

УДК 621.865:8

Э. В. Алиев, кандидат технических наук
А. Х. Алиева, соискатель
Л. Р. Алиева, соискатель
А. Н. Домбрачев, кандидат технических наук
В. С. Клековкин, доктор технических наук, профессор
М. А. Разживина, соискатель
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МЕХАНИКА КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА СФЕРОРОБОТА

Описываются варианты роботов сферического типа с различными конструкциями механической части, и на их основе предлагается новая компоновочная схема, свободная от ряда ограничений, присущих перечисленным устройствам. Показаны ситуации, в которых новое устройство будет предпочтительнее описанных. Представлены и другие компоновочные схемы, использующие предлагаемый принцип комбинирования их основных движущих частей. Робот предложенной конструкции сможет работать в трех независимых режимах движения, причем как по отдельности, так и в сочетании.

Ключевые слова: робот, omnimobility, привод, гироскоп, сфера.

В последнее время во многих сферах производства происходит внедрение автоматизации, робототехники, интеллектуальных средств управления процессами. Это позволяет повысить стабильность качественных показателей выполнения операций, снизить длительность производственных циклов, снизить человеческие нагрузки в части тяжелых, рутинных и опасных видов работ.

Среди всего многообразия робототехнических устройств к отдельному классу можно отнести сферороботов. Сфероробот представляет собой транспортное устройство, состоящее из внешней оболочки – колеса, преимущественно сферической формы и расположенных внутри него движущихся частей, которые приводят его в движение. Сферороботы благодаря герметичности оболочки могут находить применение при повышенной влажности, запыленности и химической активности внешней среды. Могут использоваться для сторожевой деятельности, контроля, разведки, диверсий.

Первые описания такой транспортной системы были проведены в конце девятнадцатого века [1, 2], где исследовались отличия динамики шара с гироскопом, движущегося по ровной поверхности без скольжения. В США были запатентованы несколько изобретений подобных механизмов – пассажирский вариант [3], управляемые игрушки [4]. Позднее была проведена классификация таких устройств по применяемым физическим принципам в их кинематических схемах [5, 6]. В результате устройства были разделены на три группы: со смещением центра масс [7–14], с изменением момента импульса [15–19], с изменением формы внешней оболочки [20].

Рассмотрим их подробно.

Из уровня техники известен робот-шар (RU2315686C1, МПК В25J9/00, В25J11/00, опубл. 27.01.2008), содержащий полую сферу, установленные внутри сферы двигатели, зафиксированные таким образом, что их геометрические оси перпендикулярны друг другу и пересекаются в геометрическом центре сферы, один из двигателей установлен на внутренней поверхности сферы и соединен посредством каркаса,

выполненного в форме четверти окружности, со вторым двигателем, установленным на свободном конце упомянутого каркаса и снабженным аналогичным каркасом, связанным с его валом.

Также известен робот-шар (RU106215U1, МПК В62D57/00, опубл. 10.07.2011), состоящий из корпуса, выполненного в виде полого шара, содержащего внутренний каркас, соединенный с корпусом шарниром, закрепленный на внутреннем каркасе первый и второй электроприводы, при этом вал первого двигателя соединен с корпусом, а на концах вала второго электродвигателя закреплены дебалансы.

Рассмотренные выше технические решения принято относить к механизмам, обеспечивающим движение, посредством смещения центра масс внутри робота или к системам маятникового типа.

Общим недостатком устройств, реализующих такой способ перемещения, является то, что применяемые в них кинематические схемы снижают маневренность роботов, не позволяя им осуществлять движение по всем возможным траекториям без предварительного перемещения подвижных масс внутри сферической оболочки.

Из уровня техники известен также автономный катящийся робот (US6414457B1, МПК В25J 5/00, опубл. 2.07.2002), содержащий полую сферу, имеющую гладкую наружную и внутреннюю поверхности, не менее двух роторов, установленных внутри сферы в диаметральной направленности так, что геометрические оси роторов пересекаются в геометрическом центре сферы; передаточные механизмы, соединяющие диаметрально противоположные роторы, выполняющие также роль элементов каркаса.

Похожий механизм реализован в патенте (RU149882U1, МПК В25J5/00, опубл. 20.01.2015). Он содержит полый корпус, состоящий из полусфер, каркас в виде экваториального диска, установленный в разъем полусфер, роторные движители, установленные в окнах экваториального диска с осями вращения роторов, расположенных под углом 90° по отношению друг к другу, и точкой пересечения осей движителей, находящихся на линии диаметра корпу-

са, расположенной перпендикулярно оси экваториального диска.

Рассмотренные выше два технических решения относятся к механизмам с изменением момента импульса или инерционным типам сферических роботов. К недостатку конструкции первого из них следует отнести удаленное расположение роторов от центра масс, что увеличивает момент инерции катящегося робота. Общим недостатком роботов является их ограниченные возможности при продолжительном передвижении вверх по наклонной плоскости и преодолении глубоких впадин, вследствие малого момента импульса роторов, ограниченного их скоростью и моментом инерции.

Сферороботы третьей группы реализуются пока реже остальных, поскольку сложнее по конструкции, менее технологичны, менее надежны.

Оригинальный подход описывается в работе [21]. Так, автор предлагает выполнить оболочку двухслойной и обеспечить вращение внутренней оболочки относительно внешней при помощи двух омниколес. Прежде омниколесные схемы реализовывались в сферороботах, но относились ко второй группе, то есть использовали смещение центра масс. В данном же случае автор рассуждает лишь об изменении момента импульса. Однако его конструкцию можно слегка переделать, нарушить баланс внутренней оболочки, и она станет относиться к первой группе вышеупомянутой классификации. К сожалению, сочетать два принципа в предложенной им схеме не представляется возможным.

Предложенная нами конструкция предполагает реализацию трех принципов движения в одном устройстве, причем один из них, прецессионный, ранее не описывается, что может расширить сферы применения данных устройств.

Технической задачей, на решение которой направлено предлагаемое устройство, является повышение проходимости сфероробота и обеспечение возможности его длительного непрерывного движения вверх по наклонным поверхностям при одновременном сохранении быстродействия и точности маневрирования.

Указанная задача решена за счет того, что комбинированный сфероробот содержит корпус, выполненный в виде двух соединенных полусфер, при этом на внутренней поверхности одной из полусфер жестко закреплен маневровый двигатель с установленным на его роторе валом, на торце которого, перпендикулярно его продольной оси, в геометрическом центре корпуса сфероробота закреплен стержень. При этом на стержне равноудаленно от центра вала и диаметрально противоположно друг другу установлены два главных движителя, выполненных в виде дебалансов, а на торцах стержня установлены первый и второй вспомогательные движители, выполненные в виде гироскопов.

Положительным техническим результатом, который обеспечивается раскрытыми выше конструктивными признаками сфероробота, является повышение мощности и маневренности устройства за счет со-

вмещения в его конструкции маятников, выполненных в виде дебалансов и вспомогательных двигателей, выполненных в виде гироскопов.

Конструкция сфероробота поясняется рисунками, где на рис. 1 показан сфероробот в разрезе; на рис. 2 – внешний вид движителей сфероробота базовой конфигурации в изометрии; на рис. 3 – устройство главного движителя; на рис. 4 – устройство вспомогательного движителя; на рис. 5 – внешний вид движителей сфероробота максимально возможной комплектации в изометрии.

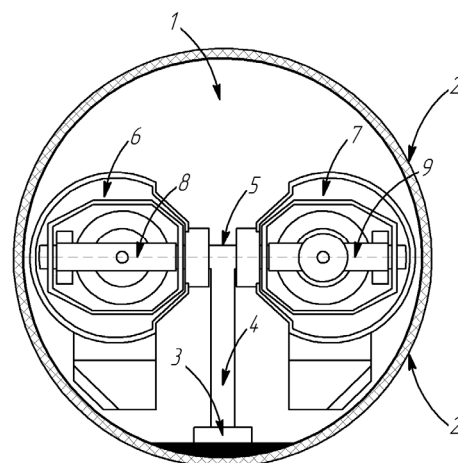


Рис. 1. Комбинированный сфероробот

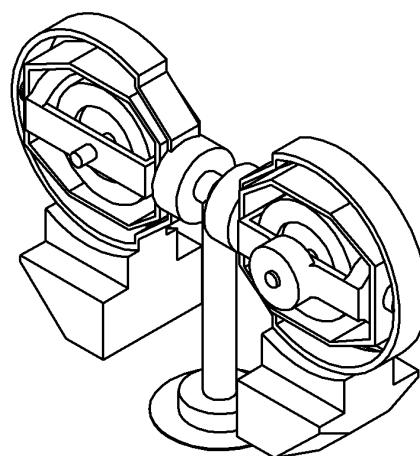


Рис. 2. Внешний вид движителей

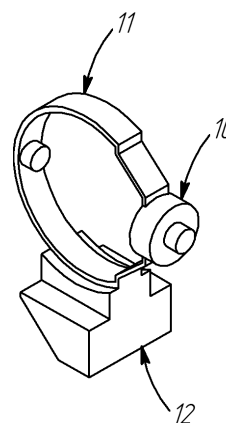


Рис. 3. Устройство главного движителя

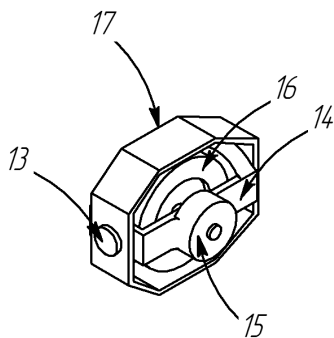


Рис. 4. Устройство вспомогательного двигателя

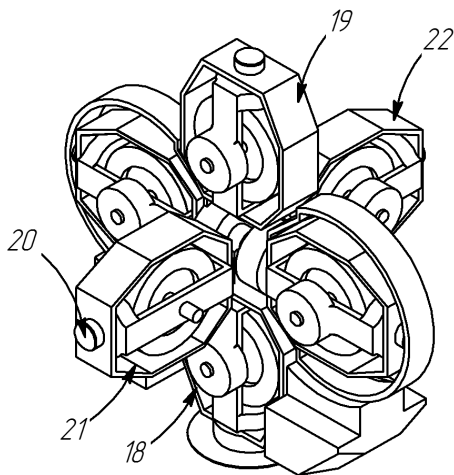


Рис. 5. Внешний вид двигателей сфероробота максимальной возможной комплектации в изометрии

Сфероробот устроен следующим образом.

Корпус 1 выполнен в виде двух соединенных полусфер 2, на внутренней поверхности одной из них жестко закреплен маневровый двигатель 3 с установленным на его роторе валом 4, на торце которого перпендикулярно его продольной оси в геометрическом центре корпуса сфероробота закреплен стержень 5.

На стержне 5 равноудаленно от центра вала 4 и диаметрально противоположно друг другу, установлены два главных двигателя 6 и 7, выполненных в виде дебалансов, а на торцах стержня установлены первый и второй вспомогательные двигатели 8 и 9, выполненные в виде гироскопов.

Каждый из главных двигателей робота 6 и 7, выполненных в виде дебалансов, включает в себя двигатель с внешним ротором 10, на котором закреплено кольцо 11, поперечная ось которого совпадает с осью стержня, а в нижней части кольца размещен груз 12.

Каждый из вспомогательных двигателей 8 и 9, выполненных в виде гироскопов, содержит двигатель коррекции 13 с закрепленной на его роторе рамкой 14, внутри которой на роторе двигателя основного вращения 15 установлен маховик 16, при этом ось вращения маховика перпендикулярна оси ротора двигателя коррекции. Вспомогательные двигатели могут также дополнительно оснащаться рамами жесткости 17.

Для дополнительного увеличения мощности сфероробота вал 4 может быть выполнен комбинированным, состоящим из двух секций. При этом первая из секций представляет собой третий вспомогательный двигатель 18, а вторая – цилиндр; ротор двигателя коррекции вспомогательного двигателя 18, предпочтительно, соосен ротору маневрового двигателя 3; на верхнем торце вала 4 в этом случае, вдоль его продольной оси, установлен четвертый вспомогательный двигатель 19, ротор двигателя коррекции которого, предпочтительно, соосен валу 4.

Для достижения максимальной мощности в конструкции сфероробота предусмотрена возможность установки на верхнем торце вала 4, перпендикулярно стержню 5, дополнительного стержня 20, на торцах которого установлены пятый и шестой вспомогательные двигатели 21 и 22, оси роторов двигателей коррекции которых, предпочтительно, соосны дополнительному стержню 20.

В качестве двигателей, установленных на основных двигателях робота, а также двигателей коррекции на вспомогательных, в конструкции устройства целесообразно использовать шаговые двигатели, так как они имеют известные преимущества, важные для реализации указанных узлов: фиксированный угол поворота и возможность организации системы контролируемых перемещений, высокий крутящий момент на низких оборотах, а также полная повторяемость при позиционировании и наличие момента удержания.

Двигатели же основного движения, на роторе которых установлены маховики, целесообразно выполнить асинхронными, так как для эффективности их работы важен высокий крутящий момент.

В качестве системы управления сферороботом целесообразно использовать любой известный из уровня техники микроконтроллер, имеющий в своем составе достаточное количество программируемых линий ввода-вывода, а также универсальный синхронно-асинхронный приемопередатчик для приема команд оператора.

Сфероробот работает следующим образом.

В режиме маятникового движения главные двигатели 6 и 7 приводят в движение совместно, с вращением их двигателей по часовой или против часовой стрелки, смещая массу грузов 12, относительно горизонтальной оси сфероробота, что обеспечивает его передвижение в прямом и обратном направлении соответственно. Для обеспечения возможности выполнения поворотов робота вокруг своей оси при этом используют маневровый двигатель.

В режиме роторного движения грузы двигателей 6 и 7 с помощью двигателей 10 приводят в диаметрально противоположное положение и удерживают их в нем. Далее с помощью двигателей коррекции 13, вращая рамки 14, устанавливают оси вращения маховиков 16 в нужное положение и включают двигатели основного движения 15.

В режиме прецессионного движения необходимо, предварительно раскрутив с помощью двигателей основного движения 15 маховики 16, начать отк-

нять оси их вращения с помощью рамок 14, управляя при этом двигателями коррекции 13. Во время поворота рамок 14 возникнет прецессия гироскопа, при этом создаваемый им момент сил за счет реакции опор передает движение сферороботу, в момент останова вращения рамок прецессия прекратится. Благодаря безынерционной прецессии, последний из описанных режимов работы сфероробота применим для реализации его прецизионного маневрирования.

Заключение

Несмотря на то, что сферороботы находят все более разнообразные сферы применения. Например, робот-куб [22–24] планируется использовать при освоении планет со слабой гравитацией; устройства со сферической оболочкой благодаря жесткой форме смогут погружаться на значительные глубины океанов; нашли свое применение конструкции с прозрачной оболочкой, сетчатые конструкции и т. д., однако внедрению этих устройств мешают ограничения, изначально заложенные в их концепциях. Устройствам маятникового типа свойственна недостаточная управляемость и ограничения на скорость перемещения. В устройствах инерционного типа отмечается малая эффективность привода: ряд опытных образцов даже не смогли сдвинуться с места из-за трения качения.

Таким образом, предлагаемая конструкция, способная сочетать несколько принципов для обеспечения движения, будет более энерговооруженной и управляемой и сможет, на наш взгляд, уменьшить ряд недостатков, присущих предшественникам по отдельности.

Библиографические ссылки

1. Бобылев Д. К. О шаре с гироскопом внутри, катящемся по горизонтальной плоскости без скольжения // Матем. сб. – 1892. – Т. 16, № 3. – С. 544–581.
2. Жуковский Н. Е. О гироскопическом шаре Д. К. Бобылева // Собр. соч. : Т. 1. – М. ; Л. : Гостехиздат, 1948. – С. 275–289.
3. Ylikorpi T., Suomela J. Ball-shaped robots // Climbing and walking robots: Towards new applications / Н. Zhang (Ed.). Vienna: InTech, 2007. P. 235–256. См. также: Иликорпи Т., Суомела Ю. Сферические роботы // Мобильные роботы: Робот-колесо и робот-шар / А. В. Борисов, И. С. Мамаев, Ю. Л. Караваев. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2013. – С. 29–50.
4. Easterling J. M. Toy: Patent US № 2 949 696A (Aug 23, 1960).
5. Кулин А. А., Караваев Ю. Л., Клековкин А. В. Кинематическая модель управления высокоманевренным мобильным сферороботом с внутренней омниколесной платформой // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10, № 1. – С. 113–126.
6. Иванов А. П. Об управлении роботом-шаром при помощи двух омниколес // Нелинейная динамика. – 2015. – Т. 11, № 2. – С. 319–327.
7. Bicchi A., Balluchi A., Prattichizzo D., Gorelli A. Introducing the «Sphericle»: An experimental testbed for research and teaching in nonholonomy // Proc. IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation (Albuquerque, N.M., April 21–27, 1997): Vol. 3, pp. 2620–2625.
8. Michaud F., Caron S. Roball, the rolling robot // Auton. Robots, 2002, vol. 12, pp. 211–222.
9. Kaba la M., Wnuk M. Design and construction of RoBall, a spherical, nonholonomic mobile robot: Raport serii PRE nr 48/2004. Wroc_law: Instytut Cybernetyki Technicznej, 2004. 18 pp.
10. Mukherjee R., Minor M. A., Pukrushpan J. T. Simple motion planning strategies for spherobot: a spherical mobile robot // Proc. of the 38th IEEE Conf. on Decision and Control (Phoenix, Ariz., Dec 1999): Vol. 3, pp. 2132–2137.
11. Javadi A., Mojabi P. Introducing glory: A novel strategy for an omnidirectional spherical rolling robot // J. Dyn. Syst. Meas. Control Trans. ASME, 2004, vol. 126, no. 3, pp. 678–683.
12. Alves J., Dias J. Design and control of a spherical mobile robot // J. Syst. Control Eng., 2003, vol. 217, pp. 457–467.
13. Иванова Т. Б., Пивоварова Е. Н. Динамика и управление сферическим роботом с осесимметричным маятниковым приводом // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9, № 3. – С. 507–520.
14. Halme A., Schonberg T., Wang Y. Motion control of a spherical mobile robot // Proc. of the 4th IEEE Internat. Workshop on Advanced Motion Control (Mie, Japan, 1996): Vol. 1, pp. 259–264.
15. Bhattacharya S., Agrawal S. Spherical rolling robot: A design and motion planning studies // IEEE Trans. Robot. Autom., 2000, vol. 16, no. 6, pp. 835–839.
16. Jia Q., Zheng Y., Sun H., Cao H., Li H. Motion control of a novel spherical robot equipped with a flywheel // ICIA'09: Internat. Conf. on Information and Automation (Zhuhai, Macau, 2009), pp. 893–898.
17. Schroll G. C. Design of a spherical vehicle with flywheel momentum storage for high torque capabilities: Dissertation (bachelor of science), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 2008.
18. Борисов А. В., Кулин А. А., Мамаев И. С. Как управлять шаром Чаплыгина при помощи роторов: 2 // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9, № 1. – С. 59–76.
19. Joshi V. A., Banavar R. N. Motion analysis of a spherical mobile robot // Robotica, 2009, vol. 27, no. 3, pp. 343–353.
20. Sugiyama Y., Hirai S. Crawling and jumping by a deformable robot // Int. J. Robot. Res., 2006, vol. 25, pp. 603–620.
21. Иванов А. П. Об управлении роботом-шаром при помощи двух омниколес // Нелинейная динамика. – 2015. – Т. 11, № 2. – С. 319–327.
22. Самосборные конструкции из движущихся кубиков // Geektimes.ru: основан в 2014 году. Издателем проекта является компания «ТМ». – URL: <https://geektimes.ru/post/196570/> (дата обращения: 05.12.2016).
23. Ivanov A. P. On the impulsive dynamics of M-blocks // Regul. Chaotic Dyn., 2014, vol. 19, no. 2, pp. 214–225.
24. Cubli: роботизированный куб с почти совершенной балансировкой // Geektimes.ru: основан в 2014-м году. Издателем проекта является компания «ТМ». – URL: <https://geektimes.ru/post/206980/> (дата обращения: 05.12.2016).

* * *

E. V. Aliev, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

A. H. Alieva, Applicant, Kalashnikov ISTU

L. R. Alieva, Applicant, Kalashnikov ISTU

A. N. Dombrachev, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

V. S. Klekovkin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

M. A. Razzhivina, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

Mechanics of Combined-Type Spherical Robot

The paper describes the versions of spherical-type robots with various designs of the mechanical part and a new layout scheme is proposed on their basis which is free from many limitations inherent in the listed devices. Situations are shown in which the new device will be preferable than the described ones. Other layout schemes are also presented which implement the proposed principle of combining their main moving parts. The robot of the proposed design can operate in three independent modes of motion, both separately and in combination.

Keywords: robot, omnimobility, drive, gyroscope, sphere.

Получено: 13.12.16