

Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-835

doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-37-47

РАЗРАБОТКА БЕСПИЛОТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РОБОТИЗАЦИИ СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКИ

Александр Николаевич Рукавицын^{1✉}, Евгений Николаевич Политов², Гавриил Анатольевич Фурсов³

^{1,2,3} Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

³ alruk75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>

² politovyevgeny@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

³ ka8139405@gmail.com

Аннотация

Цель исследования - создание конструкции беспилотного транспортного средства для роботизации процессов транспортно-складских операций на логистических предприятиях. Показано, что роботизация транспортных операций на складах повышает производительность и безопасность труда, способствует обеспечению минимизации ручного труда, повышает эффективность непосредственно самих складских операций. Представлена концепция беспилотной транспортной системы для роботизации складской логистики, которая представляет собой мобильный колесный робот, оснащенный подъемной грузовой платформой и обеспечивающий перемещение полезного груза с возможностью осуществления самостоятельной разгрузки. Разработана, на основе методов математического моделирования, модель транспортирующего модуля робота-доставщика, позволяющая исследовать кинематические параметры его движения. Проведено численное исследование транспортирующей платформы робота на ЭВМ с помощью пакета прикладных программ имитационного моделирования. Выполнен прочностной анализ наиболее нагру-

женных элементов конструкции рамы робота, который позволил определить ее грузоподъемность и подтвердить работоспособность предлагаемой конструкции. Новизна работы заключается в создании методики исследования расчетной геометрической модели рамы робота которая позволяет выявить критические зоны в конструкции оси ведущего колеса электромеханического дифференциального привода. Результаты проведенного исследования дают предпосылки к созданию системы автоматического управления робота-доставщика, обеспечивающая автономность его функционирования.

Выводы: разработана математическая модель беспилотной транспортной системы для роботизации складской логистики, исследованы режимы его работы, предложена методика управления через точку с координатами, которые вводятся в специальный регулятор системы управления электроприводами ведущих колес.

Ключевые слова: робот-доставщик, операции, платформа, математическое моделирование, дифференциальный электропривод, управление, колеса анализ.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

Ссылка для цитирования:

Рукавицын А.Н. Разработка беспилотной транспортной системы для роботизации складской логистики / А.Н. Рукавицын, Е.Н. Политов, Г.А. Фурсов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 11. – С. 37-47. doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-37-47.

Original article

Open Access Article

DEVELOPMENT OF AN UNMANNED TRANSPORT SYSTEM FOR ROBOTIZING WAREHOUSE LOGISTICS

Aleksandr Nikolaevich Rukavitsyn^{1✉}, Evgeny Nikolaevich Politov², Gavriil Anatolyevich Fursov³

^{1,2,3} Southwest State University, Kursk, Russia

³ alruk75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>

² politovyevgeny@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

³ ka8139405@gmail.com

Abstract

The study objective is to develop an unmanned vehicle for robotizing transport and warehouse operations at logistics enterprises. It is shown that robotization of transport operations in warehouses increases productivity and labor safety, helps to minimize manual labor, and increases the efficiency of warehouse operations. The concept of an unmanned transport system for robotizing warehouse logistics is presented, which is a mobile wheeled robot equipped with a lifting cargo platform and providing net load transportation with the possibility of self-unloading. Based on mathematical simulation methods, a model of a transporting module of a delivery robot has been developed, which makes it possible to study the kinematic parameters of its movement. A numerical study of the robot transport platform on a computer using a package of simulation software is carried out. A strength analysis of the most loaded structural elements of the robot frame is performed, which makes it possible to determine its load

capacity and confirm the operability of the proposed structure. The novelty of the work is in developing a technique for studying the computational geometric model of the robot frame, which allows to identify critical areas in the design of the drive wheel axis of an electromechanical differential drive. The results of the conducted research provide prerequisites for developing an automatic control system of the delivery robot, ensuring the autonomy of its functioning.

Conclusions: a mathematical model of an unmanned transport system for robotizing warehouse logistics is developed, its operating modes are studied, and a control method is proposed through a point with coordinates that are input into a special regulator of the control system for electric drives of traction wheels.

Keywords: delivery robot, operations, platform, mathematical simulation, differential electric drive, control, wheel analysis.

Funding: This paper is funded according to the implementation of the development program of the Southwest State University "Priority 2030" project.

Reference for citing:

Rukavitsyn AN, Politov EN, Fursov GA. Development of an unmanned transport system for robotizing warehouse logistics. *Transport Engineering*. 2025;11:37-47. doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-37-47.

Введение

В последние годы, в нашей стране, как и во всем мире, наблюдается резкий рост потребительских услуг в области доставки широкого спектра различных товаров, которые неотрывно связаны со складской логистикой и перемещением материальных объектов. Все это требует создания новых транспортно-логистических решений, опирающихся на современные достижения в области автоматизации и роботизации транспортных операций, обеспечивающих функционирование современных складов и логистических комплексов [1]. Основным стимулом роботизации складских помещений – оптимизация пространства, ускорение выполняемых операций, исключение человека из операций на складе.

Роботизация транспортных операций на складах, не только повышает производительность и улучшает показатели безопасности труда, но и способствует обеспечению минимизации ручного труда, что позволяет существенно повысить эффек-

тивность непосредственно самих складских операций. При этом, до 90% увеличивается точность сборки заказов, а скорость приёмки и отгрузки товаров возрастает в 15 и в 5 раз соответственно [2]. Благодаря роботам значительно улучшаются транспортно-логистические цепочки, обеспечивается экономия времени и финансовых средств за счет роста производительности и снижения затрат на оплату низко квалифицированных складских работников.

Складские роботы – это робототехнические системы, которые выполняют различные технологические операции на складах. Среди них следует выделить несколько разновидностей складских роботов – паллетайзеры, сортировщики, промышленные манипуляторы, комплексные решения автоматизации складов, мобильные роботы-тележки. Последние из них способны автономно перемещать грузы по территории складских помещений. При этом некоторые роботы-тележки способ-

ны самостоятельно находить и снимать нужные товары с полки и перемещать их в специальные контейнеры или паллеты, или же, наоборот, раскладывать по полкам товары. Такие автономные транспортные системы намного облегчают работу сотрудникам складов и предприятий [3, 4].

При создании средств складской робототехники и обеспечении ее эффективного функционирования внутри складских комплексов, важнейшей задачей становится предложение новых и модернизация уже существующих конструктивных решений для применяемых мобильных транспортных систем, путем реализация новейших возможностей комбинированных навигационных технологий [5]. Создание новых конструкций мобильных транспортных роботов должно сопрово-

даться широким применением новейших сенсоров, обеспечивающих возможность осуществлять перемещение роботам-тележкам без применения вспомогательных устройств, совершать маневренные операции передвижений с объездами не только различных стационарных препятствий, но и обходов движущегося персонала склада.

В настоящее время разработка конструкций автономных беспилотных транспортных систем, создаваемых на базе искусственного интеллекта и оснащенных устройствами программной пространственной ориентации, являются актуальной задачей, в решении которой заинтересованы крупнейшие мировые складские логистические компании.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Основная цель данного исследования заключается в разработке конструкции беспилотного транспортного средства для роботизации процессов транспортно-складских операций на логистических предприятиях для повышения эффективности логистических процессов и минимизации человеческого фактора. Реализация указанной цели требует решения следующих задачи – разработка концепции, модели и собственно конструкции роботизированной транспортной мобильной системы, обладающей высокой маневренностью с возможностью осуществлять повороты в радиусе 360° и перемещением грузов массой не менее 200 кг. Особенностью создаваемого робота должна стать возможность

планирования собственного маршрута передвижений в целях скорейшей доставки складских грузов. Указанные особенности создаваемого робота должны обеспечить минимизацию расходов на персонал, высокую скорость и точность выполнения транспортных операций [6].

Схема концепции создаваемой беспилотной транспортной системы для роботизации складской логистики представлена на рис. 1. Транспортная система представляет собой мобильный колесный робот, оснащенный подъемной грузовой платформой и обеспечивающий перемещение полезного груза с возможностью осуществления самостоятельной разгрузки.

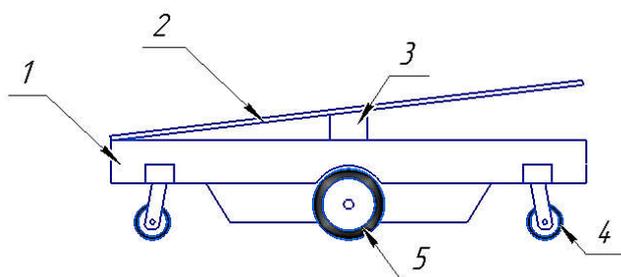


Рис.1 Схема конструкции роботизированной транспортной системы (описание представлено в тексте)

Fig.1. Diagram of the robotic transport system (description provided in the text)

Основой транспортировочной платформы является рама (1), которая служит базой для размещения и соединения всех

узлов и модулей робота. За движение отвечают ведущие колеса (5), оснащенные дифференциальными электромеханиче-

скими приводами. Для сохранения равновесия и обеспечения маневренности дополнительно применяются четыре поддерживающих роляных колеса (4). Взаимодействие с перевозимыми грузами осуществляется через грузовую платформу (2), приводимой в нужное положение специальным подъемным механизмом (3) с электромеханическим приводом.

Для обеспечения перемещения робота по территории склада его транспортировочная платформа задействует два электропривода ведущих колес, обеспечивая точное управление его движением, и положением исполнительных звеньев. Для реализации функции самостоятельной разгрузки используются четыре электропривода, обеспечивающие зацепление рамы с подъемной грузовой платформой, и один привод, отвечающий за вертикальные перемещения грузовой платформы.

Теория. Одной из задач проектирования робота-тележки становится разработки математической модели для данной автономной транспортной системы, позволяющей установить кинематические параметры движения робота, которые ложатся в основу формирования законов изменения питающего напряжения, подаваемого на электродвигатели электромеханических приводов транспортирующей плат-

формы [7]. В основе реализации функции изменения угла поворота корпуса робота стоит дифференциальная система приводов, то есть поворот осуществляется за счет разности вышеописанных напряжений, подаваемых на электродвигатели. Перемещение в пространстве обеспечивается сочетанием законов вращения двух ведущих колес. За счет разности угловых скоростей колес осуществляется маневрирование [8]. При подаче равных по величине и по знаку напряжений рассматриваемая колесная система перемещается прямолинейно.

Разработка математической модели создаваемого робота-доставщика требует установления следующих допущений:

1. Робот представляет собой систему абсолютно твердых тел.
2. Ведомые роляные колеса рассматриваются как абсолютно гладкие опоры, не влияющие на перемещение робота.
3. Ведущие колеса являются недеформируемыми, однородными, фиксированных размеров и положения.
4. Движение робота происходит без проскальзывания.

Разработанная, с учетом указанных для создаваемой модели допущений, расчетная схема представлена на рис. 2.

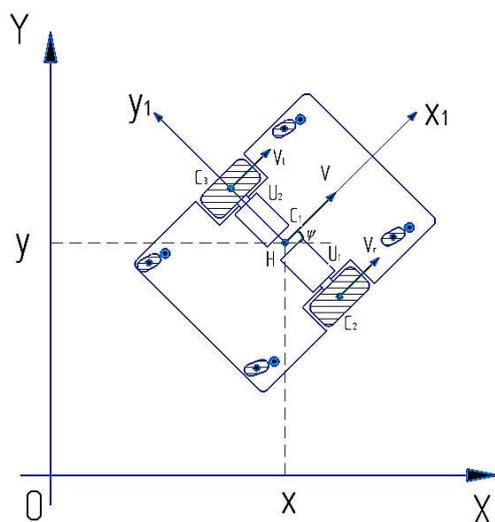


Рис. 2 Расчетная схема робота-доставщика
Fig. 2 Design scheme of the delivery robot

Поскольку движение робота происходит только в горизонтальной плоскости, то рассматривается только

плоский случай его движения. Положение робота, рассматриваемого как твердое тело, задается линейными координатами

точки Н и углом ψ между осью ОХ и вектором линейной скорости V.

Для проекций линейной скорости движения робота на оси X и Y, а также для его угловой скорости, справедливы следующие уравнения

$$\begin{cases} V_x = V \cos(\psi) \\ V_y = V \sin(\psi) \\ \omega = \dot{\psi} \end{cases} \quad (1)$$

Линейная V и угловая ω скорости робота могут быть определены через скорости центров масс (точки C_3 и C_2) правого V_r и левого V_l колес соответственно, как

$$V = 0.5(V_l + V_r), \quad \omega = \frac{(V_l - V_r)}{L}, \quad (2)$$

где L – расстояние между ведущими колесами.

С учетом (2) запишем уравнения (1), выразив линейную скорость робота через угловые скорости его ведущих колес

$$\begin{cases} \dot{x} = 0,5R(\omega_l + \omega_r) \cos(\psi) \\ \dot{y} = 0,5R(\omega_l + \omega_r) \sin(\psi) \\ \dot{\psi} = \omega = \frac{R(\omega_r - \omega_l)}{2 \cdot L} \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая, что φ_l и φ_r – углы поворота ведущих колес, система (3) принимает вид

$$\begin{cases} \dot{x} = 0,5R(\dot{\varphi}_l + \dot{\varphi}_r) \cos(\psi) \\ \dot{y} = 0,5R(\dot{\varphi}_l + \dot{\varphi}_r) \sin(\psi) \\ \dot{\psi} = \omega = \frac{R(\dot{\varphi}_r - \dot{\varphi}_l)}{2 \cdot L} \end{cases} \quad (4)$$

Полученную систему уравнений можно представить в матричном виде:

Результаты моделирования

Проверка работоспособности представленной модели осуществляется с использованием программного пакета Matlab [9]. Исходные данные для моделирования движения автономной роботизированной системы: Радиус колес $r = 0,075$ м; Межосевое расстояние $L = 2H = 0,58$ м; Максимальная линейная скорость $V = 0,6$ м/с.

Ниже на рис. 3 представлены результаты моделирования движения робота с вышеуказанными конструктивными характеристиками по криволинейной траектории с постоянными

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi)/2 & \cos(\psi)/2 \\ \sin(\psi)/2 & \sin(\psi)/2 \\ 1/H & -1/H \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для разработки алгоритмов управления движением рассмотрим его перемещение в плоскости ОХУ. Текущие координаты (x, y) центра масс С робота будут определяться как сумма предыдущих координат (x_{old} и y_{old}) и их изменений (Δx и Δy), т.е.

$$\begin{cases} x = x_{old} + \Delta x \\ y = y_{old} + \Delta y \end{cases} \quad (6)$$

Изменение координаты представляет собой произведение линейной скорости робота относительно рассматриваемой оси на изменение времени

$$\begin{cases} x = x_{old} + V_x \Delta t \\ y = y_{old} + V_y \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

Принимая во внимание (3), а также (7) получим

$$\begin{cases} x = x_{old} + \frac{\omega_n + \omega_l}{2} r \cos(\psi) \Delta t \\ y = y_{old} + \frac{\omega_n + \omega_l}{2} r \sin(\psi) \Delta t \end{cases} \quad (8)$$

Уравнения (4) и (5), по сути, представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений относительно фазового вектора с компонентами (x, y, ψ), которую можно рассматривать как кинематическую модель разрабатываемого мобильного робота [6], а уравнения (8) – для создания наиболее качественных методов управления через точку с соответствующими координатами.

угловыми скоростями левого ($\omega_l = 6$ с⁻¹) и правого ($\omega = 8$ с⁻¹) ведущих колес.

В действительности, поскольку робот может перемещаться по поверхностям с разным покрытием, то движение будет происходить не всегда идеально [10].

Для устранения возможного отклонения положения робота от заданного, которое будет иметь место из-за наличия как внешних, так и внутренних вредных факторов, потребуется применить один из наиболее качественных методов управления через точку с координатами, которые вводятся в специальный

регулятор системы автоматического управления электроприводами ведущих колес робота, и который обеспечит

нахождение робота в заданном положении и его ориентацию [11, 12].

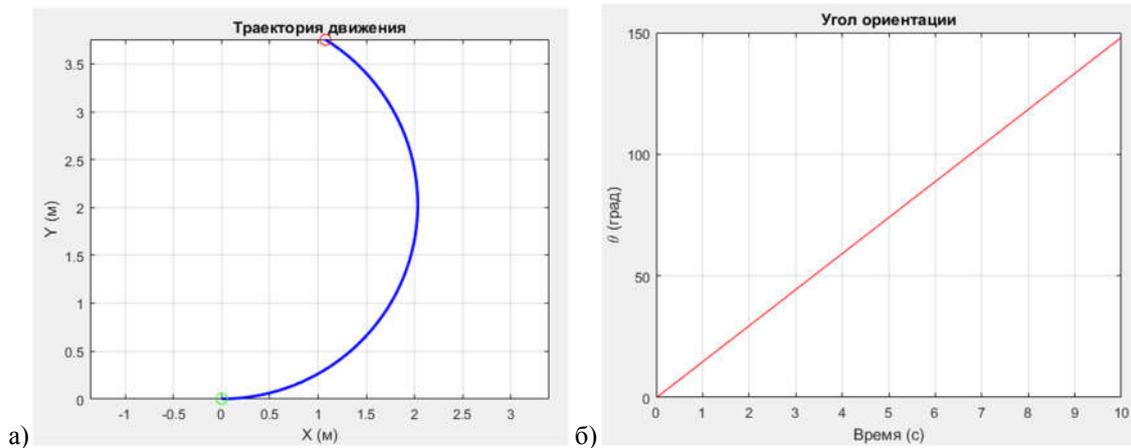


Рис. 3 Графики изменения перемещения а – и угла ориентации б – положения робота
 Fig. 3 Graphs of the robot's position displacement (a) and orientation angle (b)

Ниже на рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования движения мобильного робота и кинематические

характеристики движения как самого робота, так и его отдельных звеньев при осуществлении поворота на 90^0 .

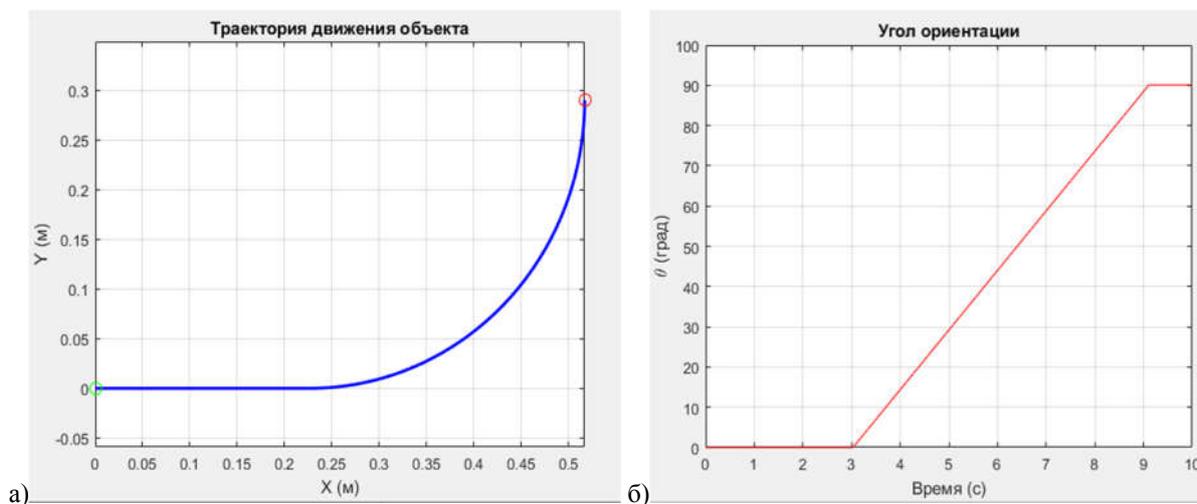


Рис. 4 Графики изменения перемещения а – и угла ориентации б – положения робота при повороте на 90^0
 Fig. 4 Graphs of changes in the robot's position (a) and orientation angle (b) during a 90-degree rotation

Расхождение угловых скоростей вращения левого и правого ведущих колес транспортирующей платформы робота-доставщика неизменно влечет за собой его уход с прямолинейной траектории движения. В случае действия крутящего момента только на одном приводе ведущих колес, робот поворачивается с малым радиусом. Поворот с большим радиусом возможен только в результате принудительного уменьшения скорости одного из колес

транспортирующей платформы мобильного робота. При этом отстающее колесо опирается на опорную поверхность, со стороны которой возникает реактивная сила, оказывающая дополнительную нагрузку на ось крепления ведущего колеса [13].

Учитывая специфику работы создаваемой автономной системы, которая предъявляет повышенные прочностные требования к транспортирующей плат-

форме робота, была разработана конструкции ее рамы, которая представлена на рис. 6.

Рама транспортировочной платформы предназначена установки и крепления составных частей и механизмов робота-доставщика. Рама принимает на себя основные нагрузки, как при движении робота, так и во время его стоянки. На ней закреплены приводы ведущих колес, приво-

ды управляемых петель подъемного механизма. Также к нижней части рамы крепятся поддерживающие ролевые колеса, а по бокам оси ведущих колес дифференциального электромеханического привода. Такая конструкция призвана обеспечить компактность и удобство обслуживания приводов ведущих колес, обеспечив одновременно стабильность движения робота при выполнении транспортных операций.

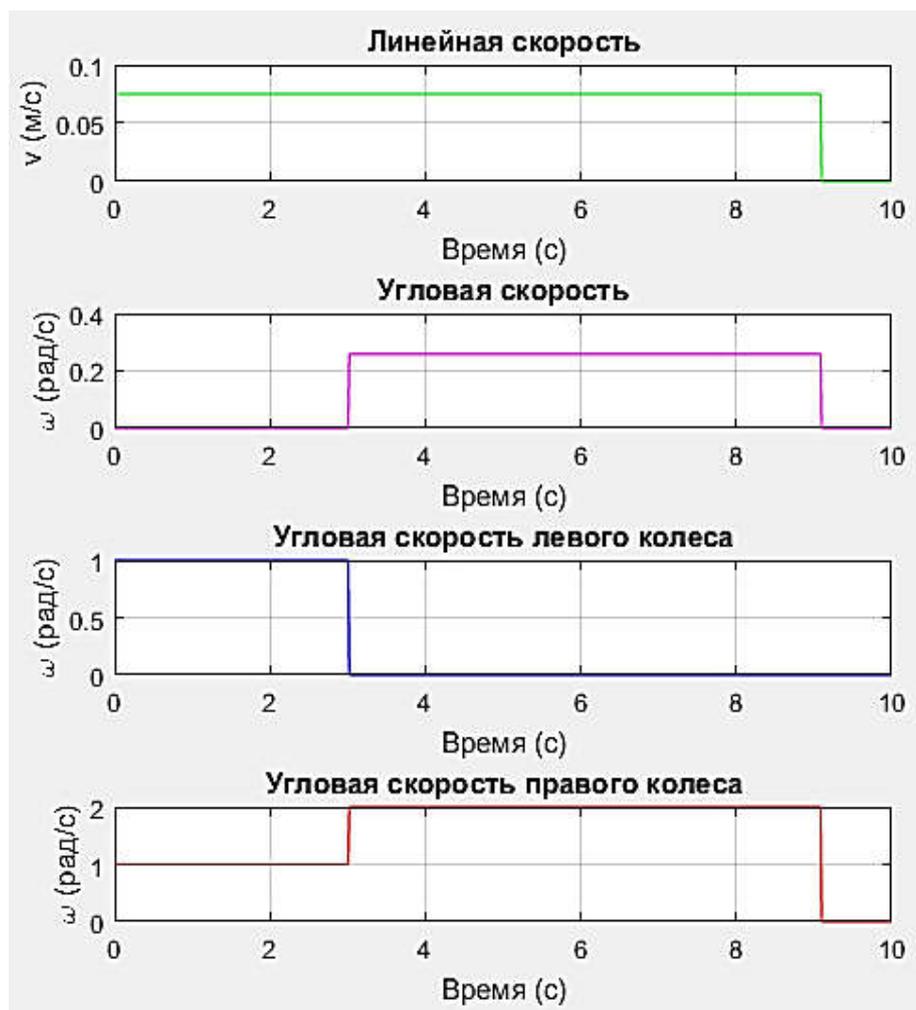


Рис. 5 Графики изменения линейной и угловой скоростей робота и угловых скоростей его колес
Fig. 5 Graphs of the robot's linear and angular velocities and the angular velocities of its wheels

Поскольку оси ведущих колес испытывают значительные нагрузки, то была проведена оценка их прочности. При этом использовались методы конечно-элементного анализа и статического моделирования с применением ЭВМ. При создании модели (рис. 7) учитывались геометрические параметры колес, нагрузочные характеристики, свойства материалов и возможные условия эксплуатации.

Рассматривался случай, когда все прилагаемые усилия достигают максимальных значений одновременно и равномерно распределены по поверхности. Полученные карты возникающих напряжений и наблюдающихся деформаций позволяют наглядно оценить поведение конструируемой детали под воздействием внешних нагрузок.

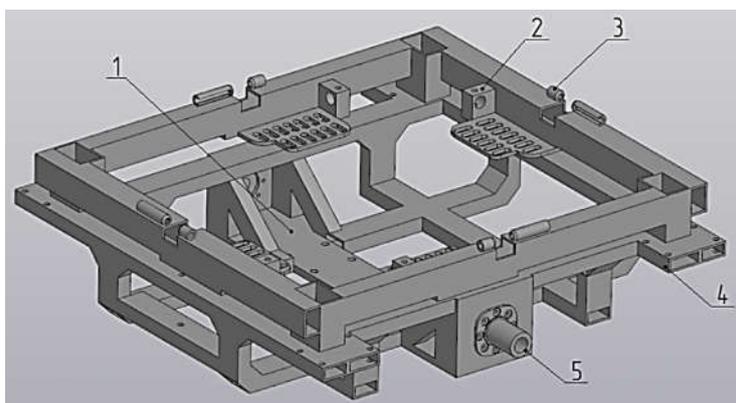


Рис. 6. Рама транспортирующей платформы: 1 – площадка для крепления приводов ведущих колес; 2,3 – площадка и ложементы для крепления линейного электропривода управляемой петли механизма разгрузки; 4 – опора крепления рояльного поддерживающего колеса; 5 – ось ведущего колеса
Fig. 6. Transport platform frame: 1 – platform for mounting the drives of the leading wheels; 2,3 – platform and supports for mounting the linear electric drive of the controlled loop of the unloading mechanism; 4 – support for mounting the piano supporting wheel; 5 – axle of the leading wheel

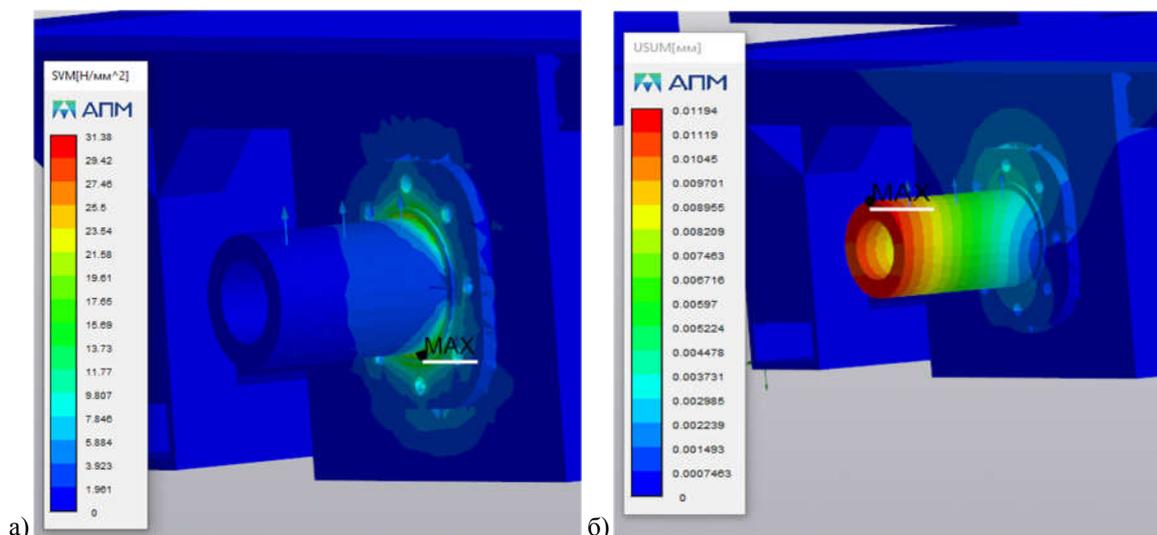


Рис.7. Карты напряжений а - и деформаций б - оси ведущего колеса
Fig.7. Stress (a) and strain (b) maps of the drive wheel axle

Проверка модели на прочность в среде трехмерного компьютерного моделирования при задаваемой нагрузке 1000 Н (примерно 102 кгс) на ось в условиях максимально жесткого нагружения, когда вся нагрузка приходится на ведущие колеса дифференциального электромеханического привода, обеспечивает корректный подход для оценки надежности конструкции. При этом нагрузка распределяется между двумя колесами поровну, т.е. в реальных

условиях эксплуатации грузоподъемность робота-доставщика будет достигать более 200 кгс, а применение дифференциального электропривода поможет избежать перегрузок.

Проведенное моделирование позволяет заранее выявить критические зоны в конструкции оси ведущего колеса и провести ее доработку до изготовления физического прототипа, что сокращает время и затраты на разработку.

Заключение

Создание беспилотной транспортной системы складской логистики способно

значительно повысить эффективность работы складов путем снижения затрат, уве-

личения скорости обработки грузов и минимизации ошибок. Поэтому, сегодня, подобные роботизированные системы становятся стандартом складской логистики, обеспечивая скорость, точность и экономию ресурсов. Компании, которые внедряют их первыми, получают значительное конкурентное преимущество. Создание подобной автономной транспортной системы требует интеграции множества ключевых технологий и процессов. Ее внедрение позволяет сократить издержки, ускорить доставку и минимизировать человеческие ошибки [14].

Мобильные колесные роботы-доставщики предназначены для автономной транспортировки грузов в различных условиях (склады, улицы, торговые центры и т. д.). Их конструкция зависит от решаемых задач и реальных условий эксплуатации. Транспортная подсистема робота должна обеспечивать рреализацию сложных траекторий движения, например, при использовании дифференциального электромеханического привода, который позволяет управлять движением робота по криволинейным траекториям. При этом обладать повышенной маневренностью - разворачиваться на месте, двигаться вперед/назад и выполнять плавные повороты. Конструкция рамы мобильного робота-доставщика должна быть прочной, легкой, защищенной и адаптируемой под конкретные задачи. При проектировании важно учитывать баланс

между надежностью, стоимостью и функциональностью. При этом, для координации выполняемых действий, необходимо обеспечивать синхронизацию работы нескольких электроприводов, что предъявляет дополнительные требования к системе автоматического управления такого робота, которая должна осуществлять контроль и управление всем устройством, одновременно обеспечивая его навигацию в пространстве [15].

При создании робота-доставщика необходимо учитывать необходимость обеспечения автономного передвижения с учетом обхода различных препятствий на своем пути, что требует дополнительного оснащения робота новейшими датчиками и сенсорами, которые дают роботу возможность передвижения без применения вспомогательных устройств и реализовывать дополнительную маневренность передвижений с объездами как стационарных, так и динамических препятствий.

Представленная методика моделирования движения мобильного беспилотного робота-доставщика дает возможность определить характеристики скоростного режима его движения, которые создают предпосылки для разработки системы автоматического управления, обеспечивающей стабильность процесса транспортирования грузов в условиях складских помещений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Привалов, К.Д. Роботизации логистики складирования: возможности и перспективы [Текст] / К.Д. Привалов// Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № s2. URL: <https://esj.today/PDF/17FAVN224.pdf> дата обращения: 25.06.2025).
2. Табылов А.У., Суйеуова Н.Б., Юсупов А.А. Роботизация современных складских логистических комплексов [Текст]/ А. У. Табылов , Н.Б. Суйеуова Н.Б., А. А. Юсупов// Вестник КазАТК . 2021. № 4 (119). С. 58-66.
3. Волгин В. В. Склад: логистика, управление, анализ : учеб, пособи. М. : Дашков и Ко, 2009. 736 с.
4. Реброва И.А. Бугаенко Е.В. Автоматизация и роботизация систем складирования [Текст]/ И.А. Реброва, Е.В. Бугаенко // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. матер. IV Нац. научно-практ. конф. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. С. 139–144.
5. Матвеева Д.А., Полещук Е.Н. Инновационные технологии в складской логистике [Текст]/ Д.А. Матвеева, Е.Н. Полещук // Экономика. наука. инноватика: Матер. II междунар. научно-практ. конф. приуроченной 100-летию ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 19 марта 2021 года. — Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2021. С. 303–305.
6. Яцун С.Ф., Чжо П.В., Рукавицын А.Н. Изучение движения мобильной колесной системы с кинематически связанными движителями [Текст]/

- С.Ф. Яцун, Чжо Пье Вей, А.Н. Рукавицын. - Сб. междунар. научно-практ. конференции: Прогресс транспортных средств и систем. 2018. С. 162.
7. Политов Е.Н., Рукавицын А.Н., Лай Ю. Разработка мобильного колесного робота для доставки посылки [Текст]/ Е.Н. Политов, А.Н. Рукавицын, Лай Ю Хау// Транспортное машиностроение. 2024. № 8 (32). С. 21-30.
 8. Яцун С.Ф., Чжо П.В., Рукавицын А.Н. Перспективы разработки мобильных робототехнических систем с кинематическими связанными двигателями [Текст]/ С.Ф. Яцун, Чжо Пье Вей, А.Н. Рукавицын//Тенденции развития науки и образования. 2018. № 39-3. С. 33-35.
 9. Сизых В.Н., Баканов М.В. Математическая модель для адаптивного управления трёхколёсным мобильным роботом [Текст]/ В.Н. Сизых, М.В. Баканов. – Сб. междунар. научно-практ. конференции: Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство, Санкт-Петербург: СПбФ НИЦ МС.2018. № 1 С.9-18.
 10. Лелиовский К.Я. Моделирование динамики трансмиссии транспортных средств, эксплуатирующихся в ухудшенных дорожных условиях [Текст]/ К.Я. Лелиовский // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 3-5 (82). 2023. С. 18-25.
 11. Панков А.А., Нечаев Г.И., Мирошников В.В. Захарчук А.С. Будиков Л.Я., Коробейников

- Д.С., Михайлова И. Г. Разработка и лабораторные испытания автоматизированной системы управления движением транспортно-технологических машин [Текст]/ А.А. Панков, Г.И. Нечаев, В.В. Мирошников и др.// Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 4-1 (83). С. 51-60.
12. Wang, Y., Quan, Q., Yu, H., Li, H., Bai, D., & Deng, Z. Impact dynamics of a percussive system based on rotary-percussive ultrasonic drill [Текст]/ Y Wang, Q Quan, H. Yu and others // Shock and Vibration, vol. 2017, Pp.1-10.
 13. Vasiliev A.V., Shardyko I.V. Analysis, detection, reaction and prevention of potential critical situations for light-weight mobile robots [Текст] // Extreme robotics: Proc. of the Intern. sci. and techn. conf., 2019. Pp. 559-567.
 14. Дыбская В.В. Управление складированием в цепях поставок: Учебник. М.: Альфа-пресс, 2014.220 с.
 15. Гаджинский А.М. Современный склад. Управление складом в логистической системе: учебно- практическое пособие. М.: Проспект, 2005. 176 с.
 16. Арский А.А., Быкова Г.П., Венде Ф.Д. Логистика: теория и практика [Текст]/ А.А. Арский, Г.П. Быкова, Ф. Д. Венде. М.: КноРус, 2023. 242 с. ISBN 978-5-406-11809-2.

REFERENCES

1. Privalov KN. D. Robotization of warehousing logistics: opportunities and prospects. The Eurasian Scientific Journal [Internet]. 2024 [cited 2025 Jun 25];16(2). Available from: <https://esj.today/PDF/17FAVN224.pdf>
2. Tabylov AU, Suyeuova NB, Yusupov AA. Robotization of modern warehouse logistics complexes. Bulletin of KazATK. 2021;4(119):58-66.
3. Volgin V V. Warehouse: logistics, management, analysis: textbooks. Moscow: Dashkov and K; 2009.
4. Rebrova IA, Bugaenko EB. Automation and robotization of warehousing systems. Proceedings of the IV National Scientific and Practical Conference, 2021: Education. Transport. Innovation. Construction. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI); 2021.
5. Matveeva DA, Poleshchuk EN. Innovative technologies in warehouse logistics. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th Anniversary of Donetsk National Technical University, March 19, 2021: Economy. Science. Innovation. Donetsk: Donetsk National Technical University; 2021. p. 303-305.
6. Yatsun SF, Zho NP, Rukavitsyn AN. Study of the motion of a mobile wheeled system with kinematically connected propellers. Proceedings of International Scientific and Practical Conference, 2018: Progress of Vehicles and Systems; 2018.
7. Politov EN, Rukavitsyn AN, Yunhai L. Development of a mobile wheeled robot for parcel delivery. Transport Engineering. 2024;8(32):21-30.
8. Yatsun SF, Zho NP, Rukavitsyn AN. Prospects for the development of mobile robotic systems with kinematically connected propellers. LJournal. 2018;39-3:33-35.
9. Sizykh VN, Bakanov MV. Mathematical model for adaptive control of a three-wheeled mobile robot. Proceedings of International Scientific and Practical Conferences: Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production. St. Petersburg: SPbF SIC MS. 2018;1:9-18.
10. Leliovsky Kya. Simulation of transmission dynamics of vehicles operating in degraded road conditions. Transport and Technological Cars. 2023;3-5(82):18-25.
11. Pankov AA, Nechaev GI, Miroshnikov VV, Zaharchuk AS, Budikov LYa, Korobejnikov DS, Mihajlova IG. Development and laboratory testing automated traffic control system transport and technological machines. Transport and Technological Cars. 2023;4-1(83):51-60.
12. Wang Y, Quan Q, Yu H, Li H, Bai D, Deng Z. Impact dynamics of a percussive system based on rotary-percussive ultrasonic drill. Shock and Vibration. 2017:1-10
13. Vasiliev AV, Shardyko IV. Analysis, detection, reaction and prevention of potential critical situa-

tions for light-weight mobile robots. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, 2019: Extreme Robotics; 2019. p. 559-567.

14. Dybskaya VV. Warehouse management in supply chains: textbook. Moscow: Alfa-press; 2014.

Информация об авторах:

Рукавицын Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники Юго-Западного государственного университета, Scopus-Author ID 56910069200, Research- ID-Web of Science L-3380-2013, Author-ID-РИНЦ 423663, тел. 8(951)316-97-93.

Политов Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики,

Rukavitsyn Aleksandr Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics at the Southwest State University, Scopus-Author ID 56910069200, Research-ID-Web of Science L-3380-2013, Author-ID-RSCI 423663; phone: 8(951)316-97-93.

Politov Evgeny Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of

15. Gadzhinsky AM. Modern warehouse. Warehouse management in the logistics system: textbook. Moscow: Prospect; 2005.

16. Arsky AA, Bykova GP, Wende FD. Logistics: theory and practice. Moscow: Knorus; 2023.

мехатроники и робототехники Юго-Западного государственного университета, Scopus-Author ID 57194635674, Research- ID-Web of Science L-176177, Author-ID-РИНЦ 176177, тел. 8(960)685-75-79.

Фурсов Гавриил Анатольевич – студент естественно-научного факультета Юго-Западного государственного университета, тел. 8(951)316-97-93.

Mechanics, Mechatronics and Robotics at the Southwest State University, Scopus-Author ID 57194635674, Research-ID-Web of Science L-176177, Author-ID-RSCI 176177; phone: 8(960)685-75-79.

Fursov Gavriil Anatolyevich – student of the Faculty of Natural Sciences at Southwestern State University, phone: 8(951)316-97-93.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 23.09.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 27.10.2025. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 23.09.2025; approved after review on 10.10.2025; accepted for publication on 27.10.2025. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.