

ШАГАЮЩАЯ ПЛАТФОРМА МОБИЛЬНОГО РОБОТА С УПРОЩЕННОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ МЛЕКОПИТАЮЩИХ**Р.Р. Жалялов**

zhrr17m097@student.bmstu.ru

SPIN-код: 1595-9415

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены основные преимущества шагающей платформы над их прямыми конкурентами — колесными и гусеничными платформами. Выполнена систематизация различных кинематических систем по их отличительным параметрам, рассмотрены достоинства и недостатки разрабатываемой системы. Представлена инновационная кинематическая система, в основе которой лежит упрощение распространенной в шагающих роботах кинематической схемы ноги млекопитающего. На основе данной системы предложен вариант мобильной шагающей платформы, защищенной патентом № 2642020, в которой для расположения ноги в трехмерном пространстве используются две степени свободы перемещаемой ноги и степени свободы всего устройства. Проведен сравнительный анализ параметров данной конструкции с приведением примеров разработок компаний, лидирующих в данной отрасли.

Ключевые слова

Мобильная шагающая платформа, шагающий робот, кинематическая система, кинематическая схема млекопитающих, четырехногая шагающая машина, биомиметика, патент РФ 2642020, Boston Dynamics, Spot-Mini, ANYmal C, LaikaGo

Поступила в редакцию 26.06.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Активное развитие робототехники может стать основой создания прорывных технологий во многих приоритетных и критических направлениях науки, технологий и техники, обеспечить как России, так и всему миру технологический прорыв, третью промышленную революцию. В мировом масштабе развитие сервисной персональной робототехники способствует изменению распределения труда. Многофункциональные сервисные роботы будущего потеснят узкоспециализированные производства [1].

Исследованием проблем построения адаптивных шагающих машин и управления их движением занимаются многие научные коллективы в России и за рубежом. Интерес к этому направлению объясняется тем, что по сравнению с традиционными колесными и гусеничными машинами шагающая обладает принципиально лучшими следующими характеристиками [2]:

- высокая проходимость, возможность обхода и переступание препятствий;
- маневренность, возможность двигаться в любом направлении в плоскости опоры;

- возможность смены статических поз, позиции, смещений, наклонов, поворотов на месте;
- способность двигаться по ступенькам лестницы;
- возможность обеспечивать продольную и поперечную устойчивость без дополнительных упоров при работе с манипулятором;
- обеспечение высоких требований безопасности ввиду отсутствия опасных движений;
- отсутствие необходимости применения системы амортизации, гашения вибраций;
- отсутствие непрерывного следа при движении устройства, что важно для обеспечения скрытности передвижения или для нежелательных воздействий на опорную поверхность;
- изолированная передача устройством движения, что позволяет использовать защитные пленки и чехлы для упрощения дезактивации или дегазации, создания внутренней изолированной среды для работы в агрессивной среде, при низкой или высокой температуре либо давлении;
- малая подверженность устройства налипанию грунта, намерзанию льда в силу меньшей площади контакта с опорной поверхностью;
- возможность бесконтактно преодолевать препятствия (перешагивать).

Шагающие платформы имеют ряд недостатков по сравнению с колесными и гусеничными системами:

- низкая энергетическая автономность;
- сложность системы управления;
- низкая скорость;
- малая грузоподъемность;
- высокая стоимость.

Анализ существующих кинематических систем. Прототипами шагающих машин обычно служат живые организмы. Это определило количество ног, имеющих в таких машинах: 2 (человек), 4 (животные), 6 (насекомые). Реже встречаются проекты машин с большим количеством ног, прототипами которых служат пауки (8 ног), ракообразные (10 ног) и многоножки (больше 10 ног). Подобно живым организмам, машины обычно проектируются с четным числом ног. Вместе с тем не существует никаких ограничений на количество ног у машины. Нет также необходимости иметь четное число ног. В идеальном случае число ног должно соответствовать назначению машины. Меньшее число ног означает лучшую маневренность машины на пересеченной местности. Однако чем меньше ног, тем сложнее система управления машиной, обеспечивающая ее устойчивость [3].

Смысл создания шагающих машин в первую очередь заключается в обеспечении возможности передвигаться по пересеченной местности. В отличие от колеса, нога не имеет постоянного соприкосновения с поверхностью земли. Это дает шагающей машине возможность переступать через препятствия, непроходимые для колесной и гусеничной техники, а также позволяет двигаться по кру-

тым склонам. Изменение положения ног относительно корпуса машины позволяет избегать наклона самого корпуса и опрокидывания машины.

Число ног, равное шести, является оптимальным с точки зрения наибольшей свободы и скорости передвижения в рамках статической устойчивости.

Четырехногая шагающая машина обычно имеет меньшие габариты, вес и более простую конструкцию, она также может двигаться в рамках статической устойчивости. Но ее профильная и опорная проходимость меньше, чем у шестиногой, скорость движения также меньше при прочих равных условиях. Тем не менее отметим, что машины фирмы Boston Dynamics демонстрируют весьма высокую проходимость и устойчивость на сложных грунтах и поверхностях.

Двуногая машина может иметь самые малые размеры, но ее движение возможно только в рамках динамической устойчивости, организация такого движения весьма сложна. Многоногие машины имеют большую грузоподъемность при заданных ограничениях давления на грунт и размерах стоп.

Основные биологические прототипы шагающих машин показаны на рис. 1. Среди всего разнообразия в живой природе наибольший интерес как основные прототипы представляют конечности насекомых и рептилий (рис. 1, *а*), млекопитающих (рис. 1, *б*), птиц (рис. 1, *в*).

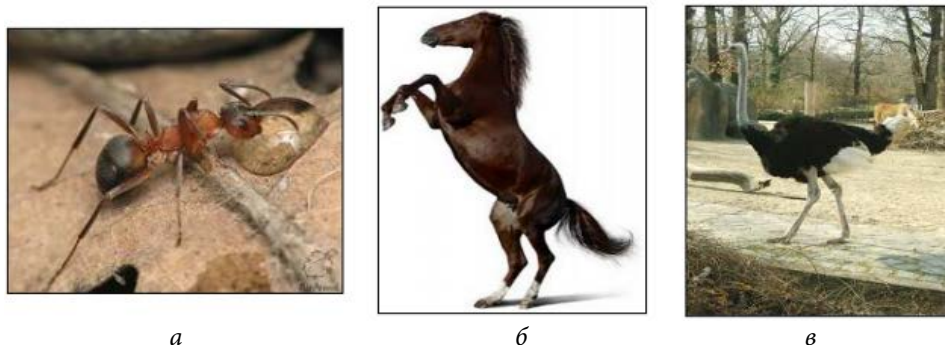


Рис. 1. Ноги биологических существ-прототипов:

а — насекомых; *б* — млекопитающих; *в* — птиц

Разработчики шагающих роботов создали прототипы на следующих кинематических системах:

- телескопическая;
- ортогональная;
- пантографическая;
- млекопитающих;
- инсектоморфная;
- млекопитающих упрощенная.

Разрабатываемая кинематическая схема. Основной идеей планируемого к разработке устройства является расширение и улучшение параметров данной кинематической системы путем ее упрощения, как продемонстрировано на рис. 2 [4].

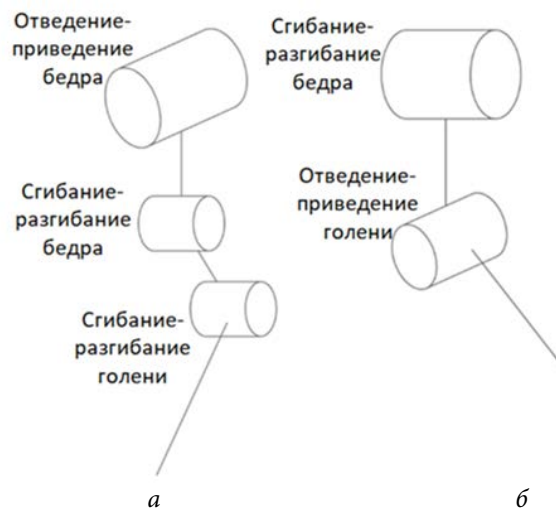


Рис. 2. Классическая (а) и упрощенная (б) кинематические схемы ноги млекопитающих

Упрощенное устройство не имеет привода отведения-приведения бедра, а привод колена выполняет функцию отведения-приведения голени.

Сравним основные параметры двух кинематических схем (млекопитающих и млекопитающих упрощенная) по отдельным параметрам.

1. *Масса.* Суммарная масса упрощенного устройства меньше на массу четырех приводов, силовых выключателей, проводов и монтажных элементов.

2. *Полезная нагрузка.* Значение полезной нагрузки ограничено значением вращающих моментов приводов и прочностью конструкции. Вращающие моменты в приводах пропорциональны синусу угла отклонения от вертикали. Упрощенное устройство может нести большую нагрузку благодаря тому, что при ходьбе элементы ноги отклоняются от вертикали на меньшее значение.

3. *Скорость.* Теоретически скорость устройств с кинематической структурой млекопитающих не ограничена, а скорость устройств с упрощенной кинематической структурой млекопитающих ограничена значением вертикального ускорения, возникающего при ходьбе. Например, при длине ноги 0,5 м максимальная скорость движения шагом составит 2,2 м/с.

4. *Сложность системы управления.* Устройство с упрощенной кинематической структурой имеет меньшее число степеней свободы, поэтому проще в управлении. Кроме того, уменьшение числа приводов делает конструкцию более жесткой, что повышает управляемость устройства. На этапе физического моделирования выяснилось, что упрощенная кинематическая конструкция упрощает проблему динамической стабилизации. В неустойчивой фазе движения, когда платформа опирается только на две ноги, падению платформы препятствует отведенная нога, которая находится в фазе переноса.

5. *Стоимость.* Упрощенное устройство дешевле, поскольку содержит меньше компонентов (приводы, силовые выключатели, провода и крепежные элементы) и имеет более простую конструкцию.

6. *Сложность конструкции.* Упрощенная кинематическая конструкция проще, потому что содержит меньше конструктивных элементов. Упрощение конструкции также связано с определенными функциональными потерями и особенностями:

- невозможно поднять ногу вертикально без перемещения корпуса;
- невозможна полная стабилизация корпуса при движении;
- требуется перестановка ног для позиционирования корпуса в вертикальной оси и по осям вращения тангажа и крена.

Характеристики передовых устройств. Рассмотрим прототипы ведущих мировых компаний и сравним их с разрабатываемой моделью.

1. *SpotMini* — шагающий робот от компании Boston Dynamics, построенный на кинематике ноги по типу млекопитающих [5]. Машина показана на рис. 3.



Рис. 3. Робот SpotMini (Boston Dynamics, 2015)

Основные достоинства:

- обладает мобильным манипулятором;
- способен поднимать до 14 кг полезной нагрузки;
- оснащен 3D-системой зрения с методом навигации SLAM и избеганием препятствий;
- имеет возможность всенаправленного перемещения;
- может подниматься и опускаться по лестницам;
- способен балансировать и приспосабливаться при физическом воздействии на него;
- помимо автономного выполнения задач и навигации также обладает возможностью удаленного управления с помощью оператора.

Из недостатков стоит отметить недостаточную максимальную нагрузку в 14 кг при том, что масса самого робота близок к 30 кг. Также робот имеет малый запас времени автономной работы. Главный недостаток данного решения — крайне высокая цена (около 70 тыс. долл. США).

Перечислим основные интересующие нас технические характеристики данного шагающего робота:

- масса 25 кг (30 кг с манипулятором);

- потребляемая мощность 400 Вт
- время автономной работы 1,5 ч;
- максимальная нагрузка 14 кг;
- максимальная скорость 1,6 м/с;
- число приводов 12 шт.;
- цена 70 тыс. долл. США

2. **ANYmal C** — шагающий робот производства швейцарской компании ANYbotics [6]. Предназначен для использования на предприятиях.



Рис. 4. Робот ANYmal C (ANYbotics, 2019)

Робот ANYmal C массой 50 кг, способный переносить груз до 10 кг, представлен на рис. 4. Он может развивать скорость до 1 м/с, двигаться по наклонной поверхности с уклоном до 20 градусов и по лестницам с уклоном до 45° благодаря мощным приводам с регулируемым крутящим моментом.

Основные достоинства:

- использование связки из лидара в верхней части корпуса и камер глубины, позволяющих ANYmal C в реальном времени составлять объемную и высокоточную карту окружающего пространства;
- способность забираться на лестницы с уклоном 45° и идти по наклонной поверхности с уклоном 20°;
- способность пробираться в проемы с низким потолком;
- самостоятельное возвращение к станции зарядки при малом уровне заряда аккумулятора;
- наличие стандарта защиты IP67.

Приведем основные интересующие нас технические характеристики данного шагающего робота:

- масса 50 кг;
- потребляемая мощность 350 Вт
- время автономной работы 2–3 ч;
- максимальная нагрузка 10 кг;
- максимальная скорость 1,0 м/с;
- число приводов 12 шт.;
- цена 250 тыс. долл. США

3. **LaikaGo** производства китайской компании Unitree Robotics представляет решение, во многом повторяющее описанный выше SpotMini, но имеющее ряд особенностей и преимуществ [7].

Шагающий робот, передвигающийся на четырех ногах, приводимых в движение 12 сервомоторами, представлен на рис. 5. Робот имеет размеры 56×35×60 см и весит 22 кг. Он может нести груз массой до 5 кг, развивает скорость до 0,8 м/с

Шагающая платформа мобильного робота с упрощенной кинематической системой ...

и работает на одном заряде бортового аккумулятора около 3 ч. Агрегат поддерживает как автономное, так и ручное управление с помощью пульта.

Основные достоинства:

- возможность работы в связке с еще тремя роботами LaikaGo в виде подвижной платформы;
- стабилизация робота при внешних воздействиях;
- низкая потребляемая мощность;
- хорошая автономность работы;
- средняя цена.

Укажем основные интересующие нас технические характеристики данного шагающего робота:

- масса 25 кг;
- потребляемая мощность 150...200 Вт
- время автономной работы 3 ч;
- максимальная нагрузка 5 кг;
- максимальная скорость 0,8 м/с;
- число приводов 12 шт.;
- цена 30 тыс. долл. США



Рис. 5. Робот LaikaGo (Unitree Robotics, 2017)

Структурная схема разрабатываемого устройства. Кинематическая схема платформы со всеми структурными элементами изображена на рис. 6 [8].

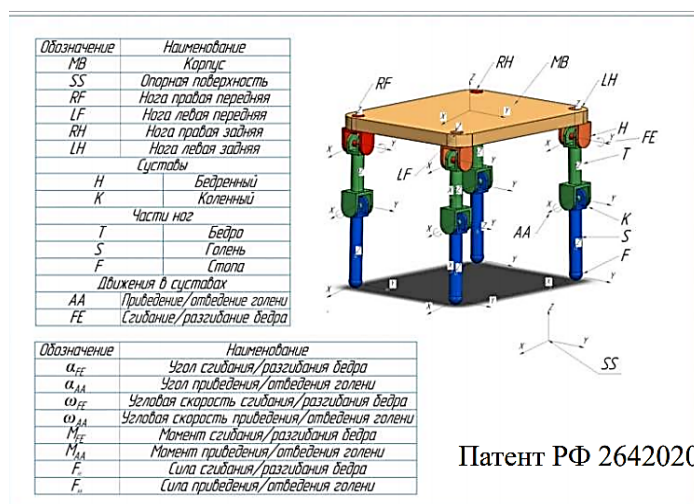


Рис. 6. Кинематическая схема разрабатываемого устройства

Сравнение характеристик. Выполним сравнение характеристик предлагаемого устройства, полученных на основе рабочего прототипа, с ведущими мировыми аналогами (см. таблицу).

Результаты сравнения разрабатываемого решения с моделями от ведущих компаний

Модель робота	Масса, кг	Потребляемая мощность, Вт	Время автономной работы, ч	Максимальная нагрузка, кг	Максимальная скорость, м/с	Количество приводов, шт.	Цена, долл. США
SpotMini	25–30	400	1,5	14	1	12	70 000
ANYmal-C	50	350	2–3	10	1	12	От 250 000
LaikaGo	22	150–200	3	5	0,8	12	30 000
Данное решение	До 18	Около 100	Около 5	Около 20	Около 0,8	8	Около 3000

Заключение. Полное копирование морфологии животных при проектировании может привести к значительному усложнению конструкции робота. Этого можно избежать с помощью тщательного анализа имеющихся данных и поиска возможных упрощений, критически не влияющих на функциональные возможности робота и допустимых при выполнении определенных задач. После проведенной систематизации кинематических систем была предложена упрощенная вариация кинематической системы млекопитающих. Выполнен анализ достоинств и недостатков выбранной системы в сравнении с ее классическим вариантом. На основе данной системы предложен вариант перспективной мобильной шагающей платформы. Проведен сравнительный анализ параметров данной конструкции с близкими по функционалу разработками ведущих мировых компаний. Установлено, что по итогам этого анализа данное решение опережает мировые аналоги. Благодаря дальнейшим исследованиям по разработке оптимальных конструкций для выполнения самых разнообразных задач могут быть расширены возможности шагающих мобильных роботов и область их применения.

Литература

- [1] Фокин В.Г., Шаныгин С.В. Обзор и перспективы развития мобильных шагающих робототехнических систем. *Молодой ученый*, 2015, № 18, с. 207–215.
- [2] Блинец П.М. Шагающая платформа мобильного робота. *Экстремальная робототехника*, 2020, т. 1, № 1, с. 41–46.
- [3] Кинематика: прямая и обратная задачи. *robocraft.ru: веб-сайт*. URL: http://robocraft.ru/blog/_mechanics/756.html (дата обращения: 20.05.2021).
- [4] Блинец П.М., Рубцов В.И., Коновалов К.В. и др. Домашний охранный робот на базе шагающего движителя. *Символ науки*, 2017, т. 2, № 3, с. 14–21.
- [5] Презентация робота SpotMini от Boston Dynamics. *habr.com: веб-сайт*. URL: <https://habr.com/ru/post/416905> (дата обращения: 20.05.2021).

- [6] ANYmal C – Autonomous legged robot. *anybotics.com: веб-сайт*. URL: <https://www.anybotics.com/anymal-legged-robot> (дата обращения: 20.05.2021).
- [7] Laikago. *robots.ieee.org: веб-сайт*. URL: <https://robots.ieee.org/robots/laikago> (дата обращения: 20.05.2021).
- [8] Артамонов Ю.П., Близнец Д.П., Близнец М.П. и др. Шагающее устройство. Патент РФ 2642020. Заявл. 24.06.2016, опубл. 21.03.2018.

Жалялов Руслан Ринатович — студент кафедры «Робототехника и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Близнец Павел Михайлович, ведущий инженер, старший преподаватель кафедры «Робототехника и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Жалялов Р.Р. Шагающая платформа мобильного робота с упрощенной кинематической системой млекопитающих. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 06(59). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-06-712>

WALKING PLATFORM OF A MOBILE ROBOT WITH A SIMPLIFIED KINEMATIC SYSTEM OF MAMMALS

R.R. Zhalyalov

zhrr17m097@student.bmstu.ru

SPIN-code: 1595-9415

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The main advantages of the walking platform over their direct competitors — wheeled and tracked platforms are considered. The systematization of various kinematic systems according to their distinctive parameters is carried out, the advantages and disadvantages of the developed system are considered. An innovative kinematic system, which is based on the simplification of the kinematic scheme of a mammal's leg, which is common in walking robots, is presented. Based on this system, a variant of a mobile walking platform, protected by patent No. 264202, in which two degrees of freedom of the movable leg and the degrees of freedom of the entire device are used to position the leg in three-dimensional space, is proposed. A comparative analysis of the parameters of this design with examples of developments of companies leading in this industry has been carried out.

Keywords

Mobile walking platform, walking robot, kinematic system, kinematic diagram of mammals, four-legged walking machine, biomimetics, RF patent 2642020, Boston Dynamics, SpotMini, ANYmal C, LaikaGo

Received 26.06.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Fokin V.G., Shanygin S.V. Review and prospects of mobile walking robotic systems development. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2015, no. 18, pp. 207–215 (in Russ.).
- [2] Bliznets Mobile robot walking platform. *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme Robotics], 2020, vol. 1, no. 1, pp. 41–46 (in Russ.).
- [3] Kinematika: pryamaya i obratnaya zadachi [Kinematics: direct and reverse problem]. *robocraft.ru: website* (in Russ.). URL: <http://robocraft.ru/blog/mechanics/756.html> (accessed: 20.05.2021).
- [4] Bliznets P.M., Rubtsov V.I., Konovalov K.V., et al. Home guard robot based on walking propeller. *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2017, vol. 2, no. 3, pp. 14–21 (in Russ.).
- [5] Prezentatsiya robota SpotMini ot Boston Dynamics [Presentation of SpotMini robot from Boston Dynamics]. *habr.com: website* (in Russ.). URL: <https://habr.com/ru/post/416905> (accessed: 20.05.2021).
- [6] ANYmal C – Autonomous legged robot. *anybotics.com: website*. URL: <https://www.anybotics.com/anymal-legged-robot> (accessed: 20.05.2021).
- [7] Laikago. *robots.ieee.org: website*. URL: <https://robots.ieee.org/robots/laikago> (accessed: 20.05.2021).
- [8] Artamonov Yu.P., Bliznets D.P., Bliznets M.P., et al. *Shagayushchee ustroystvo* [Pacing device]. Patent RU 2642020. Appl. 24.06.2016, publ. 21.03.2018 (in Russ.).

Zhalyalov R.R. — Student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Bliznets P.M., Leading engineer, Senior lecturer, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Zhalyalov R.R. Walking platform of a mobile robot with a simplified kinematic system of mammals. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 06(59). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-06-712.html> (in Russ.).