

**Г.Г. КИРАКОСЯН, А.Г. КАМАЛЯН, К.А. АВETИСЯН**  
**РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ**  
**УПРАВЛЕНИЯ ГУСЕНИЧНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ**

Исследуются вопросы моделирования и управления гусеничными мобильными роботами. Рассмотрена задача синтеза системы стабилизации линейных и угловых скоростей робота. Для реализации обратной связи в системе управления используются квадратурные энкодеры. Настройка коэффициентов регулятора осуществляется по математической модели. Представлены результаты моделирования и экспериментальной проверки.

*Ключевые слова:* динамическая модель, кинематическая модель, мобильный робот, гусеничная машина.

**Введение.** Гусеничные роботы на протяжении многих лет привлекают внимание многих исследователей. Они имеют широкий спектр применения в таких отраслях, как горная промышленность, лесозаготовка, сельское хозяйство, военное дело и т.д. На начальном этапе исследования гусеничных роботов особое внимание уделялось военным роботам. В настоящее время интенсивное развитие робототехники значительно расширило область применения гусеничных роботов. Гусеничные мобильные роботы (МР) предназначены для работы в суровых погодных условиях на грунтах с низкой несущей способностью (болото, снежная целина, бездорожье, пересеченная лесистая местность и т.д.) при температуре окружающей среды от минус 50°C до плюс 40°C.

Проблемы моделирования и управления движением МР всегда привлекали интерес исследователей, а развитие микропроцессорной техники дополнительно стимулировало этот интерес [1]. **Целью** настоящей работы является моделирование движения гусеничного мобильного робота, а также разработка микропроцессорной системы для управления гусеничным роботом.

**1. Кинематическая модель.** Криволинейное движение МР удобно исследовать с помощью системы координат, связанной с землей (рис.1).

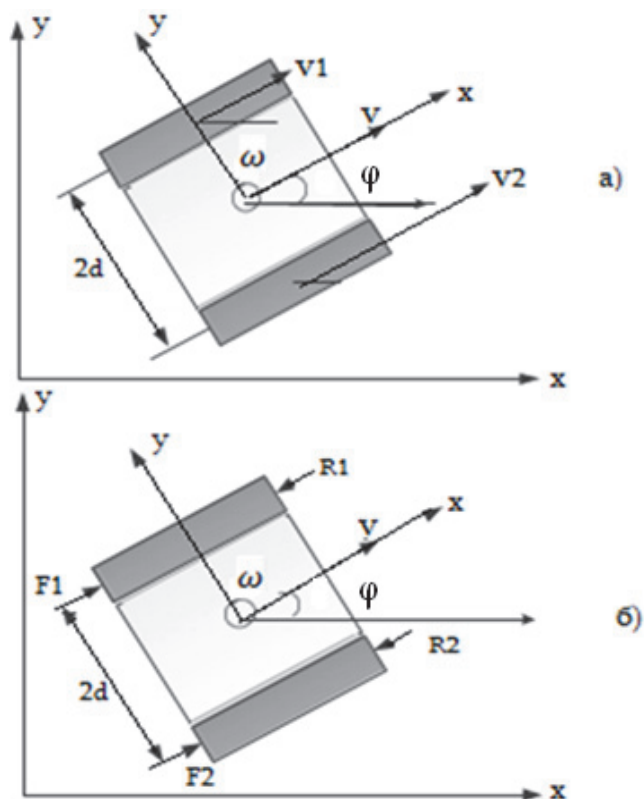


Рис. 1. Диаграмма сил для гусеничного робота.

а - кинематическая модель, б - динамическая модель

Положение МР в тот или иной момент времени определяется координатами  $X_{\text{см}}$ ,  $Y_{\text{см}}$  его центра масс, изменяющимися с течением времени. Формулы, выражающие зависимость  $X_{\text{см}}$  и  $Y_{\text{см}}$  от  $t$ , называются кинематическими уравнениями движения робота и могут быть записаны в виде [2,3]

$$\begin{aligned} \frac{dX_{\text{см}}}{dt} &= V \cos \varphi = \frac{V_1 + V_2}{2} \cos \varphi, \\ \frac{dY_{\text{см}}}{dt} &= V \sin \varphi = \frac{V_1 + V_2}{2} \sin \varphi, \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \omega = \frac{V_2 - V_1}{2d}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V_1, V_2$ ,  $V$ -линейные скорости левой и правой гусеницы и центра масс МР соответственно;  $\omega$ - угловая скорость МР вокруг оси, проходящей через центр масс робота;  $\varphi$  -угол между вектором скорости  $\vec{V}$  и осью  $X$ .

**2. Динамическая модель.** Динамические уравнения движения МР в горизонтальной плоскости, показанные на рис. 1, имеют вид

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_T - \vec{R}, \quad (2)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_R,$$

где тяга  $\vec{F}_T = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$  - движущая сила;  $\vec{R}$  - сила сухого трения;  $M_T$ - вращающий момент;  $M_R$ - момент сил трения;  $I$ -момент инерции МР.

Движущая сила определяется тяговым усилием гусеницы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , проекции которых на ось X можно выразить следующим образом [3]:

$$F_i = \frac{M_i \cdot i_g}{r}, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

где  $i_g$  - передаточное отношение коробки передач;  $r$ - радиус ведущего колеса;  $M_i$  - вращающий момент двигателя. Предположим, что у робота есть два двигателя постоянного тока, поэтому вращающий момент каждого двигателя можно выразить как [2,4]

$$M_i = c \cdot I_i, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

где  $c$  - постоянный момент двигателя;  $I_i$ - ток в обмотке  $i$ -го якоря двигателя. На основании второго закона Кирхгофа получаются следующие уравнения:

$$L \frac{dI_i}{dt} = -RI_i - c_e \omega_{ri} + U_i, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

где  $R, L$  - сопротивление и индуктивность обмотки якоря двигателя;  $c_e$  - постоянная ЭДС двигателя;  $U_i$  - напряжение, подаваемое на обмотку якоря двигателя.

Вращающий момент  $M_T$  согласно [2,3] равен

$$M_T = (F_2 - F_1)d = \frac{i_g c d}{r} (I_2 - I_1). \quad (6)$$

Сила сухого трения и момент силы трения можно определить следующим образом [3]:

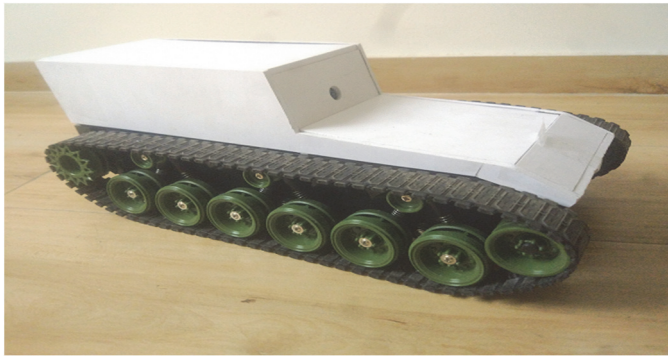
$$R = \mu_x mg, \quad M_R = \mu_y \frac{mgl}{3}, \quad (7)$$

где  $\mu_x, \mu_y$  - коэффициенты продольного и поперечного трения.

Объединяя уравнения (2)-(7), после несложных преобразований получаем динамическую модель МР [2]:

$$\begin{aligned}
m \frac{dV}{dt} &= \frac{c i_g}{r} (I_1 + I_2) - \mu_x m g, \\
J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{c i_g d}{r} (I_2 - I_1) - \mu_y \frac{m g l}{3}, \\
L \frac{dI_1}{dt} &= -R I_1 - \frac{c_e i_g}{r} (V + d\omega) + U_1, \\
L \frac{dI_2}{dt} &= -R I_2 - \frac{c_e i_g}{r} (V - d\omega) + U_2.
\end{aligned} \tag{8}$$

**3. Параметры робота.** Объектом исследования является МР на базе гусеничного шасси EarthRover (рис. 2). В качестве блока управления роботом используется плата RaspberryPi.



*Рис. 2. Внешний вид гусеничного робота*

Технические характеристики МР Earthrover:

- а) линейные размеры робота;
- б) длина гусеницы  $l=35\text{см}$ ;
- в) расстояние между гусеницами  $d=20\text{см}$ ;
- г) масса робота  $m=1,5\text{ кг}$ .

Параметры моторов:

- а) номинальное напряжение двигателя -  $U_n=12\text{ В}$ ;
- б) индуктивность ротора -  $L=0,12\text{ Гн}$ , а сопротивление ротора -  $R=100\text{ Ом}$ ;
- в) передаточное число коробки передач -  $i_g=92$ ;
- г) разрешение энкодера - 1200 импульсов на 2 оборота колеса.

**4. Конструкция системы отслеживания.** Предлагается следующая структура микропроцессорной системы управления для Earthrover-a (рис.3).

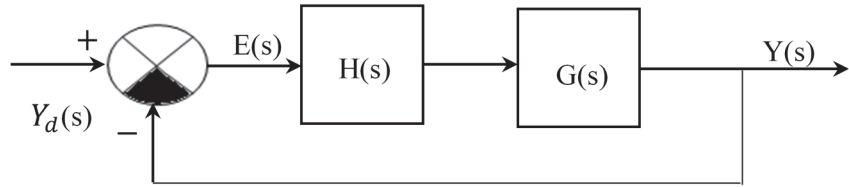


Рис.3. Структура микропроцессорной системы управления

Характеристическое уравнение замкнутой системы имеет вид

$$1 + H(s)G(s) = 0, \quad (9)$$

где  $H(s) = (s + a)/(s + 2)$  – передаточная функция регулятора;  $G(s) = 200/[s(s + 3)(s + 7)]$  – передаточная функция гусеничного робота.

Регулятор  $H(s)$  выполняет задачу управления гусеничным роботом в замкнутой системе с тем, чтобы действительное положение робота  $Y(t)$  становилось как можно ближе к заданной входной функции  $Y_d(t)$ . Такая микропроцессорная система называется системой слежения, поскольку ее действительная выходная функция  $Y(t)$  постоянно отслеживает изменение заданного входного сигнала  $Y_d(t)$ . Ошибка  $e(t) = y_d(t) - y(t)$ , которая сохраняется в пределе  $t \rightarrow \infty$ , называется установившейся ошибкой. Для установившейся ошибки получим

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t).$$

Обозначив изображения Лапласа функций  $y(t)$ ,  $y_d(t)$  и  $e(t)$  через  $Y(s)$ ,  $Y_d(s)$  и  $E(s)$  соответственно и используя важное свойство преобразования Лапласа, а именно - теорему об окончательном значении, находим

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s).$$

После несложных преобразований получим

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sY_d(s)}{1 + G(s)H(s)}.$$

В дальнейшем рассматриваются две траектории для движения робота, т.е. движение по окружности и 8 - образной траектории. Первая траектория в параметрическом виде описывается формулами

$$x_0(t) = R \sin(\Omega t),$$

$$y_0(t) = R \cos(\Omega t),$$

где  $R$  – радиус окружности, а  $\Omega$  – угловая скорость робота. Для  $x$ -компоненты движения робота по окружности изображение имеет вид

$$Y_{d1}(s) = \frac{\Omega R}{s^2 + \Omega^2}.$$

Подставив это выражение в формулу для  $e_{SS}$ , получим, что  $e_{SS} = 0$ . Для  $y$ -компоненты движения робота по окружности можно повторить аналогичный расчет и убедиться, что снова  $e_{SS} = 0$ . То есть в случае 1-й траектории гусеничный робот точно отслеживает заданный входной сигнал. Легко можно убедиться, что в случае 2 - й траектории тоже  $e_{SS} = 0$  для двух компонент движения робота по осям  $X$  и  $Y$ .

Кинематическая модель (1) используется для расчета заданной траектории  $Y_d(s)$ . Измерение текущего положения  $X_{cm}$ ,  $Y_{cm}$  МР осуществляется квадратурными энкодерами, установленными внутри редуктора Earthrover-a.

Динамическая модель используется для настройки регулятора  $H(s)$ , который служит для генерации управляющих напряжений для двигателей Earthrover-a. В качестве регулятора используется регулятор  $H(s)$  на базе платы RaspberryPi.

**5. Экспериментальные результаты.** Для демонстрации эффективности рассматриваемой микропроцессорной системы управления было проведено численное моделирование в среде Matlab/Simulink. Используемая здесь модель Earth rover основана на кинематическом уравнении (1) и динамических уравнениях (7). Параметры модели выбирались так, чтобы они соответствовали параметрам реального экспериментального мобильного робота Earth rover. Модель была смоделирована в Simulink для получения теоретических результатов, которые сравнивались с экспериментальными данными.

Нами была также использована программа Matlab/Simulink для создания желаемой траектории  $Y_d(s)$ . После расчета желаемой траектории полученные данные передаются на Earth rover по беспроводному соединению Wi-Fi.

Чтобы протестировать разработанную нами систему, рассмотрим две траектории разных форм: форму круга и форму «8». Результаты представлены на рис.4 и 5. Показано, что разработанная микропроцессорная система имеет хорошее качество слежения. Для хорошей работы системы требуется только одно условие: начальное положение робота должно находиться на заданной траектории.

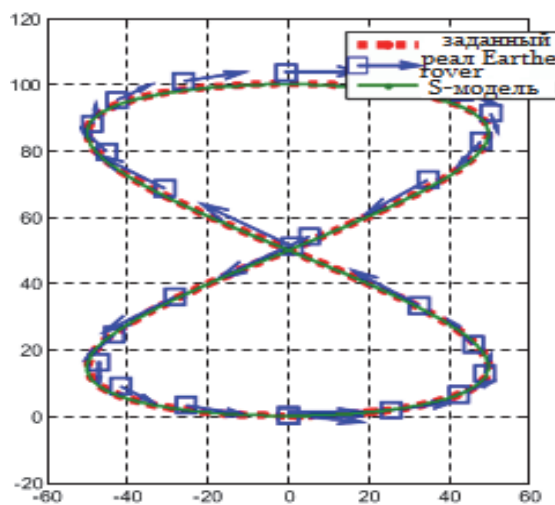


Рис. 4. Сравнение теоретических и экспериментальных данных для 8-образной траектории

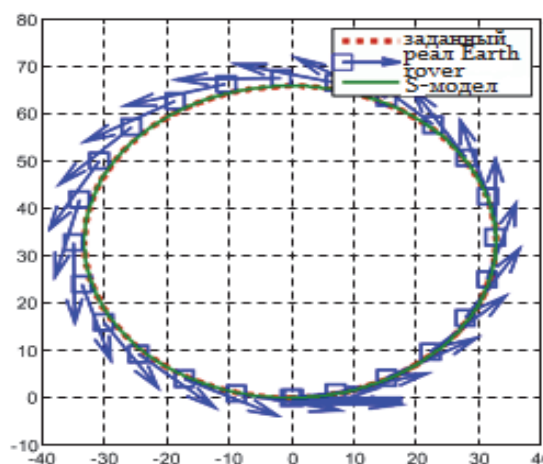


Рис. 5. Сравнение теоретических и экспериментальных данных для движения по окружности

**Заключение.** Разработана система управления траекторией для гусеничного робота Earthrover. Система основана на отрицательной обратной связи по скорости. Недостатком можно отметить то, что робот должен изначально располагаться на заданной траектории для достижения хорошего качества отслеживания. Это связано с отсутствием на борту автономной навигационной системы. Последующие исследования должны быть направлены на разработку системы управления траекторией, способной работать при произвольном начальном положении робота.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фархи О., Скопчанов М., Драганова Э., Христосков Х.** Встроенное нечеткое управление двухколесным мобильным роботом//Материалы Международной конференции по автоматике и информатике. -2010.- С. 217-220.
2. **Мартыненко Ю.Г.** Управление движением мобильных колесных роботов //Фундамент. прикл. мат. -2005. - Вып. 11, № 8.- С. 29-80.
3. **Вонг, Дж.Ю. (Джо Юнг).** Теория наземных транспортных средств. -3-е изд.- Джон Уайли и сын, Inc., 2001.
4. **Kozlowski K., Pazderski D.** Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot //Int.J.Appl. Math. Comput.Sci.-2004. -Vol. 14. -P.477-496.

**Գ. Հ. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ, Ա. Գ. ՔԱՄԱԼՅԱՆ, Ք. Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ**

### **ՄԻԿՐՈՊՐՈՑԵՍՈՐԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԹՐԹՈՒՐԱՎՈՐ ՇԱՐԺԱԿԱՆ ՌՈԲՈՏԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱՐ**

Քննարկվում են թրթուրավոր շարժական ռոբոտի մոդելավորման և կառավարման հարցերը: Դիտարկված է ռոբոտի գծային և անկյունային արագությունների կայունացման համակարգի սինթեզի խնդիրը: Կառավարման համակարգում հետադարձ կապի իրականացման համար օգտագործվում են քառակուսի կոդավորիչներ: Կարգավորիչի գործակիցների ճշգրտումն իրականացվում է ըստ մաթեմատիկական մոդելի: Ներկայացված են մոդելավորման և փորձարարական ստուգման արդյունքները:

**Առանցքային բառեր.** դինամիկ մոդել, կինեմատիկական մոդել, շարժական ռոբոտ, թրթուրավոր մեքենա:

**G.H. KIRAKOSYAN, A.G. QAMALYAN, Q.A. AVETISYAN**

### **DEVELOPMENT OF A MICROPROCESSOR SYSTEM FOR CONTROLLING A TRACKED MOBILE ROBOT**

The modeling and control of tracked mobile robots are studied. The problem of synthesis of the robot's linear and angular velocity stabilizing system is considered. To implement the feedback in the control system, quadrature encoders are used. Setting the coefficients of the regulator is carried out by the mathematical model. The results of simulation and experimental testing are presented.

**Keywords:** dynamic model, kinematic model, mobile robot, tracked vehicle.