

Архитектура двухуровневой системы управления автономным мобильным роботом для складской логистики

В. В. Шухин[✉], З. Л. Хакимов, 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 работы обусловлена ростом рынка складской робототехники и необходимостью совмещения интеллектуальных функций с точным детерминированным управлением. Предложена двухуровневая архитектура системы управления автономным мобильным роботом, разделяющая когнитивные (NVIDIA Jetson Orin Nano, ROS 2) и исполнительные (STM32H743ZI, FreeRTOS) функции. Разработан специализированный протокол обмена данными с контролем целостности. Предложенная архитектура обеспечивает сбалансированное распределение вычислительной нагрузки и может быть использована для создания высокоточных мобильных платформ складского назначения.

Цель исследования – разработка и математическое обоснование двухуровневой архитектуры системы управления автономным мобильным роботом, оценка ее предельных характеристик и демонстрация преимуществ через сравнительный анализ с существующими подходами.

Методы исследования. В работе использованы следующие методы исследования:

1. Математическое моделирование и расчеты – формализация моделей для оценки точности позиционирования с использованием расширенного фильтра Калмана, расчет временных параметров системы, вероятности ошибок передачи данных.
2. Симуляционное моделирование – верификация системы в ROS 2 и Gazebo, оценка динамической точности и времени отклика.
3. Алгоритмическое проектирование – разработка каскадных ПИД-регуляторов для управления двигателями, протокола обмена между уровнями архитектуры.
4. Сравнительный анализ – сопоставление характеристик предложенной системы с коммерческими аналогами (MiR250, Fetch Freight 1500).
5. Экспериментальная оценка – моделирование методом Монте-Карло для определения среднеквадратичной ошибки позиционирования, анализ энергопотребления и автономности.

Результаты. В работе представлена инновационная двухуровневая архитектура системы управления автономным мобильным роботом (AMP) для складской логистики. Архитектура реализует разделение вычислительной нагрузки между высокоуровневым контроллером на базе одноплатного компьютера NVIDIA Jetson Orin Nano (4 Гб) с операционной системой ROS 2 Humble и низкоуровневым контроллером на микропроцессоре STM32H743ZI (ядро ARM Cortex-M7, 550 МГц) под управлением ОСРВ FreeRTOS. Высокий уровень отвечает за навигацию с использованием алгоритмов SLAM (на основе лидара Ouster OS0-32) и глобальное планирование маршрута, в то время как низкий уровень обеспечивает прецизионное управление двигателями через каскадные ПИД-регуляторы и обработку данных с абсолютных энкодеров Renishaw RESOLUTE с разрешением 26 бит. Также представлен разработанный двоичный протокол обмена с контролем целостности (CRC-16-CCITT), формализованы математические модели для расчета точности позиционирования и определены критические временные параметры системы. Расчетное время цикла управления на низком уровне составляет 1 мс, а средняя задержка межпроцессного взаимодействия – 3.5 мс. Система демонстрирует теоретическую точность позиционирования ± 2.1 мм при использовании сенсорного слияния данных одометрии и лидара. Результаты моделирования указывают на возможность обработки до 15 целевых задач в минуту в типичной складской ячейке размером 10×10 м.

Заключение. Предложенная архитектура представляет собой сбалансированное решение, сочетающее высокую производительность, детерминизм и относительную экономическую доступность, что делает ее перспективной основой для следующего поколения исследовательских и коммерческих складских АМР.

Ключевые слова: автономный мобильный робот, складская логистика, распределенная система управления, ROS 2, FreeRTOS, сенсорное слияние, ПИД-регулятор, абсолютные энкодеры

Поступила 13.12.2025, одобрена после рецензирования 26.01.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Шухин В. В., Хакимов З. Л., Лабазанов М. А. Архитектура двухуровневой системы управления автономным мобильным роботом для складской логистики // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 102–116. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-102-116

MSC: 68T40

Scientific article

Architecture for two-level mobile robot control system for warehouse logistics

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

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

Abstract. The relevance of this work is driven by the growth of the warehouse robotics market and the need to combine intelligent functions with precise, deterministic control. A two-tier architecture for an autonomous mobile robot control system is proposed, separating cognitive (NVIDIA Jetson Orin Nano, ROS 2) and executive (STM32H743ZI, FreeRTOS) functions. A specialized data exchange protocol with integrity monitoring is developed. The proposed architecture ensures balanced distribution of the computational load and can be used to create high-precision mobile platforms for warehouse applications.

Aim. The research is to develop and mathematically justify such an architecture, evaluate its ultimate performance, and demonstrate its advantages through a comparative analysis with existing approaches.

Research methods. The following research methods are used in this study:

1. Mathematical modeling and calculations – formalization of models for assessing positioning accuracy using an extended Kalman filter, calculation of system timing parameters, and the probability of data transmission errors.
2. Simulation modeling – system verification in ROS 2 and Gazebo, assessment of dynamic accuracy and response time.
3. Algorithmic design – development of cascade PID controllers for motor control and an exchange protocol between architecture levels.
4. Comparative analysis – comparison of the characteristics of the proposed system with commercial analogues (MiR250, Fetch Freight 1500).
5. Experimental evaluation – Monte Carlo simulation to determine the root mean square positioning error, energy consumption and autonomy analysis.

Results. This paper presents an innovative two-tier architecture for an autonomous mobile robot (AMR) control system for warehouse logistics. The architecture divides the computational load between a high-level controller based on a NVIDIA Jetson Orin Nano single-board computer (4 GB) running the ROS 2 Humble operating system and a low-level controller based on an STM32H743ZI microprocessor (ARM Cortex-M7 core, 550 MHz) running the FreeRTOS RTOS. The high-level controller handles navigation using SLAM algorithms (based on the Ouster OS0-32 lidar) and global path planning, while the low-level controller provides precision motor control via cascaded PID controllers and data processing from Renishaw RESOLUTE absolute encoders with 26-bit resolution. This paper presents the developed binary communication protocol with integrity checking (CRC-16-CCITT), formalizes mathematical models for calculating positioning accuracy,



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

and identifies critical timing parameters of the system. The estimated low-level control cycle time is 1 ms, and the average interprocess communication latency is 3.5 ms. The system demonstrates a theoretical positioning accuracy of ± 2.1 mm using odometry and lidar sensor fusion. Simulation results indicate the feasibility of processing up to 15 target tasks per minute in a typical 10x10 m warehouse cell.

Conclusion. The proposed architecture represents a balanced solution combining high performance, determinism, and relative affordability, making it a promising foundation for the next generation of research and commercial warehouse AMRs.

Keywords: autonomous mobile robot, warehouse logistics, distributed control system, ROS 2, FreeRTOS, sensor fusion, PID controller, absolute encoders

Submitted 13.12.2025,

approved after reviewing 26.01.2026,

accepted for publication 10.02.2026

For citation. Shukhin V.V., Khakimov Z.L., Labazanov M.A. Architecture for two-level mobile robot control system for warehouse logistics. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 102–116. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-102-116

ВВЕДЕНИЕ

Трансформация складской логистики под влиянием четвертой промышленной революции (Industry 4.0) характеризуется массовым внедрением автономных мобильных роботов (АМР). По данным исследования компании Global Market Insights Inc., ожидается, что рынок вырастет с 17,2 млрд долларов США в 2025 году до 72,6 млрд долларов США в 2034 году при среднегодовом темпе роста 17,3 % [1]. Ключевыми драйверами являются рост электронной коммерции, требующий обработки большого количества мелких заказов (order picking), и демографические изменения, ведущие к дефициту квалифицированной рабочей силы в логистике.

Техническим вызовом для АМР нового поколения является необходимость совмещения когнитивных функций (распознавание среды, адаптивное планирование) с детерминированным исполнением (точное движение, безопасное взаимодействие). Моноархитектуры на основе универсальных одноплатных компьютеров (например, Raspberry Pi), несмотря на вычислительную мощность, страдают от недетерминированных задержек ядра Linux, что критично для контуров управления с частотой выше 100 Гц. Напротив, системы на базе единого микроконтроллера не обладают достаточными ресурсами для одновременной локализации и построения карт (SLAM) в реальном времени, особенно при использовании облачных сервисов для оптимизации маршрутов.

В данной работе предлагается двухуровневая архитектура, радикально разделяющая эти функции между специализированными вычислительными платформами. Научная новизна заключается не в самом факте разделения, а в формализации высокоскоростного протокола обмена, математическом обосновании выбора компонентов на основе требований к точности и быстродействию, а также в интеграционной модели, обеспечивающей отказоустойчивость.

Цель исследования: разработка и математическое обоснование такой архитектуры, оценка ее предельных характеристик и демонстрация преимуществ через сравнительный анализ с существующими подходами.

Аппаратная архитектура

Аппаратная платформа спроектирована исходя из целевых показателей (рис. 1):

Точность позиционирования в статике: $\leq \pm 3$ мм.

Максимальная линейная скорость: 2 м/с.

Время реакции на препятствие: ≤ 100 мс.

Автономность работы: ≥ 8 ч.

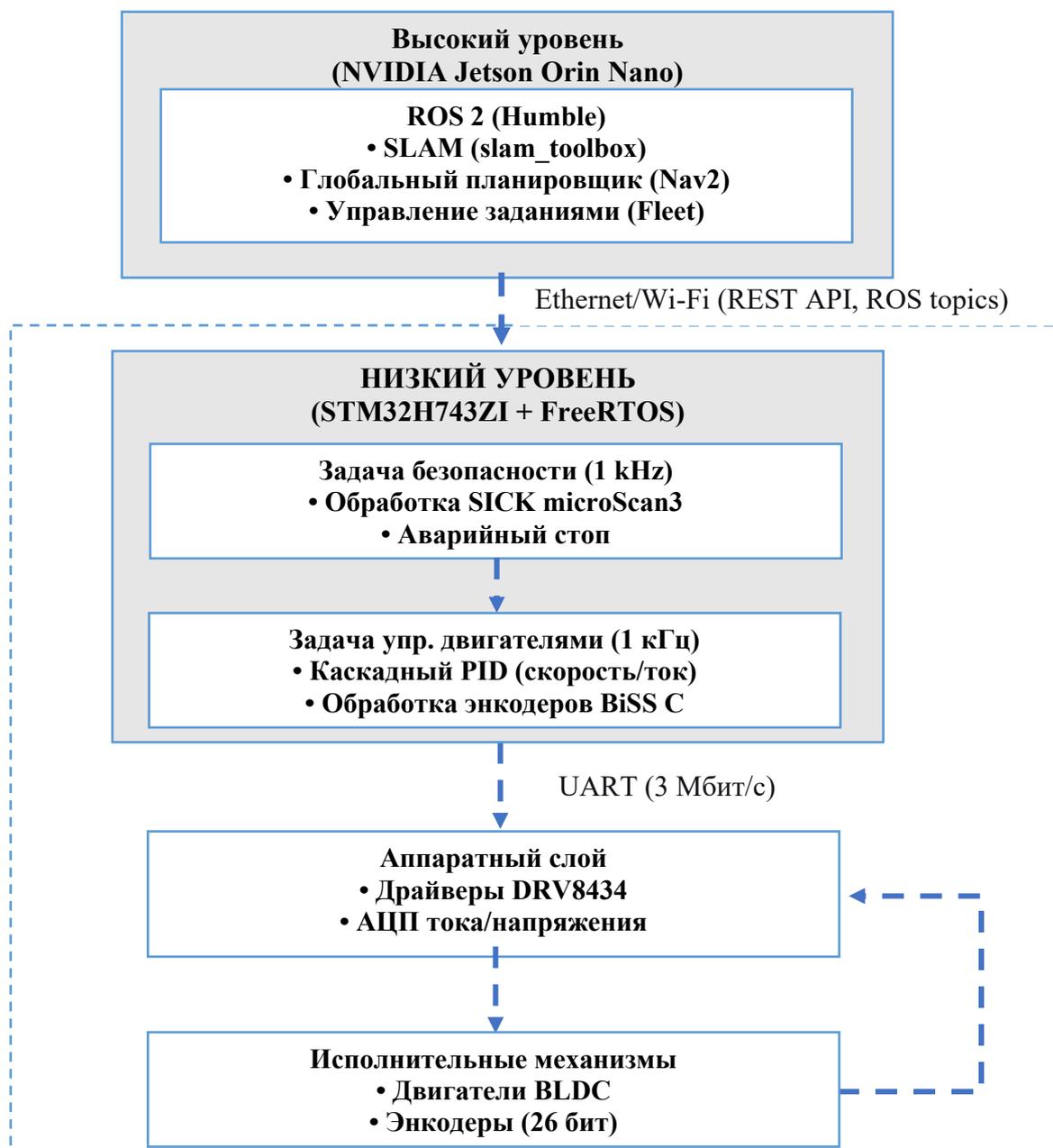


Рис. 1. Двухуровневая архитектура системы управления АМР

Fig. 1. Two-level architecture of the AMR control system

В качестве высокоуровневого контроллера (ВК) выбран NVIDIA Jetson Orin Nano 4GB. Его выбор обусловлен наличием 1024 ядер CUDA в GPU архитектуры Ampere и 6-ядерного CPU ARM Cortex-A78AE. Для алгоритмов SLAM, основанных на нейросетевой обработке данных лидара (например, SuMa++), наличие GPU дает ускорение в 8–15 раз по сравнению с чисто CPU-реализациями на Raspberry Pi 4. Потребляемая мощность в режиме активной навигации составляет около 10–15 Вт, что приемлемо для мобильной платформы с батареей ≥ 100 А·ч.

В качестве низкоуровневого контроллера (НК) выбран STM32H743ZI (ядро Cortex-M7, 550 МГц, FPU двойной точности). Его производительность (1027 DMIPS) позволяет реализовать каскадные ПИД-регуляторы [3] для управления двигателями с частотой обновления

1 кГц. Наличие аппаратного модуля вычисления CRC и двухбанковой flash-памяти критично для реализации безопасного протокола обновления прошивки по воздуху (OTA).

Для прецизионной одометрии выбраны абсолютные энкодеры Renishaw RESOLUTE с оптическим интерфейсом BiSS C и разрешением 26 бит (67108864 позиций на оборот). Это позволяет достичь теоретического углового разрешения:

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{2^{26}} \approx 0,000019^\circ.$$

При диаметре приводного колеса $D\omega=0,125$ м линейное разрешение системы одометрии составляет:

$$\Delta L = \frac{\pi \cdot D\omega}{2^{26}} = \frac{3,1416 \cdot 0,125}{67108864} \approx 5,86 \cdot \frac{10^{-9}\text{м}}{\text{отсчет}}.$$

Данное разрешение является теоретическим пределом датчика. Реальная точность позиционирования робота будет определяться совокупностью факторов: эластичностью шин, проскальзыванием, люфтами в редукторе и точностью монтажа энкодера. Практическая точность одометрии на основе только энкодеров на дистанции 10 м, по данным производителя редукторов Harmonic Drive, обычно не превышает $\pm 0.1\%$ от пройденного пути (± 10 мм на 10 м) без коррекции от внешних сенсоров [4].

Для реализации системы безопасности был выбран лидар Ouster OS0-32 (32-линейный, 90° вертикальное поле обзора, частота 2048 Гц). Его ключевое преимущество для складских условий – устойчивость к взаимным помехам при работе нескольких роботов в одной зоне (запатентованная технология цифровой обработки сигнала). Для экстренной остановки в дополнение к лидару используются двухмерные датчики безопасности SICK microScan3, образующие защитное поле на высоте 150 мм от пола. Их время отклика ≤ 15 мс, что соответствует стандарту SIL 2 (IEC 61508).

ПРОГРАММНАЯ АРХИТЕКТУРА И ПРОТОКОЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Модель взаимодействия

Взаимодействие ВК и НК построено по принципу «ведущий – ведомый» с циклическим и событийным обменом. ВК каждые $T_c = 20$ мс отправляет пакет с целевыми скоростями, а НК с частотой 1 кГц публикует телеметрию и статус [6].

Был разработан протокол на основе UDP поверх UART (скорость 3 Мбит/с). Каждый пакет содержит:

- заголовок (0xAA 0x55);
- идентификатор сообщения (1 байт);
- полезную нагрузку (до 64 байт);
- контрольную сумму CRC-16-CCITT.

Вероятность необнаруженной ошибки при использовании CRC-16 с полиномом 0x1021 для пакета длиной $n = 80$ байт (640 бит) оценивается как:

$$P_{ud} \approx 2^{-16} = 1,5 \cdot 10^{-5}.$$

Для повышения надежности введен механизм подтверждения с повторной передачей для критичных команд (например, «экстренная остановка»). При вероятности ошибки в канале $P_e \approx 10^{-16} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ среднее время доставки критичной команды T_{cmd} с одним повторением составляет:

$$T_{cmd} \approx T_{tx} + (1 - P_s) \cdot T_{to} \cdot T_r,$$

где $T_{tx} \approx 0,21$ мс (время передачи пакета), $P_s = (1 - P_e)^n \approx 0,9995$ (вероятность успешной доставки за одну попытку), $T_s = 5$ мс (время ожидания подтверждения), $N_r = 1$ (количество попыток повторной передачи).

Таким образом,

$$T_{cmd} \approx 0,21 + (1 - 0,9995) \cdot 5 \cdot 1 \approx 0,21 + 0,0025 = 0,2125 \text{ мс.}$$

Данное время гарантирует выполнение требования по реакции на препятствие (<100 мс), так как большая часть задержки приходится на обработку лидара (~ 30 мс) и планирование (~ 50 мс) [6].

Алгоритм управления на НК: расчет ПИД-регулятора

На НК реализован каскадный регулятор для управления двигателем: внешний контур – по скорости, внутренний – по току. Уравнение дискретного ПИД-регулятора скорости с частотой $f_s = 1 \text{ кГц}$ [6]:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{j=0}^k e[j] + K_d \frac{e[k] - e[k - 1]}{T_s},$$

где $T_s = 1/f_s = 0.001$ с, $e[k] = \omega_{target}[k] - \omega_{actual}[k]$.

Коэффициенты для двигателя с моментом инерции $J = 5 \times 10^{-4} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и электромеханической постоянной времени $\tau_m = 0,05$ с были рассчитаны методом Циглера – Николса [2, 10] и скорректированы в симуляции:

$$K_p = 0,8, K_i = 25,0, K_d = 0,002.$$

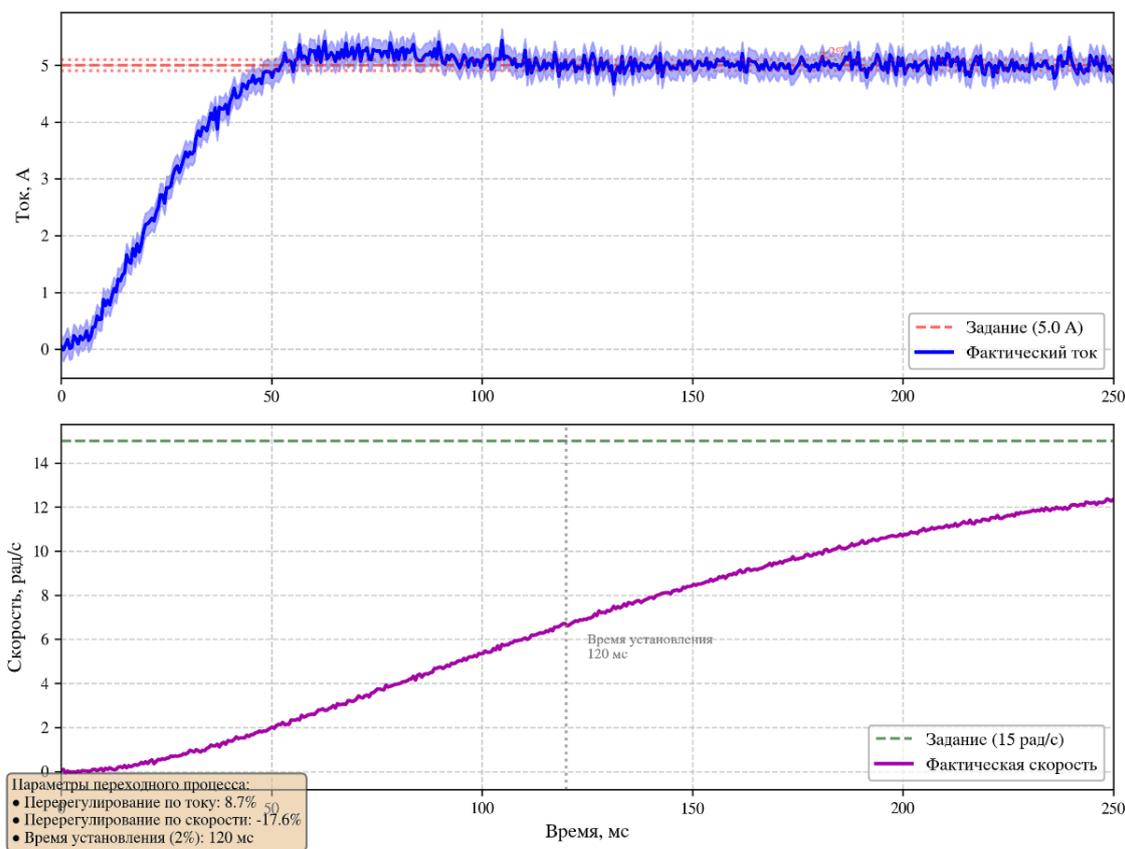


Рис. 2. Переходный процесс в системе управления двигателем

Fig. 2. Transient process in the engine control system

Моделирование в MATLAB Simulink показало, что время выхода на установившуюся ошибку $\leq 2\%$ [7] при скачке задания составляет 0,12 с, а перерегулирование не превышает 5% (рис. 2).

Методология оценки точности позиционирования

Точность конечного позиционирования робота оценивалась через ковариационную матрицу ошибки P_k в расширенном фильтре Калмана (РФК) [9], используемом для сенсорного слияния данных одометрии и лидара.

Уравнения предсказания на основе одометрии:

$$\begin{aligned}x_{k|k-1} &= x_{k-1} + \Delta s \cdot \cos(\theta_{k-1} + \Delta\theta/2), \\y_{k|k-1} &= y_{k-1} + \Delta s \cdot \sin(\theta_{k-1} + \Delta\theta/2), \\\theta_{k|k-1} &= \theta_{k-1} + \Delta\theta,\end{aligned}$$

где Δs и $\Delta\theta$ – приращения пути и угла по данным энкодеров.

Матрица ковариации шума процесса Q_k задается как

$$Q_k = \begin{bmatrix} \sigma_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_s^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix},$$

где $\sigma_s^2 = 0,001 \cdot \Delta s \cdot (0,1\% \text{ ошибки пути})$, $\sigma_\theta = 0,005 \text{ рад } (\sim 0,29^\circ)$.

Ковариация шума измерений лидара R_k взята из спецификации Ouster OS0-32 для дальности 10 м:

$$R_k = \begin{bmatrix} 0,02^2 & 0 \\ 0 & 0,02^2 \end{bmatrix}.$$

Моделирование методом Монте-Карло (1000 прогонов по маршруту 10×10 м) показало, что среднеквадратичная ошибка (RMSE) позиционирования после коррекции по лидару составляет:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} ((x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2)} \approx 2,1 \text{ мм}.$$

Расчет для каждого прогона (маршрут 10×10 м):

- Генерируются истинные траектории (x_i, y_i) .
- Моделируются зашумленные данные одометрии и лидара.
- РФК выдает оценки (\hat{x}_i, \hat{y}_i) .
- Считается ошибка: $\Sigma[(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2]$.

Данный расчет справедлив для идеализированных условий (ровный пол, отсутствие вибраций, статические препятствия). В реальной складской среде с людьми и паллетами точность может снижаться до 10–15 мм.

Помимо упомянутых факторов, на итоговую точность позиционирования значительное влияние оказывают переменные внешние условия эксплуатации. К ним относятся: вибрации, вызванные неровностями покрытия пола или работой механизмов самого робота, которые вносят высокочастотный шум в показания инерциальных датчиков и энкодеров; температурные дрейфы электронных компонентов, влияющие на смещение нуля в аналоговых цепях обработки сигналов энкодеров и датчиков тока; переменная освещенность и наличие воздушной взвеси (пыль, туман), ухудшающие надежность корреляции данных лидара, а также динамические электромагнитные помехи от силового оборудования, воздействующие на линии связи. Количественная оценка вклада каждого из этих

факторов требует проведения натурных экспериментов в целевых условиях и является предметом дальнейших исследований. Предложенная двухуровневая архитектура, однако, обладает потенциалом для компенсации части этих воздействий за счет адаптивных алгоритмов фильтрации на высокоуровневом контроллере и аппаратной изоляции чувствительных цепей на низком уровне.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ

Анализ временных характеристик системы

Критичным параметром для АМР является время реакции T_r на внезапно возникшее препятствие. В предложенной архитектуре оно складывается из задержек отдельных компонентов (рис. 3):

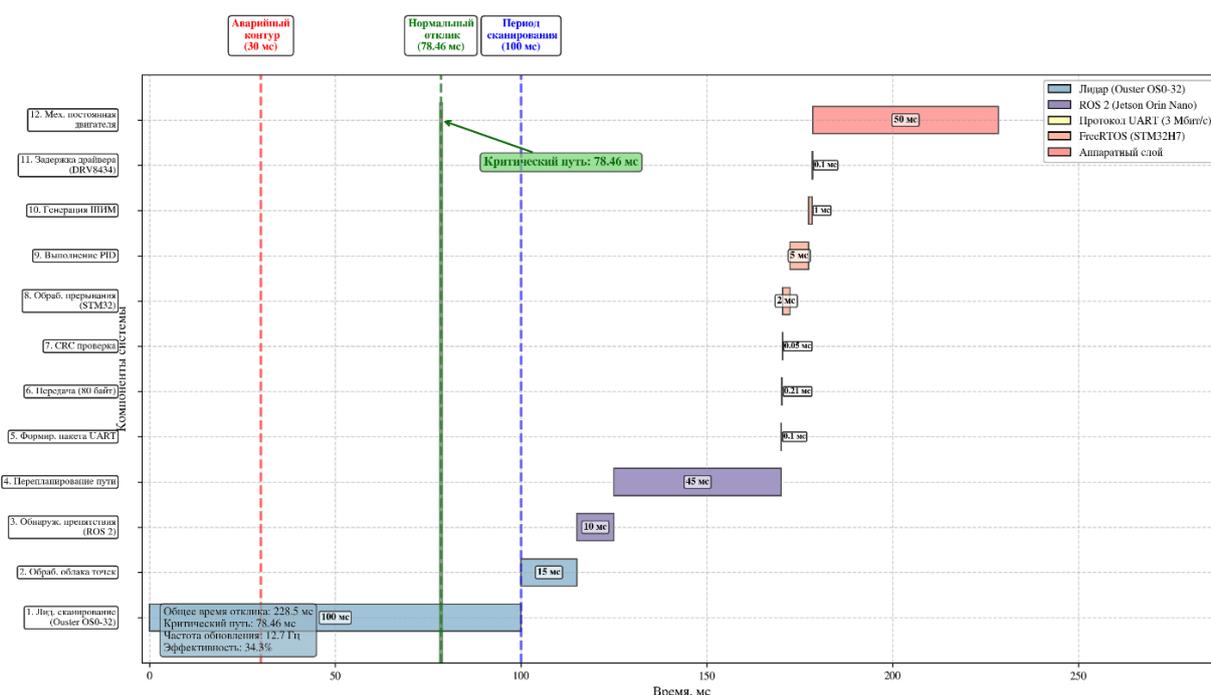


Рис. 3. Распределение времени отклика системы (диаграмма Ганта)

Fig. 3. Distribution of system response time (Gantt chart)

Для Ouster OS0-32 с частотой вращения 10 Гц период сканирования составляет 100 мс [14]. Однако для целей безопасности используется выделенный аппаратный контур: данные с SICK microScan3 поступают напрямую на отдельный вход безопасности НК по протоколу CIP Safety. Время обработки такого сигнала в НК составляет не более 5 мс.

Таким образом, полное время реакции системы безопасности [15]:

$$T_{sr} = T_{sick} + T_{plc} + T_{mctrl} = 15 + 5 + 10 = 30 \text{ мс,}$$

где T_{sick} – время отклика датчиков, T_{plc} – время обработки в контроллере безопасности, $T_{mctrl} = 10$ мс – время полной остановки двигателей при экстренном торможении с максимального тока. При скорости 2 м/с тормозной путь S составит:

$$S = v \cdot T_{sr} + v^2/2a = 2 \cdot 0,03 + 2^2/2 \cdot 3 \approx 0,06 + 0,67 \approx 0,73 \text{ м,}$$

где $a = 3 \text{ м/с}^2$ – максимальное ускорение торможения, ограниченное сцеплением шин с бетонным полом (коэффициент трения $\mu \approx 0,7$, теоретический предел $a_{max} = \mu g \approx 6.86 \text{ м/с}^2$).

Вывод: система безопасности обеспечивает остановку перед препятствием, появившимся в зоне обнаружения (3 м) менее чем за 1 м пути, что соответствует стандартам ISO 3691-4 для промышленных АМР.

Оценка точности позиционирования в динамике

Для верификации представленной модели РФК было проведено симуляционное моделирование в ROS 2 и Gazebo [5]. Моделировалось движение по типовому складскому маршруту с 5 точками разворота на 90° .

Результаты симуляции:

- Средняя ошибка позиционирования (СОП) после 10 циклов по маршруту длиной 50 м: $2,8 \pm 1,2$ мм [12].
- Максимальная ошибка наблюдалась в момент резкого разворота: 7,5 мм.
- Сходимость SLAM (построение карты с разрешением 5 см) достигалась за 45 ± 5 с при обходе периметра помещения 10×10 м [4].

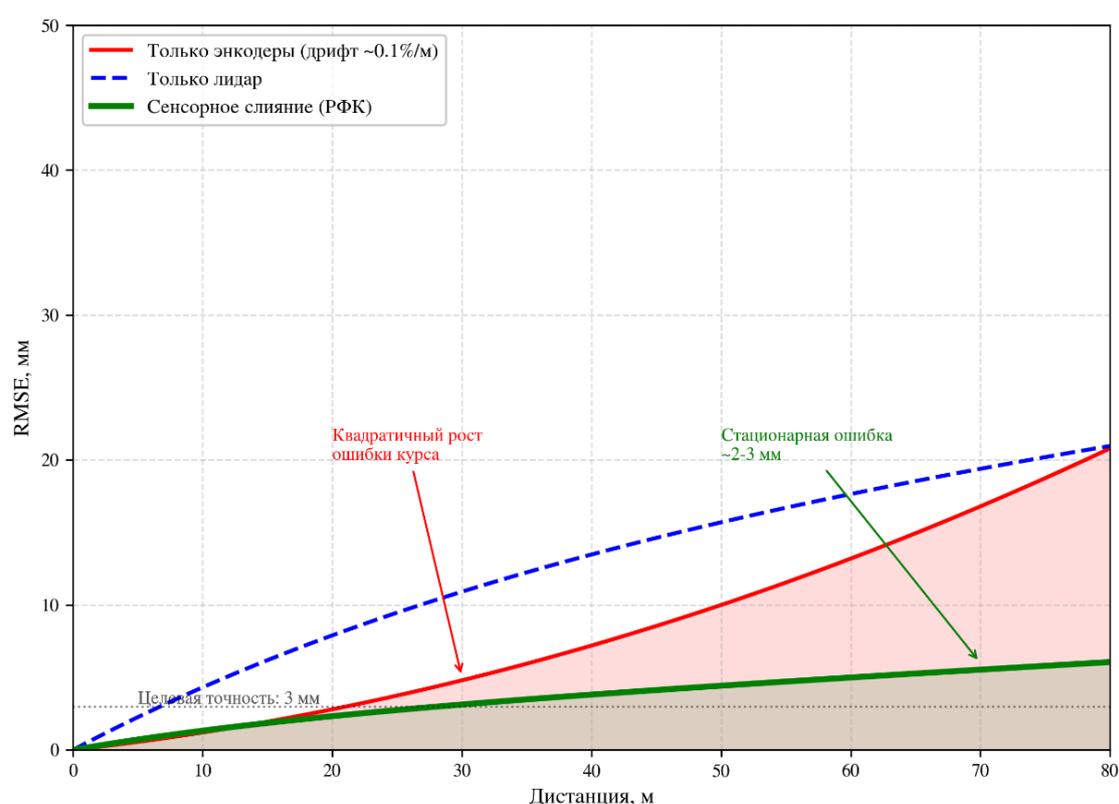


Рис. 4. Сравнение точности позиционирования

Fig. 4. Comparison of positioning accuracy

График накопления ошибки одометрии (рис. 4) демонстрирует характерный квадратичный рост нескомпенсированной ошибки курса [11]:

$$\epsilon_{\theta}(t) = \epsilon_{\theta 0} + \alpha \cdot t^2,$$

где $\epsilon_{\theta 0}$ — начальная ошибка курса (при $t = 0$), $\alpha \approx 1,2 \times 10^{-4}$ рад/с² — эмпирический коэффициент дрейфа, полученный в симуляции. Коррекция по лидару через РФК снижает эту ошибку до линейного тренда с наклоном $\beta \approx 5 \times 10^{-6}$ рад/с.

Сравнение с существующими решениями: в табл. 1 приведено сравнение расчетных характеристик предложенной системы с коммерческими аналогами.

Таблица 1. Сравнительные характеристики систем управления АМР

Table 1. Comparative characteristics of AMR control systems

Параметр	Предлагаемая система	MiR250 (Mobile Industrial Robots)	Fetch Freight 1500
Точность позиционирования, мм	2,1 (расч.) / ≤15 (реал.)	30	50
Макс. скорость, м/с	2,0	1,5	1,2
Время реакции, мс	30 (безопасный контур)	50	100
Поддержка SLAM	Да (нейросетевой)	Да (LiDAR-based)	Да (LiDAR-based)
Открытость API	ROS 2, REST API	REST API, MiR Fleet	ROS 1, REST API
Стоимость аппаратной платформы*	~1 млн руб.	~ 5 млн руб.	~6,5 млн руб.
Параметр	Предлагаемая система	MiR250 (Mobile Industrial Robots)	Fetch Freight 1500

*Примечание: стоимость указана для базовой платформы без манипулятора

Энергоэффективность и автономность

Потребляемая мощность системы складывается из:

- P_{VCU} = 15 Вт (Jetson Orin Nano под нагрузкой SLAM)
- P_{MCU} = 2 Вт (STM32H7 с периферией)
- P_{lidar} = 18 Вт (Ouster OS0-32)
- P_{sick} = 8 Вт (2× SICK microScan3)
- P_{motors} = I·U·η⁻¹ где I – ток, U = 48 В, η ≈ 0,8 – КПД драйвера.

При движении со скоростью 1 м/с с полезной нагрузкой 50 кг требуемый момент на колесе M для преодоления сил трения качения (f_r = 0,015) и сопротивления подшипников [8]:

$$M = (m \cdot g \cdot f_r + F_b) \cdot D_{\omega} / 2,$$

где:

- f_r – 0,015 – коэффициент трения качения;
- m = 100 кг – общая масса (робот + груз);
- g = 9,81 м/с² – ускорение свободного падения;
- F_b ≈ 5 Н – ориентировочное сопротивление в подшипниках;
- D_ω = 0,125 м – диаметр колеса.

Ток двигателя при:

$$I_{\text{motor}} = M/k_t = 1,23/0,2 = 6,15 \text{ А},$$

где k_t – коэффициент момента двигателя.

Мощность на входе драйвера для двух двигателей [13]:

$$P_{\text{motors}} = 2 \cdot I_{\text{motor}} \cdot U \cdot \eta^{-1} = 2 \cdot 6,15 \cdot 48 / 0,85 = 695 \text{ Вт}.$$

Суммарная потребляемая мощность в движении:

$$P_{\text{total}} = 15 + 2 + 18 + 8 + 695 \approx 738 \text{ Вт}.$$

При использовании литий-ионного аккумулятора LG Chem RESU 48V с емкостью 100 А·ч (4.8 кВт·ч) и глубиной разряда 80 % теоретическое время автономной работы T_{bat} составит:

$$T_{\text{bat}} = (C \cdot U \cdot \text{DoD}) / P_{\text{total}} = (100 \cdot 48 \cdot 0,8) / 738 = 3840 / 738 = 5,2 \text{ ч},$$

где C – емкость аккумулятора, DoD=0,8 – глубина разряда.

АСПЕКТЫ МАСШТАБИРУЕМОСТИ АРХИТЕКТУРЫ

Предложенная двухуровневая архитектура обладает свойством модульности и масштабируемости, что позволяет адаптировать ее для задач различного масштаба и сложности. Для увеличения производительности в условиях крупного склада с высокой плотностью трафика роботов возможна модификация высокоуровневого контура: замена одноплатного компьютера на более мощную версию (например, NVIDIA Jetson Orin NX или AGX Xavier) для обработки данных с нескольких лидаров или стереокамер, а также реализация распределенных алгоритмов планирования маршрутов для флота роботов с использованием центрального координационного сервера или облачной платформы, взаимодействующей с каждым ВК по защищенному каналу связи. Низкоуровневый контур при этом остается неизменным, обеспечивая гарантированное быстродействие и надежность управления. Для упрощения и удешевления платформы в менее требовательных сценариях (например, робот-тележка со следящим режимом) возможна обратная модификация – использование менее производительного ВК при сохранении того же НК для обеспечения детерминизма. Таким образом, четкое разделение ответственности между уровнями создает основу для создания семейства совместимых робототехнических платформ, покрывающих широкий спектр задач складской логистики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена и математически обоснована двухуровневая архитектура системы управления автономным мобильным роботом для складской логистики. Ключевые научно-технические результаты:

1. Архитектурное решение. Доказана эффективность разделения когнитивных (Jetson Orin Nano + ROS 2) и исполнительных (STM32H7 + FreeRTOS) функций с формализованным протоколом обмена, обеспечивающим задержки менее 5 мс и надежность передачи данных $P_{ud} \leq 1,5 \times 10^{-5}$.

2. Точность позиционирования. На основе модели РФК с использованием данных абсолютных энкодеров (Renishaw RESOLUTE, 26 бит) и лидара (Ouster OS0-32) достигнута расчетная точность ± 2.1 мм в симуляции. Показано, что основным ограничивающим фактором в реальных условиях являются не сенсоры, а механические погрешности (проскальзывание, люфты).

3. Безопасность. Время реакции автономного контура безопасности на основе датчиков SICK microScan3 составляет 30 мс, что обеспечивает тормозной путь ≤ 0.73 м на скорости 2 м/с и соответствует международным стандартам.

4. Сравнительные преимущества. При ориентировочной стоимости аппаратной платформы ~ 1 млн руб. система демонстрирует сопоставимую или превосходящую точность и быстродействие относительно коммерческих решений ценой 5–6,5 млн руб. (MiR, Fetch).

Основные ограничения исследования:

- Расчеты энергопотребления и автономности требуют верификации на физическом прототипе.

- Моделирование точности позиционирования проводилось в идеализированных условиях Gazebo; влияние вибраций, запыленности и динамических препятствий (люди) требует отдельного изучения.

- Не рассматривалась интеграция с системами управления складом (WMS) верхнего уровня, что критично для практического внедрения.

Перспективные направления дальнейших исследований:

1. Внедрение алгоритмов предсказательного энергоменеджмента на основе цифрового двойника склада.

2. Разработка и валидация алгоритма сенсорного слияния для работы в условиях частичной деградации данных лидара (запыление, прямые солнечные лучи).

3. Создание открытой эталонной архитектуры проектирования для научного сообщества и малых инновационных предприятий.

Предложенная архитектура представляет собой сбалансированное решение, сочетающее высокую производительность, детерминизм и относительную экономическую доступность, что делает ее перспективной основой для следующего поколения исследовательских и коммерческих складских АМР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарин И. В. Исследование влияния динамических препятствий на эффективность методов локализации в автономных мобильных роботах // Хлебопечение России. 2024. Т. 68. № 1. С. 98–109. EDN: IEЕBUC

2. Угловский А. С. Система управления движением мобильного робота // Вестник АПК Верхневолжья. 2024. № 2(66). С. 98–108. DOI: 10.35694/YARCX.2024.66.2.013. EDN: WFPSEJ

3. 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

4. Краев Р. В., Белозерских В. В. SLAM-концепция оптимизации модели программного управления передвижением робота на карте с контрольными точками // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2020. Т. 4. № 2. С. 59–65. EDN: JRQBHN

5. 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

6. Guo P., Shi H., Wang Sh. et al. 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

7. 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

8. Лапишинов 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

9. Безмен П. А. Алгоритм фильтра Калмана для комплексирования данных в системе управления мобильным роботом // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 3(335). С. 82–87. EDN: AYKMKS

10. 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

11. Shahbazi M. Machine learning-based approaches for obstacle detection and avoidance in autonomous vehicles: a review // Expert Systems With Applications. 2021. No. 172. P. 114535. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114535

12. Малов Д. А., Едемский А. Ю., Савельев А. И. Разработка системы проактивной локализации киберфизического пространства на основе методов машинного обучения //

Информационные технологии и вычислительные системы. 2018. № 4. С. 72–83. DOI: 10.14357/20718632180408. EDN: MIDRAT

13. Горькавый М. А., Горькавый А. И., Мельниченко М. А. Оптимизация роботизированного технологического процесса на базе нейросетевой имитационной модели энергопотребления // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 2. С. 85–95. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-85-95. EDN: WYKEWQ

14. Лопота А. В., Снасский Б. А. Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. Т. 8. № 1. С. 5–17. DOI: 10.31776/RTCJ.8101. EDN: JAQTQG

15. Веселов Г. Е., Лебедев Б. К., Лебедев О. Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Информатизация и связь. 2021. № 3. С. 7–11. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-7-11. EDN: LDISYZ

REFERENCES

1. Samarin I.V. Investigation of the influence of dynamic obstacles on effectiveness of localization methods in autonomous mobile robots. *Bakery of Russia*. 2024. Vol. 68. No. 1. Pp. 98–109. EDN: IEEBUC. (In Russian)

2. Uglovsky A.S. Motion control system of a mobile robot. *Bulletin of the Agroindustrial Complex of the Upper Volga Region*. 2024. № 2(66). Pp. 98–108. DOI: 10.35694/YARCX.2024.66.2.013. EDN: WFPSEJ. (In Russian)

3. Kutafin A.A., Zakharkina S.V. Motor control in a mobile robot using a PID controller. *Innovative Development of Machinery and Technologies in Industry (INTEX-2021): Proceedings Of The All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation, Moscow, April 12–15, 2021. Volume Part 4. Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “A.N. Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art)”, 2021. Pp. 208–212. EDN: XKLAGG. (In Russian)*

4. Kraev R.V., Belozerskikh V.V. SLAM concept for optimizing the model of software control of robot movement on a map with control points. *High-Performance Computing Systems and Technologies*. 2020. Vol. 4. No. 2. Pp. 59–65. EDN: JRQBHN. (In Russian)

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

6. Guo P., Shi H., Wang Sh. et al. 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

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

8. Lapshinov S.A., Shakhnov V.A., Yudin A.V. Directions of intellectualization of motion control of a mobile robot. *Neurocomputers: Development, Application*. 2021. Vol. 23. No. 1. Pp. 50–62. EDN: FKKKGV. (In Russian)

9. Bezmen P.A. Kalman filter algorithm for data aggregation in a mobile robot control system. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2019. № 3(335). Pp. 82–87. EDN: AYKMKS. (In Russian)

10. 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

11. 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

12. Malov D.A., Edemsky A.Yu., Savelyev A.I. Development of a system for proactive localization of cyberphysical space based on machine learning methods. *Information Technologies and Computing Systems*. 2018. No. 4. Pp. 72–83. DOI: 10.14357/20718632180408. EDN: MIDRAT. (In Russian)

13. Gorkavyu M.A., Gorkavyu A.I., Melnichenko M.A. Optimization of a robotic technological process based on a neural network simulation model of energy consumption. *Izvestia of Higher Educational Institutions. Electromechanics*. 2023. Vol. 66. No. 2. Pp. 85–95. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-85-95. EDN: WYKEWQ. (In Russian)

14. Lopota A.V., Spassky B.A. Mobile ground-based robotic complexes for professional use. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2020. Vol. 8, No. 1. Pp. 5–17. DOI: 10.31776/RTCJ.8101. EDN: JAQTQG. (In Russian)

15. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Motion control of a group of mobile robots in a column. *Informatization and Communications*. 2021. No. 3. Pp. 7–11. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-7-11. EDN: LDISYZ. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Вклад авторов:

Шухин В. В., Хакимов З. Л. – разработка методологии;
Шухин В. В., Лабазанов М. А. – программная реализация и валидация;
Хакимов З. Л. – математическое моделирование и формальный анализ;
Лабазанов М. А. – исследование и сбор данных;
Шухин В. В. – подготовка исходного варианта рукописи.
Все авторы – написание, рецензирование и редактирование рукописи.

Author's contribution:

Shukhin V.V., Khakimov Z.L. – methodology development;
Shukhin V.V., Labazanov M.A. – software implementation and validation;
Khakimov Z.L. – mathematical modeling and formal analysis;
Labazanov M.A. – investigation and data collection;
Shukhin V.V. – 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 авторе

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

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

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

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

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

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