

УДК 629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2025-4-299-84-88

*Н. Г. Шаронов, Р. В. Крайнов***КИНЕМАТИКА ЯКОРНО-ТРОСОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИИ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА****Волгоградский государственный технический университет**

sharonov@vstu.ru, rodikray@mail.ru

Рассматривается кинематика якорно-тросового движителя мобильного робота, корпус которого перемещается в плотных средах за счет притягивания гибкими связями к расположенным на неподвижной поверхности опорам. Приводится аналитическое решение уравнений кинематики движения опоры относительно корпуса с учетом геометрии механизма подъема-опускания.

Ключевые слова: механизм, якорно-тросовый движитель, мобильный робот.

*N. G. Sharonov, R. V. Krainov***KINEMATICS OF THE ANCHOR-ROPE PROPULSION UNIT
OF A MOBILE ROBOT TAKING INTO ACCOUNT
THE GEOMETRY OF THE LIFTING MECHANISM****Volgograd State Technical University**

The kinematics of the anchor-rope propulsion device of a mobile robot is considered. The mobile robot body moves in dense environments due to attraction by flexible connections to supports located on a fixed surface. The analytical solution of the equations of the kinematics of the movement of the «anchor» relative to the body is given, taking into account the geometry of the lifting-lowering mechanism.

Keywords: lifting mechanism, anchor-rope propulsion unit, mobile robot.

Введение

Широко известны механизмы подъемно-транспортных устройств, обеспечивающие перемещение прикрепленного к гибкой связи (канату, тросу, цепи) груза при намотке гибкой связи на барабан. Подобные механизмы являются неотъемлемой частью тросовых роботов различной конструкции [1; 2]. Учет конструкции направляющих роликов, лебедок, механизмов намотки не является принципиально новой задачей [3], однако в конкретных тросовых системах встречаются особенности, связанные с взаимным размещением механизмов и управлением приводами.

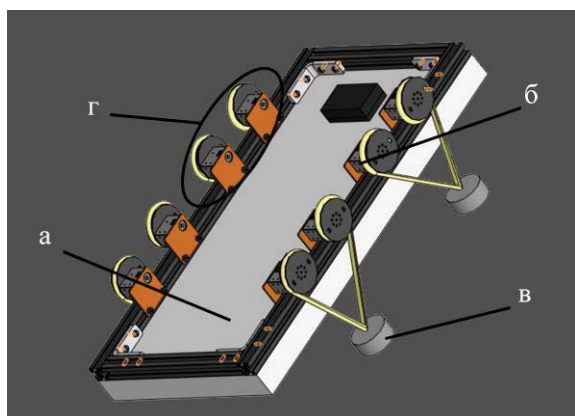


Рис. 1. Модель мобильного робота с якорно-тросовыми движителями:

a – платформа (корпус-понтон); *b* – сервопривод с барабаном механизма подъема; *v* – груз-опора; *z* – движитель

Известен [4] мобильный робот с якорно-тросовыми движителями (рис. 1), корпус которого немногим легче окружающей среды (например, перемещаемый под водой понтон с небольшой положительной плавучестью). Якорно-тросовые движители такого робота периодически дискретно взаимодействуют опорами («якорями») с поверхностью водоема.

Перемещение каждой из опор относительно движущегося корпуса происходит за счет одновременной работы двух механизмов подъема-опускания, включающих барабан и сервопривод, при этом предполагается отсутствие возможности контролировать фактическое положение опоры относительно корпуса. При согласованном управлении приводами нескольких движителей подобного робота возможные неточности программных законов могут привести к существенным отклонениям от целенаправленного движения.

Постановка задачи

С целью оценки возможных ошибок при управлении движением мобильного робота, вызванных не учитываемой в проведенных ранее исследованиях [5–7] геометрией барабана привода, рассматривается кинематика одного якорно-тросового движителя, лабораторная модель которого приведена на рис. 2.

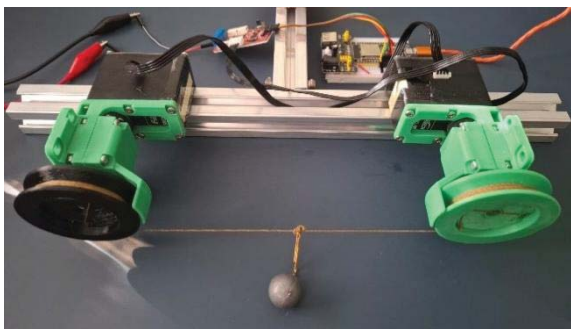


Рис. 2. Лабораторная модель якорно-тросового движителя

Рассматриваемое движение иллюстрируют рис. 3 (положение движителя с минимально возможной длиной гибкой связи и средним положением «якоря») и рис. 4 (произвольное положение «якоря»). Перемещение «якоря» относительно корпуса происходит в описываемой системой координат Oxz плоскости, перпендикулярной проходящим через точки M_1 и M_2 осям вращения установленных на серводвигатели барабанов и связанной с корпусом мобильного робота.

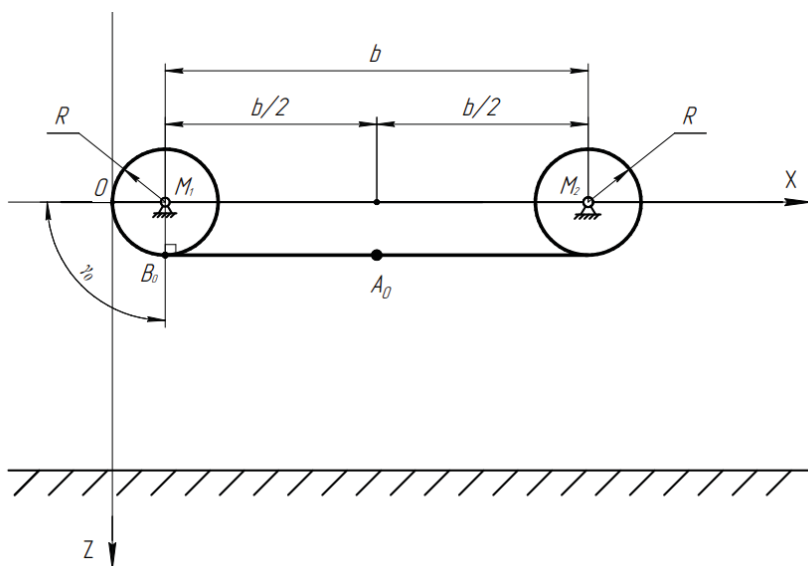


Рис. 3. Кинематическая схема якорно-тросового движителя (длина гибкой связи минимальна)

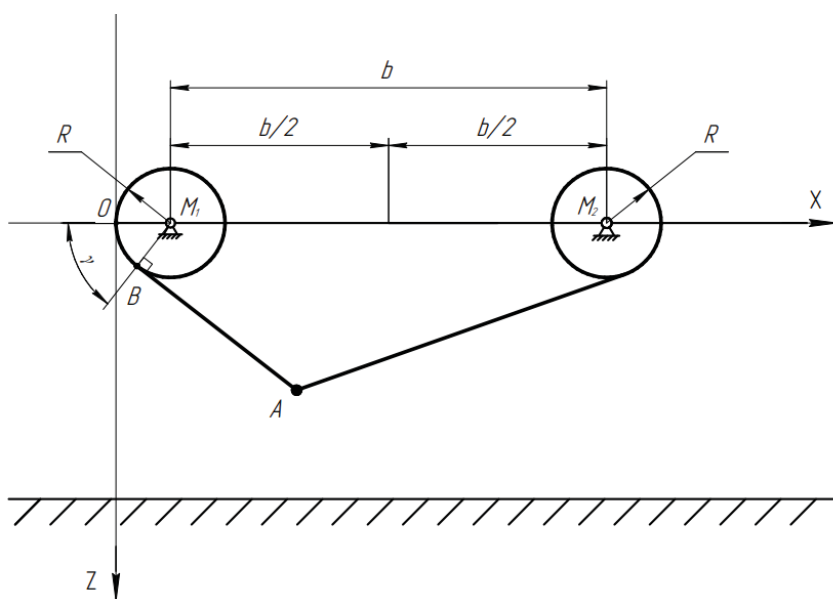


Рис. 4. Кинематическая схема якорно-тросового движителя при произвольном положении «якоря» (точка A)

Модель кинематики движения якоря

Задаваемый при управлении роботом угол φ поворота вала M сервопривода, на котором установлен барабан лебедки радиуса R , связан с начальным углом φ_0 поворота вала и длиной гибкой связи на барабане соотношением

$$\varphi R + \gamma R + AB = \varphi_0 R + \gamma_0 R + A_0 B_0, \quad (1)$$

где γ , γ_0 – текущий и начальный углы обхвата гибкой связью поверхности барабана, AB , $A_0 B_0$, – текущая и начальная длины свободной части гибкой связи от точки B барабана до точки A крепления «якоря».

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{A_0 B_0}{R} + \arctg \frac{R}{A_0 B_0} + \arctg \frac{x_0 - R}{z_0} - \frac{AB}{R} - \arctg \frac{R}{AB} - \arctg \frac{x - R}{z}, \quad (4)$$

где

$$A_0 B_0 = \sqrt{(x_0 - R)^2 + z_0^2 - R^2}, \quad AB = \sqrt{(x - R)^2 + z^2 - R^2}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) позволяют однозначно определить программные законы для управления серводвигателями робота при заданных $x(t)$, $z(t)$.

Совокупность уравнений (2) для всех движителей робота определяет движение опор («якорей») относительно корпуса. Шагающе-подобный характер движения опорных точек определяет существование на траектории $x = f(z)$ «якоря» участков, соответствующих опоре «якоря» на грунт (при некоторых допущениях, например, поступательном движении корпуса, зависимость $x(t)$ будет соответство-

Уравнения $x(t)$, $z(t)$ движения точки A («якоря») в связанной с корпусом системе координат:

$$\begin{cases} x = R - R \cos \gamma + AB \sin \gamma \\ z = R \sin \gamma + AB \cos \gamma \end{cases}. \quad (2)$$

Используя тривиальные геометрические соотношения для зависимости вспомогательного угла γ от координат «якоря» с учетом радиуса барабана лебедки

$$\gamma = \arctg \left(\frac{R}{AB} \right) + \arctg \left(\frac{x - R}{z} \right), \quad (3)$$

получаем задаваемый при управлении роботом угол φ поворота вала сервопривода в зависимости от законов $x(t)$, $z(t)$ движения «якоря»:

вать уравнению движения корпуса робота и ускоренному переносу «якоря».

Например, на участке траектории, соответствующей опорной фазе при поступательном равномерном движении корпуса, $x(t) = Vt$, $z(t) = z$ ($V = \text{const}$ – скорость поступательного движения корпуса, $z = \text{const}$ – расстояние от осей лебедок до поверхности дна водоема). Для такого простейшего движения программные законы управления серводвигателями, учитывающие геометрию барабана лебедки и соответствующие схеме рис. 3 начальные условия $\varphi_0 = 0$, $z_0 = R$, $x_0 = R + b/2$, $A_0 B_0 = b/2$, имеют вид:

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \frac{b}{2R} + \arctg \frac{2R}{b} + \arctg \frac{b}{2R} - \\ & - \frac{\sqrt{(Vt - R)^2 + z^2 - R^2}}{R} - \arctg \frac{R}{\sqrt{(Vt - R)^2 + z^2 - R^2}} - \arctg \frac{Vt - R}{z}. \end{aligned} \quad (6)$$

При отсутствии учета влияния геометрии барабана лебедки задаваемые при управлении ро-

ботом зависимости для угла φ поворота вала сервопривода будут иметь упрощенный вид [5–7]:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{A_0 B_0 - AB}{R} = \varphi_0 + \frac{\sqrt{(x_0 - R)^2 + z_0^2 - R^2} - \sqrt{(x - R)^2 + z^2 - R^2}}{R}. \quad (7)$$

Частный случай (6) равномерного поступательного движения корпуса при отсутствии учета геометрии барабана лебедки будет иметь вид:

$$\varphi(t) = \frac{1}{R} \left(\frac{b}{2} - \sqrt{(Vt - R)^2 + z^2 - R^2} \right). \quad (8)$$

Результаты моделирования

С целью сравнительной оценки движения мобильного робота по программным законам управления сервоприводом, определенным с учетом геометрии барабана лебедки (4) и без учета (8), проведено численное моделирование частного случая поступательного движения корпуса

и опорной фазы движителя с начальными условиями в соответствии со схемой рис. 3, а также с тестовыми значениями скорости движения $V = 1$ м/с, расстояния от осей лебедок до поверхности дна водоема $z = 0,1$ м, радиуса барабана блока лебедки $R = 0,03$ м.

Результаты численного моделирования программных законов управления приводом барабана лебедки приведены на рис. 5. При заданных тестовых значениях ошибки определения угла поворота, угловой скорости и углового ускорения составили 6–10 %.

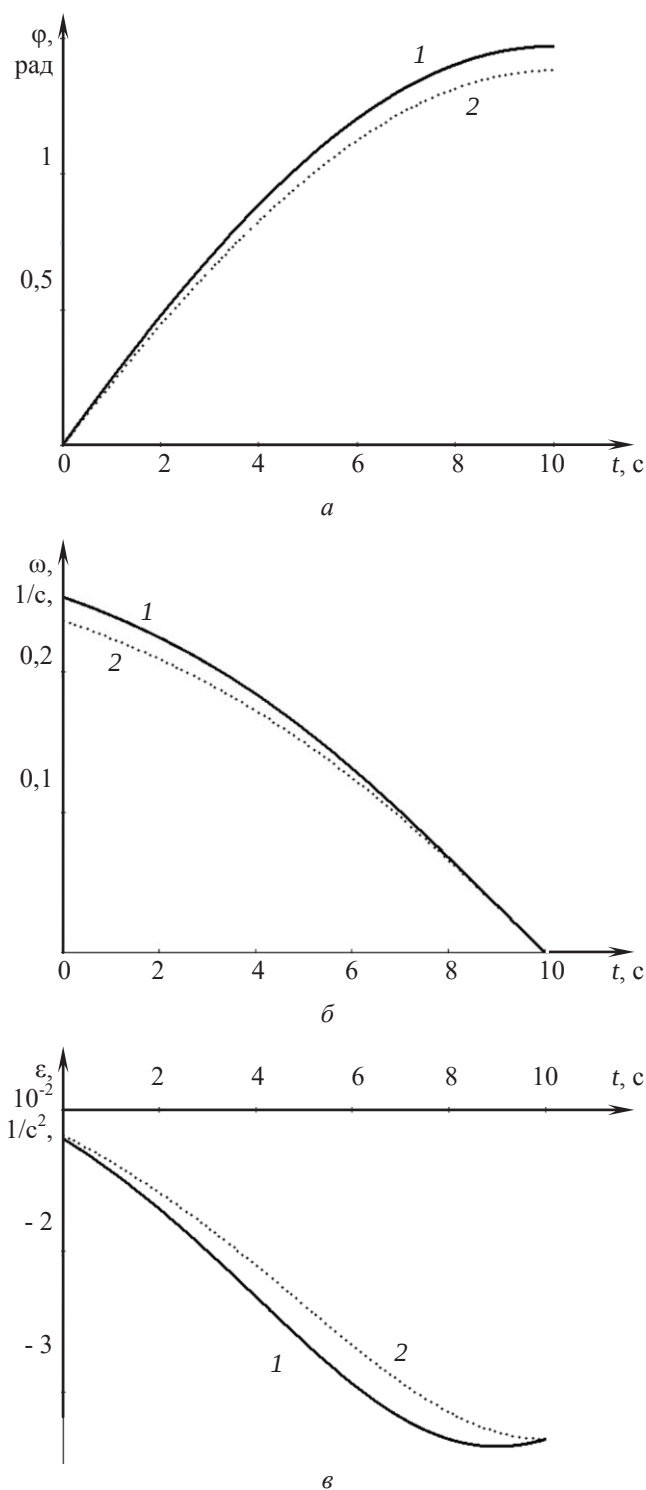


Рис. 5. Зависимости угла поворота (а), угловой скорости (б) и углового ускорения (в) вала сервопривода от времени (1 – с учетом геометрии барабана, 2 – без учета геометрии барабана)

Заключение

Учет геометрии барабана лебедки в математической модели кинематики якорно-тросового движителя позволяет улучшить точность программных законов управления сервоприводами мобильного робота, определяемых по заданными движениям корпуса и относительного движения опор механизмов передвижения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Qian, S. A Review on Cable-driven Parallel Robots / S. Qian, B. Zi, W.-W. Shang, Q.-S. Xu // Chin. J. Mech. Eng. – 2018. – № 31. – P. 66.
2. Гапоненко, Е. В. Структурный анализ и классификация роботизированных систем с приводными механизмами на основе кабельных элементов / Е. В. Гапоненко, Л. А. Рыбак, Л. Р. Холошевская // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 9. – С. 126–136.
3. Малолетов, А. В. Учет конструкций направляющих роликов и механизмов намотки при управлении движением тросового робота / А. В. Малолетов, А. С. Климчик, К. В. Костенко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 13 (223) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – С. 113–119.
4. Патент на полезную модель 217486 РФ, Двигатель для мобильной платформы / Е. С. Брискин, И. С. Пеньшин, Н. Г. Шаронов; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.
5. Some problems of controlling the cable propulsion devices of mobile robots / E. S. Briskin, N. G. Sharonov, M. I. Efimov [et al.] // Robots in Human Life- Proceedings of the 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2020. – Moscow, 2020. – P. 321–328.
6. Платонов, В. Н. Согласованное управление электроприводами движителей мобильных роботов, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью : дис. ... канд. техн. наук / В. Н. Платонов, 2022. – 132 с.
7. Пеньшин, И. С. Управление поступательным движением роботов-понтонных с якорно-тросовыми движителями : дис. ... канд. техн. наук / И. С. Пеньшин, 2023. – 141 с.