

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА, ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ ПО НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.А. Хачатрян

Волгоградский государственный технический университет
Россия, 400005, Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28
E-mail: aram-081097@mail.ru

Ключевые слова: управление движением, динамика, математическая модель, мобильный робот, перемещение.

Аннотация: Предложена расчетная схема и математическая модель робототехнической системы, предназначенной для перемещения по наклонной поверхности. Решена задача динамики движения мобильного робота, перемещение которого обеспечивается за счет управления величиной и направлением усилия, развиваемого линейным приводом механизма прижатия. Получены уравнения движения центра масс мобильного робота и траектория его движения.

1. Введение

Роботы, способные перемещаться по наклонным поверхностям, имеют множество актуальных применений: осмотр и обслуживание зданий и сооружений, выполнение работ во время спасательных операций, в которых присутствие человека нецелесообразно или опасно. Под наклонной поверхностью понимается относительно ровная поверхность, расположенная под углом от 0° до 90° к горизонтали.

Кроме того, роботы для перемещения по вертикальным поверхностям могут быть полезны при выполнении различных технологических операций на высоте, что позволяет повысить безопасность и эффективность таких работ, а также снизить риски для человеческой жизни.

Известны разработки роботов, способных перемещаться по наклонным поверхностям за счет захватных и вакуумных устройств, электромагнитного взаимодействия, адгезии и тросовых движителей [1-5]. Анализ достоинств и недостатков применяемых движителей позволил за основу выбрать робот, опирающийся на наклонную поверхность за счет прижатия к ней «толкающим» движителем. Он может быть выполнен с использованием одноопорного механизма прижатия [6, 7], в котором за счет работы линейного привода осуществляется реализация усилия «прижатия» робота к обрабатываемой поверхности.

2. Постановка задачи

Ставится задача определения перемещения центра масс мобильного робота при известном выдвигании штока линейного привода (актуатора) и усилия, развиваемого актуатором для обеспечения требуемого перемещения. Задача дополняется построением траектории движения мобильного робота.

3. Математическая модель

3.1. Расчетная схема робототехнической системы с одной опорой на горизонтальную плоскость

Расчетная схема рассматриваемой робототехнической системы с одной опорой представлена на рис. 1 (а). Рассматривается движение робототехнической системы, состоящей из робота 1, представленного на рис. 1 характерной поверхностью S , перемещающегося по наклонной (рабочей) поверхности 2, опираясь на нее тремя опорами 3-5, за счет приложенного со стороны актуатора 6 усилия P . Актуатор при этом закреплен на опорной поверхности 7. Изучается вращательное движение мобильного робота вокруг заторможенных поочередно опор 3 и 4 при расторможенных остальных опорах и воздействия усилием P со стороны актуатора на мобильный робот.

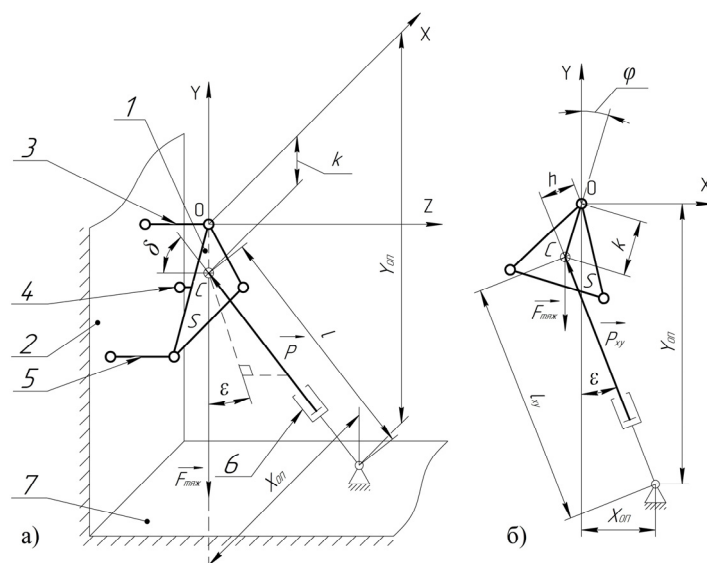


Рис. 1. Расчетная схема робота с прижимным механизмом: а) общий вид робототехнической системы; б) проекция робототехнической системы на плоскость XOY .

При описании расчетной схемы использованы следующие обозначения: C – центр масс робота; k – расстояние от каждой из опор робота до его центра масс; $x_{оп}$, $y_{оп}$ – 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 – длина штока линейного привода механизма прижатия; l_{xy} – проекция штока линейного привода механизма прижатия на плоскость XOY ; $F_{тяж}$ – сила тяжести, действующая на мобильный робот; P_{xy} – проекция усилия P на плоскость XOY ; h – расстояние от оси вращения до линии действия усилия P в плоскости XOY .

3.2. 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. Рассматриваемый процесс движения состоит из трех этапов. На первой

и третьем этапах вращение происходит относительно неподвижной опоры 3, на втором – относительно неподвижной опоры 5. Таким образом, поочередным торможением необходимых опор достигается требуемая траектория движения робота. Уравнение вращательного движения в дифференциальной форме представим в виде:

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

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

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

Координаты центра масс робота x_c и y_c в момент времени t , можно вычислить:

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

Зависимость длины линейного привода от времени можно задать следующим выражением:

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

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

3.3. Математическое моделирование

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

Таблица 1. Исходные данные для математического моделирования.

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

Для указанных начальных и граничных условий получена зависимость угла поворота мобильного робота вокруг начала координат от времени для первого этапа:

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

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). По полученным значениям координат x_c и y_c рассчитана траектория движения мобильного робота (рис. 3).

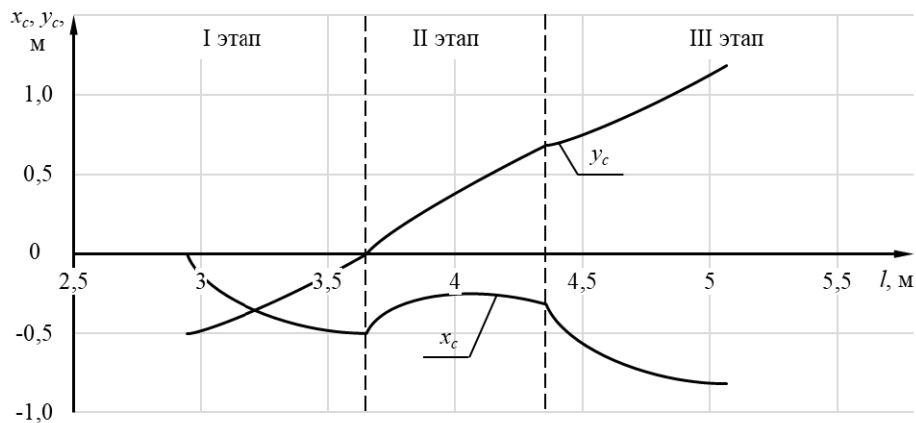


Рис. 2. График зависимостей координат центра масс мобильного робота от длины штока линейного привода механизма прижатия.

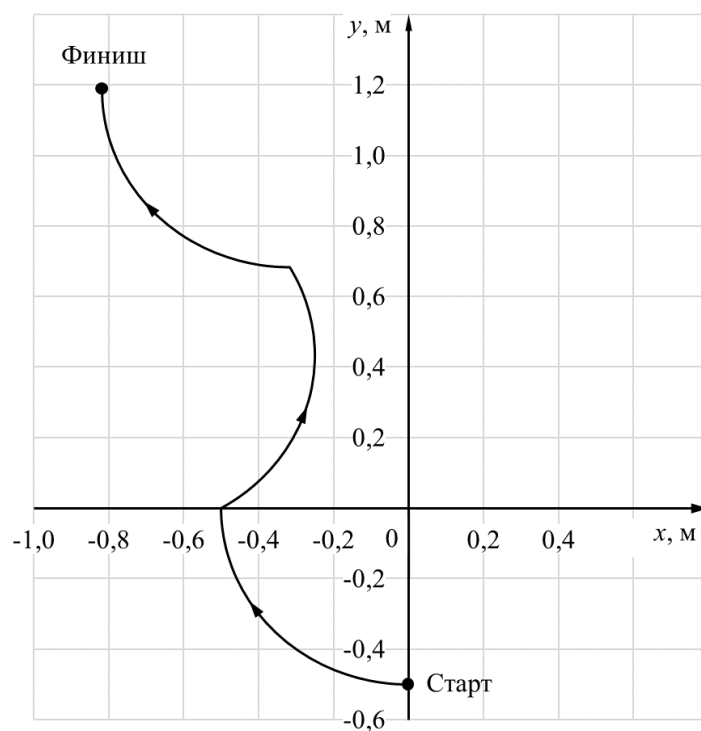


Рис. 3. Траектория движения центра масс робота.

Для обеспечения требуемого перемещения мобильного робота вычислены значения усилия, возникающего на штоке линейного привода механизма прижатия и получен график зависимости указанного усилия от длины линейного привода, показанный на рис. 4.

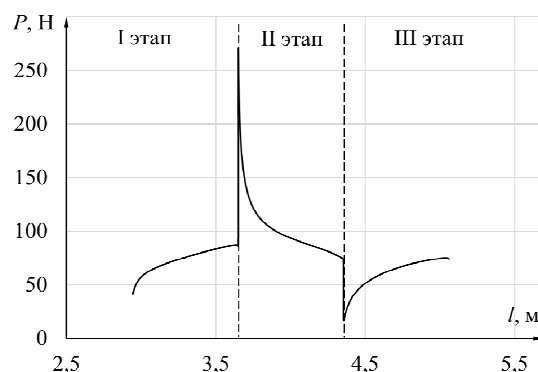


Рис. 4. График зависимости усилия, возникающего на штоке линейного привода механизма прижатия от его удлинения.

Выполненные расчеты позволили получить диапазон изменения длины штока линейного привода механизма прижатия l от 2,9 м до 5,1 м. При этом усилие P принимает значения от 20 Н до 270 Н. 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.

5. Выводы

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

- получены уравнения и траектория движения центра масс робота;
- вычислено усилие прижатия, развиваемое актуатором, необходимое для обеспечения требуемого перемещения.

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

Список литературы

1. Градецкий В.Г., Князьков М.М. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1 (2). С. 9-16.
2. Manuel F, Tenreiro Machado J.A. A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion // Climbing and Walking Robots. 2010.
3. Хачатрян А.А. Мобильные робототехнические системы, перемещающиеся произвольно ориентированным поверхностям: основные недостатки, достоинства, перспективы использования // Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы. 2022. № 4 (263). С. 57-64.
4. Побегайлов О.А., Кравченко И.В., Кожуховский С.О. Мобильные роботы вертикального перемещения // Инженерный вестник Дона. 2010. № 4 (14). С. 85-95.
5. Xiao J., Morris W., Chakravarthy N., Calle A. City Climber: a new generation of mobile robot with wall-climbing capability // Proc. of the SPIE. 2006. Vol. 6230. P. 62301.
6. Хачатрян А.А., Брискин Е.С. О перемещении трехопорного мобильного робота по произвольно ориентированной поверхности // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 4 (275). С. 89-95.
7. Хачатрян А.А., Брискин Е.С. Об управлении движением трехопорного мобильного робота по вертикальной плоскости // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 9 (280). С. 68-72.