

УДК 621.865.8(031)

Ю.Н. КУЗНЕЦОВ, М.Н. ПОЛИЩУК

Национальный технический университет Украины «КПИ им. И. Сикорского»

ОБЛАСТИ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ

В работе изложен анализ современного уровня развития мобильных роботов, применимых для выполнения технологических операций на поверхностях произвольной ориентации. Освещена проблема создания и предложены новые направления синтеза конструкций роботов указанного типа применительно к областям их эксплуатации. Даны рекомендации по повышению энергетической эффективности мобильных роботов произвольной ориентации в технологическом пространстве.

Ключевые слова: мобильные роботы, шагающие механизмы, роботы вертикального перемещения, альпинистские роботы.

Ю. М. КУЗНЕЦОВ, М.М. ПОЛІЩУК

Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського»

ОБЛАСТИ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РОБОТІВ ДОВІЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ В ПРОСТОРІ

В роботі викладено аналіз сучасного рівня розвитку мобільних роботів, застосованих для виконання технологічних операцій на поверхнях довільної орієнтації. Освітлена проблема створення й запропоновані нові напрямки вдосконалення конструкцій роботів зазначеного типу стосовно до областей їх експлуатації. Надані рекомендації з підвищення енергетичної ефективності мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі.

Ключові слова: мобільні роботи, крокуючі механізми, роботи вертикального переміщення, альпіністські роботи.

Yu.N. KUZNETSOV, M.N. POLISHCHUK

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

AREAS OF PERSPECTIVE APPLICATION OF ROBOTS OF ARBITRARY ORIENTATION IN SPACE

In this paper, an analysis is given of the current level of development of mobile robots that are applicable for performing technological operations on surfaces of arbitrary orientation. The problem of creation is described and new directions of synthesis of designs of robots of the specified type are applied in relation to the areas of their operation. Recommendations are given to increase the energy efficiency of mobile robots of arbitrary orientation in the technological space.

Keywords: mobile robots, walking machines, robots of vertical movement, climbing robots.

Постановка проблеми

Технологические роботы произвольной ориентации (РПО) в пространстве, известные в ряде публикаций также как роботы вертикального перемещения, а в международных (англоязычных) изданиях – под термином Climber Robot (альпинистский робот), являются новой модификацией мобильных роботов, оснащенных средствами удержания робота на поверхности произвольной ориентации относительно горизонта технологического пространства. Создание данного вида робототехники находится на начальной стадии и продиктовано необходимостью выполнения технологических операций в экстремальных условиях, опасных для пребывания человека. Сложность разрешения данной проблемы состоит в том, что если в относительно традиционных мобильных роботах гравитационная сила оказывает содействие стабилизации их передвижению, то в случае роботов произвольной ориентации (способных перемещаться по стенам, потолкам, трубам произвольного наклона и т.п.) – наоборот, возникает необходимость преодоления гравитационной нагрузки для гарантированного удержания робота на произвольно ориентированной поверхности перемещения при выполнении технологических операций.

Процесс эволюции технических систем в области создания технологического оборудования, как правило, приводил к возникновению новых средств производства. Несмотря на то, что ко второй половине XX века научно-технической мыслью созданы достаточно надежные средства преодоления гравитационной силы в виде оборудования летательного и реактивного характера, способного быть

использованным в качестве транспорта, до настоящего времени отсутствуют промышленные образцы оборудования для непосредственного выполнения *контактных* технологических операций при одновременном преодолении сил гравитации

В условиях вызовов четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» [1] с ориентацией на искусственный интеллект и полную автоматизацию с применением роботов и робототехнических систем, средств информатизации и коммуникации, а также всего касающегося общества, бизнеса, производственных технологий и образования, главной проблемой создания мобильных роботов данного типа есть синтез конструкций и их приводов для преодоления дестабилизирующей гравитационной составляющей в совокупности рабочих динамических нагрузок транспортных и технологических операций в таких областях производственной деятельности как мониторинг промышленных объектов, монтаж и демонтаж строительных конструкций, ремонт и профилактическое обслуживание их компонентов.

Анализ последних исследований и публикаций

Теоретические и экспериментальные исследования по созданию роботов произвольной ориентации в пространстве начались относительно недавно – в последнем десятилетии XX века в странах Западной Европы, Японии, США, Кореи, Китая и России, где в системе институтов РАН серьёзные исследования на протяжении многих лет ведёт Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского [2, 3]. К сожалению, примеры отечественных разработок, равно как и публикаций (кроме авторских) к настоящему времени в данной области отсутствуют. Изложенный ниже анализ известных технических реализаций на уровне опытных образцов отображает взаимосвязь конструкций мобильных роботов с параметрами топологии объектов обслуживания. Более того, ниже приведенный анализ структур РПО показывает доминирующе влияние подсистем на энергетическое потребление робота произвольной ориентации, поскольку именно этот фактор определяет мощность, а значит и массу робота, т.е. силу его гравитационного притяжения, подлежащую преодолению.

Формулирование цели исследования

Целью работы было установление приоритетов влияния подсистем мобильных роботов на их энергетические затраты при выполнении различных технологических операций во взаимосвязи с параметрами топологии объектов обслуживания, а также определение наиболее эффективных областей эксплуатации роботов произвольной ориентации в пространстве.

Изложение основного материала исследования

В общем случае структура РПО (рис. 1) включает в себя подсистему управления, подсистему удержания на поверхности и перемещения, сенсоры анализа окружающей среды, систему питания и технологическое оснащение [4]. Сенсорная подсистема осуществляет связь робота с топологией технологического пространства. Последнее может быть представлено прямоугольной Декартовой X,Y,Z или сферической R,β,γ системами координат, точки которых достигаемы исполнительными органами робота радиусом R при углах их изгиба β, γ в зоне сервиса, определяемой углом α. Наибольшее энергопотребление присуще системам удержания и перемещения.

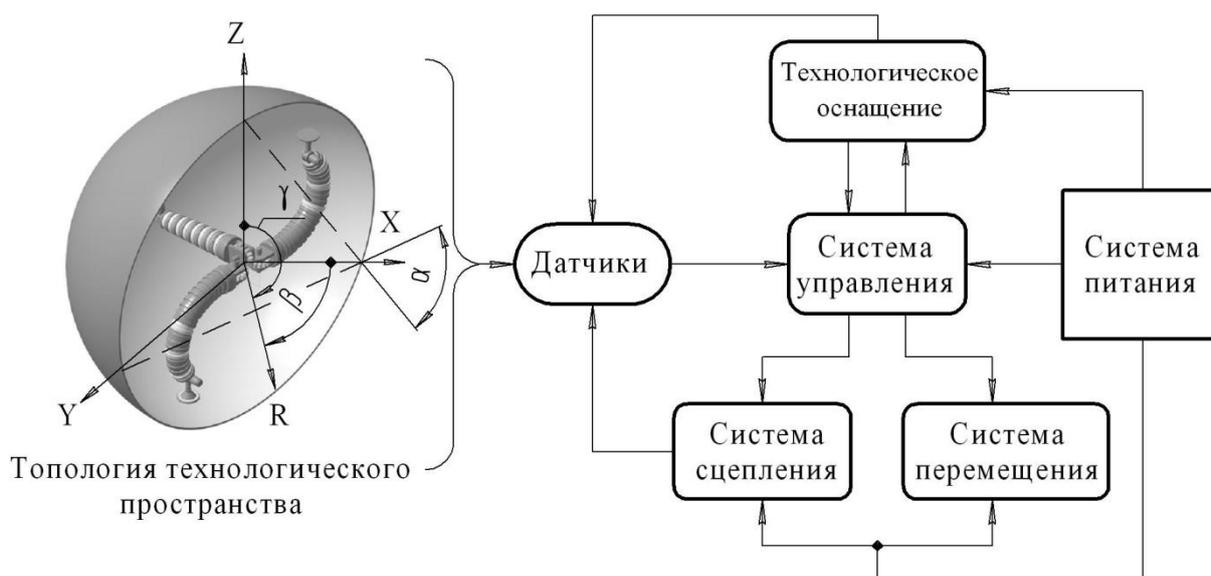


Рис. 1. Общая структура подсистем РПО

Изменение общей массы робота не имеет прямого влияния на энергетические затраты системы управления, датчиков и функциональных устройств, но существенно влияет на общую мощность его приводов. Важно подчеркнуть тот факт, что функциональные устройства определяются технологическим назначением робота, т.е. являются сменной его частью, а значит, в случаях необходимости расширения технологических возможностей, данная подсистема потребует автоматических стыковочных устройств и инструментальных накопителей. Последнее станет фактором увеличения массы, а значит и гравитационной силы, действующей на робот.

С целью установления приоритетов влияния на энергетические затраты, рассмотрим в первом приближении структуру подсистем движения робота и его сцепления с поверхностью перемещения (рис. 2). Подсистема приводов обеспечивает движение элементов конструкции робота в пространстве и непосредственно определяет вид трансмиссии робота. Причем выбор совокупности указанных приводов определяется видом системы координат: Декартовой прямоугольной, сферической, ангулярной и цилиндрической, т.е. системой координат технологического пространства. Как и в приложении к классическим роботам (стационарным и транспортным) целесообразно использовать электроприводы, обладающие большей способностью к гибкому программированию, чем пневматические приводы, и меньшей массой, чем гидроприводы, хотя и уступают последним по показателям точности позиционирования и удельной мощности. Возможные и гибридные (комбинированные) приводы, как скрещивание выше указанных с электрическими [5, 6], которые могут потреблять энергию от того же источника, что и система управления.

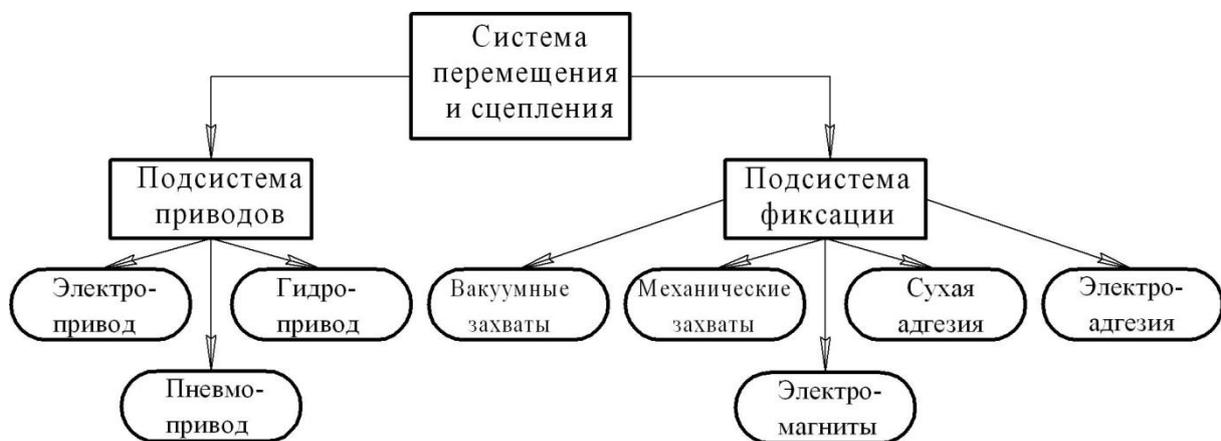


Рис. 2. Объединенная структура подсистем удержания и перемещения РПО в качестве исходной для дальнейшего развития

Однотипность приводов существенно повышает энергетическую эффективность мобильных роботов, равно как и оптимизация траектории движения робота, при достаточной мощности для поддержания заданной скорости движения робота по поверхности перемещения произвольной ориентации. Указанные методы сокращения энергетических затрат достаточно известны.

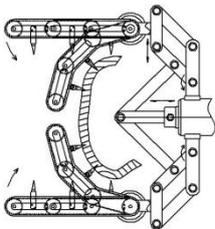
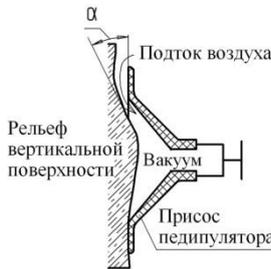
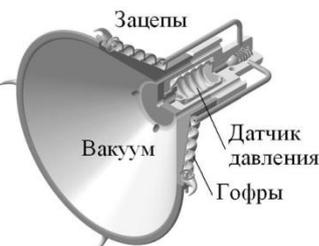
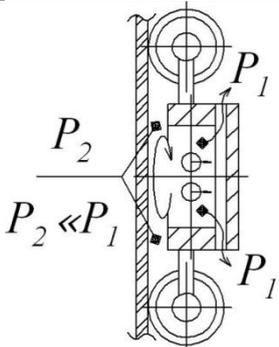
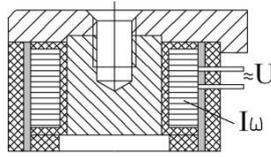
Поэтому с целью установления дополнительных резервов повышения энергетической эффективности РПО рассмотрим детальнее технические решения подсистемы сцепления с поверхностью перемещения (табл. 1). Подсистема сцепления обеспечивает удержание робота на поверхности перемещения и включает в себя устройства и приводы удержания робота на поверхности перемещения. Усилие указанных устройств должно превышать гравитационную и технологическую составляющие динамических нагрузок. От избранного механизма удержания на поверхности перемещения зависит принципиальная конструкция робота, а их выбор определяется типом и рельефом поверхности произвольной ориентации, в т.ч. вертикальной и потолочной. Также выбор типа фиксации на поверхности непосредственно влияет и на энергетическую эффективность мобильного робота. Например, механические подсистемы [7, 8, 9] наиболее эффективны при перемещении робота по пористым поверхностям (почва, грубый бетон, деревья), однако потребляют значительную мощность и тем самым увеличивают вес робота, а значит и его гравитационную силу тяжести.

Наиболее распространенной является подсистема с вакуумной фиксацией вследствие своей универсальности. При этом возможны два варианта реализации указанной подсистемы: непосредственное использование вакуумных присосов [10, 11] и удержание робота без присосов за счет создания зоны давления ниже атмосферного между корпусом робота и поверхностью его перемещения [12]. Создание зоны вакуума предполагает наличие либо вакуумного насоса, либо пневматического компрессора, что в свою очередь приводит к увеличению массы робота. Здесь наиболее эффективным

техническим решением может быть комбинация механической и вакуумной подсистем с эжектором, объединенных обратной связью по управлению и средствами контроля глубины вакуума [13, 14]. Интеграция указанных подсистем особенно эффективна в условиях перемещения робота по сложному рельефу, когда возникает угроза нештатной (аварийной) ситуации, а именно утрата в определенные моменты времени тесного контакта с поверхностью.

Таблица 1

Типы подсистем удержания робота на поверхности перемещения

№	Тип подсистемы	Примеры проектной реализации	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4	5
1	Механическая		Надежность сцепления с пористой поверхностью	Наличие редукции привода
2	Вакуумная		Индифферентность к материалу поверхности перемещения	Подток воздуха, недопустимость резких перепадов топологии
			Компенсация подтока воздуха, повышенная надежность удержания робота	Высокая чувствительность системы управления
			Отсутствие герметизации зоны пониженного давления	Недопустимость резких перепадов топологии
			Устойчивость системы управления, быстродействие	Только для ферромагнитных поверхностей

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
6	Сухая адгезия		Отсутствие привода	Низкая скорость

Электромагнитная подсистема [15, 16] удержания РПО на поверхности перемещения отличается высоким быстродействием, относительно низким энергопотреблением, но ограничена видом материала поверхности, а именно допускает перемещение робота только по поверхностям, обладающими ферромагнитными свойствами. Данная подсистема может иметь достаточно эффективное применение при обслуживании металлических трубопроводов большого диаметра, например газовых и нефтяных магистралей.

Так называемая, «сухая» адгезия [17], а также электрическая адгезия являются наиболее эффективными с точки зрения энергосбережения, но и одновременно довольно дорогими технологиями. Современные реализации указанного сцепления с поверхностью перемещения характеризуются крайне низкой скоростью перемещения робота вследствие медлительности эффекта адгезии, что пока препятствует их промышленному использованию.

Каждая из сфер применения мобильных роботов (табл. 2) предопределяет не только их численные технические характеристики, но главным образом – тип системы сцепления с поверхностью перемещения, во-первых, и тип трансмиссии робота, во-вторых. Сравнивая в первом приближении объекты обслуживания, указанные в таблице, легко убедиться во взаимосвязи характеристик объектов, в части их топологии, физико-механических свойств поверхности перемещения и гипотетических предполагаемых к выполнению технологических операций с характеристиками самих роботов.

Очевидно, что выбор трансмиссии роботов произвольной ориентации определяется видом объекта обслуживания, точнее его топологией, а тип подсистемы сцепления для противодействия гравитационной нагрузке – физико-механическими свойствами поверхности перемещения робота, а именно видом материала, его твердостью, шероховатостью, в том числе и электромагнитными свойствами. Влияние топологии объясняется тем, что форма объекта обслуживания предопределяет вид системы координат, в которой производится отсчет величин перемещения робота. Например, при обслуживании зданий предпочтительней робот, работающий в прямоугольной Декартовой системе координат, а при обслуживании таких объектов, как трубы магистралей или деревьев – робот, управляемый в цилиндрической системе координат. Вследствие изложенного целесообразна интеграция приводов перемещения по каждой из координатных осей, что способствует расширению технологических возможностей мобильных роботов. Более того, рекомендуется исполнение подсистем сцепления с поверхностью перемещения в виде сменных модулей, что, в свою очередь, будет обеспечивать достаточно высокий уровень универсальности РПО. Такой подход к синтезу систем сцепления предпочтительней с точки зрения снижения стоимости мобильных роботов.

Таким образом, в отличие от традиционных мобильных роботов, главной проблемой синтеза роботов, перемещающихся по поверхностям произвольной ориентации, является уменьшение их массы, точнее гравитационной силы тяжести, при одновременном повышении надежности удержания на поверхности перемещения различных промышленных объектов. Первая из указанных задач может быть решена применением высокопрочных легких материалов конструкций роботов и уменьшением количества приводов по каждой из координатных осей движения за счет интеграции приводов трансмиссии и ориентации робота. Для решения второй задачи не достаточно только усовершенствования устройств удержания робота на поверхности перемещения, а необходима разработка альтернативных систем сцепления с поверхностью произвольной ориентации. Такими подсистемами могут быть устройства противодействия гравитационной составляющей динамических нагрузок в виде генераторов тяги, точнее аэродинамической подъемной силы, не превышающей, однако силы сцепления робота с поверхностями произвольной ориентации с учетом технологических нагрузок при обслуживании различных промышленных объектов.

Таблица 2

**Области перспективного применения мобильных роботов
произвольной ориентации**

№	Область применения	Объект обслуживания	Рекомендуемые системы сцепления	Допустимая трансмиссия
1	Обслуживание высотных зданий		Вакуумные	Колесная, шагающая
2	Ремонт высоковольтных ЛЭП		Механические, электромагнитные	Шагающая
3	Демонтаж или восстановление мостов, виадуков и диагностика сооружений		Механические	Шагающая
4	Диагностика промышленных трубопроводов, чистка, нанесение покрытий		Вакуумные, электромагнитные, адгезионные	Колесная, гусеничная, шагающая, червячная
5	Техническое обслуживание парковых и лесных древесных массивов		Механические	Шагающая
6	Дезактивация объектов техногенных катастроф		Механические	Колесная, гусеничная шагающая

Выводы

1. Принимая во внимание доминирующее влияние на энергопотребление робота подсистемы перемещения, дальнейшим направлением совершенствования РПО следует считать интеграцию приводов движения и ориентации роботов в пространстве, как средство уменьшения массы робота, а значит и его гравитационной силы тяжести.

2. Поскольку подсистемы сцепления мобильного робота определяют надежность его удержания на поверхности перемещения, то целесообразна разработка подсистемы противодействия гравитационной динамической нагрузки, независимой от физико-механических свойств объектов обслуживания, например, генераторов реактивной пневматической тяги, а именно аэродинамической подъемной силы, противоположной вектору силы тяжести робота.

3. Реализация указанных направлений совершенствования мобильных роботов произвольной ориентации позволит создать новые и достаточно эффективные средства производства для обслуживания промышленных объектов в экстремальных условиях, опасных и даже не приемлемых для пребывания человека.

Список использованной литературы

1. Кузнецов Ю.Н. Вызовы четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» перед учеными Украины // Вестник ХНТУ, Херсон, №2 (61), 2017.-С.67-75.
2. Черноусько Ф.Л. Мобильные роботы: исследования, разработки, перспективы./Ф.Л. Черноусько Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий. – 2018. <http://www.ras.ru/news/shounews.aspx?id=f5c75bcf-2fa5-40e6-b06/>
3. Градецкий В.Г. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. / В.Г. Градецкий, В.Б. Вешников, С.В. Калиниченко, Л.Н. Кравчук. – М.: Наука, 2001. – 360 с.
4. Полищук М.Н. Проектирование технологического оснащения и наладка промышленных роботов. / М.Н. Полищук, Ю.В. Тышкевич. – К: Дорадо-Друк, 2014. – с. 7 – 24.
5. Кузнецов Ю.М. Робототехнічні системи і комплекси фармацевтичного та біотехнологічного виробництв / Ю.М. Кузнецов, В.Ю. Шибельский // Навч. пос. під заг. ред. Ю.М. Кузнецова. – К.: ГНОЗІС, 2012. 335 с.
6. Павленко І.І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 420 с.
7. Saunders A. The RiSE Climbing Robot: Body and Leg Design / Saunders A., Goldman D.I., Fullb R.J., Buehler M. // Boston Dynamics, Cambridge, Department of Integrative Biology, University of California, Berkeley. – Unmanned Systems Technology VIII, Proc. of SPIE Vol. 6230, 623017, (2006). – p.13.
8. Tin Lun Lam. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning / Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. – Springer Heidelberg New York – 2012. – p. 37– 46.
9. Patent US 9492928 МПК В25J 15/00. Interconnected phalanges for robotic gripping / заяв. 05.11.2014; опубл. 05.05.2016.
10. International Journal of Engineering Research and General Science Volume 2, ISSN 2091-2730. Developments in wall climbing robots: a review. – 2014.– p.36 –37.
11. Чашухин В.Г. Исследование параметров движения робота со скользящим уплотнением. – Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 4 (2), с. 347–349.
12. Patent US 9738337 Int. Cl. B62D 57/024. Climbing robot vehicle / заяв. 28.01.2015; опубл. 22.08.2017.
13. Поліщук М.М. Модернізація вакуумного захвату мобільного крокуючого робота. NTUU "Igor Sikorsky KPI". – Mechanics and Advanced Technologies, No. 2 (80). 2017. – p. 59–64.
14. Патент UA 117979 МПК В65Н 5/08. Захват крокуючого робота / М.М.Поліщук, М.М. Ткач, В.П. Пасько; заявл. 10.03.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. – 4 с.
15. Patent US 9428231 Int.Cl. B62D 55/00. Climbing vehicle with suspension mechanism / заяв. 12.02.2014; опубл. 30.08.2016.
16. Патент РФ на полезную модель 101683 МКИ В62D 57/04. Транспортное устройство для движения по вертикальным металлическим поверхностям / заяв. 29.09.2010; опубл. 27.01.2011. Бюл. № 3.
17. Menon Carlo. Gecko Inspired Surface Climbing Robots / Carlo Menon, Michael Murphy, and Metin Sitti // International Conference on Robotics and Biomimetics. – Shenyang, China, August 22 – 26, 2004. – p. 6.