

УДК 62-182.78

DOI 10.35211/1990-5297-2020-9-244-84-88

*П. А. Смирнов, И. А. Кан, О. Ю. Сивченко***ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
МОДУЛЬНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА «МАРС»****Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук**

adrelia@gmail.com

Представлен многофункциональный модульный робот, способный собираться в заданную конфигурацию и адаптировать ее в процессе эксплуатации в соответствии со спецификой текущей задачи. Рассмотрены структурная схема электротехнического оснащения отдельных модулей и основные программные компоненты системы.

Ключевые слова: модульные роботы, драйвер двигателя постоянного тока, инкрементальный энкодер, абсолютный энкодер.

*P. A. Smirnov, I. A. Kan, O. Yu. Sivchenko***SOFTWARE AND HARDWARE FOR A MODULAR ROBOTIC
DEVICE “MARS”****St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences**

The paper presents a multifunctional modular robot, self-assembling into a predefined configuration, which is adjustable in the course of operation according to the specific task. The principal design of the electric equipment of the robot is considered, as well the main software modules of the system.

Keywords: modular robotics, direct current motor driver, incremental encoder, absolute encoder.

Введение

В настоящее время актуальна разработка модульных гомогенных роботов, способных образовывать формации различных форм и размеров. Каждый робот такой системы автономен и обладает полным набором функциональных возможностей, необходимым для выполнения поставленных перед системой задач. При этом конструкция всех модульных роботов в системе одинакова, что облегчает производство и обслуживание подобных систем [1, 2]. Проведенный обзор электротехнического оборудования существующих модульных гетерогенных роботов [3] показал, что в настоящее время в модульной робототехнике разрабатываются одноплатные роботы, либо системы с одним контроллером и разнесенными по корпусу вспомогательными платами. Такая структура имеет существенный недостаток – наличие большого количества соединительных проводов и, зачастую, недостаточное быстродействие. В некоторых системах для связи используются последовательные интерфейсы, что дает возможность управления периферией без использования большого количества соединительных проводов. Также универсальные платы осложняют

разработку роботов в компактной компоновке. Данное исследование посвящено улучшению электротехнического оснащения робота МАРС [4, 5] с учетом вышеозначенных недостатков, с целью уменьшения габаритов и веса отдельных роботов.

**Электротехническое оснащение
модуля**

Каждый отдельный робот МАРС должен иметь возможность перемещаться и функционировать как самостоятельная единица, а также соединяться в предписанные формации [4]. Кроме того, отдельным роботам необходимо наличие системы ориентации в пространстве (гироскопа/акселерометра) и добавочных систем позиционирования. Требуемая длительность автономной работы робота должна составлять не менее 10 минут. Вышеперечисленные условия требуется выполнить для доказательства работоспособности предложенной формации (proof of concept) и ее технической целесообразности в контексте решения динамически изменяющихся прикладных задач.

Основой разработанной конструкции робота МАРС является рама с аксиальным блоком, обеспечивающая вращение робота относительно

но продольной оси в пределах 90 градусов в каждом направлении от основного блока, а также сгибать конструкцию относительно поперечной оси в том же диапазоне. Такая сложная конструкция предполагает разнесение исполнительных механизмов и управляющей электроники по всему роботу с обеспечением реализации предусмотренных особенностей и уменьшением количества питающих проводов и каналов связи. Таким образом, целесообразно применить концепцию распределенного управления, используя несколько контроллеров, которые объединены в сеть и отвечают за вы-

полнение разных функций. Это позволит распределить вычислительную нагрузку между узлами, а связь между узлами реализовать с помощью шины связи. Схожее решение предлагается в модульной микроконтроллерной системе управления роботами РОБОКОН-1 [6], однако одноплатная архитектура данной системы неприменима в случаях, где первоочередное значение отводится уменьшению массогабаритных показателей системы. Исходя из вышеизложенных соображений, была сформирована электротехническая система оснащения робота MARC (рис. 1).

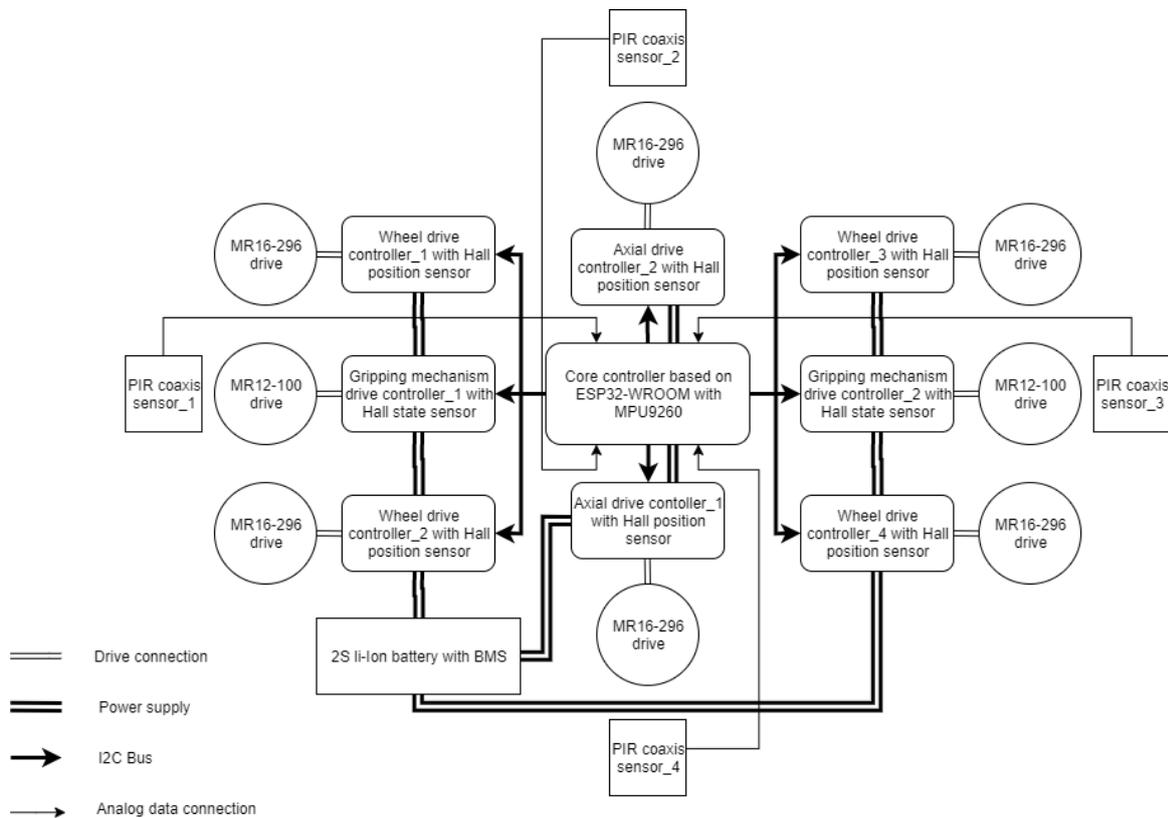


Рис. 1. Структурная схема разработанного электротехнического оснащения

На рис. 1 представлена структурная схема электротехнических узлов МРУ. Основной контроллер на базе ESP32-WROOM, управляет всеми устройствами, подразделяемыми на три основных группы: шасси, соединительное устройство и осевой актуатор. Также на основном контроллере установлен 9-осевой IMU-сенсор, включающий гироскоп и акселерометр для контроля положения МРУ в пространстве. Для реализации системы управления роботом были разработаны два типа печатных плат с дополнительным оснащением в виде внешних датчиков (рис. 2, 3).

Главная плата обеспечивает контроль работы всего робота, просчет алгоритмов управления, передачу данных на приводы колес, а также связь с веб-сервером. Вычислительным ядром данной платы был выбран микроконтроллер ESP32-WROOM, поскольку данная модель имеет on-chip поддержку беспроводной связи (Wi-Fi и Bluetooth 4.0), обеспечивающую связь робота с веб-сервером и миниатюрный DC-DC преобразователь TPS62172. Дополнительно установленный 9-осный сенсор MPU-9250 (гироскоп, акселерометр, магнитометр), обеспечивает вспомогательную функцию нави-

гации. К разъему внешних датчиков на главной плате подключены инфракрасные датчики, обеспечивающие повышение точности при по-

зиционировании роботов и, соответственно, увеличивающие надежность сцепления при автономном соединении роботов.

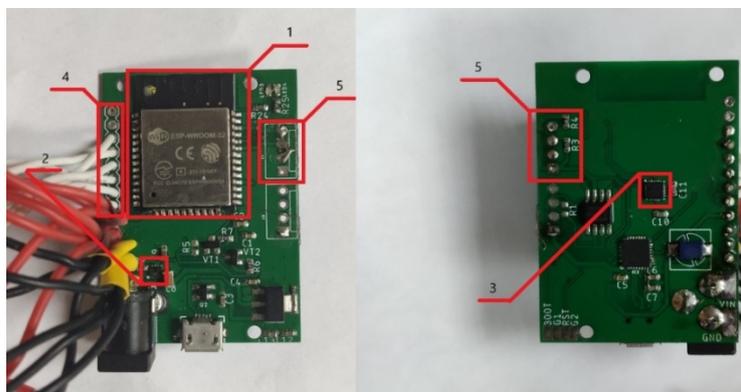


Рис. 2. Главный контроллер робота MARC:
1 – микроконтроллер ESP32-WROOM; 2 – DC-DC преобразователь TPS62172;
3 – 9-осный сенсор MPU-9250; 4 – разъем внешних датчиков; 5 – разъем I2C

Общая масса разработанного робота составляет 1,1 кг. С учетом такой массы и габаритных показателей были выбраны мотор-редукторы MR16-296 для колес и аксиальных приводов, максимальный крутящий момент которых составляет 4,9 кг*см, рабочее напряжение 6-9 В, а максимальный ток под нагрузкой 620 мА. В качестве приводов захватного механизма выбраны мотор-редукторы MR12-150 с током нагрузки 390 мА. Для управления данными двигателями было разработано 8 одинаковых плат, на которых размещены полномостовые драйверы MAX14870ETC+ в корпусе TDFN12 в связке с микроконтроллером STM32F030F4P. Весь набор плат подключен в главной плате через разъем I2C. Такое решение позволяет управлять двигателями используя шину I2C. Обратная связь по положению и скорости осуществляется линейными датчиками

холла SS49E с кольцевым магнитом диаметральной намагниченности, установленным на выходном валу мотор-редуктора. На рисунке 3 представлена плата драйвера мотор-редуктора, закрепленная на раме робота. Установленные на ней датчики Холла позволяют отслеживать положение выходного вала, а также его скорость и направление вращения.

На основании вышеизложенных технических характеристик отметим приоритетную важность массогабаритных показателей и гибкости единичного робота. Также важно обеспечить исчерпывающие навигационные возможности и сетевые функции, так как связь единичных роботов в процессе образования формаций выполнения поставленных задач должна быть бесперебойной и избыточной. В рассматриваемых условиях данные требования выполняются на аппаратном уровне.

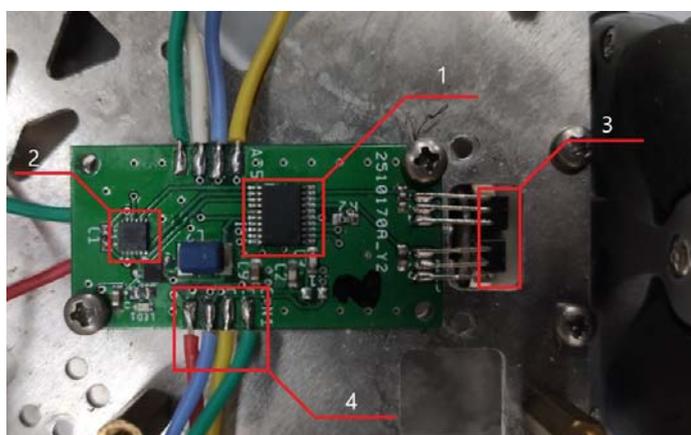


Рис. 3. Плата драйвера мотор-редуктора:
1 – микроконтроллер STM32F030F4P; 2 – полномостовой драйвер MAX14870ETC+;
3 – линейные датчики холла SS49E; 4 – порт I2C

Для обеспечения автономной работы робота необходимо выбрать источник питания, соответствующий параметрам потребления тока роботом. Расчет необходимой емкости аккумулятора робота ведется исходя из потребления тока роботом. Для расчета потребления тока роботом воспользуемся формулой (1):

$$I_{\max} = \sum I_{\text{дв}} + \sum I_{\text{др}} + I_{\text{ос}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{дв}}$ – ток потребления двигателем; $I_{\text{др}}$ – ток потребления платой драйвера; $I_{\text{ос}}$ – ток потребления главной платы. Рассчитанное по формуле (1) значение I_{\max} для заданных характеристик робота МАРС составляет 4710 мА. Рассчитаем минимальную емкость аккумуляторной батареи (2):

$$C_{\min} = T_{\min} + I_{\max}, \quad (2)$$

где I_{\max} – максимальное потребление тока роботом; T_{\min} – заданная минимальная длительность автономной работы. Для заданных характеристик получим $C_{\min} = 800,7$ мАч. Так как для питания двигателей необходимо напряжение 6–9 В, то сборка из двух последовательных литий-ионных ячеек обеспечит необходимое напряжение на всем диапазоне его работы (6–8,4 В). Исходя из полученной необходимой емкости аккумулятора, выберем элементы питания. Технологически возможные габариты аккумуляторного отсека – 55*25*35 (д*ш*в). Этим габаритам соответствует сборка из ячеек типоразмера 14 500 с платой защиты от перезаряда и переразряда. Максимальная емкость литий-ионных ячеек типоразмера 14 500 составляет 900 мАч. Рассчитаем длительность работы робота при максимальной нагрузке (3):

$$T_{\min} = \frac{C_{ab}}{I_{\max}}, \quad (3)$$

где C_{ab} – емкость аккумулятора; I_{\max} – максимальное потребление тока роботом; T_{\min} – заданная минимальная длительность автономной работы. Исходя из (3), получаем, что при выбранных решениях минимальное время автономной работы робота МАРС составляет около 11 мин.

Программные компоненты системы

Для управления электротехническим оснащением модулей, двигателями и сервоприводами, а также для установления соединения с сервером, получения и отправки команд, посредством выполнения которых выполняется построение формаций, было разработано программное обеспечение микроконтроллеров с помощью интерфейса для программирования роботов ROS (Robot Operating System).

Каждый модуль имеет семь микроконтроллеров, один микроконтроллер ESP32, используемый для связи с сервером, получения и обработки данных с датчиков холла и инфракрасных датчиков, управления сервоприводами аксиального моста и захватами, распределения команд микроконтроллерам управления двигателями колес. Шесть микроконтроллеров STM32F030 для управления двигателями колес и сервоприводами захватов. Прошивка основного микроконтроллера ESP32 включает в себя код соединения с сервером по Wi-Fi и постоянным обменом командами с сервером посредством последовательных сообщений ROS (ROS serial messages).

Данные и команды, которые получает модуль от сервера: 1) направление до следующей точки движения; 2) погрешность в градусах между вектором направления движения робота и направлением до следующей точки; 3) расстояние до следующей точки; 4) команды для старта, остановки, движения в одном из 10 различных направлений: вперед, назад, влево, вправо, диагональные движения и вращения вокруг своей оси; 5) команды для соединения, управления захватом и аксиальным мостом. Данные, получаемые сервером от модуля: 1) скорости вращения колес; 2) показания IMU датчика; 3) показания датчиков захватов и аксиального моста. Для выполнения задачи реконфигурации и объединения в сложную структуру каждому модулю необходимо: 1) переместиться в нужную точку; 2) осуществить операцию стыковки и захвата с другими модулями.

Выполнение этих задач производится следующим образом. Сервер рассчитывает маршрут движения каждого модуля с учетом препятствий и месторасположением других модулей, затем передает соответствующие команды каждому модулю. Для обмена командами и данными основной микроконтроллер устанавливает Wi-Fi соединение с сервером, посредством ROS сообщений, получает возможность получения и отправки команд на сервер. После получения команд и данных о расстоянии и погрешности в градусах до следующей точки, основной контроллер каждого модуля начинает выполнение функций движения в требуемом направлении с необходимой скоростью. Основной контроллер связан с контроллерами драйверов по протоколу I2C, посредством которого передает команды о направлении движения и требуемой скорости каждого колеса. Скорость движения и скорость поворотов выбира-

ются с учетом данных о расстоянии, погрешности и ПИД регулирования, в зависимости от изменения этих значений, а также показаний датчиков Холла на колесах и IMU датчика.

После достижения позиции для соединения модуль получает команду от сервера для стыковки и производит ее, самостоятельно используя данные с ИК сенсоров и датчиков Холла, установленных на захватах. Основной контроллер в режиме реального времени получает данные с ИК сенсоров и в зависимости от их значений отдает команды драйверам на движение, для корректировки позиции модулей относительно друг друга, и команды управления захватами. После успешного захвата модуль отправляет об этом информацию на сервер. Вышеперечисленные операции повторяются последовательно с каждым модулем, до тех пор, пока каждый модуль не достигнет нужной точки для соединения и образования нужной формации.

Эксперименты

Для тестирования разработанного электротехнического оснащения МРУ были проведены эксперименты, в которых работа этих узлов проверялась по отдельности. Для тестирования шасси МРУ был собран тестовый макет, включающий в себя: драйверы двигателей, двигатель, отладочный микроконтроллер ESP32, аккумулятор и всенаправленные колеса. В процессе тестирования отслеживалась точность передвижения макета по трем осям: вперед-назад, влево-вправо и по диагонали. Также тестировалась продолжительность автономной работы макета. Помимо этого, было проведено тестирование грузоподъемности макета МРУ. По результатам тестирования макета шасси было определено, что среднее время работы МРУ составляет 40 минут при максимальной нагрузке в 3,5 кг, без учета веса самого макета. Также экспериментально выявлена погрешность позиционирования $\Delta x = \pm 10$ мм.

Для тестирования механического устройства соединения был собран тестовый макет, состоящий из драйвера двигателя, двигателя, ИК-датчика, прототипа механизма соединения на основе ирисовой диафрагмы и тестовой соединительной пластины. В процессе тестирования отслеживалась работа механизма в двух основных режимах работы: раскрытое и закрытое состояние. Также тестировался захват и остановка механизма для фиксации тестовой соединительной пластины. Аналогичным образом был собран прототип осевого актуатора МРУ, включающий в себя драйверы двигателей, дви-

гатели, планетарный редуктор и ИК-датчики. Тестировалось сгибание и вращение прототипа в пределах 180 градусов относительно его геометрического центра. Тестирование механического устройства соединения показало корректную работу механизма во время перехода из раскрытого в закрытое состояние и обратно. При захвате соединительной пластины механизм останавливается и создает усилие на разрыв порядка 10 кг*см.

Заключение

Предложенная распределенная структура электротехнического оснащения с многопроцессорной архитектурой позволяет распределить функции контроля и управления между узлами системы. Спроектированные печатные платы с использованием компонентов с низким энергопотреблением позволяют увеличить продолжительность автономной работы в четыре раза от расчетной. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение микроконтроллеров обеспечивают обмен командами и данными модулей с сервером, управление движением и соединением модулей. Электротехнические показатели получаемых формаций свидетельствуют об их энергоэффективности в сравнении с аналогичными моделями, а также о возможности расширения описанной модели при помощи дополнительных модулей, что открывает возможности для сборки более сложных и многофункциональных формаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shlyakhov, N.* Survey of Methods and Algorithms of Robot Swarm Aggregation / N. Shlyakhov, I. Vatamaniuk, A. Ronzhin // International Conference on Information Technologies in Business and Industry 2016, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 803–2017.
2. О способах контактного соединения группы модульных роботов / А. Л. Ронжин, И. В. Вагаманюк, Л. А. Станкевич, Н. Е. Шляхов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 3 (12). – С. 34–41.
3. Formation of modular structures with mobile autonomous reconfigurable system / N. Pavliuk, D. Pykhov, A. Saveliev, E. Cherskikh // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 154. – Pp. 383–395.
4. *Павлюк, Н. А.* Формирование функциональных структур на основе гомогенных единиц модульной автономной реконфигурируемой системы / Н. А. Павлюк, П. А. Смирнов, А. Д. Ковалев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2019. – Т. 17. – № 5. – С. 14–20. DOI: 10.18127/j20700814-201905-03.
5. Connecting Gripping Mechanism Based on Iris Diaphragm for Modular Autonomous Robots / N. Pavliuk, P. Smirnov, A. Kondratkov, A. Ronzhin // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Springer, Cham, 2019. – С. 260–269.
6. *Павловский, В. Е.* Модульная микроконтроллерная система управления роботами РОБОКОН-1 / В. Е. Павловский, В. В. Павловский. Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2012.