
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 531.8

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ
МОБИЛЬНОГО РОБОТА С МЕХАНИЗМОМ
ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
НА МАГНИТНЫХ ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЯХ**© 2020 г. В. В. Серебряный¹, Д. В. Лапин^{1,*}, А. А. Мокаева¹¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*e-mail: lapindv@bmstu.ru

Поступила в редакцию 11.12.2019 г.
Принята к публикации 27.03.2020 г.

В статье рассмотрена динамика вновь разработанного мобильного робота с механизмом вертикального перемещения на магнитных гусеничных движителях. С учетом анализа современных решений в области роботов вертикального перемещения была предложена оригинальная кинематическая схема движения механизма вертикального перемещения, позволяющая реализовать ряд критических преимуществ по сравнению с текущими схемами. Проведенные натурные эксперименты доказали эффективность заложенных в конструкцию теоретических решений. Разработанный робот вертикального перемещения может быть использован в качестве платформы сервисного оборудования для обслуживания и диагностики сложных металлоконструкций, в том числе в экстремальных условиях – корпуса кораблей, мостовые и доковые конструкции.

Ключевые слова: робот вертикального перемещения, гусеничный движитель, магнитное зацепление, механизм подвески

DOI: 10.31857/S0235711920040136

В настоящий момент и в ближайшей перспективе обслуживание металлоконструкций из магнитных материалов является актуальной проблемой в различных инженерных отраслях. При этом ключевым направлением к рационализации данного процесса является применение перспективных робототехнических комплексов с возможностью вертикального перемещения. Подобные робототехнические средства используются в таких ответственных операциях, как диагностика нефтяных цистерн [1], трубопроводов [2], кораблей [3] и прочих магнитных металлоконструкций сложной пространственной конфигурации.

Данное исследование посвящено локомотии вновь разработанного мобильного робота вертикального перемещения на постоянных магнитных движителях, предназначенного для проведения локальных работ на магнитных металлоконструкциях сложной пространственной конфигурации. При этом были решены такие задачи, как: анализ перспективных решений в современных мобильных роботах вертикального перемещения на основе магнитной силы, формирование концепции эффективного механизма вертикального перемещения с учетом специальных требований, а также проведение экспериментальных исследований разработанного прототипа. Применяются такие методы, как построения эффективной кинематики [4, 5] и специальные приложения в системах управления мобильными роботами [6–8].

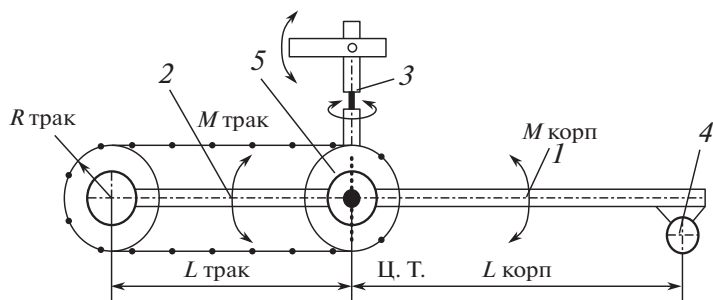


Рис. 1. Устройство механизма вертикального перемещения.

Рассмотрим подробнее применение мобильных робототехнических комплексов в задачах корабельного обслуживания.

Анализ перспективных решений. Современное корабельное обслуживание включает в себя следующий цикл задач: кренингование — очистка днища корабля от раковин, его диагностика внешнего состояния, а также покраска и нанесение специальных покрытий. Осуществлять данные операции возможно, как на сухом доковании, так и в перспективе на обычной стоянке судна. Для решения данных задач постепенно начинают использовать автоматизированные робототехнические средства [9], ключевым при создании которых является механизм перемещения по вертикальным поверхностям. При этом широко распространено построение механизмов на основе таких физических принципов, как постоянная и переменная магнитные силы [10], вакуумный прижим [11] и иные, более экзотические методы. Реализуемая в этих схемах динамика базируется как на гусеничных [12–15], так и на специальных колесных движителях [15–18]. При этом наибольшее распространение и, как следствие, глубину проработки, получили механизмы на колесных движителях с постоянными магнитами [19–23], обладающие такими преимуществами, как простота конструкции и управления. Однако при этом они имеют существенные эксплуатационные недостатки, такие как невозможность контроля силы магнитного прижима и малое пятно контакта колесного движителя. Эти недостатки существенно ограничивают применение и автономность всего комплекса корабельного обслуживания в силу сложности и загрязненности поверхности днища кораблей.

На основе описанных предпосылок была разработана концепция механизма вертикального перемещения.

Концепция механизма вертикального перемещения. Общая схема разработанного механизма вертикального перемещения представлена на рис. 1.

Корпус-хвост 1 с шаровыми опорами 4 закреплен с гусеничными модулями 2 механизмом подвески 5, над механизмом подвески закреплен манипулятор 3. Динамическая схема описана на рис. 2.

Путем подбора конструктивных параметров, координаты центра тяжести перенесены максимально близко к оси крепления гусеничных модулей с корпусом-хвостом, над которой также расположена поворотная платформа, что улучшает балансировку механизма при перемещении по неровным поверхностям, а также позволяет реализовать в дальнейшем механизм дополнительной компенсации реакции от предустановленного манипулятора.

На рис. 2 показаны фазы изменения кинематического шаблона при преодолении вертикального препятствия. В ходе преодоления вертикального препятствия гусеничные модули начинают движение по горизонтальной поверхности (рис. 2а), фиксируемой управляемым электромагнитом. При подходе к препятствию благодаря полусво-

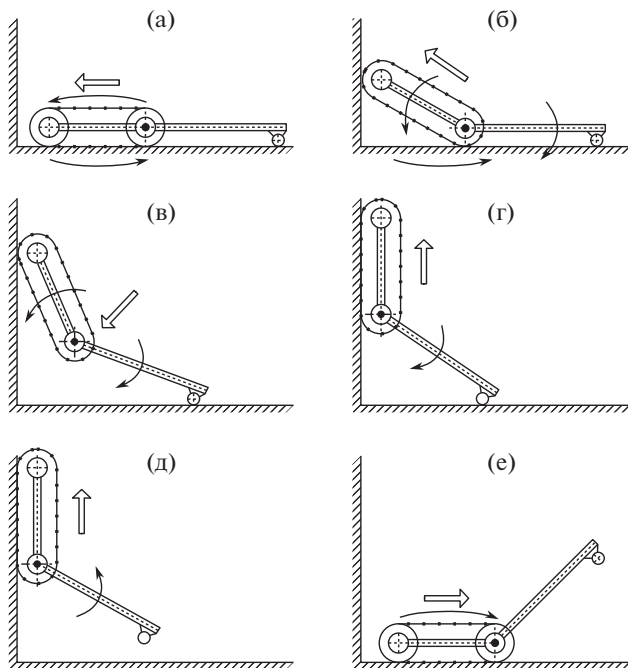


Рис. 2. Схемы фаз преодоления вертикального препятствия.

бодному вращению гусеничные модули прижимаются к вертикальной поверхности (рис. 2б), усилие прижатия к стене создается за счет механизма подвески, работающего за счет магнитного сопротивления проворачиваемых гусениц, в месте соединения гусеничных модулей с силовыми приводами.

При дальнейшем движении по стене пассивный корпус-хвост создает момент (рис. 2в) для дополнительного прижимающего усилия передней части гусеничных модулей. При полном переходе на вертикальную поверхность (рис. 2г) корпус-хвост создает дополнительный рычаг, работающий в качестве механизма дополнительной стабилизации устанавливаемой полезной нагрузки. Во время реверсивного движения по вертикальной поверхности (рис. 2д) корпус-хвост поднимается за счет срабатывания механизма подвески. Это позволяет реализовать демпфирование при спуске с вертикального препятствия, а также использовать механизм подвески как части кинематики позиционирования полезной нагрузки (рис. 2е).

Основа динамической модели. Описание динамики отдельного гусеничного движителя с помощью уравнений Лагранжа второго порядка для неголономной системы выглядит следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{q}} \right)^T - \left(\frac{\partial E}{\partial q} \right)^T = Q + J^T(q) \lambda,$$

где $E = E(q, \dot{q})$ – кинетическая энергия системы; q – обобщенный вектор координат; Q – обобщенный вектор сил; J – Якобиан; λ – множитель Лагранжа.

Кинетическая энергия системы определяется как сумма кинетических энергий отдельных элементов робота

$$E = E_R + E_{G1} + E_{G2},$$

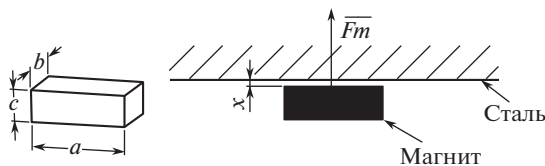


Рис. 3. Взаимодействия магнита со стальной поверхностью.

где E_R – кинетическая энергия корпуса; E_{G1} и E_{G2} – кинетическая энергия гусеничных движителей.

Рассмотрим схему взаимодействия единичного магнита с поверхностью.

Система магнитного притяжения содержит прямоугольные магниты, расположенные внутри гибкой гусеницы. Сила притяжения одного прямоугольного магнита размером $a \times b \times c$, установленного на определенном расстоянии от стальной пластины, определяется формулой

$$Fm = \frac{AB_x^2}{\mu},$$

где A – площадь плоскости, прилегающей (параллельной) к притягиваемому объекту; $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ Н/м – магнитная проницаемость вакуума; $B_x(T)$ – магнитная индукция.

Значение магнитной индукции рассчитывается по уравнению

$$B_x = \frac{B_r}{\pi} * \left(\begin{array}{c} a \tan \left(\frac{ab}{2x\sqrt{4x^2 + a^2 + b^2}} \right) \\ a \tan \left(\frac{ab}{2(c+x)\sqrt{4(c+x)^2 + a^2 + b^2}} \right) \end{array} \right),$$

где B_r – остаток намагниченности, отличительная особенность магнитного материала.

На основе данной модели проведен расчет минимально необходимого числа магнитов в составе двух гусеничных модулей для обеспечения эффективного перемещения массы полезной нагрузки не более 2 кг. При размере магнитов $20 \times 5 \times 5$ мм для сохранения квазистатического баланса необходимо 16 магнитов, т.е. по 8 магнитов в контакте с поверхностью в процессе перемещения. Исходя из этого общее число магнитов на один гусеничный модуль составило 24 шт.

Полученные расчетным путем параметры гусеничных модулей были включены как исходные данные к созданию прототипа.

Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментальных исследований был рассмотрен прототип, реализующий полный спектр закладываемых функциональных решений [6]. Внешний вид механизма вертикального перемещения представлен на рис. 4.

При этом особенность взаимного положения гусеничных движителей и корпуса хвоста при перемещении вперед при крейсерской скорости (рис. 4а), форсажной ско-

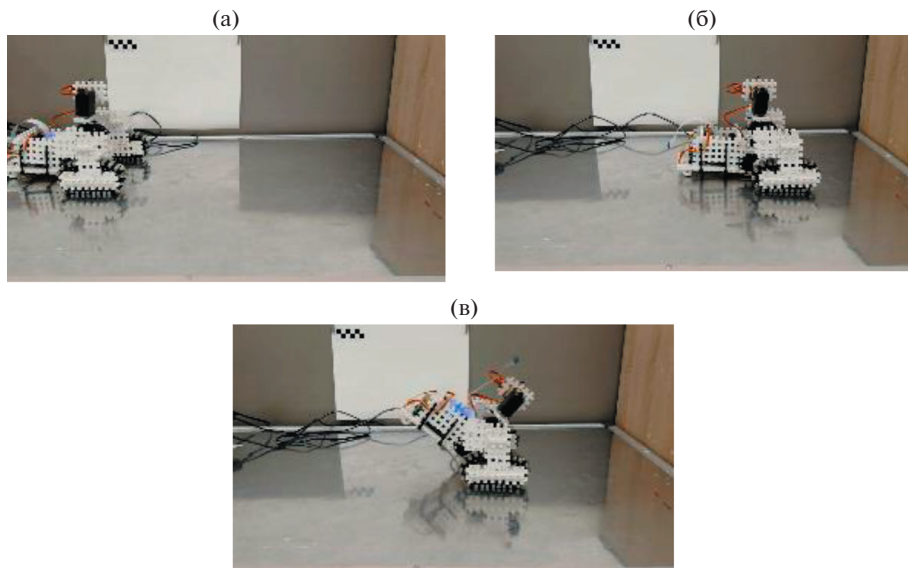


Рис. 4. Прототип механизма вертикального перемещения.

рости (рис. 4б) и перемещении назад (рис. 4в) отличается в силу нелинейной составляющей функционирования механизма подвески.

На основе динамической модели проведен синтез технических параметров прототипа и гусеничных модулей, представленных в табл. 1, 2 соответственно.

Таблица 1. Технические параметры разработанного прототипа

| Характеристика | Величина | Размерность |
|----------------------|----------|-------------|
| Масса | 0.8 | кг |
| Длина | 215.0 | мм |
| Высота | 150.0 | мм |
| Ширина | 200.0 | мм |
| Грузоподъемность | ~2.0 | кг |
| Скорость крейсерская | 0.2 | м/с |
| Скорость форсажа | 0.5 | м/с |

Таблица 2. Технические характеристики гусеничного модуля

| Характеристика | Величина | Размерность |
|-----------------------------------|----------|-------------|
| Масса | 0.215 | кг |
| Длина | 110.0 | мм |
| Высота | 85.0 | мм |
| Ширина | 56.0 | мм |
| Напряжение питания электромагнита | 5.0 | В |
| Потребляемый ток | 0.5 | А |
| Усилие на отрыв | 10.0 | Н |

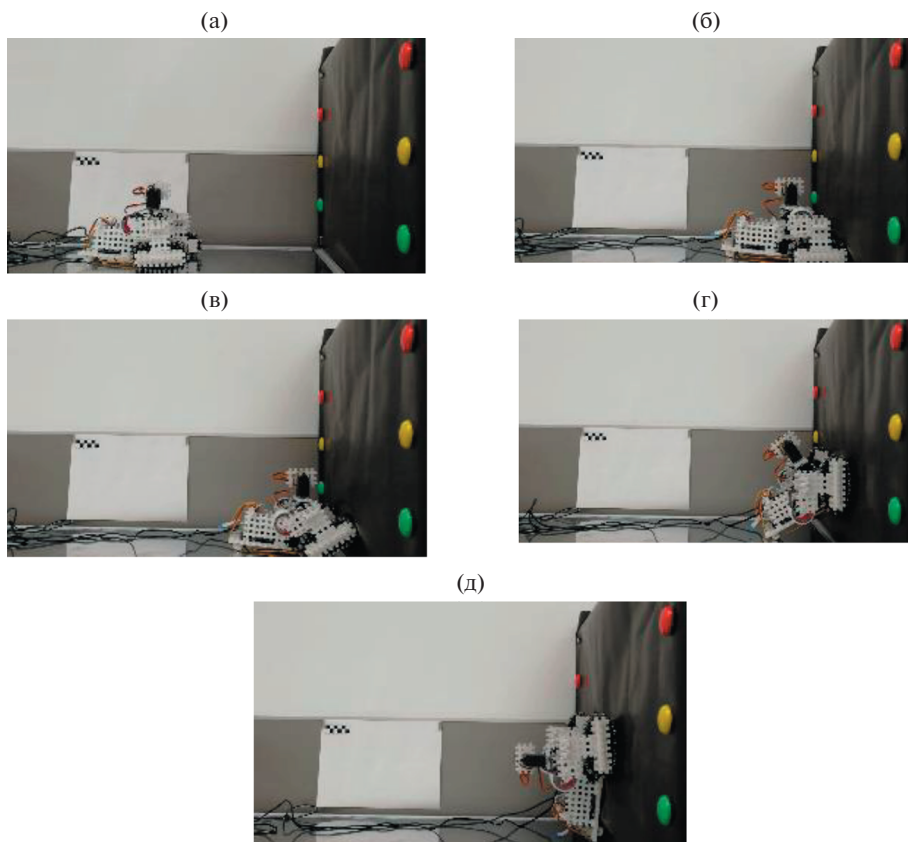


Рис. 5. Фазы функционирования механизма вертикального перемещения.

В результате обработки экспериментальных данных были получены действующие фазы действия заложенного в конструкцию кинематического шаблона при преодолении вертикального препятствия, представленные на рис. 5.

В ходе преодоления вертикального препятствия гусеничные модули начинают движение на горизонтальной поверхности (рис. 5а), фиксируемую управляемым электромагнитом. При подходе к препятствию благодаря полусвободному вращению гусеничных модулей прижимаются к вертикальной поверхности (рис. 5б), усилие прижатия к стене создается за счет механизма подвески, работающего за счет магнитного нелинейного взаимодействия гусеничных трактов, усилие которого приведено к оси крепления гусеничных модулей с силовыми приводами и корпусом (рис. 5в).

При дальнейшем движении по стене активный корпус-хвост создает момент (рис. 5г) для дополнительного прижимающего усилия передней части гусеничных модулей за счет того же механизма подвески. При полном переходе на вертикальную поверхность (рис. 5д) корпус-хвост создает дополнительную опору, работающую в качестве механизма дополнительной компенсации усилия при применении установленного манипулятора.

Заключение. Разработанная кинематическая схема позволила реализовать относительно простую и эффективную конструкцию механизма вертикального перемещения. Синтезированные с помощью динамической модели технические параметры

прототипа были апробированы в ходе экспериментальных исследований и соответствуют техническому заданию. Полученные в ходе расчета проектные параметры в части количества магнитов для гусеничных модулей были апробированы в ходе экспериментальных исследований. Результаты имеют существенное значение в рамках дисциплины проектирования мобильных робототехнических комплексов вертикального перемещения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shen W.* Proposed wall climbing robot with permanent magnetic tracks for inspecting oil tanks / W. Shen, Gu J., Shen Y. // IEEE International Conference Mechatronics and Automation. IEEE, 2005. V. 4. P. 2072.
2. *Tâche F.* Adapted magnetic wheel unit for compact robots inspecting com-plex shaped pipe structures / Tâche F., Fischer W., Moser R., Mondada F., & Siegwart R. // IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics. IEEE, 2007. P. 1.
3. *Tavakoli M.* OmniClimbers: Omni-directional magnetic wheeled climbing robots for inspection of ferro-magnetic structures/ M. Tavakoli, C. Viegas, L. Marques, J.N. Pires, J.N., A.T. De Almeida // Robotics and Au-tonomous Systems. 2013. V. 61. № 9. P. 997.
4. *Pupkov K.A., Kovalchouk A.K., Kulakov B.B.* Usage of Biological Prototypes for Kinematical Scheme Construction of Modern Robots // IFAC Proceedings Volumes. 2009. V. 42. № 4. P. 1838.
5. *Kulakov D.B. et al.* Hydraulic bipedal robots locomotion mathematical modeling // Procedia Engineering. 2015. V. 106. P. 62.
6. *Yudin A., Semyonov M.* Distributed Control System for a Mobile Robot: Tasks and Software Architecture // International Conference on Research and Education in Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. P. 321.
7. *Kozov A.V., Volosatova T.M., Vukolov A.Y.* Structural Obstacle Recognition Method and Its Application in Elevated Terrain Objects Search // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2018. P. 1.
8. *Volodin S.Y., Mikhaylov B.B., Yuschenko A.S.* Autonomous robot control in partially undetermined world via fuzzy logic // Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Springer, Cham, 2014. P. 197.
9. *Faal S.G.* Design and Analysis of a Robotic Duct Cleaning System: – Sharif University of Technology, International Campus, Kish, 2011.
10. *Chu B. et al.* A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion // International journal of precision engineering and manufacturing. 2010. V. 11. № 4. P. 633.
11. *Eich M. et al.* A robot application for marine vessel inspection // Journal of Field Robotics. 2014. V. 31. №. 2. P. 319.
12. *Eich M., Vögele T.* Design and control of a lightweight magnetic climbing robot for vessel inspection // 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). IEEE. 2011. P. 1200.
13. *Fan J. et al.* An underwater robot with self-adaption mechanism for cleaning steel pipes with variable diameters // Industrial Robot: An International Journal. 2018. V. 45. № 2. P. 193.
14. *Fondahl K. et al.* A magnetic climbing robot for marine inspection services // Proceedings of the 11th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. Technische Universit at Hamburg-Harbur, 2012. P. 92.
15. *Tâche F. et al.* Adapted magnetic wheel unit for compact robots inspecting complex shaped pipe structures // IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics. IEEE, 2007. P. 1.
16. *Wang X. et al.* Optimum dynamic modeling of a wall climbing robot for ship rust removal // International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Springer, Berlin. Heidelberg. 2009. P. 623.

17. *Kermorgant O.* A magnetic climbing robot to perform autonomous welding in the shipbuilding industry // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018. V. 53. P. 178.
18. *Tavakoli M. et al.* OmniClimbers: Omni-directional magnetic wheeled climbing robots for inspection of ferromagnetic structures // *Robotics and Autonomous Systems*. 2013. V. 61. № 9. P. 997.
19. *Yanqiong F., Libo S.* Design and analysis of modular mobile Robot with magnetic wheels. 2008.
20. *Zhang Y. et al.* Design and optimization of magnetic wheel for wall and ceiling climbing robot // 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE. 2010. P. 1393.
21. *Fondahl K.* A magnetic climbing robot for marine inspection services / K. Fondahl, M. Eich, J. Wollenberg, F. Kirchner // *Proceedings of the 11th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*. – Technische University at Hamburg-Harbur, 2012. P. 92.
22. *Zhang Y.* Design and optimization of magnetic wheel for wall and ceiling climbing robot / Y. Zhang, T. Dodd, K. Atallah, I. Lyne // 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2010. P. 1393.
23. *Аверьянов Е.В.* Основные аспекты создания отечественных технологических мобильных роботов вертикального перемещения / Под ред. Е.В. Аверьянов, Б.Б. Коваленко, А.В. Костин, Е.И. Пелепас, Ю.В. Подураев, С. Ф. Яковлев // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 8. С. 23.