

УДК 629.1.02

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-32-35

*Д. В. Бордюгов***ОБ УПРАВЛЕНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
ЗА СЧЕТ СТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ ВНУТРЕННИХ МАСС
И НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГОЛОНОМНЫХ СВЯЗЕЙ*****Волгоградский государственный технический университет**

denklopuk@gmail.com

Рассматривается метод управления плоским движением робота с двумя внутренними массами, совершающими движение по окружности с постоянной скоростью вокруг вертикальной оси, основанный на наложении или снятии голономных связей на стойки, установленные на корпусе робота. В процессе перемещения поочередно одна из стоек вступает в контакт с поверхностью, в то время как другие с ней не взаимодействуют. Это позволяет корпусу робота проворачиваться вокруг неподвижной стойки.

Ключевые слова: робот, стойка, заклинивание, управление движением, внутренняя масса.

*D. V. Bordyugov***A MOBILE ROBOT MOTION CONTROL BASED ON STATIONARY MOTION
OF INTERNAL MASSES AND NON-STATIONARY HOLOMOMIC LIAISONS****Volgograd State Technical University**

A method of controlling the planar motion of a robot with two internal masses moving in a circle with constant velocity around a vertical axis is considered, based on imposing or removing holonomic ties on the struts mounted on the robot body. During the movement process, alternately one of the struts comes into contact with the surface while the others do not interact with it. This allows the robot body to rotate around the stationary post.

Keywords: robot, support, jamming, motion control, internal mass.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили мобильные роботы с различными типами движителей [1–3]. Шагающие или «шагающеподобные» движители в сравнении с другими отличаются дискретным взаимодействием с опорной поверхностью, что предоставляет существенные преимущества в условиях неорганизованной среды [4]. Это позволяет рассматривать их в качестве механических систем, на которые накладываются голономные связи при взаимодействии с поверхностью, или снимаются при переносе опор в новое положение.

Голономной, или конечной связью называется такое условие, которое ограничивает положение рассматриваемой механической системы, понуждая ее координаты подчиняться уравнениям связей [5]. Путем объединения метода управления реакциями связей (одна из стоек робота находится в силовом, тяговом

взаимодействии с опорной поверхностью, а остальные с ней не взаимодействуют и не создают усилий) и управления перемещением внутренней массы [6, 7] возможно осуществить требуемое управление движением мобильного робота.

Постановка задачи

Рассматривается мобильный робот (рис. 1), состоящий из твердого тела (корпуса) 1, который опирается на горизонтально расположенную поверхность N шариковыми опорами 2. Конструкция робота включает в себя два внутренних тела 3, совершающих вращательное движение вокруг вертикальных осей O_1, O_2 . При помощи стоек 4, поочередно вступающих в контакт с опорной поверхностью, на движение робота накладываются голономные связи, или они снимаются, что позволяет ему совершать плоское движение.

© Бордюгов Д. В., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

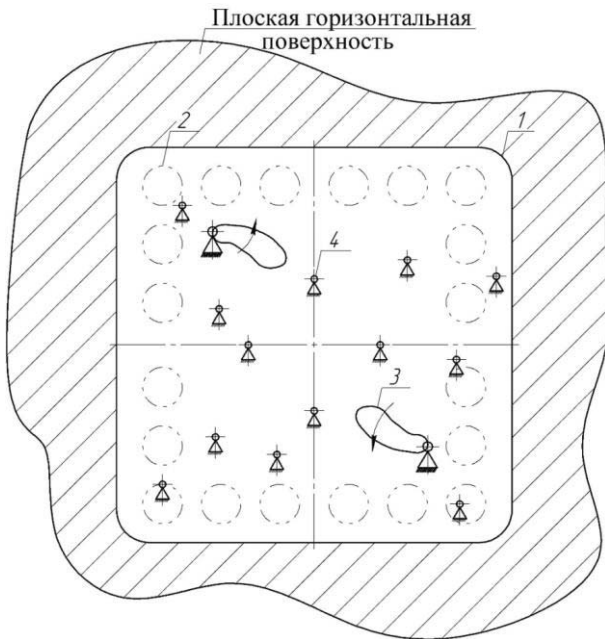


Рис. 1. Кинематическая схема

В процессе перемещения робота можно выделить несколько этапов; на каждом из них одна из стоек находится в опорной фазе, что позволяет корпусу проворачиваться вокруг вертикальной оси, проходящей через нее.

Ставится задача определения уравнений движения рассматриваемого мобильного робота при произвольном последовательном изменении взаимодействующих с опорной поверхностью стоек и получения траектории движения центра его корпуса.

Математическое моделирование

На рис. 2 представлена расчетная схема рассматриваемого робота. Количество управляемых приводов-стоек равно четырем, расположенных симметрично. Рассматривается установившийся режим движения двух внутренних масс $\omega_1 = \text{const}$, $\omega_2 = \text{const}$; момент, развиваемый двигателем не учитывается, в силу предположительного «медленного» движения корпуса робота.

$$\begin{aligned} \Phi_{x1} &= m_1 r \cdot \omega_1^2 \cdot \cos(\alpha_1 + \omega_1 t), & \Phi_{y1} &= m_1 r \cdot \omega_1^2 \cdot \sin(\alpha_1 + \omega_1 t), \\ \Phi_{x2} &= m_2 r \cdot \omega_2^2 \cdot \cos(\alpha_2 + \omega_2 t), & \Phi_{y2} &= m_2 r \cdot \omega_2^2 \cdot \sin(\alpha_2 + \omega_2 t). \end{aligned} \quad (2)$$

Имитационное моделирование

Параметры рассматриваемой механической системы:

$a = 0,20$ м; $b = 0,02$ м; $d = 0,02$ м; $r_1 = 0,09$ м; $r_2 = 0,10$ м; $m_1 = 1$ кг; $m_2 = 2,5$ кг; $\omega_1 = 0,5$ рад/с; $\omega_2 = 0,5$ рад/с; $\alpha_1 = 1,047$ рад; $\alpha_2 = 0,52$ рад.

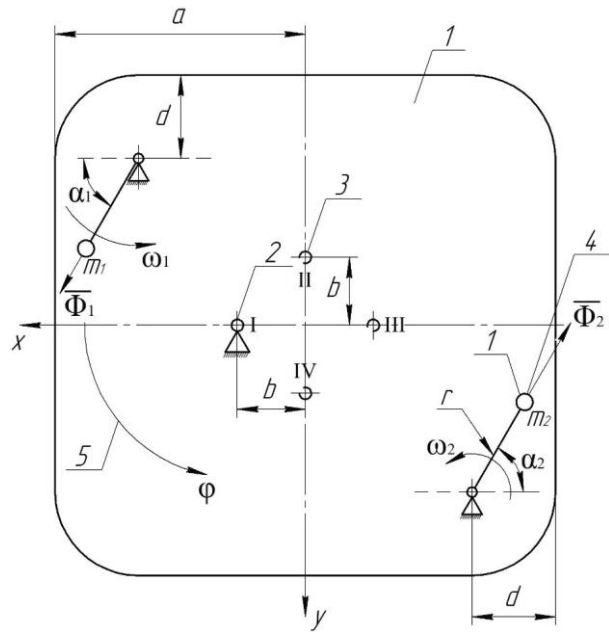


Рис. 2. Расчетная схема мобильного робота с подвижными внутренними массами:

Φ_1, Φ_2 – силы инерции; m_1, m_2 – массы грузов; r – длина стержня, на котором закреплен груз; b – расстояние от зафиксированной опоры до линии, проходящей через геометрический центр робота; α_1, α_2 – углы отклонения стержней относительно горизонтальной оси; ω_1, ω_2 – угловые скорости стержней с закрепленными на них грузами; ϕ – угол поворота корпуса; $\ddot{\phi}$ – угловое ускорение корпуса робота.

1 – корпус мобильного робота; 2 – опора, взаимодействующая с поверхностью; 3 – опора в фазе свободного перемещения; 4 – вращающаяся масса; 5 – траектория движения геометрического центра корпуса робота

В предположении малости сил инерции, обусловленных непосредственно вращательным движением робота относительно неподвижной опоры, уравнение движения корпуса мобильного робота имеет вид:

$$J_a \ddot{\phi} = M_1 + M_2; \quad (1)$$

$$J_a \ddot{\phi} = \Phi_{x1} l_i + \Phi_{y1} l_j + \Phi_{x2} l_k + \Phi_{y2} l_q;$$

где J_a – момент инерции корпуса робота; M_1, M_2 – моменты сил Φ_1 и Φ_2 , действующие со стороны вращающихся грузов относительно неподвижной опоры; l_i, l_k, l_j, l_q – плечи сил $\Phi_{x1}, \Phi_{y1}, \Phi_{x2}, \Phi_{y2}$ соответственно,

Начальные условия: $\phi = 0$ рад; $\dot{\phi} = 0$ рад/с.

Смена стоек происходит в момент нулевого значения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\phi} = 0$ рад/с для предотвращения удара. На рис. 3 показан график изменения угловой скорости корпуса от времени.

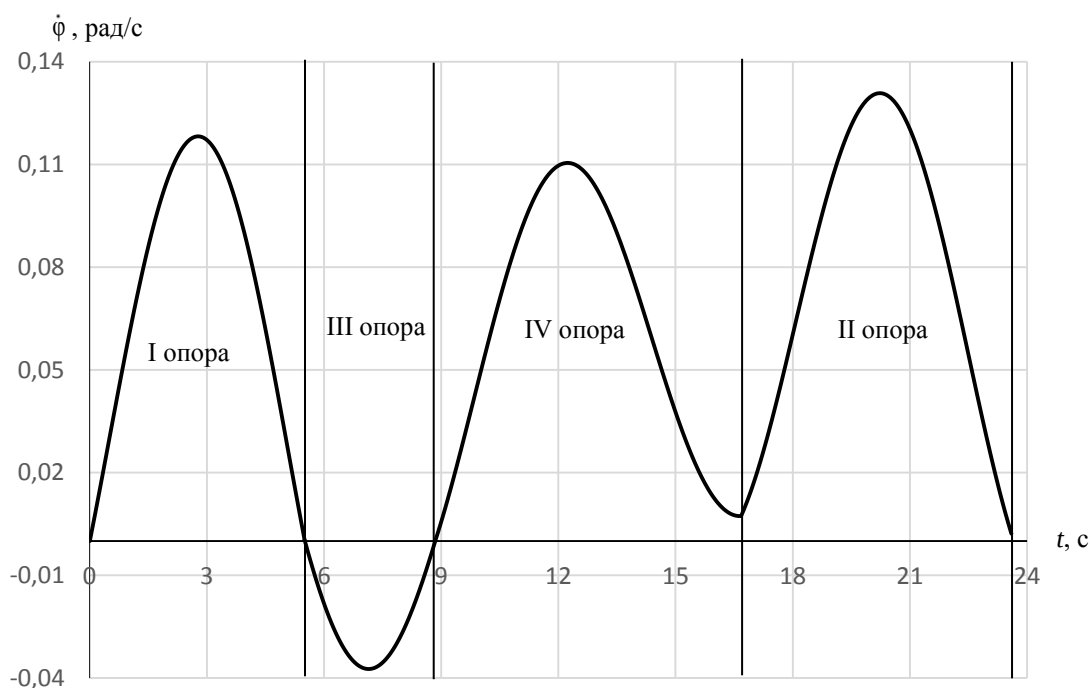


Рис. 3. Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi}$, рад/с от времени t , с.

Ниже в таблице представлены алгоритм управления стойками робота и значения угла поворота корпуса φ , рад.

Промежуток времени движения t , с	Угол поворота внутренней массы φ , град	Стойка, взаимодействующая с поверхностью
0 ... 5,50 с	0 ... 23,17 град	I опора
5,50 ... 8,86 с	23,17 ... 18,52 град	III опора
8,86 ... 16,68 с	18,52 ... 46,12 град	IV опора
16,68 ... 23,60 с	46,12 ... 76,98 град	II опора

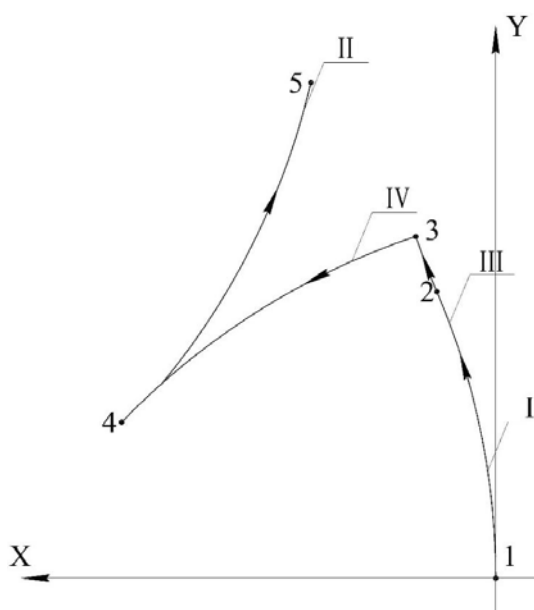


Рис. 4. Изменение положения центра корпуса мобильного робота

Полученные результаты подтверждают справедливость гипотезы малой скорости корпуса мобильного робота, вследствие чего не учитывается момент, развиваемый двигателем.

Траектория изменения положения геометрического центра корпуса мобильного робота изображена на рис. 4. В начальный момент времени корпус вращается против часовой стрелки, участок 1–2; в точке 2 его угловая скорость равна нулю, и происходит смена стойки, после чего корпус начинает вращаться против часовой стрелки, участок 2–3. Дальнейшее перемещение мобильного робота происходит аналогичным образом.

Заключение

Представлены уравнения движения мобильного робота с внутренними массами, совершающими вращательное движение, при произвольном последовательном изменении взаимодействующих с опорной поверхностью стоек.

Определены значения угла поворота корпуса робота, представленные выше в таблице, а также изменение его угловой скорости в процессе движения, рис. 3.

Получена траектория движения геометрического центра корпуса робота при заданном алгоритме смены стоек (рис. 4).

Полученные результаты позволяют ставить задачу о разработке алгоритма движения корпуса робота из начальной точки в конечную (заданную) с условиями минимума энергозатрат и времени движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Okhotsimsky, D. E.* Walking machines / D. E. Okhotsimsky, A. K. Platonov, A. A. Kirilchenko [et al.] // *Advances in Mechanics*. – 1992. – Vol. 15. – No 1–2. – P. 39–70.
2. *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. *Караваев, Ю. Л.* Динамика сфероробота с внутренней омниколесной платформой / Ю. Л. Караваев, А. А. Килин // *Нелинейная динамика*. – 2015. – Т. 11. – № 1. – С. 187–204.
4. The investigation of walking machines with movers on the basis of cycle mechanisms of walking / E. S. Briskin, V. V. Chernyshev, A. V. Maloletov, V. V. Zhoga // 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2009, 09–12 августа 2009 года / sponsors: IEEE Robotics and Automation Society, Changchun University of Science and Technology, Kagawa University. – Changchun, 2009.
5. *Журавлев, В. Ф.* Понятие связи в аналитической механике / В. Ф. Журавлев // *Нелинейная динамика*. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 853–860.
6. *Болотник, Н. Н.* Оптимальное управление прямолинейным движением твердого тела по шероховатой плоскости посредством перемещения двух внутренних масс / Н. Н. Болотник, Т. Ю. Фигурина // *Прикладная математика и механика*. – 2008. – Т. 72. – № 2. – С. 216–229.
7. *Акуленко, Л. Д.* Управление движением неоднородного цилиндра с подвижными внутренними массами по горизонтальной плоскости / Л. Д. Акуленко, Н. Н. Болотник, С. А. Кумакшев, С. В. Нестеров // *Прикладная математика и механика*. – 2006. – Т. 70. – № 6. – С. 942–958.