

УДК 621.865.8

Научная статья

 <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-75-89>

 CWKQZO

Разработка математической модели для шестизвенного промышленного робота-манипулятора с механическим захватом

З. Л. Хакимов[✉], В. В. Шухин, М. А. Лабазанов

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова
364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100

Аннотация. Актуальность разработки точной математической модели для манипуляторов данного типа обусловлена растущими требованиями к точности, скорости и автономности робототехнических систем.

Цель исследования – разработка целостной математической модели шестизвенного робота-манипулятора, включающей кинематическое и динамическое описание, а также модель его механического захвата.

Методы исследования. В работе использован интегрированный подход, сочетающий классические методы робототехники с учетом особенностей силового захвата для решения задач контактного взаимодействия. Также использованы методы Денавита–Хартенберга, уравнения Лагранжа–Эйлера и полигональное представление.

Результаты. В статье представлен подход к разработке комплексной математической модели шестизвенного робота-манипулятора, оснащенного механическим захватом. Предложен единый формализм для моделирования, управления и анализа манипулятора. Модель включает в себя кинематическое, динамическое и геометрическое описание, необходимое для решения задач точного позиционирования и силового взаимодействия с объектами манипулирования. Проведенное численное моделирование в среде MATLAB/Simulink подтверждает корректность модели и демонстрирует ее применимость для синтеза траекторий и систем управления.

Заключение. Разработанная модель является универсальным инструментом и может быть адаптирована для конкретных промышленных манипуляторов путем корректировки параметров D-Н и инерционных характеристик, что открывает широкие возможности для ее практического применения в робототехнике.

Ключевые слова: робот-манипулятор, шестизвенная кинематическая цепь, прямая и обратная задачи кинематики, динамика манипуляторов, математическое моделирование, система управления

Поступила 13.12.2025, одобрена после рецензирования 28.01.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Хакимов З. Л., Шухин В. В., Лабазанов М. А. Разработка математической модели для шестизвенного промышленного робота-манипулятора с механическим захватом // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 75–89. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-75-89



Mathematical model development for a six-link industrial robotic arm with mechanical gripper

Z.L. Khakimov[✉], V.V. Shukhin, M.A. Labazanov

Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov
100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia

Abstract. The need to develop an accurate mathematical model for this type of manipulator is driven by increasing demands on the precision, speed, and autonomy of robotic systems.

Aim. This study is to develop a comprehensive mathematical model of a six-link robotic manipulator, including a kinematic and dynamic description, as well as a model of its mechanical gripper.

Research methods. This study utilizes an integrated approach combining classical robotics methods with consideration of the specific features of a force gripper to solve contact interaction problems. The Denavit-Hartenberg methods, the Lagrange-Euler equations, and a polygonal representation are also used.

Results. This article presents an approach to developing a comprehensive mathematical model of a six-link robotic manipulator equipped with a mechanical gripper. A unified formalism for modeling, control, and analysis of the manipulator is proposed. The model includes a kinematic, dynamic, and geometric description necessary for solving problems of precise positioning and force interaction with manipulated objects. Numerical simulations conducted in MATLAB/Simulink confirm the model's validity and demonstrate its applicability for trajectory and control system synthesis.

Conclusion. The developed model is a universal tool and can be adapted to specific industrial manipulators by adjusting the D-H parameters and inertial characteristics, opening up broad possibilities for its practical application in robotics.

Keywords: robot manipulator, six-link kinematic chain, direct and inverse kinematic problems, manipulator dynamics, mathematical modeling, control system

Submitted 13.12.2025,

approved after reviewing 28.01.2026,

accepted for publication 10.02.2026

For citation. Khakimov Z.L., Shukhin V.V., Labazanov M.A. Mathematical model development for a six-link industrial robotic arm with mechanical gripper. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 75–89. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-75-89

ВВЕДЕНИЕ

Шестизвенные манипуляторы, обладающие шестью степенями подвижности, являются наиболее распространенным классом промышленных роботов. Такая конструкция, часто называемая «универсальной», обеспечивает необходимую пространственную гибкость для произвольного позиционирования и ориентации рабочего органа в рабочей зоне, что делает их незаменимыми в задачах сборки, сварки, палетизации и обработки материалов.

Актуальность разработки точной математической модели для манипуляторов данного типа обусловлена растущими требованиями к точности, скорости и автономности робототехнических систем. Модель служит основой для:

- 1) синтеза алгоритмов управления;
- 2) отработки и оптимизации траекторий в виртуальной среде;
- 3) прогнозирования силового взаимодействия с объектами и окружающей средой;
- 4) проведения анализа устойчивости и производительности системы.



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Целью данной работы является разработка целостной математической модели шестизвенного робота-манипулятора, включающей кинематическое и динамическое описание, а также модель его механического захвата.

Научная новизна заключается в интегрированном подходе, сочетающем классические методы робототехники с учетом особенностей силового захвата для решения задач контактного взаимодействия.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ

При разработке математических моделей промышленных манипуляторов в современной литературе выделяют несколько основных подходов:

- Классический подход, основанный на методе Денавита–Хартенберга и уравнениях Лагранжа–Эйлера, обеспечивает высокую точность и физическую интерпретируемость, однако требует сложных вычислений для анализа рабочего пространства [1, 2].
- Геометрические и алгоритмические методы (например, метод Пайпера) эффективны для решения обратных кинематических задач, но зачастую не учитывают динамику и силовое взаимодействие [3].
- Современные подходы активно используют полигональное моделирование и аппарат компьютерной геометрии для анализа коллизий и доступных зон [4, 5], однако редко интегрируются с динамическими моделями в едином формализме.

Представленный в данной работе интегрированный подход объединяет преимущества перечисленных методов. В отличие от работ [1, 2] наша модель дополнена детальной геометрической аппроксимацией звеньев и анализом рабочего пространства методом Монте-Карло, что позволяет планировать траектории с учетом коллизий. В отличие от подходов [3, 4] мы в явном виде рассматриваем динамику системы и силовое взаимодействие через модель механического захвата на основе условий трения Кулона, что критически важно для задач захвата и манипулирования. Таким образом, предлагаемая модель является более комплексной и практико-ориентированной, поскольку охватывает весь цикл от кинематического описания до анализа силового взаимодействия в единой вычислительной среде (MATLAB/Simulink)».

ОБЩАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Предлагаемая математическая модель является ядром системы управления, общая структура которой представлена на рисунке 1. Система работает по замкнутому контуру. На основе задания целевой траектории для рабочего органа (схвата) **планировщик траектории** формирует плавный закон движения. **Блок обратной кинематики (ОЗК)** преобразует это задание в требуемые углы в сочленениях q . Для компенсации динамических эффектов (инерции, сил Кориолиса, гравитации) используется **динамический компенсатор**, реализующий вычисление управляющих моментов τ по уравнениям Лагранжа–Эйлера. Эти моменты поступают на **приводы** (сервомоторы), которые приводят в движение **физическую систему** манипулятора и захвата. Обратная связь обеспечивается **датчиками** (энкодерами, тензодатчиками), сигналы которых фильтруются и обрабатываются. **Блок прямой кинематики (ПЗК)** по измеренным углам q вычисляет текущее положение и ориентацию схвата T , замыкая контур управления. Таким образом, разработанная модель охватывает ключевые блоки этой схемы: кинематику (ПЗК/ОЗК), динамику (компенсатор) и взаимодействие через захват.

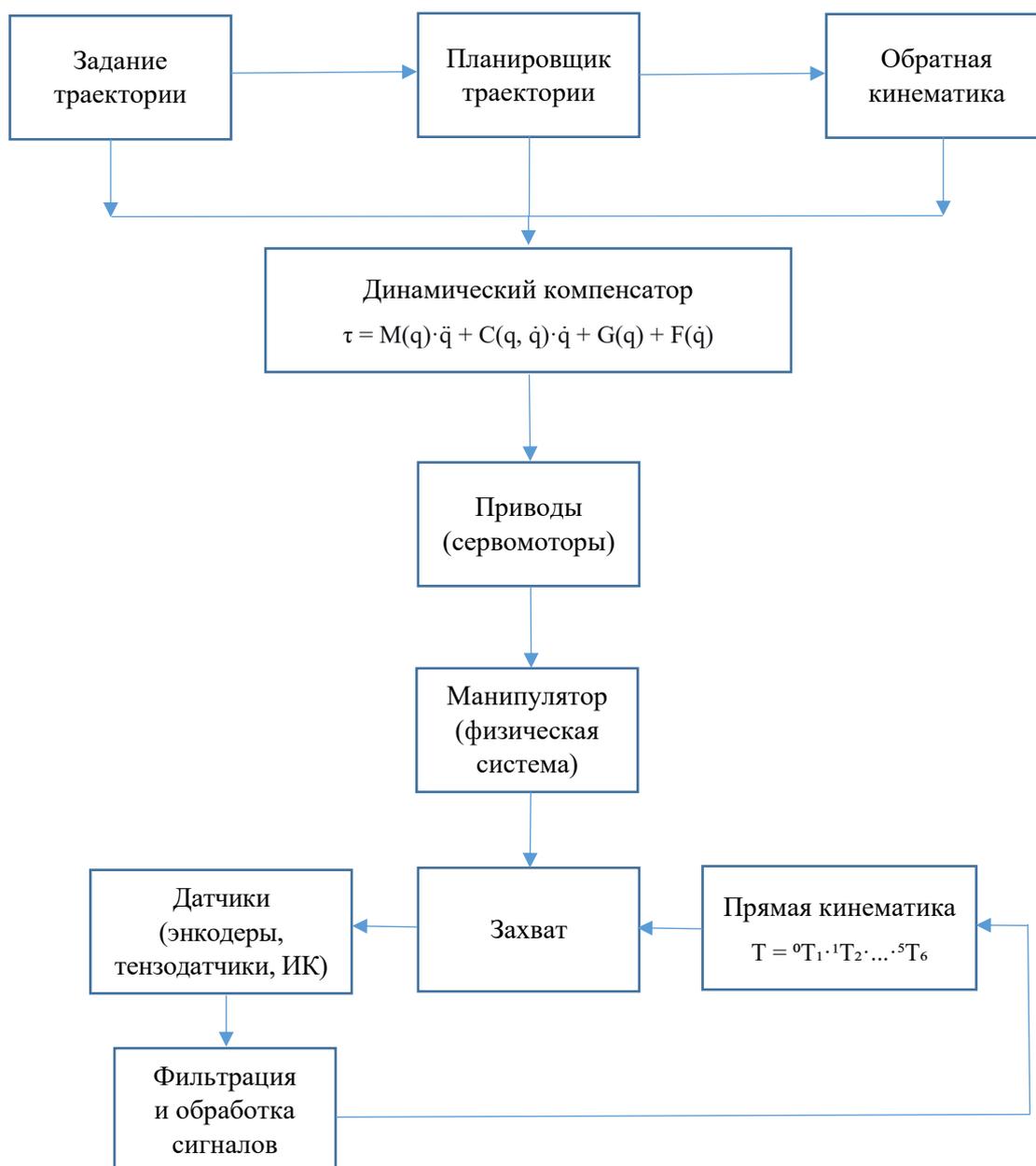


Рис. 1. Блок-схема системы управления манипулятором

Fig. 1. Block diagram of the manipulator control system

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАНИПУЛЯТОРА

Кинематическая модель манипулятора описывает геометрию и движение манипулятора без учета сил, его вызывающих. Для шестизвенного манипулятора с вращательными сочленениями (рис. 2) решаются две основные задачи [13, 14, 15].

Прямая задача кинематики (ПЗК) определяет положение и ориентацию схвата (X, Y, Z , Roll, Pitch, Yaw) по известным углам в сочленениях ($\theta_1 \dots \theta_6$). Стандартным методом решения является использование **алгоритма Денавита–Хартенберга (D-H)**. Для каждого звена i определяются четыре параметра:

a_i – длина звена (расстояние вдоль оси x_i от z_{i-1} до z_i);

α_i – угол скручивания звена (угол вокруг оси x_i от z_{i-1} до z_i);

d_i – смещение (расстояние вдоль оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i);
 θ_i – угол вращения (угол вокруг оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i).

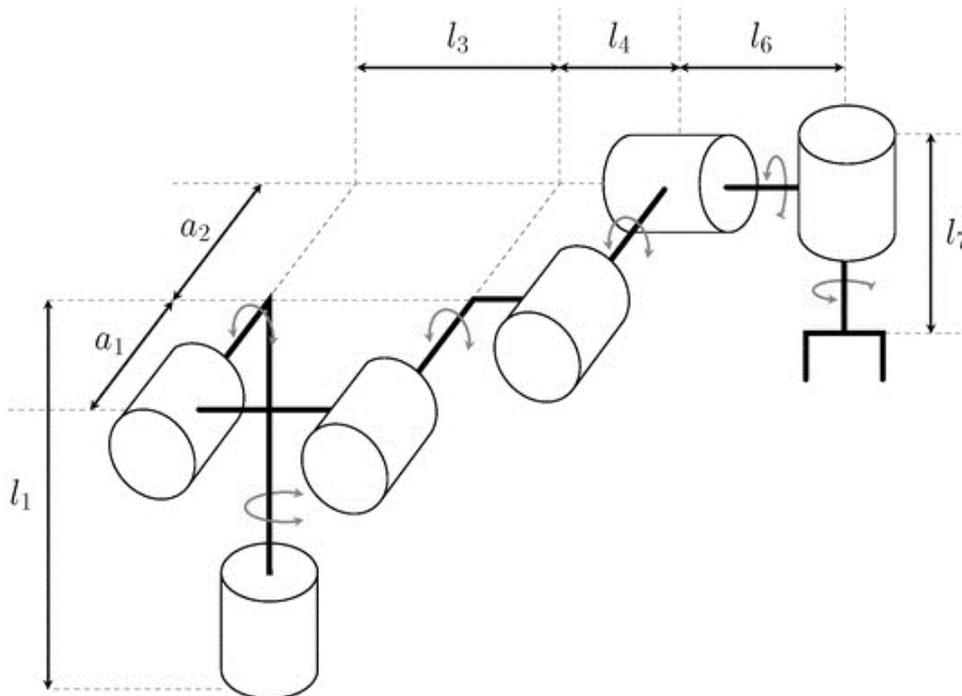


Рис. 2. Шестизвенный манипулятор с вращательными сочленениями

Fig. 2. Six-link manipulator with rotary joints

Матрица однородного преобразования ${}^{i-1}T_i$, описывающая переход от системы координат $(i-1)$ к системе i , имеет вид:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_i) & (a_i) \cdot \cos(\theta_i) \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_i) & (a_i) \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Результирующее положение схвата относительно базовой системы координат определяется произведением матриц:

$$T_{base_tool} = {}^0T_1 * {}^1T_2 * {}^2T_3 * {}^3T_4 * {}^4T_5 * {}^5T_6.$$

Обратная задача кинематики (ОЗК) является более сложной и находит набор углов в сочленениях ($\theta_1 \dots \theta_6$) для достижения заданного положения и ориентации схвата. Для шестизвенных манипуляторов с пересекающимися осями 4-го, 5-го и 6-го сочленений (сферическое запястье) часто применяют геометрико-алгебраические методы, такие как метод Пайпера. Решение может иметь до 8 различных кинематических конфигураций, однако некоторые из них могут быть недоступны из-за сингулярностей, возникающих при вырождении матрицы Якоби [10], выбор оптимальной из них осуществляется на основе минимизации пути, обхода препятствий или энергозатрат [11, 12].

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАНИПУЛЯТОРА

Динамическая модель описывает взаимосвязь между движением манипулятора и силами/моментами, вызывающими это движение. Она необходима для проектирования систем управления, учитывающих инерционные, кориолисовы и гравитационные силы.

Уравнения динамики могут быть получены с использованием формализма Лагранжа–Эйлера, что приводит к компактной матричной форме:

$$\tau = M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) + F(\dot{q}),$$

где:

τ – вектор обобщенных моментов в сочленениях (размерности 6×1);

q, \dot{q}, \ddot{q} – векторы обобщенных координат (углов), скоростей и ускорений;

$M(q)$ – симметричная, положительно определенная матрица инерции манипулятора (6×6);

$C(q, \dot{q})$ – матрица, учитывающая кориолисовы и центробежные силы (6×6);

$G(q)$ – вектор гравитационных моментов (6×1);

$F(\dot{q})$ – вектор моментов сил трения (вязкого и сухого).

Расчет коэффициентов этих матриц основан на знаниях о массах, центрах масс и тензорах инерции каждого звена, что делает этап параметрической идентификации критически важным для точности модели.

МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОГО ЗАХВАТА

Механический захват (схват) является конечным элементом манипулятора, обеспечивающим силовое взаимодействие с объектом. Его модель включает кинематику и силовое замыкание [8, 9].

Для двухпальцевого захвата прямого действия кинематику можно описать одной обобщенной координатой g (расстояние между губками). Преобразование от системы координат схвата (звено 6) до точек контакта на губках описывается простой матрицей смещения.

Ключевым является условие статического равновесия удерживаемого объекта. Для надежного удержания без проскальзывания необходимо обеспечить силовое замыкание. Для точечного контакта с трением (модель Кулона) это сводится к проверке условия:

$$|F_t| \leq \mu * F_n,$$

где F_t и F_n – тангенциальная и нормальная составляющие силы реакции в контакте, μ – коэффициент трения. Модель позволяет рассчитать требуемое усилие сжатия губок (τ_g) для удержания объекта массой m под действием ускорений, вызванных движением манипулятора:

$$\tau_g = (m \|a_g\|) / (2\mu),$$

где a_g – результирующее ускорение объекта в точке захвата, рассчитанное на основе динамической модели манипулятора.

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАБОЧЕЕ ПРОСТРАНСТВО

Для анализа доступности точек и планирования траекторий без коллизий строится геометрическая модель манипулятора в виде совокупности простых тел (цилиндров, параллелепипедов). Рабочее пространство – множество всех точек, достижимых центром схвата [6, 7].

Рабочее пространство шестизвенного манипулятора представляет собой сложную объемную фигуру, которую можно аппроксимировать как сферическую оболочку с внутренней полостью (мертвой зоной у основания). Его границы определяются длинами звеньев и ограничениями углов в сочленениях. Анализ проводится либо аналитически (для упрощенных конфигураций), либо численно – путем случайной выборки конфигураций и построения облака точек методом Монте-Карло (рис. 3).

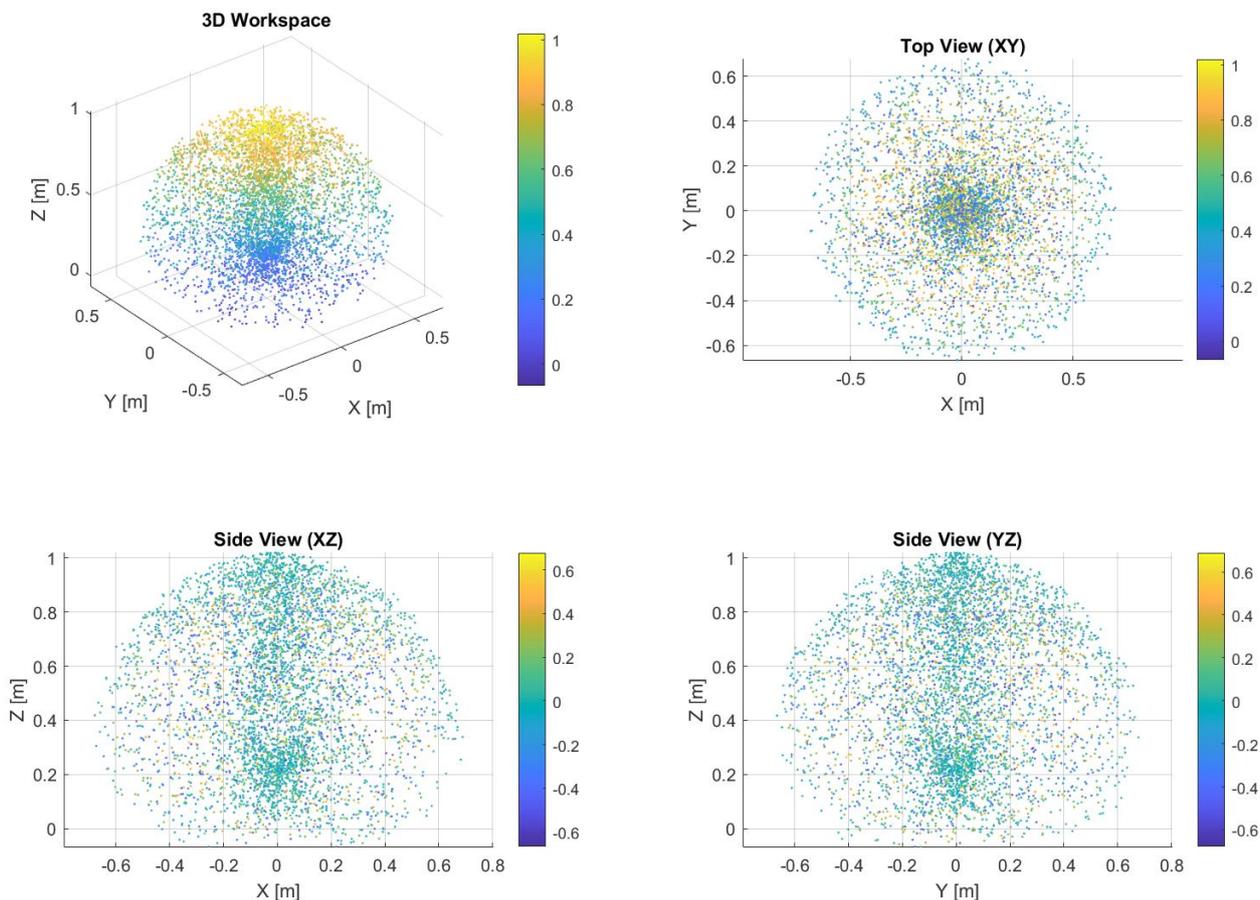


Рис. 3. Построение облака точек методом Монте-Карло

Fig. 3. Point cloud simulation using the Monte-Carlo Method

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ В MATLAB/SIMULINK

Для верификации разработанной математической модели было проведено численное моделирование в среде MATLAB/Simulink с использованием Robotics Toolbox. Имитировалось движение манипулятора по типовой траектории «поднять-переместить-опустить» с объектом в захвате (рис. 4–14).

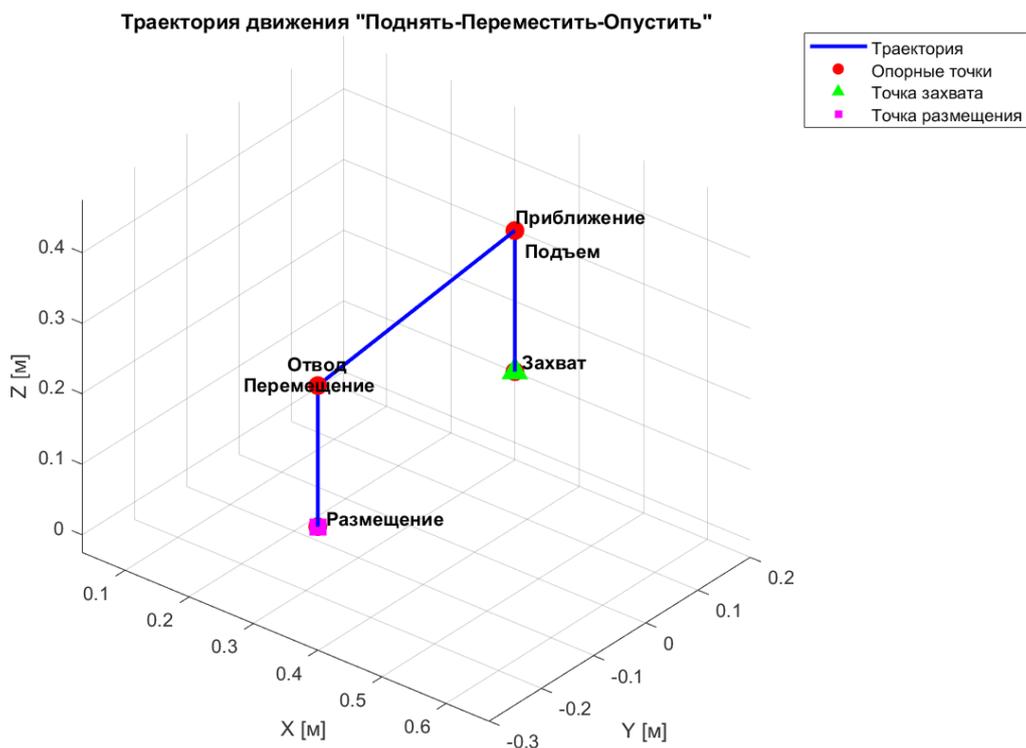


Рис. 4. Движение манипулятора по типовой траектории «поднять-переместить-опустить» с объектом в захвате

Fig. 4. Movement of the manipulator along a typical “lift-move-lower” trajectory with an object in its grip



Рис. 5. Анимация движения промышленного робота-манипулятора

Fig. 5. Industrial manipulator movement animation

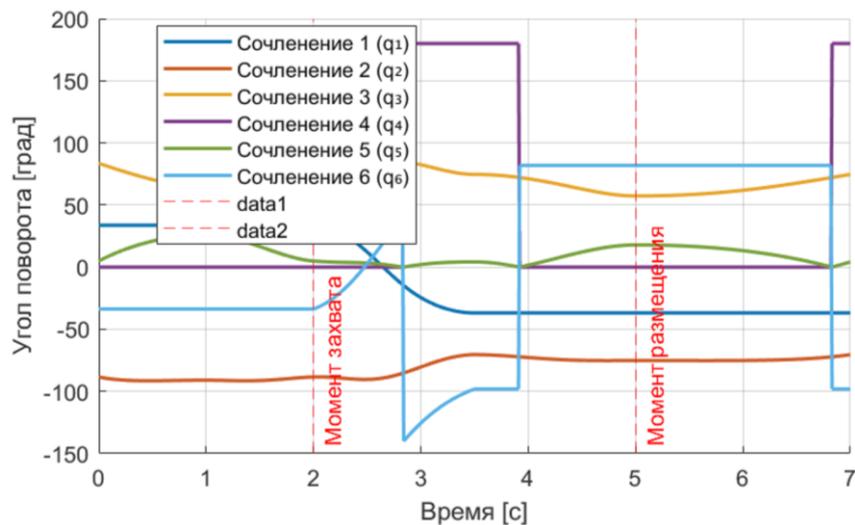


Рис. 6. Углы в кинематических сочленениях / Fig. 6. Angles in kinematic joints

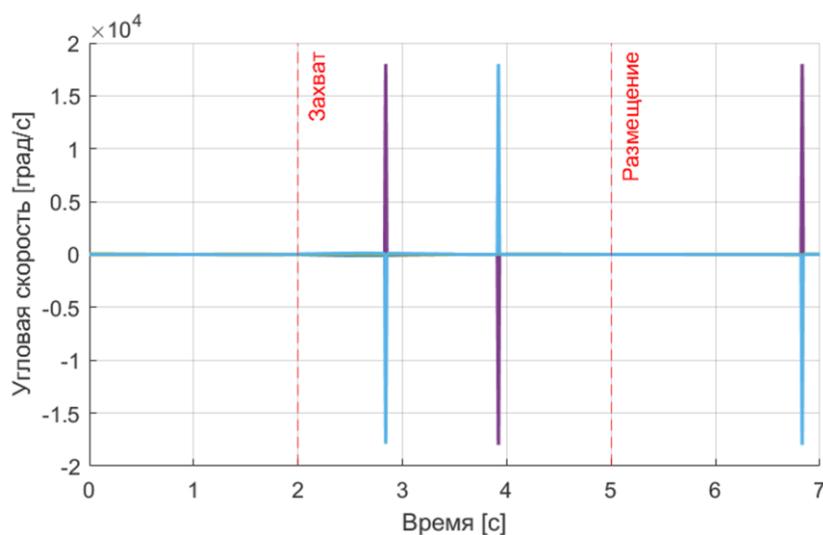


Рис. 7. Скорости вращения сочленений / Fig. 7. Joint rotation speeds

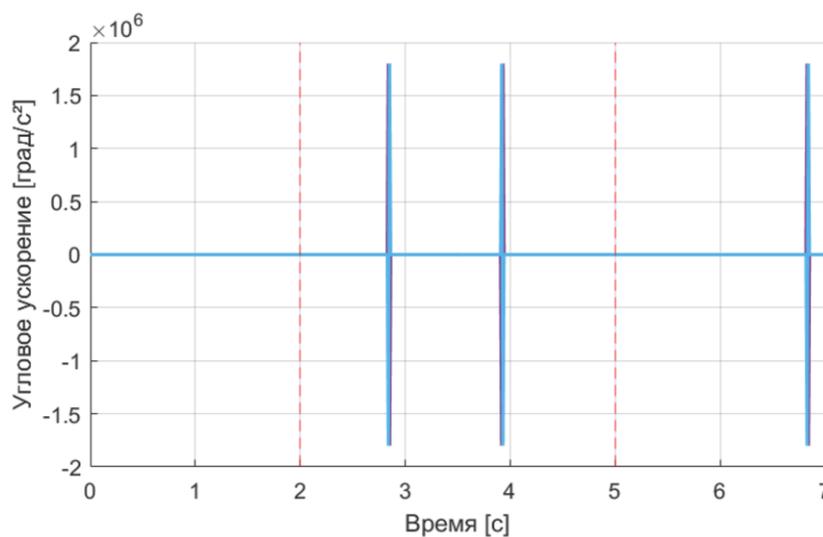


Рис. 8. Ускорения сочленений / Fig. 8. Joint accelerations

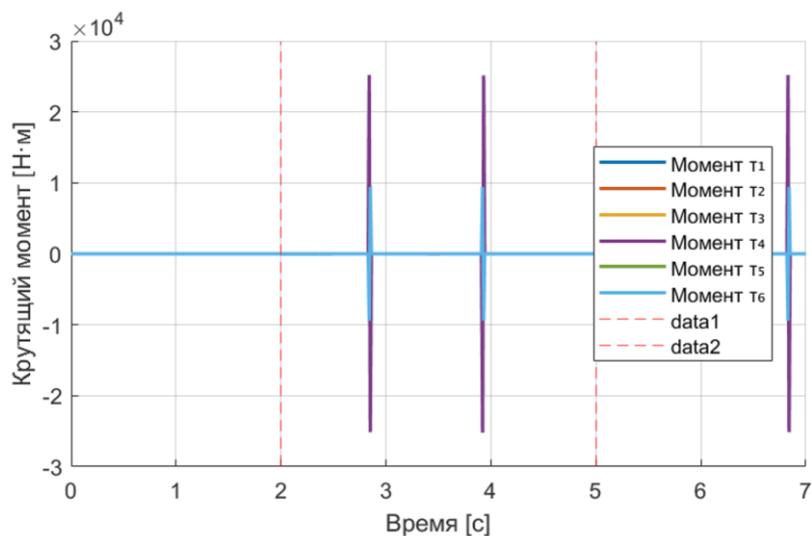


Рис. 9. Моменты в приводных сочленениях / Fig. 9. Moments in drive joints

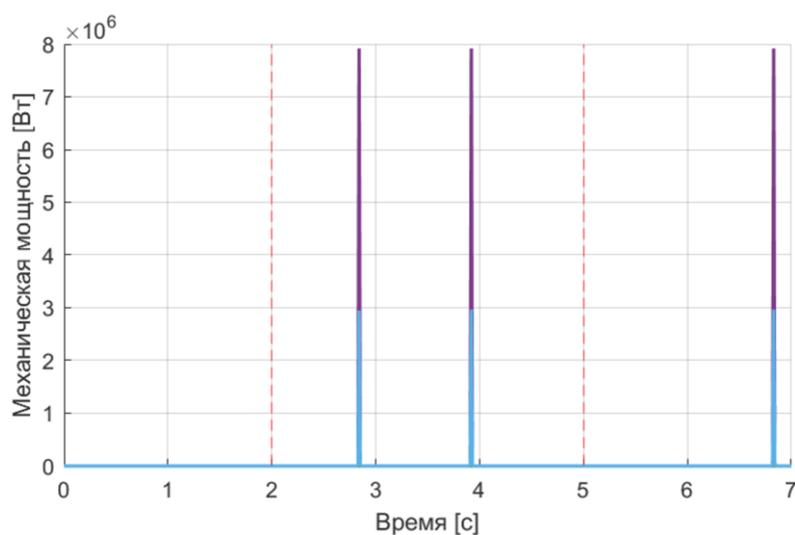


Рис. 10. Мгновенная мощность приводов / Fig. 10. Instantaneous power of drives

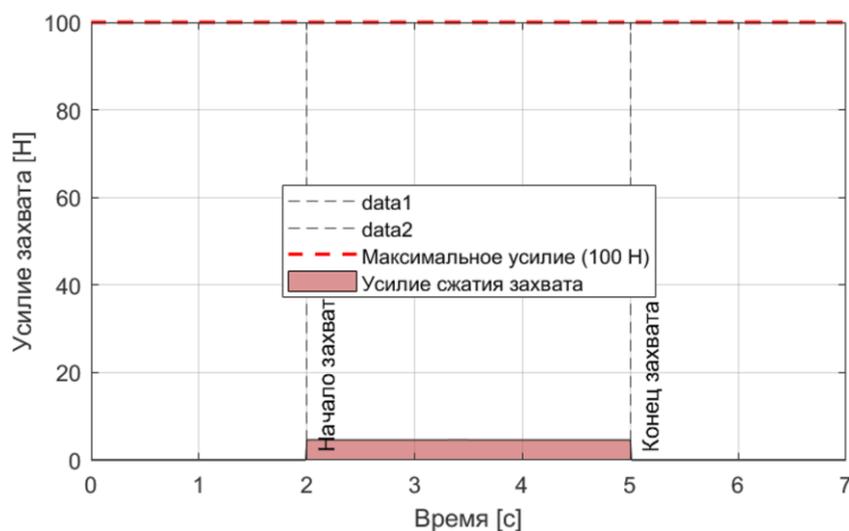


Рис. 11. Динамика усилия механического захвата / Fig. 11. Dynamics of mechanical gripping force

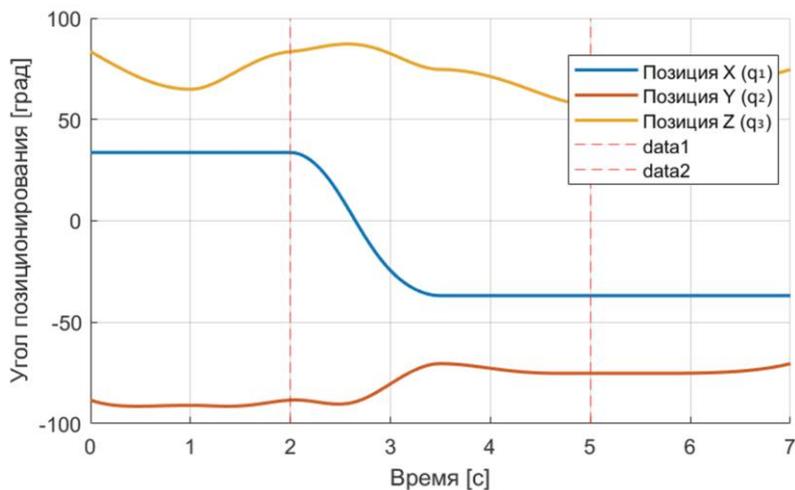


Рис. 12. Положение схвата (базовые степени подвижности)

Fig. 12. Grip position (basic degrees of mobility)

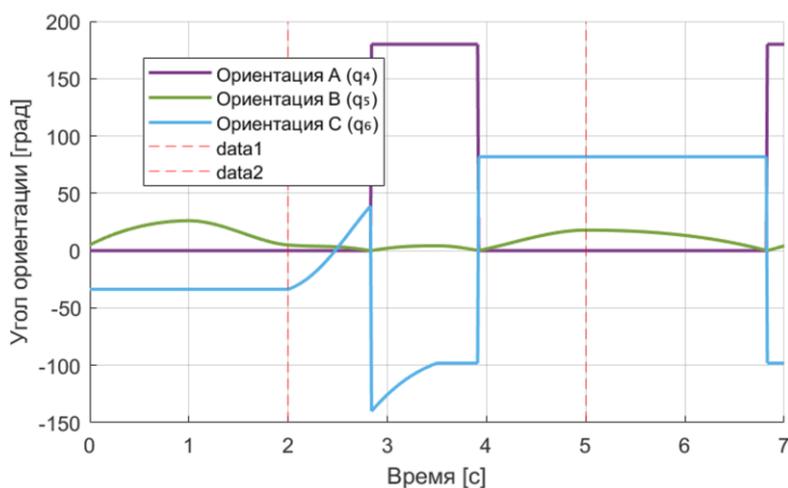


Рис. 13. Ориентация схвата (запястье манипулятора)

Fig. 13. Orientation of the gripper (manipulator wrist)

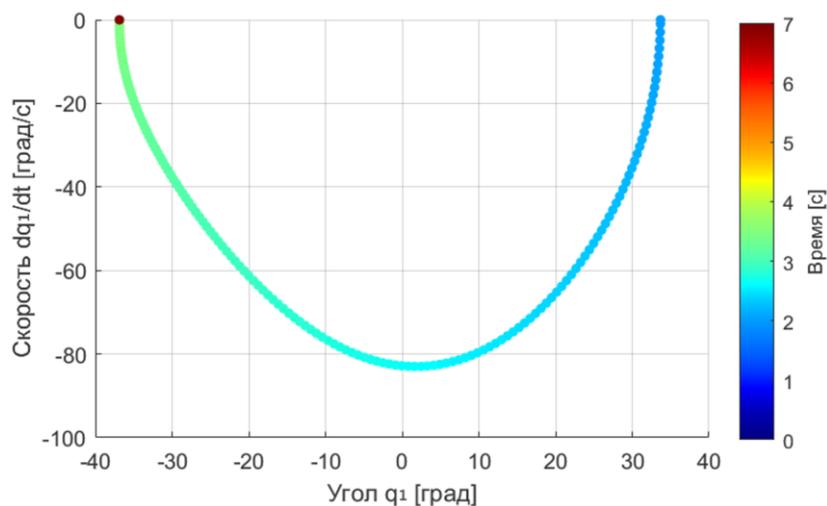


Рис. 14. Фазовый портрет: сочленение 1 (пояс вращения)

Fig. 14. Phase portrait: joint 1 (rotation belt)

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате исследования получены:

1. **Кинематика.** Графики углов в сочленениях при решении ОЗК для заданной траектории схвата показали плавность и отсутствие сингулярностей.
2. **Динамика.** Расчет требуемых моментов в приводах выявил пиковые нагрузки при разгоне и торможении, что критично для выбора исполнительных устройств.
3. **Рабочее пространство.** Построенная 3D-модель и облако точек подтвердили ожидаемую геометрию рабочей зоны и позволили визуализировать мертвые зоны.
4. **Захват.** Модель захвата позволила определить минимальное необходимое усилие сжатия для удержания объекта на всех этапах движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе успешно разработана комплексная математическая модель промышленного шестизвенового робота-манипулятора с механическим захватом. Модель интегрирует кинематику, динамику и геометрию, образуя основу для проектирования систем точного управления, планирования траекторий и анализа производительности.

Основные научные и практические результаты:

1. Получены замкнутые аналитические выражения для решения прямой и обратной задач кинематики.
2. Сформированы параметрические матрицы динамических уравнений движения в форме Лагранжа–Эйлера.
3. Разработана модель силового взаимодействия двухпальцевого захвата с объектом манипулирования.
4. Создан программный инструмент в MATLAB для численного анализа и визуализации рабочего пространства.

Разработанная модель является универсальным инструментом и может быть адаптирована для конкретных промышленных манипуляторов путем корректировки параметров D-Н и инерционных характеристик, что открывает широкие возможности для ее практического применения в робототехнике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кутафин А. А., Захаркина С. В.* Управление двигателями в мобильном роботе при помощи ПИД-регулятора / Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2021): сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием, Москва, 12–15 апреля 2021 года. Том Часть 4. М.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2021. С. 208–212. EDN: XKLAGG
2. *Беркаев А. Р., Ненашев А. А., Ключиков А. В.* Разработка системы локализации и позиционирования мобильного робота // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 12-3. С. 152–157. EDN: QDGESL
3. *Guo P., Shi H., Wang Sh., Tang L., Wang Z.* An ROS architecture for autonomous mobile robots with UCAR platforms in smart restaurants // Machines. MDPI AG – 2022. Vol. 10. No. 10. P. 844. DOI: 10.3390/machines10100844. EDN: ADSREE
4. *Алхалили А. С., Лукьянов Е. А.* Управление движением колесного мобильного робота на основе имитационного моделирования // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 8. С. 112–121. EDN: XJSZPY

5. Лапинов С. А., Шахнов В. А., Юдин А. В. Направления интеллектуализации управления движением мобильного робота // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2021. Т. 23. № 1. С. 50–62. EDN: FKKGKV

6. Deshmukh A., Gupta M. PID Controller: A review of literature // *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT)*. 2021. Vol. 6. Is. 3. Pp. 48–53. DOI: 10.32628/IJSRCSEIT.0639

7. Shahbazi M. Machine learning-based approaches for obstacle detection and avoidance in autonomous vehicles: A review // *Expert Systems With Applications*. 2021. 172:114535. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114535

8. Rubio JdJ, Garcia E., Aquino G. et al. Learning of operator hand movements via least angle regression to be taught in a manipulator. *Evol Syst* 2018: 1–16.

9. Rubio JdJ. Robust feedback linearization for nonlinear processes control. *ISA Trans* 2018; 74: 155–164. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.01.017

10. Альвардат М. Я., Мболо О. Э. Л., Кочнева О. В. и др. Исследование сингулярности роботов-манипуляторов // *Автоматизация. Современные технологии*. 2024. Т. 78/ № 4. С. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179. EDN: PIXMWL

11. Бошляков А. А., Новак А. В. Генетический алгоритм для решения задачи планирования траектории манипулятора с избыточными степенями подвижности с учетом препятствий // *Наукосфера*. 2024. № 4-1. С. 129–135. DOI: 10.5281/zenodo.10992535. EDN: LWSMST

12. Каляшина А. В., Смирнов Ю. Н. Программирование контроллера робота для реализации технологического процесса лазерной резки // *Инженерный вестник Дона*. 2024. № 4(112). С. 90–98. EDN: JFUPHM

13. Афонин Д. В., Печурин А. С., Яцун С. Ф. Динамический анализ двухзвенной связанной системы // *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Т. 12. № 5. С. 49–56. EDN: NOHWHH

14. Архипов М. В., Вартапов М. В., Мищенко Р. С. Промышленные роботы: управление манипуляционными роботами: учебник для среднего профессионального образования. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2025. 170 с. ISBN: 978-5-534-13082-9

15. Москвичев А. А., Кварталов А. Р., Устинов Б. В. Захватные устройства промышленных роботов и манипуляторов: учебное пособие. М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2020. 176 с.

REFERENCES

1. Kutafin A.A., Zakharkina S.V. Control of motors in a mobile robot using a PID controller. In: *Innovative Development of Engineering and Technology in Industry (INTEX-2021): Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation*, Moscow, April 12–15, 2021. Vol. Part 4. Moscow: Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet imeni A. N. Kosygina (Tekhnologii. Dizayn. Iskusstvo.). 2021. Pp. 208–212. EDN: XKLAGG. (In Russian)

2. Berkaev A.R., Nenashev A.A., Klyuchikov A.V. Development of a localization and positioning system for a mobile device. In: *Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMTT)*. 2020. Vol. 12–3. Pp. 152–157. EDN: QDGESL. (In Russian)

3. Guo P., Shi H., Wang Sh., Tang L., Wang Z. An ROS architecture for autonomous mobile robots with UCAR platforms in smart restaurants. *Machines. MDPI AG – 2022*. Vol. 10. No. 10. P. 844. DOI: 10.3390/machines10100844. EDN: ADSREE

4. Alkhalili A.S., Lukyanov E.A. Motion control of a wheeled mobile robot based on simulation modeling. *Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 8. Pp. 112–121. EDN: XJSZPY. (In Russian)

5. Lapshinov S.A., Shakhnov V.A., Yudin A.V. Directions for intelligent mobile robot motion control. *Neurocomputers: Development, Application*. 2021. Vol. 23. No. 1. Pp. 50–62. EDN: FKKGKV. (In Russian)
6. Deshmukh A., Gupta M. PID Controller: A review of literature. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT)*. 2021. Vol. 6. No. 3. Pp. 48–53. DOI: 10.32628/IJSRCSEIT.0639
7. Shahbazi M. Machine learning-based approaches for obstacle detection and avoidance in autonomous vehicles: A review. *Expert Systems with Applications*. 2021. 172:114535. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114535
8. Rubio JdJ, Garcia E., Aquino G. et al. Learning of operator hand movements via least angle regression to be taught in a manipulator. *Evol Syst*. 2018. Pp. 1–16.
9. Rubio JdJ. Robust feedback linearization for nonlinear processes control. *ISA Trans*. 2018. No. 74. Pp. 155–164.
10. Alvardat M.Ya., Mbolu O.E.L., Kochneva O.V. et al. Study of the singularity of robotic manipulators. *Automation. Modern Technologies*. 2024. Vol. 78. No. 4. Pp. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179. EDN: PIXMWL. (In Russian)
11. Boshlyakov A.A., Novak A.V. Genetic algorithm for solving the problem of planning the trajectory of a manipulator with redundant degrees of freedom taking into account obstacles. *Naukosphere*. 2024. No. 4-1. Pp. 129–135. DOI: 10.5281/zenodo.10992535. EDN: LWSMST. (In Russian)
12. Kalyashina A.V., Smirnov Yu.N. Programming a robot controller for the implementation of the laser cutting process. *Engineering Bulletin of the Don*. 2024. No. 4(112). Pp. 90–98. EDN: JFUPHM. (In Russian)
13. Afonin D.V., Pechurin A.S., Yatsun S.F. Dynamic analysis of a two-link coupled system. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Vol. 12. No. 5. Pp. 49–56. EDN: NOHWHH
14. Arkhipov M.V., Vartanov M.V., Mishchenko R.S. *Promyshlennyye roboty: upravleniye manipulyatsionnymi robotami: uchebnik dlya srednego professional'nogo obrazovaniya* [Industrial Robots: Control of Manipulation Robots: Textbook for Secondary Vocational Education]. 2nd ed., corrected. and add. Moscow: Izdatelstvo Yurait, 2025. 170 p. ISBN: 978-5-534-13082-9. (In Russian)
15. Moskvichev A.A., Kvartalov A.R., Ustinov B.V. *Zakhvatnyye ustroystva promyshlennykh robotov i manipulyatorov* [Gripping Devices of Industrial Robots and Manipulators]: textbook. Moscow: FORUM; INFRA-M, 2020. 176 p. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Хахимов З. Л., Шухин В. В., Лабазанов М. А. – разработка методологии, разработка и проектирование алгоритмов управления;

Хахимов З. Л., Лабазанов М. А. – программная реализация и валидация;

Хахимов З. Л. – математическое моделирование и формальный анализ;

Лабазанов М. А. – анализ и сбор данных;

Хахимов З. Л. – подготовка исходного варианта рукописи.

Все авторы – написание, рецензирование и редактирование рукописи.

Author's contribution:

Khakimov Z.L., Shukhin V.V., Labazanov M.A. – methodology development, development and design of control algorithms;

Khakimov Z.L., Labazanov M.A. – software implementation and validation;

Khakimov Z.L. – mathematical modeling and formal analysis;

Labazanov M.A. – data analysis and collection;

Khakimov Z.L. – manuscript preparation.

All authors – writing, reviewing, and editing the manuscript.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Хакимов Заур Леччиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

deffender_95@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1665-8631>, SPIN-код: 3540-6580

Шухин Владимир Витальевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

shukhin86@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0273-0058>, SPIN-код: 2895-3434

Лабазанов Магомед Абубакарович, старший преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

labazanov.90@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9714-5146>, SPIN-код: 5981-5217

Information about the authors

Zaur L. Khakimov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

deffender_95@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1665-8631>, SPIN-code: 3540-6580

Vladimir V. Shukhin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

shukhin86@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0273-0058>, SPIN-code: 2895-3434

Magomed A. Labazanov, Senior Lecturer, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

labazanov.90@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9714-5146>, SPIN-code: 5981-5217