

*С. Е. Латыш<sup>1</sup>✉, Д. Д. Лидер<sup>1</sup>, А. А. Шаранов<sup>1</sup>*

## **Модернизация гексапода: увеличение степеней свободы и применение Jetson Nano**

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: latysh@example.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты активной разработки модернизированной версии шестиногого робота-гексапода. Рассмотрены конструктивные особенности базовой модели с тремя степенями свободы на каждую ногу. Предложены пути модернизации, включающие увеличение числа степеней свободы до четырёх на ногу, замену сервоприводов на модели с вращением на 360°, интеграцию одноплатного компьютера Jetson Nano для задач компьютерного зрения и автономной навигации. Описана модульная конструкция верхней платформы для установки сменного целевого оборудования (видеокамер, датчиков, манипуляторов). Приведены результаты 3D-печати деталей и сборки текущего прототипа. Обсуждаются перспективы применения робота в спасательных операциях, геологоразведке и экологическом мониторинге.

**Ключевые слова:** гексапод, шестиногий робот, степени свободы, Jetson Nano, компьютерное зрение, модульная конструкция, автономная навигация

*S. E. Latysh<sup>1</sup>✉, D. D. Lider<sup>1</sup>, A. A. Sharapov<sup>1</sup>*

## **Modernization of a hexapod: increasing degrees of freedom and using Jetson Nano**

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: latysh@example.ru

**Abstract.** The article presents the results of the active development of a modernized version of a six-legged hexapod robot. The design features of the basic model with three degrees of freedom per leg are considered. Modernization paths are proposed, including increasing the number of degrees of freedom to four per leg, replacing servos with 360° rotation models, integrating a Jetson Nano single-board computer for computer vision and autonomous navigation tasks. The modular design of the upper platform for mounting interchangeable mission equipment (cameras, sensors, manipulators) is described. The results of 3D printing of parts and assembly of the current prototype are presented. The prospects for using the robot in rescue operations, geological exploration and environmental monitoring are discussed.

**Keywords:** hexapod, six-legged robot, degrees of freedom, Jetson Nano, computer vision, modular design, autonomous navigation

### ***Введение***

Шестиногие роботы (гексаподы) занимают особое место в современной робототехнике благодаря уникальному сочетанию статической устойчивости и высокой проходимости. В отличие от колесных и гусеничных платформ, гексапод способен преодолевать препятствия за счёт выборочной постановки ног на устойчивые точки,

что делает его незаменимым для работы в условиях завалов, горной местности, техногенных аварий [1]. Однако большинство существующих решений представляют собой либо дорогостоящие исследовательские платформы, либо любительские конструкторы с ограниченным функционалом. Актуальной задачей является создание доступной, ремонтпригодной и технологичной платформы, способной нести полезную нагрузку и выполнять автономные миссии.

Цель данной работы – модернизация классической конструкции гексапода с трёхстепенными ногами до версии с четырьмя степенями свободы (СО) на каждую конечность, интеграция высокопроизводительного вычислителя Jetson Nano для задач компьютерного зрения и реализация модульной системы крепления сменного оборудования. Работа находится на активной стадии разработки: выполнена 3D-печать основных элементов ног, ведётся сборка корпуса, разрабатывается программное обеспечение.

### *Исследование предметной области*

В мире существует множество конструкций шестиногих роботов, которые можно разделить на три основные категории. Первая – высокобюджетные исследовательские платформы (например, Spot от Boston Dynamics, Laika от ANYbotics), обладающие совершенной кинематикой и системами управления, но имеющие стоимость от нескольких миллионов рублей и закрытую архитектуру. Вторая – любительские конструкторы на основе Arduino и стандартных сервоприводов (PhantomX, Lynxmotion), доступные по цене, но с низкой грузоподъемностью, примитивными походками и отсутствием автономной навигации. Третья – единичные open-source проекты энтузиастов, как правило, незавершённые или плохо документированные [1, 2].

При анализе российского рынка и научных публикаций выявлено, что большинство разработок ориентировано либо на лабораторные исследования походок, либо на демонстрацию базовых навыков ходьбы. Системы компьютерного зрения и автономной навигации в них либо отсутствуют, либо реализованы на маломощных контроллерах (Raspberry Pi 3/4), что приводит к низкой частоте обработки кадров и задержкам при принятии решений [3]. Также недостаточно проработана модульность: смена целевой нагрузки (например, замена видеодомофона на газоанализатор) требует переделки корпуса.

В многочисленных исследованиях отмечается, что трёхступенная кинематика ноги является минимально необходимой для перемещения по пересечённой местности, но четырёхступенная конструкция обеспечивает существенно большую манёвренность, позволяя вращать конечность в горизонтальной плоскости без разворота всего робота [4]. Поэтому, в рамках данной работы сначала создается рабочий прототип с тремя степенями свободы для отладки базовых алгоритмов, затем переход на четырёхступенную версию.

Кроме того, анализ потребностей потенциальных заказчиков, легших в основу тех. задания для последующей доработки конструкции показал, что основными требованиями выступили такие немаловажные параметры, как совмещение возможности дистанционного управления и автономного движения по заданному

маршруту, включая распознавание людей, также дешевизна и простота ремонта в полевых условиях.

### ***Методы и материалы***

На данный момент базовая конструкция гексапода, взятая за основу, имеет шесть ног, каждая из которых обладает тремя степенями свободы вращения суставов в пределах  $180^\circ$ , позволяющая использовать систему передвижения, при которой робот будет в любом положении опираться на три точки опоры, образуя устойчивый треножник, в то время как остальные три ноги переносятся вперед, делая шаг. Однако данная конструкция накладывает некоторые ограничения, связанные с преодолением сложных траекторий движения конечностей и маневренностью на пересеченной местности.

Для модернизации конструкции были предусмотрены следующие технические решения:

1. Увеличение количества степеней свободы, при которых на каждую ногу добавляется четвёртый привод, обеспечивающий вращение в горизонтальной плоскости, перпендикулярно корпусу в месте крепления, делая из ноги четырехзвенный манипулятор, что позволяет реализовать более сложные походки (например, волнообразную или метахрональную), а также поможет при передвижении на равнине за счет достижения конструкции колесной формы для увеличения скорости перемещения. Сами сервоприводы также не останутся без внимания, вместо стандартных с углом поворота до  $180^\circ$  планируется использовать сервоприводы с непрерывным вращением на все  $360^\circ$ , что даст возможность каждой ноге вращаться без ограничений, расширяя возможности расчета обратной кинематики, а следовательно, и диапазон достижимых положений стопы относительно корпуса.

2. Интеграция одноплатного компьютера Jetson Nano. Выбор обусловлен необходимостью выполнения ресурсоемких задач компьютерного зрения в реальном времени, одноплатный компьютер содержит встроенный графический процессор с 128 ядрами CUDA, что позволит запускать сверточные и предикативные нейронные сети для распознавания объектов, сегментации препятствий и последующего реагирования на них, также построения карты методом SLAM [2] Планируется использование камеры глубины и инерциального измерительного модуля для точной оценки положения робота в пространстве.

3. Модульная конструкция верхней платформы. для модификаций спектра возможностей робота для специфических задач в различных отраслях. Будет разработана универсальная система крепления на верхней части корпуса, а также сами модули в зависимости от пожеланий заказчика. Она выполнена в виде сетки отверстий с шагом 20 мм и позволяет устанавливать сменные модули: тепловизионные камеры, газоанализаторы, дозиметры, лёгкие манипуляторы для взятия проб, а также транспортные контейнеры для доставки медикаментов или воды. Замена модуля занимает не более одной минуты.

Материалы изготовления: корпус и основные элементы ног выполнены методом 3D-печати из пластика PETG, обладающего хорошей ударной вязкостью

и теплостойкостью. В местах наибольших механических нагрузок предусмотрены алюминиевые вставки. Габаритный диаметр робота в сборе – 35 см, масса без сменного модуля – около 4 кг. Питание осуществляется от литий-ионной аккумуляторной сборки, обеспечивающей до 2 часов активного движения. Коммуникация с оператором – по радиоканалу с дальностью до 2 км на открытой местности.

Программное обеспечение базируется на операционной системе ROS (Robot Operating System) с использованием библиотек OpenCV, TensorFlow Lite и GTSAM для оптимизации графов поз. Управление приводами реализовано через микроконтроллер ESP32, принимающий команды от Jetson Nano по UART.

### ***Результаты***

На текущий момент (активная стадия разработки) достигнуты следующие результаты:

- Полностью спроектирована 3D-модель модернизированной конструкции с четырьмя степенями свободы на ногу. Выполнен расчёт кинематики для четырёхзвенной конечности.
- Изготовлены и проходят сборку все элементы ног для базовой трёхступенной версии (рис. 1). Это позволит отладить навигационное ПО до завершения печати деталей для четырёхступенного варианта.
- Начата печать усиленного корпуса с посадочными местами под Jetson Nano и модульную платформу.
- Подготовлен стенд для тестирования алгоритмов компьютерного зрения на Jetson Nano: реализовано детектирование человека по видео с камеры в реальном времени с частотой 15 кадров/с.
- Разработана схема электропитания с отдельными шинами для сервоприводов (высокий ток) и вычислителя (5 В).



**Рис. 1.** Напечатанные на 3D-принтере детали ног в процессе сборки

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики базовой и модернизированной версий.

**Таблица 1.**

| Параметр                                    | Базовая версия | Модернизированная версия |
|---------------------------------------------|----------------|--------------------------|
| Количество степеней свободы                 | 3              | 4                        |
| Тип сервоприводов                           | 180°           | 360°                     |
| Вычислитель                                 | Arduino Mega   | Jetson Nano              |
| Наличие компьютерного зрения                | Нет            | Да                       |
| Сменные модули                              | Нет            | Да                       |
| Ориентировочная максимальная скорость, км/ч | 3              | 12                       |

Планируемая максимальная скорость модернизированной версии возрастет за счёт более эффективного управления шагом благодаря четвёртой степени свободы.

### *Обсуждение*

Увеличение числа степеней свободы с трёх до четырёх принципиально меняет кинематические возможности гексапода. Трёхступенная нога позволяет перемещать стопу только в пределах конуса, вершина которого находится в точке крепления бедра. Четырёхступенная нога добавляет вращение вокруг горизонтальной оси, что позволяет достичь точек, расположенных сверху корпуса робота и даже зеркальной смены плоскости передвижения без потери маневренности, при повороте робота, к примеру, также при движении в узких проходах или между препятствиями разной высоты, как и вышеупомянутого движения, используя конструкцию колеса.

Сравнение с аналогичными разработками [3, 4] показывает, что большинство любительских гексаподов используют именно три степени свободы из-за простоты управления и реализации, хотя для прикладных задач, требующих высокой маневренности, например, инспекция трубопроводов или разведка под завалами, четырёхступенная кинематика является более предпочтительной. Интеграция Jetson Nano, а не Arduino Mega, как во многих проектах, обусловлена необходимостью обработки видеопотока в реальном времени без чрезмерного количества задержек.

Модульная конструкция верхней платформы создает возможность быстрой смены целевой нагрузки, дабы потенциальные заказчики, включая спасателей, геологов, экологов, могли использовать весь потенциал гексапода: сегодня робот должен нести тепловизор, завтра – газоанализатор. Также, разработанная система крепления позволяет оператору в полевых условиях заменить модуль без специального инструмента.

В ходе обсуждения с потенциальными пользователями были выявлены требования к простоте управления и надёжности. В ответ на это планируется реализовать полуавтономный режим, при котором оператор задаёт только конечную точку маршрута, а робот самостоятельно строит путь с обходом препятствий на основе данных с камер.

### *Заключение*

В результате работы спроектирована модернизированная версия шестиногого робота-гексапода, отличающаяся от классических конструкций увеличением числа степеней свободы до четырёх на каждую ногу, применением сервоприводов с вращением на  $360^\circ$ , интеграцией вычислителя Jetson Nano и модульной платформой для сменного оборудования. Разработка находится на активной стадии: изготовлены и собраны элементы ног, ведётся печать корпуса, отлаживаются алгоритмы компьютерного зрения. Ожидаемое время завершения полнофункционального прототипа – два месяца.

Дальнейшие перспективы включают:

- установку лёгкого манипулятора для взятия проб грунта;
- реализацию голосового управления при добавлении микрофона и системы распознавания команд;
- переход на отечественные микроэлектронные компоненты там, где это экономически и технически оправдано;
- проведение полевых испытаний совместно с региональным управлением МЧС.

Разработанная платформа может найти применение в спасательных работах (разведка в зонах завалов и задымления), геологоразведке на сложном рельефе, экологическом мониторинге труднодоступных территорий. Благодаря модульности и открытой архитектуре возможна дальнейшая адаптация под конкретные задачи заказчика.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпенко, А. П. Шагающие роботы: кинематика, динамика, управление / А. П. Карпенко, В. Б. Лапшин. — Москва: Наука, 2017. — 320 с.
2. Jetson Nano: встраиваемые вычисления для искусственного интеллекта / Д. С. Кузнецов, А. В. Петров // Робототехника и техническая кибернетика. — 2022. — № 3. — С. 45-52.
3. Белоногов, О. Б. Разработка шестиногого робота на базе сервоприводов и микроконтроллера Arduino / О. Б. Белоногов, И. А. Смирнов // Информационные технологии в науке и образовании. — 2020. — № 4. — С. 112-118.
4. Филимонов, Н. Б. Алгоритмы стабилизации походки гексапода при движении по неровной поверхности / Н. Б. Филимонов, Е. В. Козлов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2019. — Т. 20, № 7. — С. 415-421.

© С. Е. Латыш, Д. Д. Лидер, А. А. Шаранов, 2026