

Д.А. МОИСЕЕВ, студент гр. ЭММ-42 (НГТУ)

Научный руководитель А.П. ЧЕРВОНЕНКО, к.т.н. (НГТУ)
г. Новосибирск

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ ЛОГИСТИЧЕСКИМ РОБОТОМ ДЛЯ СКЛАДСКИХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация

В статье рассматривается разработка системы управления мобильным логистическим роботом грузоподъёмностью 20 кг для автоматизации складских электротехнических комплексов. Представлена оригинальная конструкция подъёмного механизма ножничного типа с боковым приводом, обеспечивающая работу с стандартными паллетами. Проведён синтез релейного регулятора тока электропривода, показавший время регулирования 3,5 мс при отсутствии перерегулирования. Разработана многоуровневая архитектура системы управления на базе Raspberry Pi 4 и Arduino Nano. Результаты моделирования подтверждают эффективность предложенных технических решений.

Ключевые слова: мобильный робот, система управления, логистика, складской комплекс, электропривод, подъёмный механизм, синтез регулятора, ROS.

Abstract

The article discusses the development of a control system for a mobile logistics robot with a payload capacity of 20 kg for the automation of warehouse electrical engineering complexes. An original design of a scissor-type lifting mechanism with a side drive is presented, ensuring operation with standard pallets. The synthesis of a relay current regulator for the electric drive was carried out, showing a regulation time of 3.5 ms without overshoot. A multi-level control system architecture based on Raspberry Pi 4 and Arduino Nano has been developed. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed technical solutions.

Keywords: mobile robot, control system, logistics, warehouse complex, electric drive, lifting mechanism, regulator synthesis, ROS.

Введение

Активное развитие электронной коммерции и логистических систем предъявляет новые требования к автоматизации складских помещений [1]. Ключевой проблемой остается эффективная транспортировка паллет с грузом в условиях плотной планировки складов. Традиционные решения на базе вилочных погрузчиков требуют участия оператора, а роботы-

манипуляторы обладают ограниченной мобильностью. Согласно данным International Federation of Robotics (IFR), плотность роботизации в России составляет лишь 6 единиц на 10 000 работников, что указывает на значительный потенциал для внедрения автономных решений [2].

В данной работе представлена разработка мобильного логистического робота [3], сочетающего компактность, высокую манёвренность и способность автономно работать со стандартными паллетами. Особенностью разработки является оригинальная конструкция подъемного механизма, обеспечивающая работу с паллетами без выхода габаритов робота за проекцию груза, что позволяет минимизировать ширину проходов и увеличить плотность складирования.

Цель работы – разработка и исследование системы управления мобильным логистическим роботом с уникальным подъемным механизмом для интеграции в современные электротехнические комплексы складов и производственных предприятий.

1 Концепция и структурный синтез робота

1.1 Выбор кинематической схемы и технические требования

Для обеспечения работы в условиях ограниченного пространства складских помещений была выбрана дифференциальная кинематическая схема шасси. Данное решение позволяет роботу разворачиваться на месте с угловой скоростью 30 град/с, что критически важно для маневрирования в узких проходах шириной от 1,5 м.

На основе анализа задач складской логистики были сформулированы ключевые технические требования, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики робота

Параметр	Значение
Грузоподъемность	20 кг
Скорость движения	1,4 м/с (5 км/ч)
Время автономной работы	2 ч
Точность позиционирования	±5 мм
Высота подъема	46-124 мм
Время подъема груза	5 с
Способ навигации	по контрастным линиям
Тип шасси	дифференциальное
Преодолеваемый уклон	5°

1.2 Конструкция подъемного механизма

Для работы со стандартными паллетами был разработан оригинальный подъемный механизм ножничного типа с боковым приводом. Особенностью конструкции является изменение коэффициента редукции от 4,2 до

1,15 в процессе подъема, что обеспечивает высокое начальное усилие при старте и достаточную скорость в конечной фазе работы.

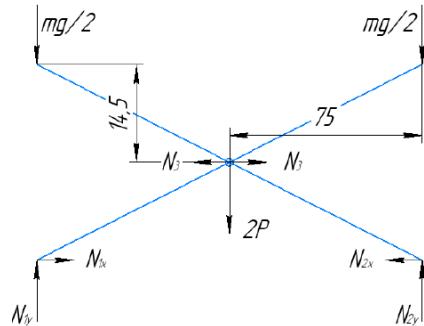


Рис. 1. Кинематическая схема подъемного механизма

Процесс загрузки состоит из шести этапов (рис. 2): Отделение механизма подъема от корпуса робота, Закатывание механизма в полости паллета, подъем паллета выше корпуса робота, перемещение робота под паллет, опускание паллета на корпус робота, фиксация механизма подъема

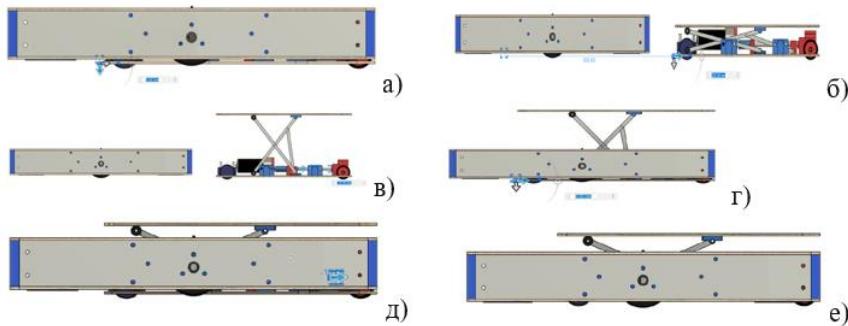


Рис. 2. Этапы работы подъемного механизма

2 Разработка системы управления

2.1 Аппаратная архитектура системы управления

Для управления роботом разработана многоуровневая архитектура со следующим распределением функций:

Уровень 1: Центральное управление (Raspberry Pi 4 Model B)

Навигация и построение маршрутов, Обработка данных с ЛИДАРа ZT-LD06, Взаимодействие с сервером по Wi-Fi, Координация работы нижнего уровня [4].

Уровень 2: Низкоуровневое управление (2×Arduino Nano)

Контроль датчиков линии ECKE5000 (8 каналов), Управление драйверами двигателей BTS7960 (6 шт.), Сбор данных с энкодеров и датчиков тока ACS712, Обработка сигналов концевых выключателей.

Уровень 3: Исполнительные устройства

Двигатели постоянного тока ходовой части (2×50 Вт), Двигатели подъемного механизма (2×10 Вт), Серводвигатели фиксации (4 шт.), Электромагнитные реле питания.

Обмен данными между Raspberry Pi и Arduino Nano осуществляется по протоколу UART. Такая архитектура обеспечивает распределение вычислительной нагрузки: Raspberry Pi решает задачи высокого уровня, а Arduino Nano гарантируют точное управление приводами в реальном времени.

2.2. Синтез регулятора тока электропривода

Для управления двигателями подъемного механизма синтезирован релейный регулятор тока. Математическая модель двигателя постоянного тока описывается передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1}{R + Lp} \quad (1)$$

где $R = 5,4$ Ом – активное сопротивление, $L = 1 \cdot 10^{-3}$ Гн – индуктивность.

Структурная схема контура регулирования тока включает преобразователь с коэффициентом передачи $W_h(p) = 4,8$ и звено обратной связи с коэффициентом $K_T = 0,83$.

Результаты моделирования в MATLAB/Simulink показали время регулирования $3,5 \cdot 10^{-3}$ с при отсутствии перерегулирования, что удовлетворяет требованиям технического задания (время регулирования не более 0,01 с, перерегулирование не более 10%). Система демонстрирует устойчивую работу во всем диапазоне регулируемого тока.

3 Результаты проектирования и моделирования

На основе проведенных расчетов и моделирования разработан комплекс технических решений, основные характеристики которого представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сводные технические характеристики системы

Параметр	Значение	Примечание
Мощность двигателей шасси	2×50 Вт	Червячные мотор-редукторы
Мощность двигателей подъема	2×10 Вт	Мотор-редукторы 480 об/мин
Емкость АКБ	2×96 Вт·ч	$2 \times 6S1P$ Li-ion
Ток потребления (номинальный)	2-6 А	В зависимости от нагрузки
Точность позиционирования	± 5 мм	По датчикам линий
Время регулирования тока	3,5 мс	Релейный регулятор

Расчет энергопотребления показал, что робот способен осуществлять 7 рабочих циклов в час при активной работе в течение 60% времени. Суммарное энергопотребление составляет 90,35 Вт·ч с учетом запаса 30% на старение аккумуляторов.

Выводы

В результате проведенной работы:

1. Разработана конструкция мобильного логистического робота с оригинальным подъемным механизмом ножничного типа, обеспечивающим работу со стандартными паллетами без выхода габаритов робота за проекцию груза.

2. Синтезирована и смоделирована система управления на базе многоуровневой архитектуры (Raspberry Pi 4 + Arduino Nano), показавшая время регулирования тока 3,5 мс при отсутствии перерегулирования.

3. Подобран комплект электрооборудования и датчиков, обеспечивающий автономную работу робота в течение 2 часов.

Перспективы развития проекта включают проведение натурных испытаний прототипа, реализацию SLAM-навигации и отработку алгоритмов группового взаимодействия роботов в составе складского электротехнического комплекса.

Список литературы:

1. Дегтяренко Э. В. Внедрение технического зрения для создания интеллектуальных производственных линий / Э. В. Дегтяренко, С. Е. Бузин; науч. рук. Н. С. Попов. - Текст: непосредственный // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. 18 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2024 г.: в 8 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2025. – Ч. 3. – С. 54–56. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-5345-2.

2. International Federation of Robotics. World Robotics 2023 – Industrial Robots Report, 2023. – 110 р.

3. Аносов В. Н. Способы обеспечения безопасности движения автономного электрического транспортного средства / В. Н. Аносов, Е. О. Орел, Н. С. Попов. // Вопросы электротехнологии: науч.-техн. журн., 2021. – № 4 (33). – С. 65–73.

4. Увеличение запаса хода автономного безрельсового транспортного средства с применением алгоритмов нечеткой логики / М. Е. Вильбергер, Н. С. Попов, Е. А. Домахин, В. И. Анибров, М. Е. Мосин. – DOI 10.15518/isjaee.2024.02.100-115. – Текст: непосредственный // Альтернативная энергетика и экология, 2024. – № 2 (419). – С. 100–115.

Информация об авторах:

Моисеев Денис Алексеевич, студент гр. ЭММ-42, НГТУ, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса д. 20, denis_moiseev_00@mail.ru;

Червоненко Андрей Павлович, к.т.н., НГТУ, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса д. 20, andrey-guitar@bk.ru.