

ПАВЛЮКОВЕЦ С.А., ВЕЛЧЕНКО А.А., РАДКЕВИЧ А.А.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ ГУСЕНИЧНЫМ РОБОТОМ С УЧЕТОМ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

В работе разработана математическая модель системы управления мобильным гусеничным роботом, которая учитывает кинематические параметры (угловые скорости вращения катков и центра масс робота, линейную скорость передвижения робота и угол его поворота относительно нормали к оси) и динамические параметры (моменты инерции, усилия сопротивления и электромеханические параметры применяемых электродвигателей), что позволило дать наиболее полное математическое представление описания движения гусеничного мобильного робота. Получена система управления мобильными роботами по заранее заданной траектории с учетом обратных связей по положению.

Ключевые слова: мобильный гусеничный робот, математическая модель, кинематические и динамические параметры

Введение

Из числа всех видов мобильных роботов, разработанных за последние десятилетия, наиболее многофункциональными представляются мобильные роботы, использующие в качестве движителя гусеничные ленты. Применение современных систем управления, основанных, в том числе на методах искусственного интеллекта, в сочетании с преимуществами гусеничных шасси, таких как увеличенная площадь сцепления с поверхностью, образываемая растягиваемой между опорными и приводными элементами гусеницей, обеспечивающая наилучшую проходимость по сравнению с колесными роботами, возможность движения мобильного робота по пересеченной местности с большими уклонами и ступеням, обеспечение высокой грузоподъемности и другие возможности предопределили широкое распространение гусеничных мобильных роботов, в первую очередь, в военной технике и сельском хозяйстве.

Формализация условий поведения гусеничного мобильного робота в пространстве описывается его математической моделью, которая характеризует статические и динамические характеристики робота, позволяя исследовать и анализировать его работу без использования аппаратных средств [1].

В настоящее время имеется ряд научных источников, в которых рассматривается вопрос математического моделирования гусеничных мобильных роботов. В частности, в статье [2] анализируется задача управления движением мобильного робота в неопределенных средах с обходом препятствий с использованием лазерных систем для управления. В источнике [3] предложена комплексная методика процесса построения численной модели

гусеничной машины для анализа ее движения, однако без учета ее кинематических и динамических параметров. В статьях [1, 4, 5] проанализировано применение методов искусственного интеллекта для управления мобильными роботами. Данные источники рассматривают математические модели гусеничных мобильных роботов либо без учета их кинематических и динамических параметров, либо анализируют системы управления мобильными роботами в общем случае, без учета специфики гусеничных движителей.

В данной статье авторами предлагается разработка математической модели системы управления мобильным гусеничным роботом, которая учитывает кинематические параметры (угловые скорости вращения катков и центра масс робота, линейную скорость передвижения робота и угол его поворота относительно нормали к оси) и динамические параметры (моменты инерции, усилия сопротивления и электромеханические параметры применяемых электродвигателей), что позволяет составить наиболее полное математическое описание движения гусеничного мобильного робота.

Исходя из выше сказанного, целью данной статьи является разработка математической модели системы траекторного управления гусеничным мобильным автономным роботом с учетом его кинематических и динамических параметров.

Назначение моделируемого гусеничного мобильного робота предполагает его применение в точном земледелии. В данной статье рассматривается разработка математической модели и анализ системы траекторного управления ходовой части робота, обеспечивающей его перемещение по заранее заданной траектории, определяемой требуемой последовательностью выполнения операций.

Построение математической модели гусеничного мобильного робота

Для математического описания гусеничного мобильного робота рассмотрим кинематические и динамические модели и исследуем управляемость ходовой части объекта.

Прямая кинематическая модель гусеничного движителя описывается кинематикой дифференциального привода, определяемого матрицей состояний:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\varphi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi(t)) & 0 \\ \sin(\varphi(t)) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vartheta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где x, y – координаты центра масс робота; φ – угол между вектором линейной скорости и нормалью к оси; ϑ – линейная скорость перемещения робота; ω – угловая скорость вращения центра масс робота.

Однако, дифференциальный привод предполагает идеальный контакт трения качения между колесом и поверхностью, в то время как гусеничный привод имеет большую площадь соприкосновения и требует проскальзывания для поворота гусениц. Поэтому, прямая кинематическая модель не столь надежна для оценки положения гусеничного движителя, чем для дифференциального колесного привода.

Визуализация кинематической модели гусеничного движителя в пространстве изображена на рис. 1. Как видно из рисунка, положение робота определяется координатой точки центра масс гусеницы O_1 в подвижной системе координат $(\bar{X}_1, \bar{Y}_1, \bar{Z}_1)$ и углом поворота гусеницы φ относительно неподвижного базиса $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$. При кинематическом анализе движения решается задача определения положения, скорости центра масс гусеницы и скорости точек центра катков и их соприкосновения с лентой [6].

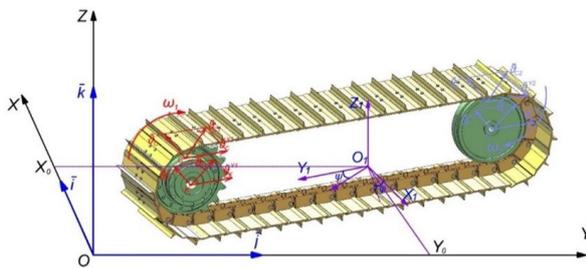


Рисунок 1. Визуализация кинематической модели гусеничного движителя в пространстве

На данной модели (рис. 1) обозначены: $O, (\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ – неподвижная система координат; $O_1, (\bar{X}_1, \bar{Y}_1, \bar{Z}_1)$ – подвижная система координат; C_1, C_2 – точки крепления центров опорных катков; K_1, K_2 – точки контакта гусеничных лент с поверхностью;

$\bar{q}_{C_1}, \bar{q}_{C_2}$ – скорости точек крепления центров опорных катков; $\bar{q}_C^{x1}, \bar{q}_C^{x2}$ – проекции скоростей точек крепления опорных катков на ось OX_1 ; $\bar{q}_C^{y1}, \bar{q}_C^{y2}$ – проекции скоростей точек крепления опорных катков на ось OY_1 ; $\bar{q}_{K_1}, \bar{q}_{K_2}$ – скорости точек контакта опорных катков с поверхностью; $\bar{q}_K^{x1}, \bar{q}_K^{x2}$ – проекции скоростей точек контакта опорных катков с поверхностью на ось OX_1 ; $\bar{q}_K^{y1}, \bar{q}_K^{y2}$ – проекции скоростей точек контакта опорных катков с поверхностью на ось OY_1 ; ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения опорных катков; φ – угол поворота гусеницы вокруг оси OZ_1 относительно OY ; Ψ – угол поворота гусеницы вокруг оси OZ_1 относительно OX .

Радиус-вектор, описывающий движение гусеницы в неподвижной системе координат, описывается матричным уравнением:

$$\bar{r}_{O_1} = \begin{bmatrix} x_{O_1} \\ y_{O_1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где x_{O_1}, y_{O_1} – проекции радиус-вектора в относительной системе координат.

Скорость центра масс гусеничного робота рассчитывается исходя из выражения:

$$\frac{d\bar{r}_{O_1}}{dt} = \begin{bmatrix} \vartheta_C \cos(\Psi) \\ \vartheta_C \sin(\Psi) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vartheta_C^{x1} \\ \vartheta_C^{y1} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Скорость центра масс в подвижном базисе $(\bar{X}_1, \bar{Y}_1, \bar{Z}_1)$ описывается в матричном виде:

$$\bar{q}_{O_1}^{(1)} = \begin{bmatrix} \vartheta_C \cos(\Psi) \\ \vartheta_C \sin(\Psi) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vartheta_C^{x1} \\ \vartheta_C^{y1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

а скорость центра масс в неподвижной системе координат $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ имеет вид:

$$\bar{q}_{O_1}^{(0)} = \begin{bmatrix} \vartheta_C \cos(\Psi + \varphi) \\ \vartheta_C \sin(\Psi + \varphi) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vartheta_C^x \\ \vartheta_C^y \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Радиус-вектор закрепления катков гусеничного робота определяется как:

$$\bar{r}_i = \bar{r}_{OC} + \bar{r}_{CC_i}, \quad i = \{1...4\}. \quad (6)$$

Линейные скорости этих точек задаются дифференциальными уравнениями:

$$\bar{q}_{C_i} = \frac{d\bar{r}_i}{dt} = \frac{d\bar{r}_{OC}}{dt} + \frac{d\bar{r}_{CC_i}}{dt} = \frac{d\bar{r}_{OC}}{dt} + \bar{\omega} \cdot \bar{r}_{CC_i} = \bar{q}_C + \bar{\omega} \cdot \bar{r}_{CC_i}. \quad (7)$$

Радиус-вектор точек контакта катков с поверхностью выражается уравнением:

$$\bar{r}_{Ki}^{(0)} = \bar{r}_i + \bar{r}_{C_i K_i}, \quad i = \{1...4\}. \quad (8)$$

Продифференцируем выражение (8):

$$\frac{d\bar{r}_{Ki}^{(0)}}{dt} = \frac{d\bar{r}_i}{dt} + \frac{d\bar{r}_{C_i K_i}}{dt}. \quad (9)$$

Линейные скорости точек контакта катков с поверхностью K_i в абсолютной системе координат $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ определяются уравнениями:

$$\bar{\mathfrak{Q}}_{Ki}^{(0)} = \bar{\mathfrak{Q}}_{Ci} + \bar{\omega}_i \cdot \bar{r}_{C_i K_i}; \quad (10)$$

$$\bar{\mathfrak{Q}}_{Ki}^{(0)} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{K_i} \\ \dot{y}_{K_i} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{C_i} \\ \dot{y}_{C_i} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \omega_{1X} & \omega_{1Y} & 0 \\ 0 & 0 & r_{C_i K_i} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Линейные скорости точек контакта катков с поверхностью K_i в относительной системе координат $(\bar{X}_1, \bar{Y}_1, \bar{Z}_1)$ определяются уравнениями:

$$\bar{\mathfrak{Q}}_{Ki}^{(1)} = \bar{\mathfrak{Q}}_{Ki}^{(0)} \cdot T_{10}^{-1}, \quad (12)$$

где

$$T_{10}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$T_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Положения точек центров катков гусениц задаются системами уравнений:

$$\begin{cases} x_{C_1} = x_C + l_1 \cdot \cos(\varphi + \alpha_1); \\ y_{C_1} = y_C + l_1 \cdot \sin(\varphi + \alpha_1). \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} x_{C_2} = x_C + l_1 \cdot \cos(\varphi - \alpha_1); \\ y_{C_2} = y_C + l_1 \cdot \sin(\varphi - \alpha_1). \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_{C_3} = x_C - l_2 \cdot \cos(\varphi + \alpha_2); \\ y_{C_3} = y_C - l_2 \cdot \sin(\varphi + \alpha_2). \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} x_{C_4} = x_C - l_2 \cdot \cos(\varphi - \alpha_2); \\ y_{C_4} = y_C - l_2 \cdot \sin(\varphi - \alpha_2). \end{cases} \quad (18)$$

где x_{C_i}, y_{C_i} – координаты центра i -го катка, $i = \{1...4\}$; x_C, y_C – координаты центра масс корпуса робота; l_1, l_2 – расстояния от центра масс робота до 1 и 4, 2 и 3 катков соответственно; φ – угол поворота робота вокруг оси OZ_1 ; α_1, α_2 – углы между диагоналями l_1, l_2 и осями подвижной системы координат \bar{X}_1, \bar{Y}_1 .

Построение системы управления гусеничного мобильного робота с учетом кинематической и динамической моделей

С целью исследования управляемости ходовой части гусеничного робота как многомерного объекта рассмотрим его кинематическую и динамическую модели.

Движение гусеничного мобильного робота в подвижной системе координат $(\bar{X}_1, \bar{Y}_1, \bar{Z}_1)$ определяется уравнениями, описывающими его кинематическую модель [2]:

$$\begin{cases} \mathfrak{Q}_1 = r \cdot \omega_1 \cdot (1 - i_1); \\ \mathfrak{Q}_2 = r \cdot \omega_2 \cdot (1 - i_2); \\ \mathfrak{Q} = (\omega_1 \cdot (1 - i_1) + \omega_2 \cdot (1 - i_2)) \cdot \frac{r}{2}; \\ \varphi = \frac{\arctg(\mathfrak{Q}_1 - \mathfrak{Q}_2)}{b}; \\ \omega = (\omega_2 \cdot (1 - i_2) - \omega_1 \cdot (1 - i_1)) \cdot \frac{r}{b}; \\ R = \frac{(\omega_1 \cdot (1 - i_1) + \omega_2 \cdot (1 - i_2)) \cdot \frac{b}{2}}{(\omega_2 \cdot (1 - i_2) - \omega_1 \cdot (1 - i_1))}. \end{cases} \quad (19)$$

где \mathfrak{Q}_1 – линейная скорость движения левой гусеницы; \mathfrak{Q}_2 – линейная скорость движения правой гусеницы; \mathfrak{Q} – поступательная скорость движения гусеничного робота; r – радиус ведущего гусеничного катка; ω_1, ω_2 – угловые скорости ведущих гусеничных катков; ω – угловая скорость поворота робота относительно центра масс; φ – угол поворота робота относительно неподвижной системы координат $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$; l – длина гусеничной ленты; b – ширина мобильного гусеничного робота; R – радиус поворота гусеничного робота; i_1, i_2 – коэффициенты скольжения левой и правой гусениц соответственно.

Угловая скорость корпуса робота представляется матричным уравнением:

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Визуализированная математическая модель гусеничного мобильного робота показана на рисунке 2.

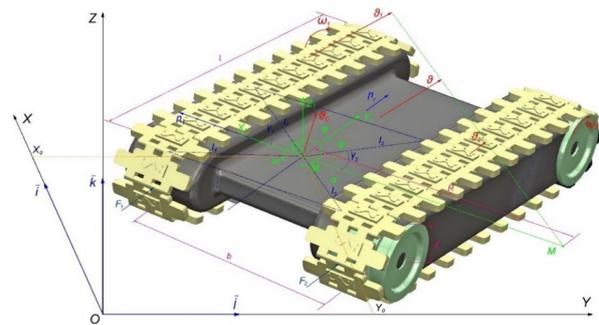


Рисунок 2. Визуализация математической модели гусеничного мобильного робота

С учетом принятых допущений, нелинейная динамическая модель гусеничного мобильного робота описывается системой дифференциальных уравнений [3].

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \vartheta \cdot \cos \varphi; \\ \frac{dy}{dt} = \vartheta \cdot \sin \varphi; \\ \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{1}{r \cdot m} \cdot (\tau_1 + \tau_2); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2r \cdot J_C} \cdot (\tau_1 - \tau_2); \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega. \end{cases} \quad (21)$$

где m – масса гусеничного робота; τ_1, τ_2 – электромагнитные моменты, развиваемые электроприводами ведущих катков; J_C – момент инерции робота относительно центра масс.

На робот при повороте на месте или на малых скоростях центробежная сила не оказывает существенного влияния, однако на высоких скоростях она представляется значительной и распределяется равномерно в поперечном направлении к вектору направления движения. В этой ситуации центробежная сила рассчитывается как:

$$F_C = m \cdot \varphi^2 \cdot R. \quad (22)$$

Сила инерции вычисляется как:

$$F = \frac{F_C}{2l}. \quad (23)$$

Центробежная сила создает момент сопротивления M_R , направленный встречно поворотному движению гусеничного робота.

Динамическая модель робота при повороте описывается уравнениями движения:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{y}_1 = F_1 + F_2 - F_C \cdot \sin \alpha - F_{R2} - F_{R1}; \\ m \cdot \ddot{x}_1 = F_C \cdot \cos \alpha - g \cdot \mu_1; \\ \alpha = \arctg \frac{\omega^2 \cdot l}{4 \cdot g} \cdot \mu_1; J_Z \frac{d\omega}{dt} = M_C - M_R; \\ M_C = [(F_1 - F_{R1}) - (F_2 - F_{R2})] \cdot \frac{b}{2}; \\ F_{R1} = \left(\frac{m}{2} + \frac{H \cdot m \cdot \vartheta_1^2 \cdot x}{b \cdot R} \right) \cdot \mu_R; \\ F_{R2} = \left(\frac{m}{2} - \frac{H \cdot m \cdot \vartheta_2^2 \cdot x}{b \cdot R} \right) \cdot \mu_R; \end{cases} \quad (24)$$

где H – высота центра тяжести над гусеницей; J_Z – момент инерции относительно вертикальной оси Z ; M_C – момент относительно центра масс робота; F_{R1}, F_{R2} – продольные силы сопротивления; μ_R – коэффициент продольного сопротивления; μ_l – коэффициент бокового сопротивления; g – ускорение силы тяжести; α – угол скольжения.

Управление роботом осуществляется с помощью контроля скорости катков, приводимых в движение двигателями постоянного тока

последовательного возбуждения, математическая модель которых имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dI_A}{dt} = \frac{U - c \cdot \omega_d - I_A \cdot R_\Sigma}{L}; \\ \frac{d\omega_d}{dt} = \frac{c \cdot I_A - M_C}{J_{ДВ}}, \end{cases} \quad (25)$$

где I_A – ток якоря двигателя, А; U – напряжение двигателя, В; C – конструктивная постоянная двигателя, В·с/рад; ω_d – угловая скорость приводной оси, рад/с; R_Σ – суммарное сопротивление двигателя, Ом; M_C – статический момент на валу двигателя, Н·м; $J_{ДВ}$ – момент инерции двигателя, кг·м².

Тогда математическая модель левого дифференциального привода записывается согласно выражению:

$$\begin{cases} \frac{dI_{Я1}}{dt} = \frac{U_1 - c \cdot \omega_1 - I_{Я1} \cdot R_\Sigma}{L}; \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{c \cdot I_{Я1} - M_C}{J_{ДВ}}. \end{cases} \quad (26)$$

Математическая модель правого дифференциального привода рассчитывается исходя из системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dI_{Я2}}{dt} = \frac{U_2 - c \cdot \omega_2 - I_{Я2} \cdot R_\Sigma}{L}; \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{c \cdot I_{Я2} - M_C}{J_{ДВ}}. \end{cases} \quad (27)$$

где ω_1, ω_2 – угловая скорость левого и переднего правого катков соответственно; $I_{Я1}, I_{Я2}$ – ток якоря левого и правого двигателей соответственно; U_1, U_2 – напряжение питания левого и правого двигателей соответственно.

Таким образом, полученные выражения (26, 27) для левого и правого дифференциального привода, позволяют описать прямую кинематическую модель гусеничного движителя.

Заключение

В ходе математического исследования системы траекторного управления мобильным гусеничным роботом с учетом его кинематических и динамических параметров, было получено:

1. Математическая модель мобильного робота на основе его параметрических кинематических и динамических уравнений, которая позволит проводить структурно-параметрический синтез системы траекторного управления гусеничным роботом, что ведет к повышению качества его управляемости;

2. Планирование траектории перемещения мобильного гусеничного робота по двум видам траекторного управления на основании его математической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романов, П.С. Подходы к созданию интеллектуальной системы управления мобильным роботом / П.С. Романов, И.П. Романова // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2018. – № 1. – С. 1-13.
2. Salem, F.A. Dynamic and kinematic models and control for differential drive mobile robots / F.A. Salem // International Journal of Current Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 3, № 2. – P. 253-263.
3. К вопросу управления мобильным роботом с колесами всенаправленного типа / С.А. Павлюковец [и др.] // BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics : сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции, Минск, 17–18 мая 2023 г. : в 2 ч. Ч. 2 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2023. – С. 94-102.
4. Mahfouz, A.A. Modeling, simulation and dynamics analysis issues of electric motor for mechatronics applications using different approaches and verification by MATLAB/Simulink / A.A. Mahfouz, M.K. Mohammed, F.A. Salem // International Journal of Intelligent Systems and Applications. – 2013. – Vol. 5, № 5. – P. 39-57.
5. Юдинцев, Д.В. Методика построения математической модели гусеничной машины для анализа движения / Д.В. Юдинцев, М.С. Рублев. – Текст: электронный // Проектирование систем вооружения боеприпасов и измерительных комплексов : Труды 17-й Всероссийской научно-технической конференции (01–02 октября 2020 г., г. Нижний Тагил). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2021. – С. 456-461.
6. Яцун, С.Ф. Математическое моделирование мобильного гусеничного робота / С.Ф. Яцун, Чжо Пью Вей, А.В. Мальчиков, Е.С. Тарасова // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 236-237

REFERENCES

1. Romanov P.S., Romanova I.P. Approaches to the creation of an intelligent control system for a mobile robot. Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don", 2018, № 1, pp. 1-13.
2. Salem, F.A. Dynamic and kinematic models and control for differential drive mobile robots. International Journal of Current Engineering and Technology, 2013, vol. 3, № 2, pp. 253-263.
3. On the issue of controlling a mobile robot with omnidirectional wheels / S.A. Pauliukavets [et al.] // BIG DATA and high-level analysis = BIG DATA and Advanced Analytics : collection of scientific articles of the IX International Scientific and Practical Conference, Minsk, May 17–18, 2023 : at 2 h. Part 2 / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; editorial board: V.A. Bogush [and others]. Minsk, 2023, pp. 94-102.
4. Mahfouz A.A., Mohammed M.K., Salem F.A. Modeling, simulation and dynamics analysis issues of electric motor for mechatronics applications using different approaches and verification by MATLAB/Simulink. International Journal of Intelligent Systems and Applications, 2013, vol. 5, № 5, pp. 39-57.
5. Yudin D.V., Rublev M.S. Methodology for constructing a mathematical model of a tracked vehicle for motion analysis. Design of weapon systems of ammunition and measuring complexes: Proceedings of the 17th All-Russian Scientific and Technical Conference (October 01–02, 2020, Nizhny Tagil). Nizhny Tagil: NTI (branch) UrFU, 2021, pp. 456-461.
6. Yatsun S.F., Zhuo Pyo Wei, Boys A.V., Tarasova E.S. Mathematical modeling of a mobile caterpillar robot. Scientific Review. Technical science, 2014, no. 2, pp. 236-237.

PAULIUKAVETS S.A., VELCHENKO A.A., RADKEVICH A.A.

MATHEMATICAL MODEL OF THE CONTROL SYSTEM OF MOBILE CATERPILLAR ROBOT TAKING INTO ACCOUNT KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

The paper developed a mathematical model of the control system for a mobile tracked robot, which takes into account the kinematic parameters (angular speeds of rotation of the rollers and the center of mass of the robot, the linear speed of the robot and its angle of rotation relative to the normal to the axis) and dynamic parameters (moments of inertia, resistance forces and electromechanical parameters used electric motors), which made it possible to give the most complete mathematical representation of the description of the movement of a caterpillar mobile robot. A control system for mobile robots along a predetermined trajectory is obtained, taking into account position feedback.

Keywords: *mobile caterpillar robot, mathematical model, kinematic and dynamic parameters*



Павлюковец Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов управления мобильными роботами.

Siarhei Pauliukavets, PhD, associate professor, head of the department «Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes» of the Belarusian National Technical University. The area of scientific interests is related to the development of methods and algorithms for controlling mobile robots.

E-mail: s.pauliukavets@bntu.by



Вельченко Анна Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с разработкой и исследованием нейросетевых регуляторов для электропривода в мобильной робототехнике и солнечной энергетике.

Anna Velchenko, PhD, associate professor, associate professor of the department «Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes» of the Belarusian National Technical University. The area of scientific interests is related to the development and research of neural network controllers for electric drives in mobile robotics and solar energy.

E-mail: anna.velchenko@bntu.by



Радкевич Артем Андреевич, магистрант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с разработкой систем управления электроприводами.

Artsiom Radkevich, master's student of the department «Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes» of the Belarusian National Technical University. The area of scientific interests is related to the development of control systems for electric drives.

E-mail: artyomradkevichbntu@bntu.by