

# Машиностроение и машиноведение

УДК 519.876.5

## Имитационное моделирование манипуляторов для решения задач планирования траекторий

Я.В. Лючев<sup>1</sup>, А.В. Ключиков<sup>2</sup>, С.В. Пчелинцева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «Информационные и управляющие системы»

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Вавиловский университет

<sup>3</sup> Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева

## Simulation modeling of a manipulator for solving the trajectory planning problems

Ya.V. Lyuchev<sup>1</sup>, A.V. Klyuchikov<sup>2</sup>, S.V. Pchelintseva<sup>3</sup>

<sup>1</sup> JSC Information and Control Systems

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vavilov University

<sup>3</sup> Russian State Agrarian University — Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev

Разработано программное обеспечение для визуализации алгоритмов планирования движения промышленного манипулятора с применением средств математического и имитационного моделирования. Рассмотрено использование среды Unity для разработки математических, физических и имитационных 3D-моделей промышленных манипуляторов в трехмерном пространстве, а также возможность вычисления и визуализации траектории звеньев. Составлены алгоритмы для программного решения кинематических задач (прямой и обратной) и методов планирования траекторий манипулятора для выполнения технологических и манипулятивных операций. Реализованы модули визуализации имитационной модели промышленного: программная модель манипулятора, рабочей сцены и траекторий. Результаты апробированы на примере учебного манипулятора Kuka. Проведен натурный эксперимент для сравнения точности вычислений разработанного программного решения.

**EDN:** EITKLQ, <https://elibrary/eitklq>

**Ключевые слова:** обратная задача кинематики, моделирование траекторий, среда Unity, имитационное моделирование, промышленный манипулятор

The paper presents results of developing a software for visualizing the manipulator motion planning algorithms using the mathematical and simulation modeling tools. It considers the use of the Unity environment in developing the mathematical, physical and 3D simulation models of manipulators in the three-dimensional space. Besides, a possibility of calculating and visualizing the link motion trajectory is identified. Algorithms are compiled for software solution to the kinematic problems (direct and inverse) and manipulator planning methods to perform the technological and manipulative operations. Modules for visualizing the manipulator simulation model are implemented, including the manipulator, working scene and trajectory models. The results were tested on the example of the Kuka training manipulator. A full-scale experiment was conducted to compare the accuracy of computation in the developed software solutions.

EDN: EITKLQ, <https://elibrary/eitklq>

**Keywords:** inverse kinematics problem, trajectory simulation, Unity environment, simulation modeling, industrial manipulator

Разработка новых мехатронных модулей и робототехнических систем предусматривает предварительное моделирование основных рабочих функций устройств с применением инструментов математического, имитационного и 3D-моделирования. При разработке программ для движения промышленного манипулятора (ПМ) учитывают переменные и параметры: ограничения рабочего пространства, препятствия и конфигурацию ПМ.

Возникает необходимость моделирования робототехнической системы и отработки траекторий с использованием имитационной модели [1–4]. К программам для моделирования ПМ относятся Kuka Sim Pro — имитационная модель для ПМ фирмы Kuka и MATLAB с программными модулями для математических вычислений.

Однако эти решения закрыты от внешних и внутренних изменений и создания дополнительного функционала. Открытость исходного кода способствует развитию и дополнению программных решений через вовлечение сообщества. Применение подхода Open Source к проекту позволяет отладить имеющийся функционал и расширить возможности программы. Для создания такого решения можно воспользоваться средой разработки, поддерживающей компонентную или объектную парадигму, позволяющую переносить алгоритмы с одной среды разработки на другую [1, 5–11].

Цель исследования — повышение качества подготовки операторов ПМ с применением программного решения для их имитационного моделирования, а также сокращение времени выполнения цикла работы ПМ с использованием его имитационной модели.

Необходимо разработать программу, позволяющую изменять, создавать и дополнять сценарии манипулятивных операций. Чтобы достичь поставленной цели, требуется разработать математическую модель для вычисления движения ПМ, алгоритмы планирования траекторий ПМ при выполнении технологических операций и пакет прикладных программ для визуализации траекторий ПМ.

**Выбор среды разработки.** Для разработки имитационной модели среда должна обладать

такими функциями, как импортное триггерное моделирование, сделанных в САД-системах и управление тригонометрическими функциями объектов, а также иметь инструменты для работы с файловой системой и вычисления математических алгоритмов [7].

Среди программных решений рассмотрены Unreal Engine, Unigine, Godot и MATLAB. Программный пакет Unreal Engine имеет инструменты для разработки инженерных и архитектурных приложений. Godot — относительно новая среда разработки (2014 г. выпуска) с развивающимся функционалом; сообщество разработчиков и базы данных исходных материалов менее развиты, чем другие игровые движки.

Для использования полного функционала среды Unigine нужна подписка Engineering, что ограничивает разработчиков в ее применении. К специализированным математическим средам для моделирования манипуляторов относится MATLAB. Однако при переносе на другую среду может возникнуть сложность с изменением синтаксиса, так как в этом программном пакете использован собственный язык [1, 6, 7, 12].

Игровой движок Unity — трехмерная среда, имеющая библиотеки для работы с тригонометрическими функциями и математическими алгоритмами, работает с файловой системой JSON и поддерживает импортное триггерное моделирование, сделанных в САД-системах. К достоинствам игрового движка Unity относятся возможность настройки пространства среды разработки Unity Editor, наличие открытого кода и способность интеграции с операционной системой для роботов ROS (Robot Operating System). Также игровой движок Unity применяют для разработки игр, тренажеров, обучающих систем и архитектурных приложений.

Исходя из перечисленных достоинств, игровой движок предлагается использовать для разработки программного пакета имитационного моделирования.

**Архитектура системы визуализации движения ПМ по вычисленным траекториям.** Для планирования этапов разработки и последующей работы с пакетом программ требуется сформировать архитектуру с целью дальнейшего сопро-

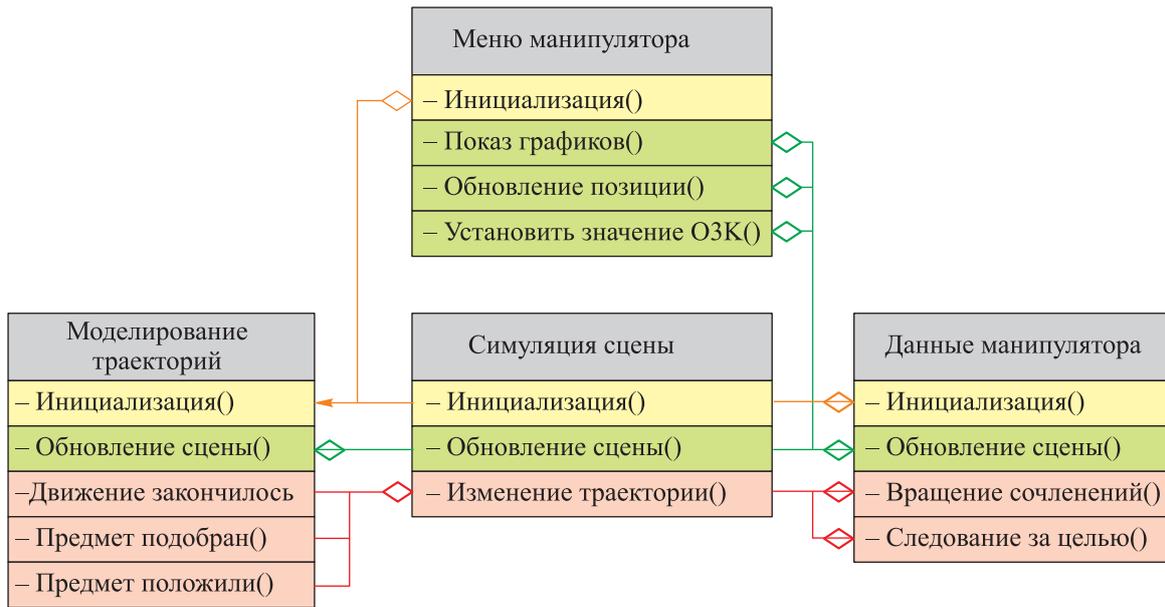


Рис. 1. Архитектура управления ПМ

вождения проекта, его переноса и интеграции на другие среды разработки [8]. Архитектура управления ПМ (рис. 1) предполагает наличие глобального компонента «Симуляция сцены», являющегося входной точкой визуализации движения ПМ. От него зависят остальные компоненты программы: «Данные манипулятора», «Моделирование траекторий» и «Меню манипулятора». Такая архитектура позволяет абстрагироваться от среды разработки и контролировать порядок расчетов вручную.

Рассмотрим общий алгоритм работы программного решения (рис. 2). При пуске сцены происходит инициализация основных компонентов сценария: глобальных параметров, пользовательского интерфейса, ПМ и его сочленений, траекторий. В каждом промежутке времени или кадре обрабатываются движения ПМ по траектории, и обновляются параметры в пользовательском интерфейсе (обновление позиции).

Если траектория модульная, то по достижению конечной точки происходит смена пути, и ПМ движется к следующей позиции (вращение сочленений, следование за целью). При особых событиях (окончить движение, подобрать или положить предмет) происходит смена траектории или изменение состояния ПМ.

При обработке сцены визуализируются законы изменения обобщенных координат на графике (рис. 3, а) и интерфейс для выбора конечной позиции ПМ, т. е. установка значения

для решения обратной задачи кинематики (ОЗК) (рис. 3, б).

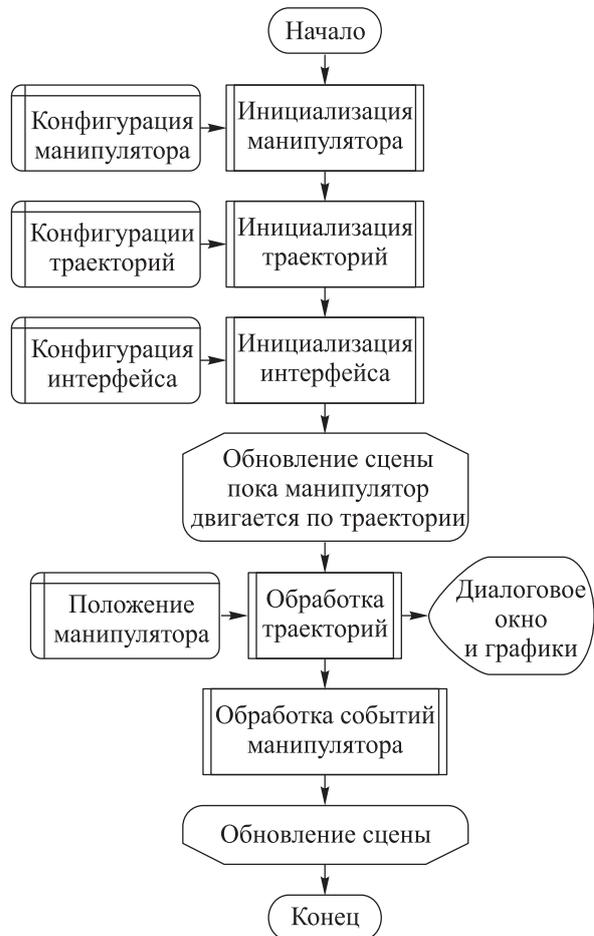


Рис. 2. Схема компонента симуляции сценария

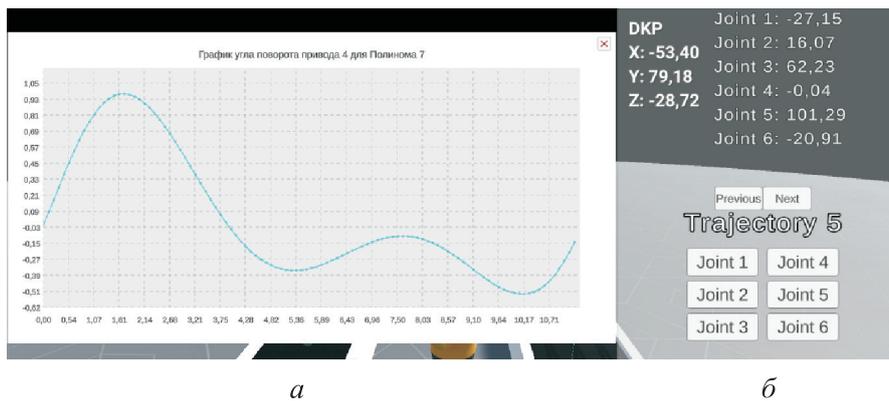


Рис. 3. Диалоговые окна:  
 а — график угла поворота; б — значения ОЗК и кнопки для изменения позиции

**Разработка системы управления ПМ.** Для управления ПМ создан класс ManipulatorData, реализующий такие функции его работы, как поворот углов сочленения, решение кинематических задач и настройка конфигурации. В классе конфигурируются звенья ПМ, тип рабочего органа и смещение базовой системы координат [2, 3, 6, 13, 14]. Настройка класса отображена на рис. 4, где звенья 1–5 — настройки звеньев ПМ, звено 6 — настройка рабочего органа ПМ, его типа и рабочих инструментов.

Для отработки сценариев работы ПМ создан класс SceneSimulation (см. рис. 4), инициализи-

рующий его конфигурацию, траекторию и пользовательский интерфейс. Для перемещения ПМ по траектории в режиме реального времени создан класс TrajectoryBehaviour. Экземпляр класса проводит математическое моделирование траектории и предоставляет ПМ обобщенные координаты ее точек для каждого звена [6, 13–15].

Алгоритм отработки траектории включает в себя следующие шаги:

- 1) отслеживание позиции ПМ в текущий промежуток времени;
- 2) проверка условия, достиг ли ПМ промежуточной траектории; в случае истинности пе-

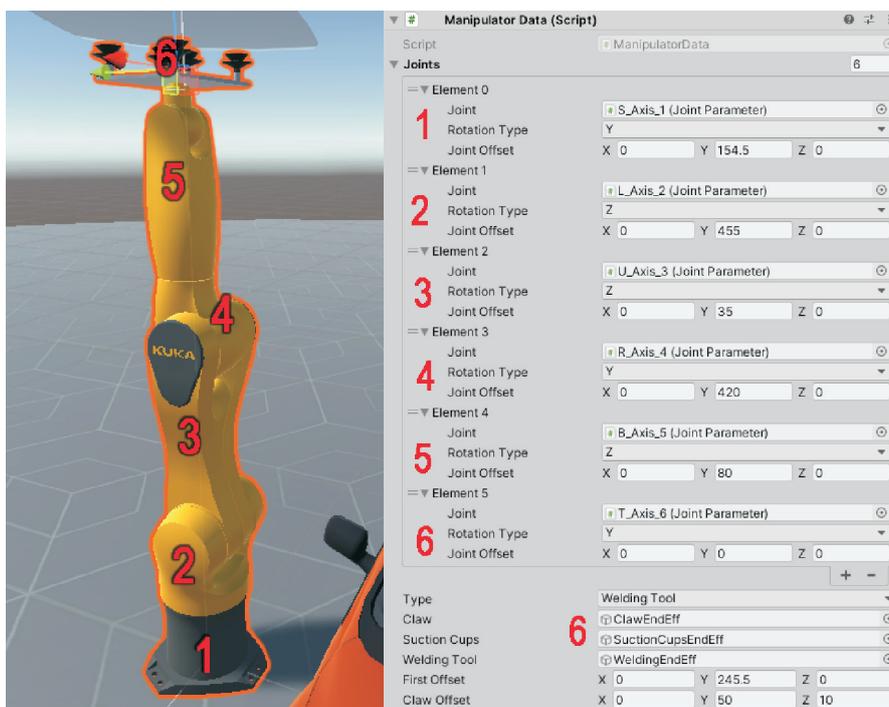


Рис. 4. Окно «Настройка скрипта ManipulatorData»

реход к следующему шагу, иначе повтор первого и второго шагов;

3) компонент TrajectoryBehaviour отправляет координаты следующей точки ПМ.

Обработка идет каждый кадр в методе SceneUpdate для составления порядка обновления компонентов на сцене.

**Работа алгоритмов решения задач кинематики и планирования траектории.** Моделирование траекторий в декартовых координатах разбивают на подзадачи.

*Подзадача 1* — определение траектории рабочего органа ПМ в пространстве.

*Подзадача 2а* — задание вектора обобщенных координат в каждый период времени (рис. 5, а) [10, 15]. Алгоритм отработки планирования в обобщенных координатах включает в себя следующие шаги. Ввод исходных данных, в качестве которых выступают углы поворота сочленений в четырех точках (начальной, ухода, подхода, конечной), ограничения (начальная и конечная скорости перемещения, ускорения) и время выполнения промежутков траекторий. Вычисление начальной и конечной точек ПМ в формате вектора координат

или углов сочленений. Уточнение траектории точками ухода и подхода ПМ. Определение ограничений траектории и углов сочленений ПМ в каждой из указанных точек. Аппроксимация траектории с помощью коэффициентов выбранного полинома, и расчет множества обобщенных координат [16–18]. Вывод массива обобщенных координат для каждого сочленения.

*Подзадача 2б* — планирование движения в обобщенных координатах для задач переноса объектов с предположительными препятствиями (рис. 5, б) [1, 4, 11,14]. Алгоритм отработки планирования в обобщенных координатах включает в себя следующие шаги. Ввод исходных данных, в качестве которых выступают массив компонентов Transform узловых точек (их позиция и ориентация), время выполнения траектории, коэффициенты квадратичной интерполяции и линейной аппроксимации. Задание узловых точек траектории. Расчет всех промежуточных точек с регулируемым шагом с использованием линейной аппроксимации или квадратичной интерполяции. Решение ОЗК для каждой точки сформированной траектории [19, 20] с получением обобщенных координат. Вы-

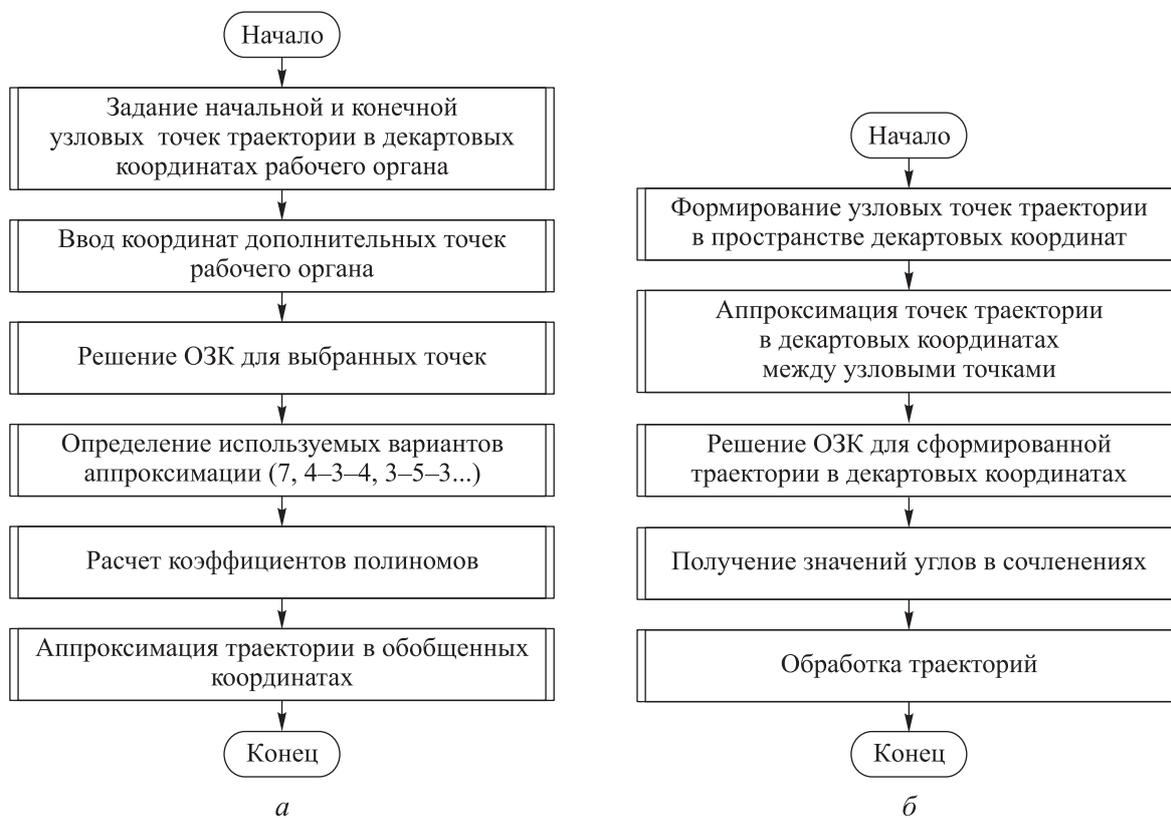


Рис. 5. Блок-схема алгоритма отработки планирования в обобщенных (а) и декартовых (б) координатах

вод массива обобщенных координат для каждого сочленения.

**Апробация рабочей программы.** Разработана траектория монтирования лобового стекла автомобиля. Для описания использовано планирование в обобщенных координатах, так как необязательно контролировать положение и ориентацию ПМ в каждый период времени, как при точечных операциях (например, при сварке).

Определены точки — начальная, ухода, подхода и конечная. Создан компонент для инициализации обобщенных координат точек и ограничений (начальная и конечная скорости перемещения и ускорения) траектории. Сформирована вспомогательная линейная траектория для установки стекла. Траектория визуализирована штриховой линией (рис. 6, а).

Моделирование ПМ выполнено без учета динамических погрешностей, влияющих на точность позиционирования. Результаты те-



а



б

Рис. 6. Имитационное моделирование монтажа стекла манипулятором:  
а — траектория технологической операции;  
б — узловые точки траектории

**Результаты тестовых замеров  
обобщенных координат звеньев манипулятора  
для различных траекторий**

Номер замера	Степень свободы	Обобщенные координаты, град		Погрешность, град
		заданные	расчетные	
1	1	102,62830	102,62830	0
	2	26,13572	26,13572	0
	3	60,62126	60,62126	0
	4	89,27655	89,27655	0
	5	77,43777	77,43777	0
	6	93,32265	93,32265	0
2	1	103,63260	103,63260	0
	2	19,38401	19,38402	~0,00001
	3	69,88738	69,88738	0
	4	89,82391	89,82391	0
	5	76,41414	76,41414	0
	6	90,74957	90,74957	0
3	1	36,76488	36,76441	~0,00047
	2	2,746373	2,747331	~0,00958
	3	86,17067	86,16959	~0,00108
	4	-58,77967	-58,77880	~0,00087
	5	76,41414	69,04128	~7,37286
	6	77,74352	77,74477	~0,00875
4	1	18,52892	18,63450	~0,10558
	2	39,52016	36,38827	~3,13189
	3	44,57952	51,80617	~7,22665
	4	-25,50002	-27,21799	~1,71797
	5	102,33090	96,55280	~5,77810
	6	125,63870	123,71200	~1,92670

стовых замеров обобщенных координат звеньев ПМ для различных траекторий приведены в таблице, где номера замеров соответствуют обозначениям, введенным на рис. 6, б.

При обработке алгоритма установки стекла наблюдается погрешность в конце траектории. В дальнейшем при вычислении планируется учитывать погрешности массы рабочего органа и калибровки сочленений ПМ.

## Выводы

1. Сформирован программный пакет для визуализации имитационной модели ПМ. Реализована настройка конфигурации ПМ, система вывода графиков и основных параметров ПМ в режиме реального времени. Разработаны алгоритмы решения кинематических задач и планирования траекторий ПМ.

2. Программное обеспечение направлено на эффективную подготовку студентов и операторов к работе с ПМ и сокращение времени построения программной траектории ПМ с использованием имитационной модели.

3. Для дальнейшей поддержки программного обеспечения сформированы следующие задачи:

- добавление динамических зависимостей ПМ (масса рабочего органа, погрешности калибровки сочленений);
- разработка консоли управления ПМ с использованием языка программирования конкретного ПМ;
- учет коллизий ПМ и объектов, находящихся в рабочей зоне.

## Литература

- [1] Осипов И.А., Феоктистов Д.А., Михайлов К.С. и др. Применение технологий виртуальной реальности в имитационном моделировании мобильных роботов. *Проблемы и перспективы цифровизации агропромышленного комплекса. Мат. межд. науч.-практ. конф.* Саратов, Вавиловский ун-т, 2023, с. 80–85.
- [2] Давлетшин Р.Р., Дробина Е.А. Моделирование системы захвата промышленного робота. *Молодой ученый*, 2019, № 39, с. 186–189.
- [3] Быков Н.В., Товарнов М.С. Имитационное моделирование взаимодействия мобильного робота с возможностью вертикального перемещения с окружением. *ИТММ-2018*. Томск, 2018, с. 300–305.
- [4] Тачков А.А. Концептуальное проектирование мобильных робототехнических систем на основе статистического имитационного моделирования. *Экстремальная робототехника*, 2016, № 1, с. 66–71.
- [5] Куприн М.С., Осипов И.А., Фурсин А.А. и др. *Программный пакет имитационного моделирования мобильных роботов на основе движка Unity*. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2023681185 РФ. Заявл. 26.09.2023, опублик. 11.10.2023.
- [6] Ключиков А.В., Лючев Я.В., Пчелинцева С.В. *Программный пакет для имитационного моделирования промышленных роботов*. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2024618442 РФ. Заявл. 27.03.2024, опублик. 11.04.2024.
- [7] Куприн М.С., Осипов И.А., Ключиков А.В. и др. Анализ инструментов имитационного моделирования мобильных робототехнических платформ с учетом физических законов (обзор). *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2023, т. 24, № 3, с. 152–157, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.24.152-157>
- [8] Куприн М.С., Ключиков А.В. Разработка программных модулей имитации колес Илона и омниколес в мобильных роботах. *Математические методы в технологиях и технике*, 2023, № 4, с. 77–80, doi: [https://doi.org/10.52348/2712-8873\\_ММТТ\\_2023\\_4\\_77](https://doi.org/10.52348/2712-8873_ММТТ_2023_4_77)
- [9] Пчелинцева С.В. Анализ сходимости процесса формирования программных траекторий с ограниченными отклонениями для манипуляторов с контурным управлением. *Вестник Саратовского государственного технического университета*, 2012, т. 1, № 2, с. 402–409.
- [10] Горелов В.А., Рубцов И.В., Стадухин А.А. Исследование подвижности мобильных робототехнических комплексов методом имитационного моделирования. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2020, № 1, с. 144–155, doi: <https://doi.org/10.1852/2311-3103-2020-1-144-155>
- [11] Брехов О.М., Звонарева Г.А., Рябов В.В. Особенности разработки и анализа имитационной модели мультипроцессорной вычислительной системы. *Открытое образование*, 2017, № 3, с. 48–56, doi: <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2017-3-48-56>
- [12] Рудковский К.Е., Корзун Д.Ж. Обзор средств имитационного моделирования перемещения и сенсорики колесных мобильных роботов. *Цифровые технологии в образовании, науке, обществе. Мат. XVII Всерос. науч.-практ. конф.* Петрозаводск, ПетрГУ, 2023, с. 84–85.
- [13] Галемов Р.Т., Масальский Г.Б. Планирование траектории манипулятора для движущейся цели. *Кибернетика и программирование*, 2018, № 2, с. 9–28.
- [14] Курочкин С.Ю., Тачков А.А., Борисенков Е.И. Параметрический синтез системы управления групповым движением роботов с использованием статистического имитационного моделирования.

- тационного моделирования. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2023, № 1, с. 146–154, doi: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-1-146-154>
- [15] Курочкин С.Ю., Тачков А.А. Статистическая имитационная модель группового движения мобильных роботов с учетом вероятностно-временных характеристик системы связи и автономного управления движением. *Экстремальная робототехника*, 2022, № 1, с. 123–129.
- [16] Пчелинцева С.В. *Разработка методов математического моделирования кинематики промышленных манипуляторов*. Дисс. ... канд. тех. наук. Саратов, СГТУ, 2005. 205 с.
- [17] Зуева С.В., Беляев А.С. Создание 3d модели манипулятора в Matlab Simulink. Молодежь и современные информационные технологии. *Межд. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. Томск, ТПУ, 2018, с. 104–105.
- [18] Селезнева С.Н. *Полиномиальные представления дискретных функций*. Дисс. ... док. физ.-мат. наук. Москва, МГУ, 2015. 257 с.
- [19] Nakamura T. *Inverse kinematics of robot arm with unity*. Japan, 2021. 89 p.
- [20] Dr.-Ing. John Nassour. *Forward kinematics: the denavit-hartenberg convention*. In: *Engineering Drawing*, 2021, pp. 71–101.

## References

- [1] Osipov I.A., Feoktistov D.A., Mikhaylov K.S. et al. [Application of virtual reality technologies in simulation modeling of mobile robots]. *Problemy i perspektivy tsifrovizatsii agropromyshlennogo kompleksa. Mat. mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Problems and Prospects of Digitalisation of Agroindustrial Complex. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Saratov, Vavilovskiy univ-t Publ., 2023, pp. 80–85. (In Russ.).
- [2] Davletshin R.R., Drobina E.A. Modelling the gripper system of an industrial robot. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2019, no. 39, pp. 186–189. (In Russ.).
- [3] Bykov N.V., Tovarnov M.S. [Simulation modelling of interaction of a mobile robot with the possibility of vertical movement with the environment]. *ITMM-2018*. Tomsk, 2018, pp. 300–305. (In Russ.).
- [4] Tachkov A.A. Conceptual design of mobile robots using statistacal simulation. *Ekstremalnaya robototekhnika* [Extreme Robotics], 2016, no. 1, pp. 66–71. (In Russ.).
- [5] Kuprin M.S., Osipov I.A., Fursin A.A. et al. *Programmnyy paket imitatsionnogo modelirovaniya mobilnykh robotov na osnove dvizhka Unity* [Software package of simulation modeling of mobile robots based on Unity engine]. Software reg. cert. no. 2023681185 RU. Appl. 26.09.2023, publ. 11.10.2023. (In Russ.).
- [6] Klyuchikov A.V., Lyuchev Ya.V., Pchelintseva S.V. *Programmnyy paket dlya imitatsionnogo modelirovaniya promyshlennykh robotov* [Software package for simulation modelling of industrial robots]. Software reg. cert. no. 2024618442 RU. Appl. 27.03.2024, publ. 11.04.2024. (In Russ.).
- [7] Kuprin M.S., Osipov I.A., Klyuchikov A.V. et al. Simulation modeling of mobile robotic complexes tool analysis according to physical laws (a review). *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 3, pp. 152–157, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.24.152-157> (in Russ.).
- [8] Kuprin M.S., Klyuchikov A.V. Development of software modules for imitation of ilon and omni-wheel wheels in mobile robots. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical Methods in Technologies and Technics], 2023, no. 4, pp. 77–80, doi: [https://doi.org/10.52348/2712-8873\\_MMTT\\_2023\\_4\\_77](https://doi.org/10.52348/2712-8873_MMTT_2023_4_77) (in Russ.).
- [9] Pchelintseva S.V. Convergence analysis method of process forming the disabled program trajectory deviation for manipulators with loop control. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik Saratov State Technical University], 2012, vol. 1, no. 2, pp. 402–409. (In Russ.).
- [10] Gorelov V.A., Rubtsov I.V., Stadukhin A.A. Mobility analysis of robot systems by means of simulation. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, no. 1, pp. 144–155, doi: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-1-144-155> (in Russ.).

- [11] Brekhov O.M., Zvonareva G.A., Ryabov V.V. Features of development and analysis of the simulation model of a multiprocessor computer system. *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education], 2017, no. 3, pp. 48–56, doi: <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2017-3-48-56> (in Russ.).
- [12] Rudkovskiy K.E., Korzun D.Zh. [Review of simulation modeling tools for movement and sensing of wheeled mobile robots]. *Tsifrovye tekhnologii v obrazovanii, nauke, obshchestve. Mat. XVII Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Digital Technologies in Education, Science, Society. Proc. XVII Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2023, pp. 84–85. (In Russ.).
- [13] Galemov R.T., Masalskiy G.B. Planning the trajectory of the manipulator for a moving target. *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2018, no. 2, pp. 9–28. (In Russ.).
- [14] Kurochkin S.Yu., Tachkov A.A., Borisenkov E.I. Parametric synthesis of a multi-robot formation controller using the statistical simulation modelling. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, no. 1, pp. 146–154, doi: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-1-146-154> (in Russ.).
- [15] Kurochkin S.Yu., Tachkov A.A. Statistical simulation model of mobile robot formation movement taking into account the probabilistic characteristics of the communication and autonomous motion control systems. *Ekstremalnaya robototekhnika* [Extreme Robotics], 2022, no. 1, pp. 123–129. (In Russ.).
- [16] Pchelintseva S.V. *Razrabotka metodov matematicheskogo modelirovaniya kinematiki promyshlennykh manipulyatorov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of methods of mathematical modelling of kinematics of industrial manipulators. Kand. tech. sci. diss.]. Saratov, SGTU Publ., 2005. 205 p. (In Russ.).
- [17] Zueva S.V., Belyaev A.S. [Creation of 3d model of manipulator in Matlab Simulink]. *Molodezh i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii. Mezhd. nauch.-prakt. konf. Studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Youth and Modern Information Technologies. Int. Sci.-Pract. Conf. of Students, Post-Graduates and Young Scientists]. Tomsk, TPU, 2018, pp. 104–105. (In Russ.).
- [18] Selezneva S.N. *Polinomialnye predstavleniya diskretnykh funktsiy*. Diss. dok. fiz.-mat. nauk [Polynomial representations of discrete functions. Doc. phys.-math. sci. diss.]. Moscow, MGU Publ., 2015. 257 p. (In Russ.).
- [19] Nakamura T. *Inverse kinematics of robot arm with unity*. Japan, 2021. 89 p.
- [20] Dr.-Ing. John Nassour. *Forward kinematics: the denavit-hartenberg convention*. In: *Engineering Drawing*, 2021, pp. 71–101.

Статья поступила в редакцию 27.05.2024

## Информация об авторах

**ЛЮЧЕВ Ярослав Валерьевич** — программист АО «Информационные и управляющие системы». АО «Информационные и управляющие системы» (410076, Саратов, Российская Федерация, ул. Верхняя, д. 17, e-mail: yaroslavlyuchev@yandex.ru).

**КЛЮЧИКОВ Аркадий Викторович** — кандидат технических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой, доцент кафедры «Цифровое управление процессами в АПК», младший научный сотрудник лаборатории прикладных и фундаментальных исследований. ФГБОУ ВО Вавиловский университет (410012, Саратов, Российская Федерация, Театральная площадь, д. 1, e-mail: krok9407@mail.ru).

## Information about the authors

**LYUCHEV Yaroslav Valerievich** — Programmer. JSC Information and Control Systems (410076, Saratov, Russian Federation, Verkhnyaya St., Bldg. 17, e-mail: yaroslavlyuchev@yandex.ru).

**KLYUCHIKOV Arkadiy Viktorovich** — Candidate of Science (Eng.), Acting Head of the Department, Associate Professor, Department of Digital Process Control in the Agro-Industrial Complex; Junior Researcher, Laboratory of Applied and Fundamental Research. Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov (410012, Saratov, Russian Federation, Teatralnaya Square, Bldg. 1, e-mail: krok9407@mail.ru).

**ПЧЕЛИНЦЕВА Светлана Вячеславовна** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная информатика». Институт экономики и управления АПК. Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, Москва, Российская Федерация, Тимирязевская ул., д. 49, e-mail: pchelintseva@inbox.ru).

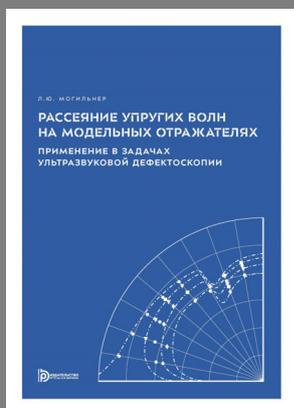
**PCHELINTSEVA Svetlana Vyacheslavovna** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Applied Informatics, Institute of Economics and Management of Agro-Industrial Complex. Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Russian Federation, Timiryazevskaya St., Bldg. 49, e-mail: pchelintseva@inbox.ru).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Лячев Я.В., Ключиков А.В., Пчелинцева С.В. Имитационное моделирование манипуляторов для решения задач планирования траекторий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 2, с. 31–40.

**Please cite this article in English as:**

Lyuchev Ya.V., Klyuchikov A.V., Pchelintseva S.V. Simulation modeling of a manipulator for solving the trajectory planning problems. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 2, pp. 31–40.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям монографию Л.Ю. Могильнера**

**«Рассеяние упругих волн на модельных  
отражателях. Применение в задачах  
ультразвуковой дефектоскопии»**

Дан обзор искусственных отражателей, используемых в соответствии со стандартами для настройки параметров ультразвукового контроля материалов и сварных швов. Обобщены некоторые теоретические результаты, связанные с дифракционными эффектами, возникающими при рассеянии упругих волн на дефектах. Приведены аналитические решения 3D-задачи рассеяния продольных и поперечных волн на острые трещины в виде полуплоскости и указаны оптимальные направления озвучивания. Изложено решение 3D-задачи рассеяния на объемных дефектах — цилиндрических и сферических полостях. Даны рекомендации по применению моделей трещин, пазов, бокового и вертикального сверления при контроле классическим эхометодом и современными дифракционными методами ультразвуковой дефектоскопии. Указаны некоторые направления совершенствования моделирования дефектов с целью повышения точности идентификации реальных дефектов по результатам ручного, автоматизированного и автоматического ультразвукового контроля материалов и сварных швов.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов старших курсов вузов по направлениям подготовки «Сварка и родственные процессы», «Контроль качества и диагностика» для углубленного изучения вопросов выявляемости дефектов методами ультразвуковой дефектоскопии.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>