В. В. Арыканцев, М. Г. Матвейчук, А. В. Бандурко

РЕВЕРСИВНЫЙ ШАГОВЫЙ ПОДЪЕМНИК ЗАКЛИНИВАЮЩЕГО ТИПА*

Волгоградский государственный технический университет

arvstu@mail.ru

В статье описан принцип работы реверсивного шагового подъемника с двигателем заклинивающего типа, схема которого разработана на основе уже существующей модели, а также приведены уравнения равновесия при условии его наихудшего нагружения на опоре.

Ключевые слова: мобильный робот, заклинивание, равновесие, управление движением.

V. V. Arykantsev, M. G. Matveichuk, A. V. Bandurko

REVERSIBLE STEPPER LIFT OF JAMMING TYPE

Volgograd State Technical University

The paper describes the principle of operation of a reversible stepper lift with a jamming type of propulsion, the scheme of which is developed on the basis of an already existing model, and equilibrium equations are provided under the condition of its worst loading on a support.

Keywords: mobile robot, jamming, balance, motion control.

Разработка мобильных шагающих роботов различного класса и назначения в настоящее время ведется во всех развитых странах мира [1, 2]. Среди них есть роботы, предназначенные для преодоления пересеченной местности, движения под водой, перемещения по специальным и подготовленным поверхностям и многие другие [1–9]. В их числе можно выделить отдельный тип – лазающих роботов.

Роботизированные устройства, предназначенные для подъема, перемещения грузов и людей вдоль вертикальных и наклонных направляющих, опор, столбов (например, при проведении ремонтных или монтажных работ), разрабатывались еще в СССР [10, 11]. Большинство из подобных разработок того времени предполагало наличие гидроприводов, что увеличивало необходимое время проверки устройства перед запуском, а во время эксплуатации становилось причиной шума. Более того, устройства могли перемещаться вдоль неподготовленной опоры, не имеющей специальных отверстий и пазов для удерживающих элементов (например, кулачков). Несмотря на востребованность подобных робо-

тов, устройств, способных осуществлять перемещение (например, вдоль столбов), не так много. Для перемещения вдоль неподготовленной опоры необходимо, чтобы фиксация рамы происходила на ней с помощью сил трения и эффекта заклинивания [12–14].

Уже известен шаговый подъемник [15], состоящий из двух рам, связанных между собой электроприводом, работающим на принципе шарико-винтовой пары. Каждая рама имеет по две скобы, необходимых для крепления на вертикальной опоре. Кроме того, одна из скоб может перемещаться в заданном диапазоне вдоль рамы и фиксироваться на ней, это позволяет использовать устройство на вертикальных опорах различного диаметра. Конструкция такого робота представлена на рис. 1.

Перед включением устройства происходит его подготовка к работе. Для этого расстояние между скобами регулируется в соответствии с диаметром направляющей, вдоль которой будет происходить подъем путем перемещения подвижной скобы вдоль рамы. После этого устройство готово к запуску.

После включения на линейный электропривод шагового подъемника подается ток от управляющего устройства (на рисунке не показано). Сначала электропривод работает в режиме растяжения и выдвигает штоки в противоположном друг другу направлении, увеличивая расстояние между рамами (рис. 1, *а*). В результате верхняя рама поднимается вдоль направляющей, а нижняя остается на прежнем месте в заклиненном состоянии. После достижения

максимального выдвижения штоков электропривод переключается в режим сжатия и штоки начинают двигаться навстречу друг другу, уменьшая расстояние между рамами. При этом на направляющей заклинивается верхняя рама, нижняя поднимается (рис. 1, *б*). При достижении штоками крайнего положения электропривод снова переключит режим и цикл повторится. После эксплуатации устройство спускается вниз вручную.

Рис. 1. Шаговый подъемник в работе: (*а* – подъем верхней рамы; *б* – подъем нижней рамы):

1 – верхняя рама; 2 – нижняя рама; 3 – подвижная скоба;
4 – неподвижная скоба; 5 – шток; 6 – линейный электропривод

Таким образом, шаговый подъемник позволяет поднять требуемый груз вдоль вертикальных или наклонных опор, столбов, направляющих различного сечения и диаметра, не имеющих отверстий или пазов, предназначенных для взаимодействия с устройством, но не имеет возможности спуска в автоматическом режиме или под управлением оператора из-за заклинивания рам на опоре.

Одним из решений, дающих возможность самостоятельного спуска, может служить введение в конструкцию дополнительного исполнительного звена в виде второго линейного электропривода.

Принцип работы такого шагового подъемника будет заключаться в следующем. Перед началом работы рамы находятся в заклиненном на вертикальной направляющей состоянии. Первым включается электропривод, находящийся дальше от опоры. Он работает в режиме растяжения до тех пор, пока рама не займет горизонтальное положение в пространстве. Таким

образом верхняя рама выходит из заклинивания на опоре (рис. 2, *а*). После этого начинает работать второй электропривод, так же в режиме растяжения штоков. Работа в таком режиме продолжается до тех пор, пока штоки первого электропривода не достигнут крайнего положения, затем он останавливается. Второй электропривод продолжает работу до тех пор, пока верхняя рама не достигнет положения, в котором будет способна заклиниться на вертикальной опоре, либо до момента достижения штоками второго электропривода крайнего положения. Затем снова включается первый электропривод, теперь в режиме сжатия. В результате наступает такой момент, когда нижняя рама выходит из заклинивания, а нагрузка полностью переносится на верхнюю раму, заклиненную на направляющей опоре (рис. 2, *б*). Первый электропривод продолжает работу в режиме сжатия до достижения крайнего положения, а затем останавливается. После расклинивания нижней рамы включается второй электропри-

вод и работает до тех пор, пока нижняя рама не достигнет положения, в котором будет способна заклинить на вертикальной опоре, либо до момента достижения штоками второго электропривода крайнего положения. Затем цикл возобновляется и продолжается до момента достиже-

ния нужной точки на вертикальной опоре. Спуск устройства происходит в обратном порядке. Нижняя рама расклинивается, опускается, заклинивается на опоре; расклинивается верхняя рама и опускается вдоль опоры, после чего цикл повторяется до полного спуска.

Рис. 2. Положения реверсивного шагового подъемника при перемещении верхней (а) и нижней (б) рамы

На схеме и в описании работы рама рассматривается как абсолютно жесткая. Также предполагается, что на устройстве установлены электроприводы, имеющие одинаковые характеристики.

При рассмотрении условий равновесия данного устройства можно пренебречь динамическими эффектами из-за малых скоростей движения. Также можно принять, что во время перемещения вся нагрузка воспринимается лишь одной рамой из двух. Тогда можно ограничиться составлением уравнений статического равновесия для одной рамы, они будут описывать

наихудшие условия для работы рассматриваемого аппарата. Во время верификации результатов математической модели на лабораторном образце удавалось находить такие положения перемещаемой рамы, при которых она не контактирует с опорой.

Схема заклиненной на вертикальной опоре рамы изображена на рис. 3. Рама нагружена нормальными реакциями опоры N_i , касательными силами трения F_j , силой тяжести G и реакциями R_{Ci} со стороны второй рамы. Тогда уравнения равновесия относительно точки O для данной схемы будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} -N_O + N_B - R_{C1} \sin \alpha_1 - R_{C2} \sin \alpha_2 = 0 \\ F_O + F_B - G - R_{C1} \cos \alpha_1 - R_{C2} \cos \alpha_2 = 0 \\ F_B d + N_B b + Gl \cos \beta + R_{C1} \cos \alpha_1 n_1 \cos \beta - \\ - R_{C1} \sin \alpha_1 n_1 \cos \beta + R_{C2} \cos \alpha_2 n_2 \cos \beta - R_{C2} \sin \alpha_2 n_2 \cos \beta = 0, \end{cases}$$

где d – ширина опоры; n_i – расстояние от скобы OA до точки крепления соответствующей вилки штока; l – расстояние от скобы OA до центра тяжести рамы (расстояниями считаются длины перпендикуляров, проведенных из соответствующей точки до скобы OA). Плечо b нормальной реакции опоры N_B может быть вычислено в зависимости от взаимного расположения скоб устройства и их размеров:

$$b = \sqrt{OD^2 + DB^2} \cdot \sin \left(\beta + \arctg \left(\frac{DB}{OD} \right) \right).$$

Реакции N_i , R_{Ci} в общем случае определяются в зависимости от веса рамы и геометрии устройства. Углы α_i будут также определяться геометрией устройства и длинами выдвижения штоков. Коэффициент трения по всей длине опоры принимается одинаковым.

Рис. 3. Схема действия сил заклиненной на вертикальной опоре рамы

С помощью составленной системы уравнений равновесия можно определить, например, зависимость грузоподъемности устройства от коэффициента трения или напряжения в зоне контакта рамы устройства с опорой. Условия, при которых обеспечивается работоспособность устройства, будут зависеть от геометрии робота (положения центра тяжести, точек крепления вилок штоков, взаимного расположения скоб), коэффициента трения между рамой устройства и опорой, массы перемещаемой полезной нагрузки и других параметров. Нахождение области допустимых значений этих характеристик требует проведения дополнительных исследований.

В результате реализации предлагаемой схемы шагающего подъемника с двумя приводами получится достичь возможности спуска устройства в автоматическом или полуавтоматическом режиме (при управлении оператором) без применения мускульной силы или дополнительных приспособлений, что расширяет функциональность данного робота и повышает удобство его эксплуатации.

Результаты работы могут быть востребованы при проектировании мобильных роботов и устройств, предназначенных для подъема, перемещения грузов и людей вдоль вертикальных и наклонных направляющих, опор, столбов (например, при проведении ремонтных или монтажных работ).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sun, Y. Design of a snake robot based on modular joint / Y. Sun, F. Ni, Y. Zhou, Y. Zhang, Y. Liu, H. Liu // *Proceedings of the 22nd International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2019)* – 2019. – pp. 53–60.
2. White, T. S. A Mobile Climbing Robot for High Precision Manufacture and Inspection of Aerostructures / T. S. White, R. Alexander, G. Callow, A. Cooke, S. Harris, J. Sargent // *The International Journal of Robotics Research*. – 2005. – Vol. 24. – pp. 589–598.
3. Verichev, S. Deep mining: from exploration to exploitation / S. Verichev, Laurens de Jonge, B. Wiebe, N. Rodney // *Minerals of the Ocean-7 & Deep-Sea Minerals and Mining-4: abstracts of International Conference / VNIIOkeangeologia*. St. Petersburg, 2014. P. 126–138.
4. Lin, Y. H. A searching technique for obstacle avoidance of autonomous underwater vehicles by using the selftuning fuzzy controller / Y. H. Lin, M. C. Fang, H. H. Chang // *Proc. of the Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE*. – Vol. 7. – 2014. – 8 p.
5. Briskin, E. S. Mathematical modeling of mobile robot motion with the support surface / E. S. Briskin, Ya. V. Kalinin, A. V. Maloletov, N. G. Sharonov // *9th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD 2018): conf. proceedings*. – Austria. – 2018. – pp. 259–264.
6. Чернышев, В. В. Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти / В. В. Чернышев // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2003. – № 5. – С. 28–30.
7. Малолетов, А. В. Оптимизация структуры, параметров и режимов движения шагающих машин со сдвоенными движителями: моногр. / А. В. Малолетов, Е. С. Брискин; ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – 175 с.
8. Яцун, С. Ф. Вибрационный мобильный робот для движения по вертикальной ферромагнитной стене / С. Ф. Яцун, А. А. Черепанов // *Естественные и технические науки*. – 2010. – № 6 (50). – С. 400–401.
9. Исследование мобильного робота вертикального перемещения на основе пневмопривода с многоступенчатым торможением / Е. В. Аверьянов, С. А. Арфикиан, В. Г. Градецкий, А. Е. Черединова // *Автоматизация. Современные технологии*. – 2015. – № 9. – С. 3–7.
10. А. с. СССР на изобретение № 1132079 А, МПК F 15 B 11/12. Пневмогидропривод шагового перемещения / В. В. Барер; Мурманский судоремонтный завод. – 1984.
11. А. с. СССР на изобретение № 662483, МПК В 66 F 3/24. Реверсивный шаговый подъемник / О. А. Кашаров, Г. С. Перекальский, А. Б. Хейфец; СКБ Всесоюзного НИИ по монтажным и специальным строительным работам. – 1979.
12. Майстренко, В. С. Лазающий робот с движителем, работающим на эффекте периодического «динамического заклинивания» / В. С. Майстренко, Р. А. Темин, А. В. Малолетов // XXVIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2016): Сборник трудов конференции. – М.: Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, 2017. – С. 260–263.
13. Азарян, Д. К. Исследование условий равновесия робота с заклинивающим движителем при движении по стержню / Д. К. Азарян, А. В. Малолетов // IV Международная школа-конференция молодых ученых «Нелинейная динамика машин (School-NDM 2017)»: Сборник трудов конференции. – М.: Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, 2017. – С. 107–112.
14. О выборе геометрических параметров заклинивающе-поворотных движителей мобильных роботов / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов, Ю. С. Кваша, М. О. Скобелев // *Известия ВолгГТУ: научный журнал* № 8 (203) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 108–112.
15. П. м. 195302 Российская Федерация, МПК В66F1/00, В66F7/00. Шаговый подъемник / Я. В. Калинин, Е. С. Брискин, В. В. Арыканцев, А. В. Малолетов; ВолгГТУ. – 2020.