией механизма [5-10]. Наблюдаемая асимметрия распределения точек в рабочей зоне [5, 11] отражает реальную структуру доступных позиций, обусловленную механическими ограничениями и особенностями конструкции (длина звеньев, отношение тяг и др.). Таким образом, цифровая модель адекватно воспроизводит геометрию рабочего пространства, что имеет ключевое значение для задач планирования движения и анализа доступности технологических операций.

С педагогической точки зрения, проведенный эксперимент, показал, что использование цифрового двойника способствует повышению качества освоения студентами кинематических принципов работы манипулятора. Существенное снижение количества ошибок и рост уверенности пользователей свидетельствуют о высокой эффективности интеграции цифровых двойников в учебный процесс. Тем самым подтверждает перспективность применения виртуальных моделей в инженерном образовании, особенно в условиях ограниченного доступа к реальному лабораторному оборудованию.

В совокупности результаты демонстрируют, что разработанный цифровой двойник обладает высокой степенью адекватности, воспроизводит ключевые кинематические и функциональные характеристики реального устройства и может использоваться как в учебных целях, так и в исследовательских задачах, связанных с моделированием, оптимизацией и анализом алгоритмов управления.

Заключение

В ходе исследования была разработана, реализована и экспериментально оценена модель цифрового двойника учебного манипулятора с рабочим диапазоном 170-400 мм. и двумя основными кинематическими звеньями длиной 230 и 170 мм соответственно. Выполненный комплекс математических, визуальных и экспериментальных процедур подтвердил корректность предложенного подхода к моделированию и визуализации кинематического поведения манипулятора в учебной среде.

Численный анализ прямой кинематики и сравнение модельных координат с данными реального стенда показали, что среднеквадратическая ошибка позиционирования не превышает 3-4 мм, что составляет менее 1% от максимального рабочего радиуса и свидетельствует о высокой точности модели. Полученная методом аппроксимации рабочая область полностью соответствует геометрическим ограничениям физического устройства и может быть использована для планирования траекторий, анализа достижимости точек и разработки учебных сценариев по управлению роботизированными системами.

Педагогический эксперимент подтвердил, что интеграция цифрового двойника в учебный процесс способствует значительному повышению качества подготовки студентов. Наблюдается рост уровня понимания кинематических принципов, уменьшение количества допущенных ошибок и увеличение уверенности при работе с реальным оборудованием.

Исходя из вышесказанного, разработанный цифровой двойник может рассматриваться как эффективное средство обучения, позволяющее расширить возможности традиционных лабораторных занятий, повысить доступность робототехнических экспериментов и обеспечить безопасную среду для изучения алгоритмов управления. Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований, включающих построение динамической модели, разработку алгоритмов автоматического планирования движения, расширение сенсорного моделирования и интеграцию цифрового двойника в системы удаленного практикума.

Список литературы

1. Fuller A., Fan Z., Day C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research [Электронный ресурс]. – 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.01276>.
2. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzing et al // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. – P. 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
3. Aziz S., Won D., Zaman U.K.U., Aqeel A. Digital Twins in Smart Manufacturing [Электронный ресурс]. – 2023. <https://doi.org/10.1201/9781003327523-6>.

4. Alimisis D. Educational robotics: Open questions and new challenges / D. Alimisis // Themes in Science and Technology Education. – 2013. – Vol. 6. – P. 63-71. URL: https://www.researchgate.net/publication/284043695_Educational_robotics_Open_questions_and_new_challenges
5. Автоматизация процессов сортировки: руководство по эксплуатации лабораторного стенда Automation ES. 17 с.
6. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control / J.J. Craig. – 3rd ed., Pearson, 2005. – 432 с.
7. Robotics: Modeling, Planning, and Control / B. Siciliano, et al // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2009. – Vol. 16. – P. 101. <https://doi.org/10.1109/MRA.2009.934833>.
8. Niku S.B. Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications / S.B. Niku. – Wiley, 2019. – 528 с.
9. Tao F. Make more digital twins / F. Tao, Q. Qi // Nature. – 2019. – Vol. 573. – P. 490-491. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>.
10. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano et al. – Springer International Publishing, 2016. – 2228 p.
11. Spong M.W. Robot Modeling and Control / M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar. – Wiley, 2005. – 496 p.

References

1. Fuller A., Fan Z., Day C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research [Ehlektronnyi resurs]. – 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.01276>. (In English).
2. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger et al // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. – P. 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>. (In English).
3. Aziz S., Won D., Zaman U.K.U., Aqeel A. Digital Twins in Smart Manufacturing [Ehlektronnyi resurs]. – 2023. <https://doi.org/10.1201/9781003327523-6>. (In English).
4. Alimisis D. Educational robotics: Open questions and new challenges / D. Alimisis // Themes in Science and Technology Education. – 2013. – Vol. 6. – P. 63-71. (In English). URL: https://www.researchgate.net/publication/284043695_Educational_robotics_Open_questions_and_new_challenges
5. Avtomatizatsiya protsessov sortirovki: rukovodstvo po ehkspluatatsii laboratornogo stenda Automation ES. 17 s. (In Russian).
6. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control / J.J. Craig. – 3rd ed., Pearson, 2005. – 432 s. (In English).
7. Robotics: Modeling, Planning, and Control / B. Siciliano, et al // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2009. – Vol. 16. – P. 101. <https://doi.org/10.1109/MRA.2009.934833>. (In English).
8. Niku S.B. Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications / S.B. Niku. – Wiley, 2019. – 528 s. (In English).
9. Tao F. Make more digital twins / F. Tao, Q. Qi // Nature. – 2019. – Vol. 573. – P. 490-491. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>. (In English).
10. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano et al. – Springer International Publishing, 2016. – 2228 p. (In English).
11. Spong M.W. Robot Modeling and Control / M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar. – Wiley, 2005. – 496 p. (In English).

Т.С. Жылқыбаев*, Е.Р. Советбаев, А.Д. Золотов, Д.В. Мясоедов, К.У. Зенкович

Шәкәрім университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А

*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

АВТОМАТТАНДЫРУ БОЙЫНША ОҚУ ЗЕРТХАНАЛАРЫНДА ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕРДІ ҚОЛДАНУ

Мақалада ұзындығы 230 және 170 мм және жұмыс ауқымы 170-400 мм болатын екі сілтемедегі оқу манипуляторының цифрлық егізін әзірлеу және зерттеу нәтижелері келтірілген. Жұмыстың мақсаты – нақты құрылғының кинематикалық және функционалдық мінез-құлқын барабар және тұрақты қайталауға мүмкіндік беретін толыққанды виртуалды модель құру, сондай-ақ оны білім

беру процесінде қолдану мүмкіндіктерін жан-жақты бағалау. Әдістер ретінде тікелей кинематиканы математикалық модельдеу, жұмыс аймағын сандық талдау, қозғалыс траекториясын визуализациялау және қосымша диагностикалық есептеулер қолданылады.

Нәтижелер сандық қосарланған позициялаудың орташа квадраттық қателігі 3-4 мм-ден аспайтынын көрсетті, бұл максималды жұмыс радиусының 1%-дан азын құрайды және модельдің жоғары дәлдігін растайды. Кездейсоқ жуықтау әдісімен есептелген манипулятордың жұмыс кеңістігі нақты құрылғының төлқұжат шектеулеріне толық сәйкес келеді, бұл модельдің сенімділігін қосымша дәлелдейді.

Педагогикалық эксперимент цифрлық дубльді қолдану студенттердің робототехника және манипуляторлар кинематикасы принциптерін игеру сапасын едәуір арттыруға ықпал ететіндігін көрсетті. Өзірленген модель зертханалық жұмыстарды жүргізудің, автоматтандыру және робототехникалық жүйелер саласындағы мамандарды даярлаудың, сондай-ақ динамикалық сипаттамалар мен қозғалысты автоматты жоспарлау алгоритмдерін қоса отырып, кейіннен кеңейтудің тиімді және әмбебап құралы ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: манипулятор, сандық модель, оқу зертханасы, Python, тікелей кинематика, орташа квадраттық қате.

T. Zhylykbaev*, Y. Sovetbaev¹, A. Zoloto¹, D. Myassoyedo¹, K. Zenkovic¹

Shakarim University,

071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street

*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

APPLICATION OF DIGITAL TWINS IN AUTOMATION TEACHING LABORATORY

The article presents the results of the development and research of a digital twin of a training manipulator with two joints 230 and 170 mm long and a working range of 170-400 mm. The aim of the work is to create a virtual model that allows the kinematic and functional behaviour of the real device to be adequately reproduced. Additionally, to evaluate its potential for use in the educational process. The methods used include mathematical modelling of direct kinematics, numerical analysis of the working area, and visualisation of the motion trajectory.

The results showed that the root mean square positioning error of the digital twin does not exceed 3-4 mm, which is less than 1% of the maximum working radius and confirms the high accuracy of the model. The working area of the manipulator, calculated using the random approximation method, fully corresponds to the passport limitations of the real device.

The pedagogical experiment showed that the use of a digital twin significantly improves students' understanding of the principles of robotics and manipulator kinematics. The developed model can be used as an effective tool for conducting laboratory work, training specialists in the field of automation and robotic systems, as well as for subsequent expansion to include dynamic characteristics and automatic motion planning algorithms.

Key words: manipulator, digital model, training laboratory, Python, direct kinematics, root mean square error.

Сведения об авторах

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев* – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8918-527X>.

Ералы Рауанұлы Советбаев – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4529-2787>.

Александр Дмитриевич Золотов – к.т.н., ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-8161>.

Дмитрий Викторович Мясоедов – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3279-0994>.

Кулькен Уалиевна Зенкович – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: kulken_@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7759-7413>.

Авторлар туралы мәліметтер

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев* – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhitosya@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8918-527X>.

Ералы Рауанұлы Советбаев – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4529-2787>.

Александр Дмитриевич Золотов – т.ғ.к., «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-8161>.

Дмитрий Викторович Мясоедов – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3279-0994>.

Кулькен Уалиевна Зенкович – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kulken_@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7759-7413>.

Information about the authors

Tursynkhan Zhylykbayev* – Master of Technical Sciences, lecturer of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhtosya@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8918-527X>.

Yeraly Sovetbayev – Master of Technical Sciences, lecturer of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4529-2787>.

Alexandr Zolotov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-8161>.

Dmitriy Myassoyedov – Master of Technical Sciences, senior lecturer of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3279-0994>.

Kulken Zenkovich – Master of Technical Sciences, senior lecturer of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kulken_@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8918-527X>.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Принята к публикации 20.02.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-11](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-11)

IRSTI: 28.23.11



Z.B. Sadirmekova^{1,3}, B.Kh. Abdygalym^{1,2,4}, M.A. Sambetbayeva^{1,2,*}, R. Taberkhan^{1,2}, I.A. Karbozova⁵

¹«Q» University, 050026, Republic of Kazakhstan, Almaty, str. Baizakov 125/185,

²L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev str. 2.

³Astana IT University, 010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Mangilik El Avenue, C1.

⁴Astana International University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Qabanbay Batyr Avenue, 8

⁵Taraz International University named after Sher Khan Murtaza,
Republic of Kazakhstan, Taraz, str. Zheltoksan 69B

*e-mail: sambetbayeva_ma_1@enu.kz

AN AI-DRIVEN THREE-STAGE FRAMEWORK FOR DYNAMIC INTEGRATION OF EMERGING CONCEPTS INTO ONTOLOGIES

Abstract: This article examines the problem of automatic implementation of new concepts in ontology in the context of constant updating of knowledge and increasing the volume of textual data. The object of research is the process by which new concepts can be integrated into hierarchical and non-taxonomic structures of ontology, while maintaining their logical and semantic consistency. The purpose of the work is to

©Z.B. Sadirmekova, B.Kh. Abdygalym, M.A. Sambetbayeva, R. Taberkhan, I.A. Karbozova, 2026