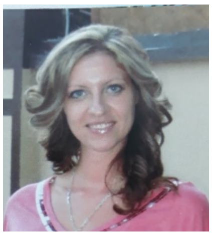
УДК 621.865.8:629.055

АЛГОРИТМИКА УПРАВЛЕНИЯ ЧЕТЫРЕХКОЛЕСНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

С.А. Павлюковец
Заведующий кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ, кандидат технических наук, доцент
sap@bntu.by



А.А. Вельченко
Доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ, кандидат технических наук, доцент
anna.velchenko@gmail.com

Ян Шисинь
Аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ
yang_shi_xin@163.com

Д.Ю. Чаплыгин
Аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ
dmitrij.tchaplygin@yandex.ru

А.А. Радкевич
студент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ
artyomradkevichbntu@gmail.com

Н.О. Савко
студент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ
nikitsauko@mail.ru

С.А. Павлюковец

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.

А.А. Вельченко

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.

Ян Шисинь

Аспирант Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с исследованием алгоритмов управления колесными мобильными роботами.

Д.Ю. Чаплыгин

Аспирант Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с исследованием алгоритмов управления робототехническими комплексами для точного земледелия.

А.А. Радкевич

Студент 4-го курса Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с разработкой систем управления электроприводами.

Н.О. Савко

Студент 3-го курса Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с разработкой математических моделей электропривода.

Аннотация. В данной работе представлен анализ построения кинематических и динамических моделей четырехколесных мобильных роботов. Для трех случаев передачи вращательного момента (при задней ведущей оси, при передней ведущей оси и при передаче движения к обеим осям мобильного робота), которые определяются характерной структурой уравнений модели, изучены следующие вопросы: голономность и неголономность системы; подвижность и управляемость; конфигурация и механизация (оснащение приводными блоками).

Ключевые слова: четырехколесный мобильный робот, неголономность, управление, математическая модель.

Введение.

В современном мире способы передвижения наземных робототехнических систем и комплексов различного назначения характеризуются большим разнообразием. Основой любого колесного мобильного робота (КМР) является шасси той или иной конструкции. Шасси мобильного робота представляет собой совокупность частей, обеспечивающих передачу механической энергии от двигателей к активным элементам движителя – ведущим колесам, звездочкам, шкивам, выходным звеньям механизмов изменения геометрии шасси или механизмов шагания и т.п., – объединенных вместе с электроприводами в функциональную конструктивную подсистему.

Цель настоящей работы заключается в обобщении и представлении общей и единой информации обо всех математических моделях четырехколесных мобильных роботов.

Кинематика и динамика мобильного робота.

Колесный мобильный робот является автоматической интеллектуальной технической системой, выполняющей заданные действия согласно интегрированной в нее базе знаний, перемещающейся в пространстве посредством колес по заданному алгоритму либо самостоятельно определяя траекторию перемещения.

По числу колес выделяют одноколесные, двухколесные, трехколесные и четырехколесные мобильные роботы. По типу колес различают традиционные и всенаправленные (*omni*-) колеса. В первом случае движение колеса по плоскости рассматривается как качение без проскальзывания. При этом скорость точки колеса, в определенный момент времени взаимодействующей с плоскостью движения, равна нулю, а составляющие скорости этой точки колеса равны нулю как в проекции на вектор, лежащий в плоскости колеса, так и в проекции на вектор, перпендикулярный плоскости колеса. В *omni*-колесе лишь одна компонента скорости точки соприкосновения колеса с плоскостью движения равна нулю при движении.

В данной работе описаны математические модели управления применительно к мобильным роботам с колесами традиционного типа для случаев управления различными осями колес: в первом случае ведущая ось – задняя, во втором случае ведущая ось – передняя, в третьем случае обе оси являются ведущими. Примем допущения, что в процессе движения плоскость каждого колеса остается вертикальной по отношению к плоскости движения, и вращение каждого колеса происходит вокруг соответствующей горизонтальной оси, проходящей через центр колеса, а сами колеса и корпус КМР не подвергаются деформации.

Все имеющиеся математические модели управления КМР подразделяются на динамические и кинематические. Динамическая модель описывает движение системы в момент действия на нее внешних сил. Эта модель описывает взаимодействие физических параметров движения и включает параметры энергии, массы системы, инерции и скорости. Описание динамических моделей производится дифференциальными уравнениями второго порядка. Кинематическая модель описывает геометрические взаимодействия, которые присутствуют в системе. Она описывает взаимосвязь между входными (управляющими) параметрами и реакцией системы, заданной представлением в пространстве состояний. Кинематическая модель описывает быстродействие системы и представляется системой дифференциальных уравнений первого порядка. Для разработки алгоритмов управления КМР обычно достаточно кинематических моделей управления, в то время как для других робототехнических систем, применяемых в космонавтике, авиации или шагающих роботах, также необходимо динамическое моделирование.

Существует несколько типов кинематических моделей:

- внутренняя кинематическая модель описывает взаимосвязь между внутренними переменными системы, например, вращением колеса и движением робота;
- внешняя кинематическая модель описывает положение и ориентацию робота в соответствии с некоторой системой координат;
- прямая кинематика и инверсная кинематика.

Прямая кинематика описывает состояния робота в зависимости от его входных данных (скорости вращения колес, движения суставов, рулевого управления и др.). Инверсная кинематика является способом планирования движения. Это означает, что входные параметры робота могут быть рассчитаны для желаемой последовательности выходных состояний.

Внутренняя кинематическая модель КМР, описывающая его положение на плоскости, определяется трехкомпонентным вектором положения $q(t)$

$$q(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \\ \varphi(t) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

где X_1, Y_1 – координаты точки О центра робота в неподвижной системе координат ($\vec{X}, \vec{Y}$);
φ – угол между системами координат, определяющими положение подвижного базиса ($\vec{\alpha}, \vec{\beta}$) относительно неподвижного базиса ($\vec{X}, \vec{Y}$)

Положение четырехколесного мобильного робота на плоскости в этом случае проиллюстрировано на рисунке 1.

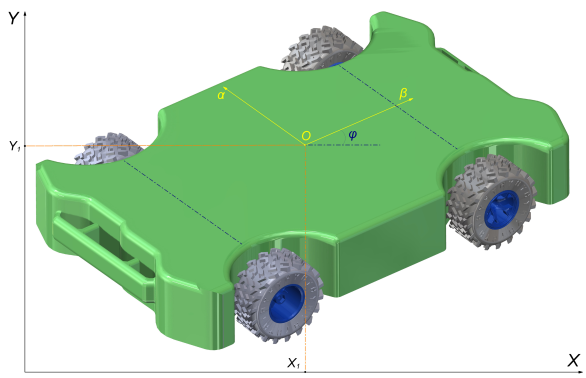


Рисунок 1. Определение положения КМР на плоскости

Повоот подвижной системы координат ($\vec{\alpha},\vec{\beta}$) относительно неподвижной системы координат ($\vec{X},\vec{Y}$) во внешней кинематической модели определяется транспонированным вектором $[X_1,Y_1]^T$ и ортогональной матрицей

$$R(\varphi)=\begin{bmatrix}\cos\varphi & \sin\varphi & 0\\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}. \qquad (2)$$

Далее рассмотрим математические модели управления КМР для различных типов приводных осей. Принимаем во внимание, что движение робота осуществляется по горизонтальной плоскости без проскальзывания, и вращение каждого колеса происходит вокруг соответствующей горизонтальной оси, проходящей через центр колеса.

Четырехколесный мобильный робот с задней приводной осью.

В четырехколесных мобильных роботах, где все колеса традиционного типа, реализован принцип геометрии рулевого управления Аккермана для поворота передней оси. Он состоит в том, чтобы оси всех колес представлялись в виде радиусов окружностей с общей центральной точкой. Поскольку задние колеса зафиксированы, эта центральная точка должна находиться на линии, продолжающейся от задней оси. Пересечение осей передних колес на этой линии также требует, чтобы одно из колес было повернуто при повороте на больший угол, чем другое колесо.

Кинематическая модель четырехколесного мобильного робота с двумя ведущими задними и двумя передними рулевыми колесами традиционного типа представлена на рисунке 2.

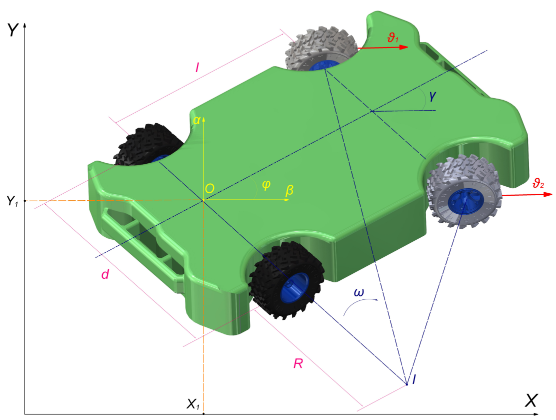


Рисунок 2. Кинематическая модель КМР с задней приводной осью

В качестве переменных состояния колесного робота рассматриваются величины:

X_1, Y_1 – координаты базовой точки робота;

γ_1, γ_2 – угол поворота переднего левого и переднего правого колеса соответственно;

γ – угол поворота платформы робота;

φ – угол поворота центральной линии платформы робота;

v_1, v_2 – модули вектора скорости правого и левого колеса соответственно;

L – расстояние от базовой точки до передней оси;

d – ширина платформы робота;
I – точка мгновенного центра скоростей;
R – расстояние от ведущей оси до точки I;
ω – угловая скорость вращения ведущей оси.

Направление вращения колес передней оси определяется из выражений

$$\begin{cases} \tan\left(\dfrac{\pi}{2}-\gamma_1\right)=\dfrac{R+\dfrac{d}{2}}{L}; \\ \tan\left(\dfrac{\pi}{2}-\gamma_2\right)=\dfrac{R-\dfrac{d}{2}}{L}. \end{cases} \tag{3}$$

Углы поворота колес передней оси выражаются из уравнений (3)

$$\begin{cases} \gamma_1=\dfrac{\pi}{2}-\arctan\left(\dfrac{R+\dfrac{d}{2}}{L}\right); \\ \gamma_2=\dfrac{\pi}{2}-\arctan\left(\dfrac{R-\dfrac{d}{2}}{L}\right). \end{cases} \tag{4}$$

Поскольку правое и левое передние колеса вращаются вокруг мгновенного центра скоростей с одинаковой угловой скоростью ω, их окружные скорости равняются

$$\begin{cases} v_1=\omega\cdot\left(R+\dfrac{d}{2}\right); \\ v_2=\omega\cdot\left(R-\dfrac{d}{2}\right). \end{cases} \tag{5}$$

Кинематическая модель робота описывается следующей системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{X}=v\cdot\cos\varphi; \\ \dot{Y}=v\cdot\sin\varphi; \\ \dot{\varphi}=\omega=\dfrac{v\cdot tg\gamma}{L}. \end{cases} \tag{6}$$

Перемещение робота описывается системой линейных дифференциальных уравнений

$$\dot{X}=Ax+Bu, \tag{7}$$

где A и B – матрицы состояния и управления соответственно;
x – вектор состояний;
u – вектор управления.

Представляя линейную непрерывную траекторию движения робота в дискретном виде, причем время дискретизации Δt стремится к нулю, а траектория на каждом из участков линейна, запишем систему линейных уравнений (7) в виде

$$X^{K+1} = \tilde{A}x^K + \tilde{B}u, \tag{8}$$

где $\tilde{A} = A \cdot \Delta t + \varepsilon,\ \tilde{B} = B \cdot \Delta t;$
ε – отклонение от заданной траектории (ошибка позиционирования);
k – шаг дискретизации.

Уравнение (7) возможно представить в матричном виде

$$\begin{bmatrix} v_X^{K+1} \\ v_Y^{K+1} \\ \omega^{K+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_X^K \\ v_Y^K \\ \omega^K \end{bmatrix} + B \cdot Q \cdot \Delta t \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega_2 \\ \Delta\omega_3 \\ \Delta\omega_4 \end{bmatrix}, \tag{9}$$

где матрица управления B принимает значение

$$B = 2\pi r \cdot \begin{bmatrix} 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ -0,25 & 0,25 & 0,25 & -0,25 \\ -\frac{1}{2\cdot(d+l)} & \frac{1}{2\cdot(d+l)} & -\frac{1}{2\cdot(d+l)} & \frac{1}{2\cdot(d+l)} \end{bmatrix}, \tag{10}$$

а матрица поворота Q имеет вид

$$Q = \begin{bmatrix} \cos\varphi^K & -\sin\varphi^K & 0 \\ \sin\varphi^K & \cos\varphi^K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Четырехколесный мобильный робот с передней приводной осью.

Далее рассмотрим математические модели четырехколесного мобильного робота с ведущими передними колесами традиционного типа. Его кинематическая схема отображена на рисунке 3.

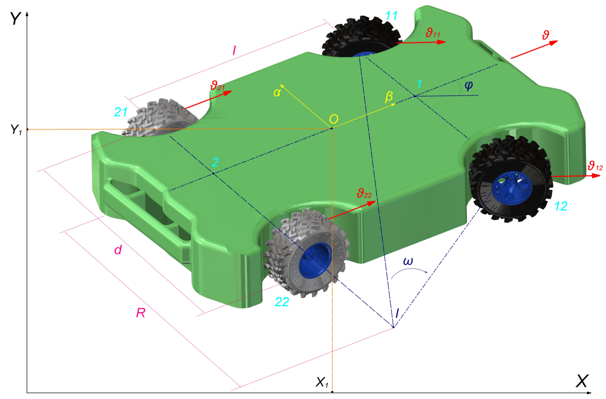


Рисунок 3. Кинематическая модель КМР с передней приводной осью

Данный тип робота использует для движения два передних колеса: 11 – переднее левое колесо, линейная скорость которого обозначена ϑ_{11}, 12 – переднее правое колесо, линейная скорость которого обозначена ϑ_{12}, 21 – заднее левое колесо, линейная скорость которого обозначена ϑ_{21}, 22 – заднее правое колесо, линейная скорость которого обозначена ϑ_{22}.

Так как мобильный робот оснащен дифференциальным приводом, контроль маневрирования устройства осуществляется путем увеличения или уменьшения скорости на двигателе, приводящем в движение ось. Следовательно, для четырехколесного мобильного робота, линейная скорость переднего привода определяется по формуле

$$\vartheta = \frac{\vartheta_{11} + \vartheta_{12}}{2}. \quad (12)$$

Управление роботом осуществляется с помощью контроля скорости колес, приводящихся в движение двигателями постоянного тока с независимым возбуждением, математическая модель которых имеет следующий вид

$$\begin{cases} \dfrac{dI_Я}{dt} = \dfrac{U - C\cdot\omega_d - I_Я\cdot R}{L}; \\ \dfrac{d\omega_d}{dt} = \dfrac{C\cdot I_Я - M_C}{J_{ДВ}}, \end{cases} \quad (13)$$

где $I_Я$ – ток якоря двигателя, А;
U – напряжение двигателя, В;
C – конструктивная постоянная двигателя, В·с/рад;
ω_d – угловая скорость приводной оси, рад/с;
R – суммарное сопротивление двигателя, Ом;
M_C – статический момент на валу двигателя, Н·м;
$J_{ДВ}$ – момент инерции двигателя, кг·м^2.

Тогда математическая модель дифференциальных приводов передней оси может быть записана согласно выражению:

$$\begin{cases} \dfrac{dI_{Я11}}{dt} = \dfrac{U - C\cdot\omega_{11} - I_{Я11}\cdot R}{L}; \\ \dfrac{d\omega_{11}}{dt} = \dfrac{C\cdot I_{Я11} - M_C}{J_{ДВ}}; \\ \dfrac{dI_{Я12}}{dt} = \dfrac{U - C\cdot\omega_{12} - I_{Я12}\cdot R}{L}; \\ \dfrac{d\omega_{12}}{dt} = \dfrac{C\cdot I_{Я12} - M_C}{J_{ДВ}}; \\ \vartheta = \dfrac{\omega_{11}\cdot R + \omega_{12}\cdot R}{2}, \end{cases} \quad (14)$$

где ω_{11}, ω_{12} – угловая скорость переднего левого и переднего правого колес соответственно, рад/с;

Кинематическая модель четырехколесного мобильного робота с передней приводной осью имеет следующий вид

$$\begin{cases} \dfrac{d\alpha}{dt} = \left(\dfrac{\vartheta_{11} + \vartheta_{12}}{2}\right)\cdot\sin\varphi + x_0; \\ \dfrac{d\beta}{dt} = \left(\dfrac{\vartheta_{11} + \vartheta_{12}}{2}\right)\cdot\cos\varphi + y_0; \\ \dfrac{d\varphi}{dt} = \left(\dfrac{\vartheta_{12} - \vartheta_{11}}{L}\right) + \varphi_0, \end{cases} \quad (15)$$

где α, β – координаты КМР в подвижной системе отсчета;

ϑ_{11}, ϑ_{12} – линейные скорости левого переднего и правого переднего приводного колеса соответственно;

L – расстояние между осями КМР;

φ – угол поворота КМР в подвижной системе координат;

$[x_0, y_0, \varphi_0]$ – начальные координаты в неподвижной системе отсчета, равные нулю.

На основании совмещений математических моделей (14) и (15) получим обобщенную кинематическую модель КМР в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{dI_{Я11}}{dt} = \dfrac{U - C\cdot\omega_{11} - I_{Я11}\cdot R}{L}; \\ \dfrac{d\omega_{11}}{dt} = \dfrac{C\cdot I_{Я11} - M_C}{J_{ДВ}}; \\ \dfrac{dI_{Я12}}{dt} = \dfrac{U - C\cdot\omega_{12} - I_{Я12}\cdot R}{L}; \\ \dfrac{d\omega_{12}}{dt} = \dfrac{C\cdot I_{Я12} - M_C}{J_{ДВ}}; \\ \vartheta = \dfrac{\omega_{11}\cdot R + \omega_{12}\cdot R}{2}; \\ \dfrac{d\alpha}{dt} = \left(\dfrac{\vartheta_{11}+\vartheta_{12}}{2}\right)\cdot\sin\varphi + x_0; \\ \dfrac{d\beta}{dt} = \left(\dfrac{\vartheta_{11}+\vartheta_{12}}{2}\right)\cdot\cos\varphi + y_0; \\ \dfrac{d\varphi}{dt} = \left(\dfrac{\vartheta_{12}-\vartheta_{11}}{L}\right) + \varphi_0. \end{cases} \qquad (16)$$

Четырехколесный мобильный робот с полным приводом.

Кинематическая модель четырехколесного мобильного полноприводного робота изображена на рисунке 4.

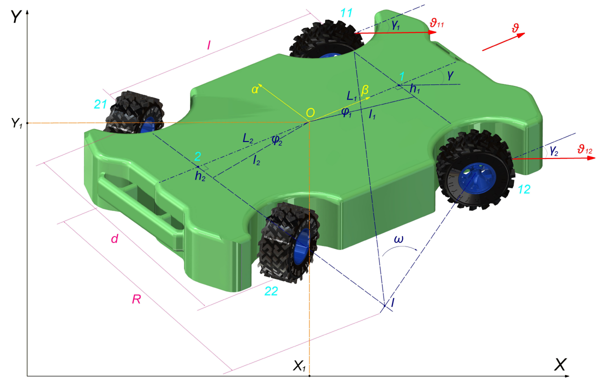


Рисунок 4. Кинематическая модель полноприводного КМР

Запишем координаты центров масс колёс во внешней неподвижной системе координат OXYZ для составления кинематической составляющей модели

$$\begin{cases} X_{IJ} = \alpha + \left(l_J\cdot\cos\gamma - h_J\cdot\sin\gamma\right) - l_{IJ}\cdot\sin\left(\gamma+\varphi_I\right); \\ Y_{IJ} = \beta + \left(l_J\cdot\sin\gamma + h_J\cdot\cos\gamma\right) + l_{IJ}\cdot\cos\left(\gamma+\varphi_I\right), \end{cases}$$
(17)

где i – номер поворотного блока;

j – номер колеса i-го поворотного блока;

l_I, h_I – проекции вектора L_I, соединяющего центр симметрии корпуса робота с точкой крепления i-го поворотного блока, на оси подвижной системы координат;

l_{IJ} – расстояние от точки крепления i-го поворотного блока до центра ij-го колеса;

φ_I – угол положения i-го приводного блока в подвижной системе координат.

Продифференцировав по времени уравнения (17), получим выражения для проекций скоростей точек контакта колёс с поверхностью

$$\begin{cases} \vartheta_{IJ}^{\ X} = \vartheta_0^{\ X} - \omega_0 \cdot \left(l_I \cdot \sin\gamma + h_I \cdot \cos\gamma\right) - \left(\omega_0 + \omega_I\right) \cdot l_{IJ} \cdot \cos\left(\gamma + \varphi_I\right); \\ \vartheta_{IJ}^{\ Y} = \vartheta_0^{\ Y} + \omega_0 \cdot \left(l_I \cdot \cos\gamma - h_I \cdot \sin\gamma\right) - \left(\omega_0 + \omega_I\right) \cdot l_{IJ} \cdot \sin\left(\gamma + \varphi_I\right), \end{cases} \tag{18}$$

где ω_0 – угловая скорость корпуса КМР относительно подвижной системы координат;
ω_I – угловая скорость вращения *i*-го поворотного блока относительно точки крепления;
ϑ_0 – проекции скорости центра корпуса на оси в неподвижной системе координат;
ϑ_{IJ} – проекции скорости *ij*-го колеса на оси в неподвижной системе координат.

Приводная сила $F_{ПР}$ возникает за счёт работы электродвигателя, подключённого к валу колеса. В данном мобильном роботе используются электродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами. Математическое описание электропривода *ij*-го колеса можно привести к системе дифференциальных уравнений первого порядка (без учёта контуров положения и скорости)

$$\begin{cases} \omega_{ДВIJ} = \dfrac{\vartheta_{IJ}^{X_{IJ}}}{I_{ЯIJ} \cdot R_{KIJ}}; \\ \dfrac{d}{dt} \cdot I_{ЯIJ} = \dfrac{1}{I_{ЯIJ}} \cdot \left(U_{фIJ} - K_{EIJ} \cdot \omega_{ДВIJ} - R_{ЯIJ} \cdot I_{ЯIJ}\right); \\ M_{ВЫХ.Д.IJ} = \dfrac{K \cdot M_{IJ}}{I_{PIJ} \cdot \eta_{PIJ}} \cdot I_{ЯIJ}, \end{cases} \tag{19}$$

где $\omega_{ДВIJ}$ – угловая скорость вращения электродвигателя *i*-го колеса;
$\vartheta_{IJ}^{X_{IJ}}$ – проекция линейной скорости *ij*-го колеса на ось $O_{IJ}X_{IJ}$ локальной системы координат;
$I_{ЯIJ}$ – ток якоря двигателя;
$R_{ЯIJ}$ – сопротивление обмоток якоря;
K_{EIJ} – конструктивная постоянная двигателя;
$M_{ВЫХ.Д.IJ}$ – динамический момент на выходе редуктора;
I_{PIJ} – передаточное число редуктора;
η_{PIJ} – коэффициент полезного действия редуктора.

Исходя из рассмотренных выше моделей видно, что алгоритмика управления четырехколесными мобильными роботами представлена кинематическими и динамическими моделями движения робота для трех случаев передачи вращательного момента: при задней ведущей оси, при передней ведущей оси и при передаче движения к обеим осям робота.

Заключение.

В результате проведенного аналитического исследования получены и структурированы математические модели четырехколесных мобильных роботов, для которых указаны варианты привода и рулевого управления. Для каждого варианта приведены примеры роботов. Проведенная оценка конкретных типов КРМ является качественной и основана на профессиональном опыте авторов и подкреплена доступной литературой. Представленный обзор дает возможность, в соответствии со структурой модели мобильного робота, производить численные эксперименты и встраивать в систему управления всевозможные модули (датчики), что позволяет получать различные характеристики мобильного робота. Подводя итог, можно сделать вывод, что с учетом всех проанализированных особенностей КМР не существует единого идеального решения во всех аспектах. Выбор кинематической конструкции должен основываться на предполагаемом применении робота.

Список литературы

[1] Васильев, А.В. Принципы построения и классификация мобильных роботов наземного применения и планетоходов / А.В. Васильев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика, телекоммуникации и управление. – 2013. – № 1. – С. 124–131.

[2] Кампион, Г. Структурные свойства и классификация кинематических и динамических моделей колесных мобильных роботов / Г. Кампион, Ж. Бастен, Б. д'Андреа-Новель // Нелинейная динамика. – 2011. – Т. 7, № 4. – С. 733–769.

[3] Klančar, Gregor. Wheeled Mobile Robotics. From Fundamentals Towards Autonomous Systems / Gregor Klančar, Andrej Zdešar, Sašo Blažič, Igor Škrjanc. – The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford. – 2017. – 492 p.

[4] Tzafestas, Spyros G. Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview / Spyros G. Tzafestas // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2018. – № 91. – P. 35–58.

[5] Evstigneev, M.I. Algorithms of control over four-wheel robot moving over rough terrain / M.I. Evstigneev, Yu.V. Litvinov, V.V. Mazulina, G.M. Mishchenko // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. – 2015. – Vol. 58, № 9. – P. 738–741 (in Russian).

[6] Meshkovskiy, E.O. Construction of a mathematical model of a four-wheel mobile robot with two differential drive units / E.O. Meshkovskiy, A.D. Kurmashev // Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. – «Инновации и инвестиции». – 2020. – № 2. – С. 113–118.

[7] Круглова, Т.Н. Моделирование системы управления полноприводным четырехколесным сельскохозяйственным мобильным роботом / Т.Н. Круглова, А.С. Власов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 5. – С. 147–154.

CONTROL ALGORITHM FOR FOUR-WHEEL MOBILE ROBOTS

S.A. Pauliukavets
Head of the Department of «Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes» of BNTU, PhD of Technical Sciences, Associate Professor

A.A. Velchenko
Associate Professor of the Department of «Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes» of BNTU, PhD of Technical Sciences, Associate Professor

Yang Shixin
PhD student of the Department of «Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes» of BNTU

D.Yu. Tschaplygin
PhD student of the Department of «Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes» of BNTU

A.A. Radkevich
Student of the Department of «Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes» of BNTU

N.O. Sauko
Student of the Department of «Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes» of BNTU

Department of «Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes»
Faculty of Information Technology and Robotics
Belarusian National Technical University, Republic of Belarus
E-mail: sap@bntu.by

Abstract. This paper presents an analysis of the construction of kinematic and dynamic models of four-wheeled mobile robots. For three cases of torque transmission (with the rear driving axle, with the front driving axle and with the transmission of motion to both axes of the mobile robot), which are determined by the characteristic structure of the model equations, the following questions were studied: holonomy and nonholonomy of the system; mobility and controllability; configuration and mechanization (equipment with drive units).

Keywords: four-wheeled mobile robot, nonholonomy, control, mathematical model.