

УДК 007.52+621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-84-87

*А. А. Хачатрян, Л. Д. Смирная***ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ РОБОТА,
ОПИРАЮЩЕГОСЯ НА РАЗЛИЧНО ОРИЕНТИРОВАННЫЕ
РОВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ*****Волгоградский государственный технический университет**

Agram-081097@mail.ru

Предложены расчетная схема и математическая модель робототехнической системы, использующей линейный привод для перемещения по вертикальной ровной поверхности. Решена задача динамики движения мобильного робота, перемещение которого по рабочей поверхности осуществляется за счет управления величиной и направлением усилия, развиваемого актуатором. Получены уравнения и траектория движения центра масс мобильного робота.

Ключевые слова: мобильные робототехнические средства, перемещение, математическая модель, задача динамики, движение по вертикальной поверхности.

*A. A. Khachatryan, L. D. Smirnaya***FEATURES OF THE DYNAMICS OF THE CONTROLLED MOVEMENT OF
THE ROBOT, BASED ON VARIOUS ORIENTED FLAT SURFACES****Volgograd State Technical University**

The design scheme and mathematical model of a robotic system using a linear actuator to move along a vertical flat surface are presented in this article. The task of motion dynamics of a mobile robot is solved, the movement of which on the working surface is carried out by controlling the magnitude and direction of the force developed by the actuator. The equations of motion and the trajectory of the center of mass of the mobile robot are obtained.

Keywords: mobile robotics, displacement, mathematical model, the task of dynamics, movement on a vertical surface.

Введение

Учитывая особые условия осуществления тех или иных технологических операций на высоте, эксплуатация роботов, способных перемещаться по вертикальным и наклонным поверхностям, имеет широкие перспективы. Области применения этих машин могут быть различными [1]. Такие роботы могут в том числе повысить безопасность и эффективность выполнения работ на высоте, а также снизить риски для человеческой жизни.

Существуют различные виды роботов, способных перемещаться по наклонным и вертикальным поверхностям за счет вакуумных устройств, электромагнитного взаимодействия, тросовых движителей или адгезии. Основными ограничениями применения указанных движителей являются требования к поверхности, по которой необходимо перемещаться, и к ее ориентации [2–5]. В работе рассматривается движение робота, опирающегося на вертикальную поверхность за счет прижатия к ней «толкающим» движителем, установленным на горизон-

тальной поверхности. За счет работы одного линейного привода и осуществляется реализация усилия «прижатия» робота к вертикальной поверхности [6–7].

Постановка задачи

Ставится задача определения перемещения (получения уравнений движения) центра масс мобильного робота и его ориентации при известном выдвижении штока линейного привода механизма прижатия и усилия, развиваемого им для обеспечения требуемого перемещения. Задача дополняется построением траектории движения мобильного робота.

**Расчетная схема робототехнической системы
с одной опорой
на горизонтальную поверхность**

Расчетная схема рассматриваемой робототехнической системы с одним линейным приводом приведена на рис. 1, а. Рассматривается движение робототехнической системы, состоящей из робота 1, представленного на рисунке характерной поверхностью S , перемещающего-

© Хачатрян А. А., Смирная Л. Д., 2024.

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

ся по вертикальной (рабочей) поверхности 2, опираясь на нее тремя опорами 3–5. Требуемое перемещение робота реализуется за счет усилия P , приложенного со стороны линейного привода механизма прижатия 6, закрепленного на горизонтальной (опорной) поверхности

7. Изучается вращательное движение мобильного робота вокруг заторможенных поочередно опор 3 и 4 при расторможенных остальных опорах и воздействии усилием P со стороны механизма прижатия на мобильного робота.

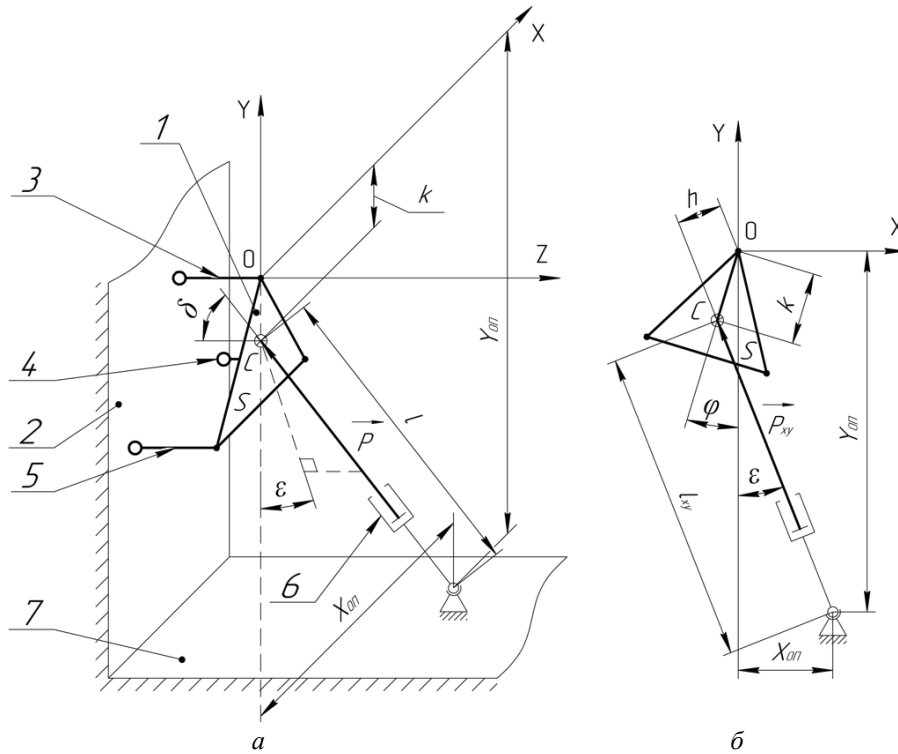


Рис. 1. Расчетная схема робота с механизмом прижатия:
а – общий вид робототехнической системы; б – проекция робототехнической системы на плоскость XOY

При описании расчетной схемы использованы следующие обозначения: C – центр масс робота; k – расстояние от заторможенной опоры 3 или 4 (оси вращения) до центра масс робота; $x_{оп}$, $y_{оп}$ – соответственно координаты основания механизма прижатия робота в плоскости XOY ; δ – угол между усилием P и отрицательным направлением оси Z ; ϵ – угол между проекцией усилия P на плоскость XOY и осью Y ; φ – угол поворота мобильного робота вокруг заторможенной опоры; l , l_{xy} – длина линейного привода механизма прижатия и его проекция на плоскость XOY соответственно; P_{xy} – проекция усилия P на плоскость XOY ; h – расстояние от оси вращения до линии действия силы P в плоскости XOY .

Метод решения

При решении поставленной задачи принимается, что усилие прижатия P обеспечивает вращательное движение робота вокруг неподвижной опоры, при этом силами трения между

расторможенными опорами и рабочей поверхностью пренебрегается. Рассматривается процесс движения, состоящий из трех этапов. На первом и третьем этапах вращение происходит относительно неподвижной опоры 3, на втором – относительно неподвижной опоры 5. Таким образом, требуемая траектория движения робота достигается поочередным торможением его опор, при воздействии усилия P механизма прижатия.

Приведены зависимости для первого этапа движения: вращение вокруг заторможенной опоры 3, совпадающей с осью Z . Уравнение вращательного движения в дифференциальной форме представляется в виде

$$I_z \ddot{\varphi} = M_z, \quad (1)$$

где I_z – момент инерции мобильного робота относительно оси Z , проходящей через опору 3; M_z – главный момент внешних сил, действующих на мобильного робота относительно оси Z :

$$M_z = P_{xy} h - F_{\text{тяж}} k \sin \varphi. \quad (2)$$

Для осуществления поставленной цели задается закон движения мобильного робота по вертикальной поверхности (зависимостью изменения угла поворота робота вокруг заторможенной опоры от времени в плоскости XOY):

$$\varphi = at^3 + bt^2 + ct + d, \quad (3)$$

где a, b, c, d – неизвестные, определяемые при заданных граничных условиях.

Тогда координаты центра масс робота x_c и y_c в момент времени t можно вычислить с помощью системы

$$\begin{cases} x_c = -k \sin \varphi; \\ y_c = -k \cos \varphi. \end{cases} \quad (4)$$

Зависимость длины линейного привода от координат центра масс робота можно задать следующим выражением:

$$l = \frac{\sqrt{(x_c - x_{оп})^2 + (y_c - y_{оп})^2}}{\sin \delta}. \quad (5)$$

Полученные зависимости позволяют решить дифференциальное уравнение (1) и построить траекторию движения мобильного робота.

Имитационное моделирование

Для решения уравнения (1), определения величины усилия линейного привода, обеспечивающего требуемое перемещение, и построения траектории движения мобильного робота задаются необходимые массово-геометрические параметры робототехнической системы, начальные и граничные условия при движении робота по рабочей поверхности (см. таблицу). При этом время τ для каждого из этапов принимается равным трем секундам.

Исходные данные для имитационного моделирования

Массово-геометрические параметры				Начальные условия при $t = 0$ с	Граничные условия при $t = \tau = 3$ с
$I_z = 3,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$k = 0,5 \text{ м}$	$x_{оп} = 0,5 \text{ м}$	$x_0 = 0 \text{ м}$	$\varphi_0 = 0 \text{ рад}$	$\varphi_\tau = \pi/2$
$m = 5 \text{ кг}$	$\delta = 60^\circ$	$y_{оп} = -3 \text{ м}$	$y_0 = 0 \text{ м}$	$\dot{\varphi}_0 = 0 \text{ с}^{-1}$	$\dot{\varphi}_\tau = 0 \text{ с}^{-1}$

Для указанных начальных и граничных условий получена зависимость угла поворота мобильного робота вокруг заторможенной опоры 3 от времени для первого этапа:

$$\varphi = -\frac{\pi}{\tau^3} t^3 + \frac{3\pi}{2\tau^2} t^2. \quad (6)$$

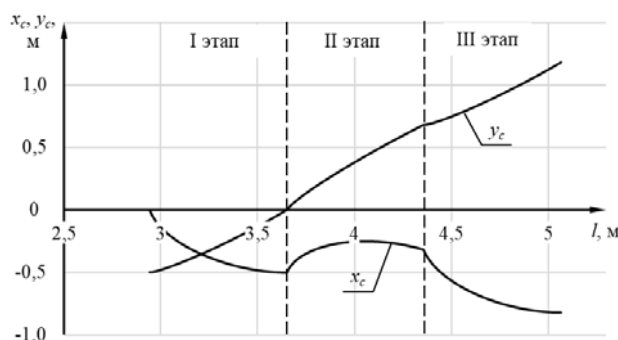


Рис. 2. График зависимостей координат центра масс мобильного робота от длины штока линейного привода механизма прижатия

Для обеспечения требуемого перемещения мобильного робота вычислены значения усилия, возникающего на штоке линейного привода

Для определения перемещения мобильного робота по рабочей поверхности получены графики зависимости координат его центра масс x_c и y_c от длины l линейного привода механизма прижатия (рис. 2). Построена траектория движения робота в плоскости XOY (рис. 3).

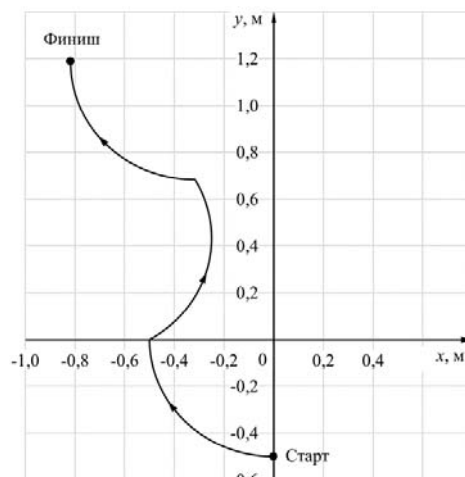


Рис. 3. Траектория движения центра масс робота

да механизма прижатия, и получен график зависимости указанного усилия от длины линейного привода, представленный на рис. 4.

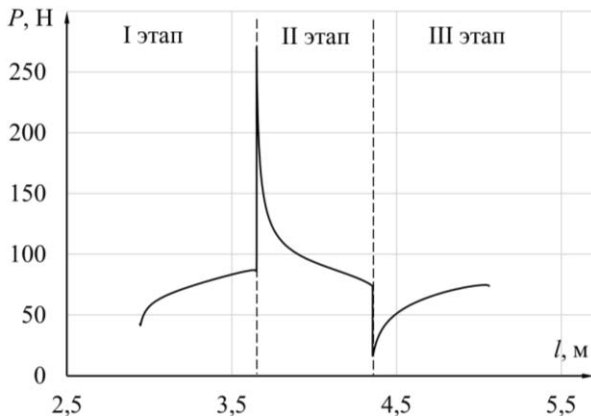


Рис. 4. График зависимости усилия, возникающего на штоке линейного привода механизма прижатия, от его удлинения при $x_{оп} = 0,5$ м; $y_{оп} = -3$ м

Выполненные расчеты позволяют определить диапазон изменения длины штока линейного привода механизма прижатия l от 2,9 до 5,1 м. При этом усилие P принимает значения от 20 до 270 Н. Одним из способов уменьшения значения данного усилия является определение оптимального расположения основания механизма прижатия робота. Так, уменьшение абсолютных значений его координат $x_{оп}$, $y_{оп}$ до 0,1 м и $-2,6$ м соответственно приводит к уменьшению требуемого усилия P до значений от 15 до 185 Н. При этом диапазон изменения длины штока линейного привода механизма прижатия l составляет от 2,4 до 4,5 м (рис. 5).

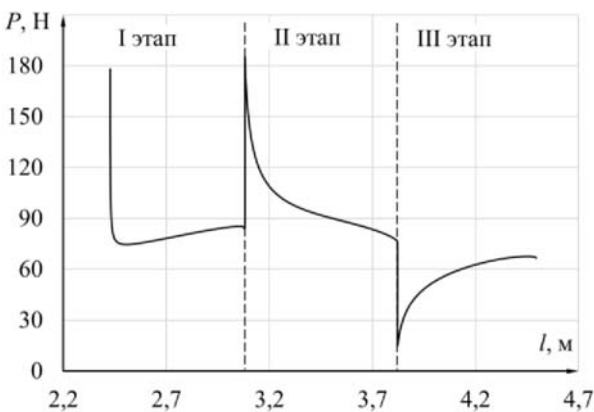


Рис. 5. График зависимости усилия, возникающего на штоке линейного привода механизма прижатия, от его удлинения при $x_{оп} = 0,1$ м; $y_{оп} = -2,6$ м

Скачки значений усилия на границах этапов движения объясняются граничными условиями: при переходе между этапами мобильный робот

совершает остановку, перед тем как сменить заторможенное колесо, после чего возобновляет движение.

Выводы

Решена задача определения перемещения центра масс мобильного робота по вертикальной поверхности:

- получены уравнения и траектория движения центра масс робота;
- определены координаты расположения опоры механизма прижатия, обеспечивающие минимальные значения усилия актуатора;
- вычислено усилие прижатия, развиваемое актуатором, необходимое для обеспечения требуемого перемещения.

Полученные результаты позволяют подобрать привод, необходимый для организации движения робота, и поставить задачу определения оптимальных режимов этого движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Silva, Manuel & Tenreiro Machado, José. A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion. 10.5772/8826. – 2010.
2. Градецкий, В. Г. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 1 (2). – С. 9–16.
3. Хачатрян, А. А. Мобильные робототехнические системы, перемещающиеся по произвольно ориентированным поверхностям: основные недостатки, достоинства, перспективы использования / А. А. Хачатрян // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (263) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 57–64.
4. Сырых, Н. В. Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами / Н. В. Сырых, В. Г. Чашухин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 5. – С. 163–173.
5. Daltorio, K. Mini-Whegs TM Climbs Steep Surfaces Using Insect-inspired Attachment Mechanisms / Daltorio, Kathryn and Wei, Terence and Horchler, Andrew and Southard, Lori and Wile, Gregory and Quinn, Roger and Gorb, Stanislav and Ritzmann, Roy // I. J. Robotic Res. – Vol. 28 – 2009. – Pp. 285–302.
6. Хачатрян, А. А. О перемещении трехопорного мобильного робота по произвольно ориентированной поверхности / А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 89–95.
7. Хачатрян, А. А. О перемещении мобильного робота по произвольно ориентированным поверхностям / А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 86–93.