

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-5-14>

УДК 621.316.71

Моделирование системы управления гусеничным мобильным роботом с учетом кинематических и динамических параметров

Кандидаты техн. наук, доценты С. А. Павлюковец¹⁾, А. А. Вельченко¹⁾,
магистрант А. А. Радкевич¹⁾, асп. Д. Ю. Чаплыгин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В работе рассмотрена задача построения системы управления движением автономных мобильных гусеничных роботов в неформализованной внешней среде. На основе предложенной математической модели системы управления гусеничным мобильным роботом, учитывающей кинематические и динамические параметры, проведено имитационное моделирование гусеничного мобильного робота в средах динамического моделирования технических систем MATLAB Simulink и SimInTech, что позволило с определенной точностью управлять координатами гусеничного мобильного робота по заранее заданной траектории. Для повышения устойчивости системы управления движением мобильного робота в нее был внедрен ПИД-регулятор тока якоря и электромагнитного момента. В ходе имитационного исследования получены графические зависимости от времени: напряжения питания; угла поворота корпуса робота; скорости гусениц; тока якоря двигателей; электромагнитного момента двигателей; тока якоря двигателей с ПИД-регулятором; пройденного гусеницами пути; электромагнитного момента двигателей с ПИД-регулятором, а также проводилось задание центра масс робота при задании траектории радиусом 10 м в течение 6,2 с. В программном пакете MATLAB Simulink построены модели: общая имитационная, имитационная кинематическая и имитационная динамическая гусеничного мобильного робота, имитационная подсистема блока управления электроприводами. В программной среде SimInTech получена имитационная модель динамической части правого электропривода гусеничного мобильного робота. Проведен сравнительный анализ графических зависимостей угловой скорости катка и тока якоря двигателя гусеничного мобильного робота, полученных в пакетах MATLAB Simulink и SimInTech, который выявил ряд достоинств и недостатков при проверке работы системы управления гусеничным мобильным роботом в неформализованной внешней среде.

Ключевые слова: мобильный робот, гусеничный робот, система управления, имитационное моделирование, математическая модель, ПИД-регулятор, электропривод, кинематические параметры, динамические параметры

Для цитирования: Моделирование системы управления гусеничным мобильным роботом с учетом кинематических и динамических параметров / С. А. Павлюковец [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-5-14>

Modeling of Control System for Tracked Mobile Robot Taking Into Account Kinematic and Dynamic Parameters

S. A. Pauliukavets¹⁾, A. A. Velchenko¹⁾, A. A. Radkevich¹⁾, D. Yu. Tschaplygin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper examines the problem of constructing a motion control system for autonomous mobile tracked robots in an informal external environment. Based on the proposed mathematical model of the control system for a tracked mobile

Адрес для переписки

Павлюковец Сергей Анатольевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-61
s.pauliukavets@gmail.com

Address for correspondence

Pauliukavets Siarhei A.
Belarusian National Technical University
9, B. Khmel'nitsky str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 293-95-61
s.pauliukavets@gmail.com

robot, which takes into account kinematic and dynamic parameters, simulation modeling of a tracked mobile robot was carried out in the dynamic modeling environments of technical systems MATLAB Simulink and SimInTech, which made it possible to control the coordinates of a tracked mobile robot along a predetermined trajectory with a certain accuracy. To increase the stability of the mobile robot motion control system, a PID controller of the armature current and electromagnetic torque was introduced into it. During the simulation study, graphical dependences on time were obtained: supply voltage; rotation angle of the robot body; track speeds; motor armature current; electromagnetic torque of engines; armature current of motors with PID controller; the path traveled by the caterpillars; electromagnetic torque of motors with a PID controller, and also the center of mass of the robot was set when setting a trajectory with a radius of 10 m for 6.2 s. Models were built in the MATLAB Simulink software package: general simulation, kinematic simulation and dynamic simulation of a tracked mobile robot, simulation subsystem of the electric drive control unit. In the SimInTech software environment, a simulation model of the dynamic part of the right electric drive of a tracked mobile robot was obtained. A comparative analysis of the graphical dependencies of the angular velocity of the roller and armature current of the motor of a tracked mobile robot, obtained in the MATLAB Simulink and SimInTech packages, was carried out, which revealed a number of advantages and disadvantages when testing the operation of the control system of a tracked mobile robot in an unformalized external environment.

Keywords: mobile robot, tracked robot, control system, simulation modeling, mathematical model, PID controller, electric drive, kinematic parameters; dynamic parameters

For citation: Pauliukavets S. A., Velchenko A. A., Radkevich A. A., Tschaplygin D. Yu. (2024) Modeling of Control System for Tracked Mobile Robot Taking Into Account Kinematic and Dynamic Parameters. *Science and Technique*. 23 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-5-14> (in Russian)

Введение

В мировой робототехнике нишу гусеничных мобильных автономных роботов успешно заняли производители тракторов и самоходной сельскохозяйственной техники для применения в точном земледелии. Несмотря на ряд недостатков, в числе которых высокая стоимость и масса гусеничных движителей, относительно низкая скорость движения, гусеничные роботы являются наиболее универсальными с точки зрения выполнения всех сельскохозяйственных операций. Гусеничные ленты позволяют работать на почвах с низкой несущей способностью, одновременно снижая удельное давление и нагрузку на поверхность почвы, тем самым повышая ее плодородность. Высокая маневренность и малый радиус поворота гусеничных роботов повышают производительность при выполнении работ в ограниченных пространствах, обеспечивают стабильность работы и плавность хода на неровностях, а применение резинометаллических и резиновых гусениц позволяет передвигаться по дорогам с усовершенствованным покрытием.

Математическое моделирование гусеничных мобильных роботов рассматривается в различных научных источниках, в частности в статье [1] рассмотрена задача управления движением мобильного робота в неопределенных средах с обходом препятствий с использованием лазерных систем для управления. В источ-

нике [2] предложена комплексная методика процесса построения численной модели гусеничной машины для анализа ее движения, однако без учета ее кинематических и динамических параметров. В [3–5] проанализировано применение методов искусственного интеллекта для управления мобильными роботами. В данных работах рассматриваются математические модели гусеничных мобильных роботов без учета их кинематических и динамических параметров либо анализируются системы управления мобильными роботами в общем случае, без учета специфики гусеничных движителей.

Поскольку гусеничные мобильные роботы с автономным управлением и перемещением в заранее неопределенной среде функционируют в неформализованных и изменяющихся условиях, это представляет проблему для адаптивного управления движением таких объектов. Для решения этой проблемы необходима разработка алгоритмов создания управляющих систем планирования траектории и управления мобильным роботом с целью повышения эффективности его функционирования в условиях изменяющихся внешних сил.

Для формирования требуемой траектории движения необходимо определить условия, в которых объект взаимодействует с окружающей средой. Формализация описания внешней среды рабочей области робота для определения его действий в условиях неопределенности ра-

бочей зоны представляет определенную сложность. В этом случае возможно использование как внутреннего алгоритма принятия решений с автоматической коррекцией действий, так и интерактивное супервизорное управление, осуществляемое оператором и выполняющее оперативную коррекцию движения с высокой эффективностью.

Целью данной работы является проведение имитационного компьютерного моделирования системы траекторного управления гусеничным мобильным автономным роботом с учетом его кинематических и динамических параметров. Достижение поставленной цели включает решение таких задач, как:

- 1) планирование траектории перемещения гусеничного мобильного автономного робота;
- 2) структурно-параметрический синтез системы траекторного управления гусеничным мобильным роботом на основании его математической модели;
- 3) оценка качества параметров системы и повышение управляемости гусеничного мобильного автономного робота.

Для решения поставленных задач необходимо определить допущения, определяющие методы и цель управления.

Объектом управления является гусеничный мобильный автономный робот.

Назначение моделируемого гусеничного мобильного робота предполагает его применение в сельском хозяйстве для точного земледелия. В данной статье рассматриваются моделирование и анализ системы траекторного управления ходовой частью робота, обеспечивающей его перемещение по заранее заданной траектории, определяемой требуемой последовательностью выполнения операций. Для примера, робот может быть оснащен бортовой системой полива растений, и цикл его работы предусматривает перемещение от одного объекта к другому по определяемой системой управления траектории. В таком случае объект управления можно классифицировать как мобильный робот первого поколения.

Моделирование системы управления происходит при движении гусениц по грунту, в связи с чем для динамического описания гусеничного мобильного робота примем допущения, что движение робота происходит по горизонталь-

ной поверхности в горизонтальной плоскости XU , механизмы робота являются жестко связанными, катки недеформируемые и находятся в жестком зацеплении с гусеничной неэластичной лентой, движение гусениц происходит без проскальзывания.

Исходя из того, что система траекторного управления гусеничным мобильным роботом относится к числу контурных систем автоматического управления, одним из требований, предъявляемых к ней, является точность обработки заданной траектории. Оценка качества переходных процессов в динамических режимах работы гусеничного мобильного робота включает в себя измерение таких параметров, как перерегулирование, время перерегулирования, колебательность системы. Дальнейшее повышение качества регулирования – актуальная задача для улучшения управляемости гусеничного мобильного робота.

Имитационное моделирование гусеничного мобильного робота

Для исследования кинематических и динамических свойств гусеничного робота на основе математической модели, полученной в работе [6], которая учитывала кинематические и динамические параметры, произведем компьютерное математическое моделирование мобильного робота в программных пакетах математического моделирования MATLAB Simulink и SimInTech.

Структурная схема архитектуры мобильного гусеничного робота включает в себя основные узлы двигателей, блока управления электроприводами, трансмиссии и ходовой части, выраженные математическими моделями [7]. Компьютерная математическая модель, созданная в пакете MATLAB Simulink, приведена на рис. 1.

Для моделирования зададимся параметрами робота: радиус катка $r = 0,015$ м, ширина ленты $b = 0,15$ м, длина ленты $l = 1$ м, масса робота $m = 15$ кг, напряжение питания $U = 24$ В, коэффициент трения катков $\mu_R = 0,095$, коэффициент трения ленты $\mu_l = 0,4$, угловые скорости катков $\omega_1 = \omega_2 = 8$ рад/с, движение осуществляется по окружности радиусом 10 м в течение 6,2 с.

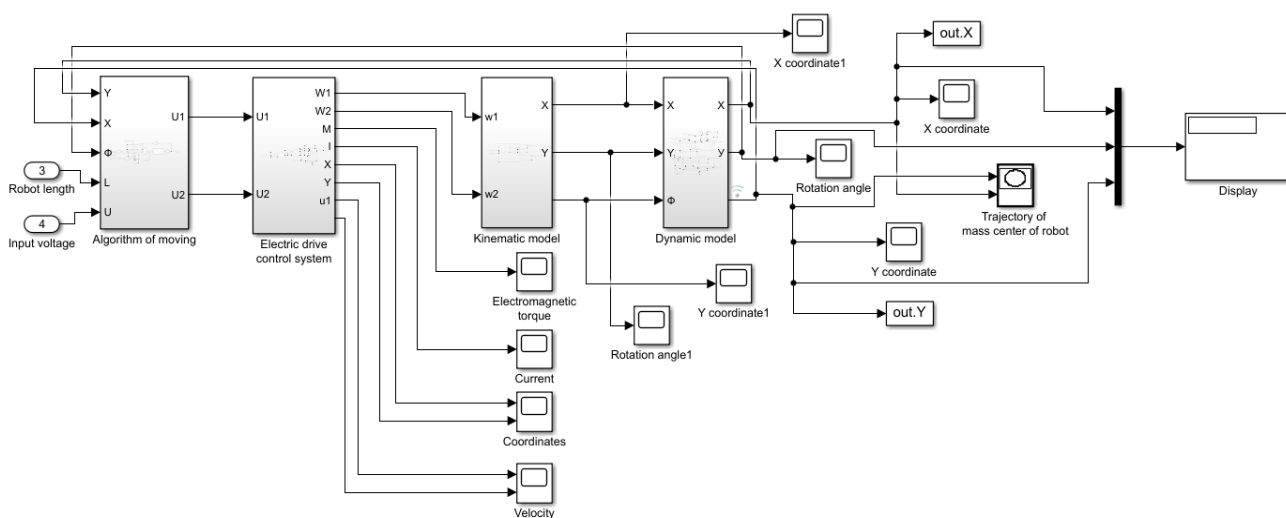


Рис. 1. Имитационная модель гусеничного мобильного робота
 Fig. 1. Simulation model of a tracked mobile robot

Данная модель содержит в себе следующие блоки [7]:

- алгоритма движения, задает траекторию движения робота, используя задатчик интенсивности и графический алгоритм, имитированный блоком 1-D Lookup Table. На вход блока подаются заданные параметры входного напряжения питания и геометрические параметры робота. Также на вход блока подаются сигналы отрицательной обратной связи по координатам и углу поворота, рассогласование которых корректируется звеном ПИ-регулятора. Данный блок генерирует сигнал требуемой скорости для каждого электропривода в соответствии с алгоритмом диаграммы;
- управления электроприводами, представляет собой имитационное управление двумя

электродвигателями постоянного тока последовательного возбуждения, использующее в качестве входного воздействия сигналы, поступающие из блока алгоритма движения. На выходе блок формирует сигналы тока якоря, электромагнитного момента, частоты вращения и угла поворота каждого двигателя;

– блоки кинематической и динамической модели, являются математическим описанием поведения робота в пространстве и реализуют управление роботом по сигналам от блока управления электродвигателями. Выходными координатами блоков являются координаты точки центра масс робота, координаты каждой из гусениц робота и угол поворота робота.

Более подробно содержимое некоторых подсистем показано на рис. 2–4.

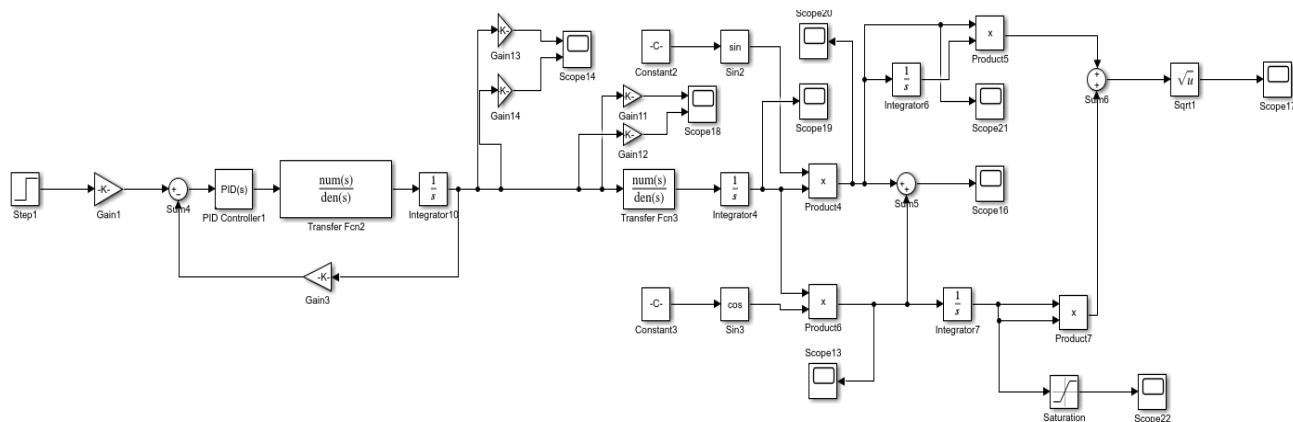


Рис. 2. Имитационная модель подсистемы блока управления электроприводами
 Fig. 2. Simulation model of the electric drives control unit subsystem

Анализ полученных результатов

Проведем анализ полученных результатов в ходе имитационного моделирования гусеничного мобильного робота. На рис. 5а показан график зависимости напряжения питания от времени, из которого видно, что на интервалах времени от 0,7 до 0,75 с и от 6,4 до 6,5 с происходят всплески напряжения до 25 и 27 В соответственно, а на 3,1 с происходит скачкообразное падение напряжения до 13,5 В, вызванное поворотом робота и колебательностью системы, обусловленной статизмом характеристик и процессами коммутации в электродвигателях. На рис. 5б показан график зависимости угла поворота корпуса робота от времени, на котором видно, что за 6,2 с робот совершил поворот по гиперболической траектории, а затем продолжил движение по прямой, что отмечено постоянством угла поворота от времени на интервале от 6,2 до 8 с.

На графиках (рис. 6, 8–10) красным цветом обозначены характеристики правого дифференциального привода и правой гусеницы, синим цветом – характеристики левого дифференциального привода и левой гусеницы.

На рис. 6а, б представлены графики зависимости скорости гусениц и пройденного гусени-

цами пути от времени. Из графиков видно, что левый привод набирает скорость больше, чем правый, из-за движения по криволинейной траектории соответственно и путь, проходимый левым приводом, меньше, чем правым, с учетом геометрических параметров лент и корпуса робота.

Как следует из рис. 6а, на отметке времени 0,8 с левый и правый приводные катки начинают разгон со скорости 0,2 м/с. На протяжении 8 с, когда робот совершает полную отработку заданной траектории, изображенной на рис. 7, происходит разгон с постоянным ускорением гусеничного робота, причем с увеличением времени рассогласование графиков левого и правого приводных катков увеличивается, что связано со смещением тела корпуса мобильного робота в зависимости от изменения траектории движения. К окончанию моделирования левый приводной каток достиг скорости 4,3 м/с, правый приводной каток – 3,2 м/с. На рис. 6б рассогласование пути, пройденного левым и правым приводными катками, составляет 0,3 м, что соответствует поправке, сделанной на ширину гусеничных лент, и с увеличением времени и скорости возрастает в связи с отработкой траектории, показанной на рис. 7.

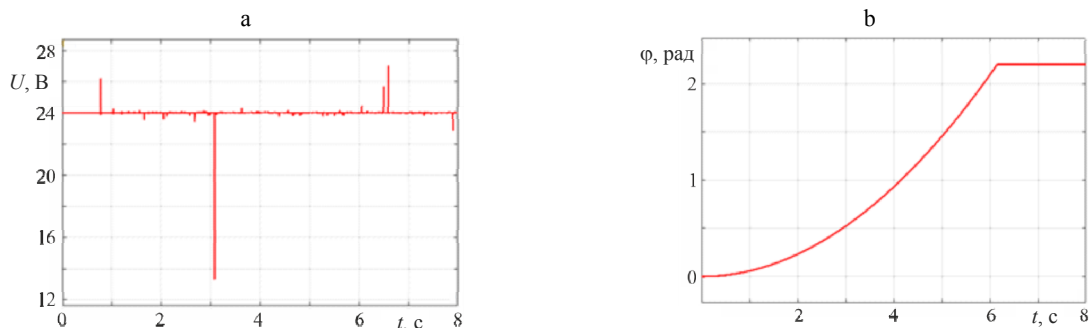


Рис. 5. Графики зависимостей: а – напряжения питания $U(t)$ от времени; б – угла поворота корпуса робота $\varphi(t)$ от времени

Fig. 5. Graphs: а – voltage source $U(t)$ to time dependence; б – rotation angle of robot body $\varphi(t)$ to time dependence

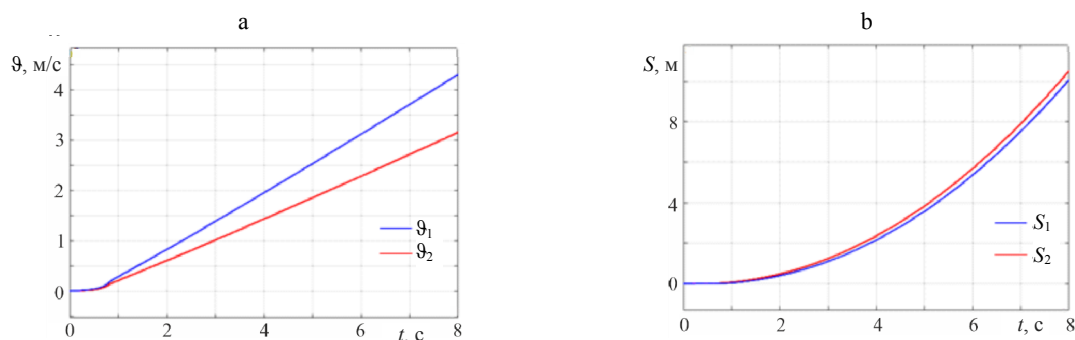


Рис. 6. Графики зависимостей: а – скорости гусениц $v(t)$ от времени; б – пройденного гусеницами пути $S(t)$ от времени

Fig. 6. Graphs: а – speed $v(t)$ to time dependence; б – path traveled by the tracks $S(t)$ to time dependence

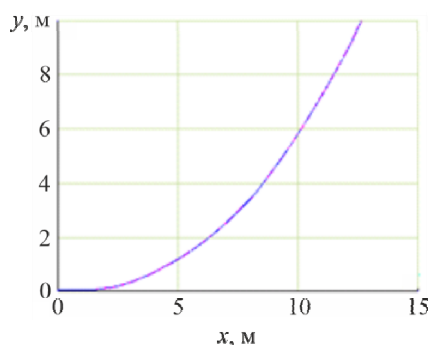


Рис. 7. График задания круговой траектории центра масс робота радиусом 10 м в течение 6,2 с

Fig. 7. Graph of the circle trajectory setting of the robot center of mass with a radius of 10 m for 6.2 s

Аналогичным образом можно объяснить и разность в токах якоря левого и правого приводов робота, связанную с поворотом корпуса робота и разной угловой скоростью катков при движении.

Графики зависимостей механической и электрической составляющих левого и правого приводных катков робота, изображенные на рис. 8а и 8б, характеризуются высокими значениями колебательности, достигающими для тока показателя 14 А, для момента – величины 6 Н·м, а также существенным перерегулированием, установившимся на максимальной отметке 27 и 26 А для левого и правого дифференциальных приводов и 12,8 и 12,1 Н·м для левого и правого катков соответственно. Время перерегулирования составляет 3,7 с для графиков тока и момента, пока значения не установятся в рамках технического оптимума. Однако и при достижении указанного времени сохраняется высокая колебательность и просадка тока, при этом число полных колебаний не уменьшается.

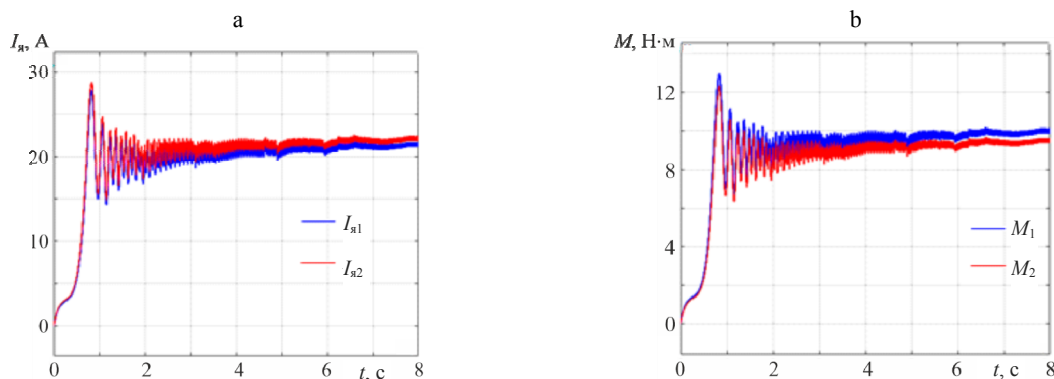


Рис. 8. Графики зависимостей:

а – тока якоря двигателей $I_{я}(t)$ от времени; б – электромагнитного момента двигателей $M(t)$ от времени

Fig. 8. Graphs: а – motors rotor current $I_{я}(t)$ to time dependence; б – electromagnetic torque of the engines $M(t)$ to time dependence

Из графиков (рис. 8а, б) видно, что зависимости тока и момента от времени имеют большие пульсации и характеризуются высокой колебательностью переходных процессов. Исходя из этого следует вывод, что система не обладает достаточной устойчивостью и характеризуется низкими показателями переходных процессов. С этой целью для поддержания требуемого качества астатической системы целесообразно в имитационную динамическую модель двигателя постоянного тока ввести ПИД-регулятор по току с настройкой по модульному оптимуму (блок PID Controller из библиотеки Simulink) [8].

ПИД-регулятор формирует сигнал управления по закону

$$u(k) = -c_0 \cdot x_1(k) - c_1 \cdot x_2(k) - c_2 \cdot x_3(k),$$

где k – номер шага расчета; c_0, c_1, c_2 – коэффициенты усиления интегрирующего, пропорционального и дифференцирующего каналов регулятора. Адаптивный ПИД-регулятор учитывает нелинейные свойства объекта управления, представленного апериодическим звеном 2-го порядка с учетом инерционности цепи якоря. Адаптация методом обучения происходит при неопределенности параметров объекта. Точность управления повышается увеличением пропорциональной составляющей и обеспечивается наличием интегрирующего звена, но при этом снижаются быстродействие системы и запас устойчивости. Наличие дифференциальной составляющей повышает динамическую и статическую точность регулирования по сравнению с другими регуляторами. Влияние ПИД-регулятора на графики зависимостей тока якоря и электромагнитного момента двигателей показано на рис. 9.

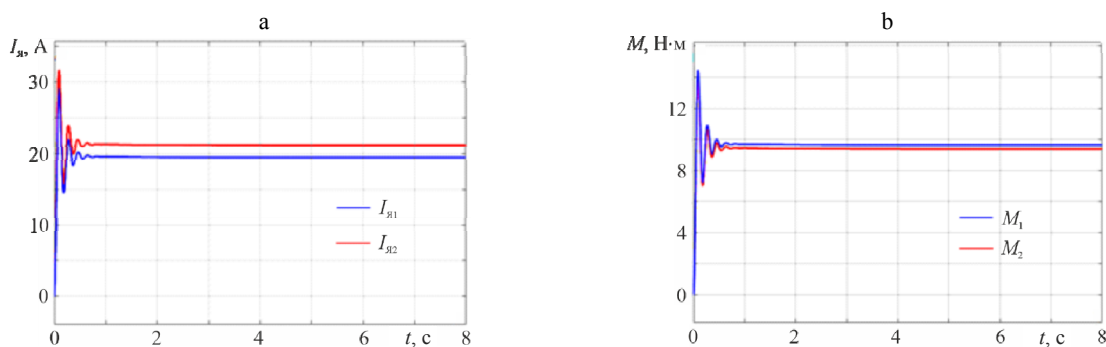


Рис. 9. Графики зависимостей: а – тока якоря двигателей $I_a(t)$ от времени с ПИД-регулятором; б – электромагнитного момента двигателей $M(t)$ от времени с ПИД-регулятором

Fig. 9. Graphs: a – motors rotor current $I_a(t)$ to time dependence with PID controller; б – electromagnetic torque of motors $M(t)$ to time dependence with PID controller

Как следует из полученных графиков тока и момента (рис. 9а, б), внедрение ПИД-регулятора значительно уменьшило время перерегулирования (0,4 с, уменьшилось на 89,2 % по сравнению с результатами моделирования без внедрения регулятора) и число полных колебаний системы (4 полных колебания), однако перерегулирование при коммутации левого приводного катка составило 29,6 %, правого приводного катка – 34,4 %. Поскольку значения пускового тока и пускового момента могут превышать допустимые значения, в системе следует ограничивать данные характеристики защитной и пускорегулирующей аппаратурой.

Проведя сравнительный анализ графиков (рис. 8, 9), можно сделать вывод, что ПИД-регулятор позволяет обеспечить стабильность динамических свойств системы в условиях ограниченных параметрических и внешних возмущений объекта. Модель управления с внедрением ПИД-регулятора повышает качество процесса регулирования, что положительно сказывается на управляемости при передвижении гусеничного робота [9, 10].

Рассмотрим случай, когда скорости гусеничных катков не равны и корпус робота совершает поворот вокруг своего центра масс. В таком случае координаты центра масс робота описываются уравнениями:

$$\begin{cases} x_C = R \cdot \cos(\omega t); \\ y_C = R \cdot \sin(\omega t), \end{cases}$$

где R – радиус кривизны окружности, по которому движется центр масс робота; ω – угловая скорость корпуса робота.

Угол поворота робота относительно системы координат, с учетом $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ и направленности вектора скорости по касательной к траектории, в этом случае изменяется по закону

$$\varphi = \omega t + \varphi_0,$$

где φ_0 – начальный угол, определяющий положение робота на траектории.

Произведем моделирование динамической модели гусеничного робота для случая, когда скорость правой гусеницы $\omega_1 = 8$ рад/с, скорость левой гусеницы $\omega_2 = 12$ рад/с. Результаты представлены на рис. 10.

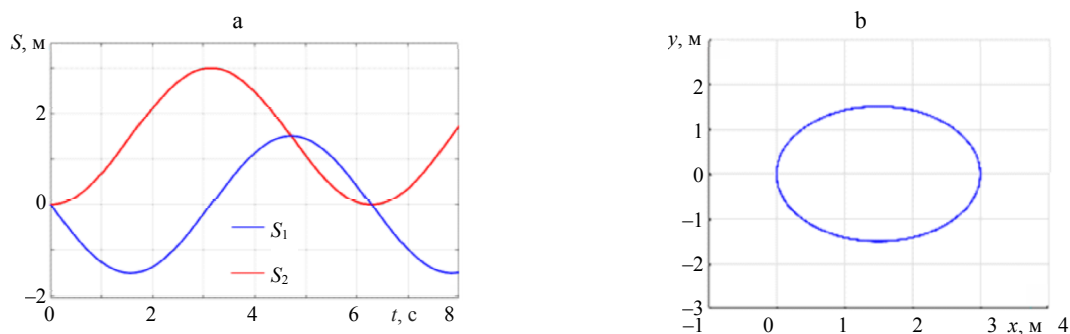


Рис. 10. Графики зависимостей: а – пройденного гусеницами пути $S(t)$ от времени; б – траектория движения мобильного робота

Fig. 10. Graphs: a – path traveled by the tracks $S(t)$ to time dependence; б – mobile robot trajectory

Полученные результаты показали, что при осуществлении движения с различной скоростью приводных катков центр масс робота описывает замкнутую фигуру, имеющую эллипсоидную форму, которая при определенных значениях скорости может принимать форму окружности. При указанных при моделировании значениях угловых скоростей катков 8 и 12 рад/с центр масс робота описывает эллипс, достигающий максимального диаметра 3 м. При этом каждый из катков совершает путь, имеющий синусоидальную форму с амплитудой 3 м и периодом 6 с.

Далее проведем моделирование динамической части электропривода в среде SimInTech. Математическая модель электропривода правого катка показана на рис. 11.

Графики угловой скорости катка и тока якоря двигателя представлены на рис. 12а, б.

На графиках рис. 12 по сравнению с аналогичными графиками, полученными в пакете Simulink, отмечается меньшая колебательность системы, достигнутая за счет использования фильтров и лучшей настройки ПИД-регулятора. Имитация изменения нагрузки осуществлялась путем ручной настройки инструмента «Стрелочный прибор». График зависимости угловой скорости катка от времени отмечается

перерегулированием (13 %), числом полных колебаний, равным 3, а график зависимости тока якоря от времени характеризуется временем перерегулирования, составившим 6,3 с, с перерегулированием 8 % и шестью полными колебаниями. При этом по сравнению с аналогичным графиком, полученным в среде Simulink, время перерегулирования наступает на 5,2 с позже, достигнутое значение тока на 0,2 А ниже и составляет 20,8 А. Данную разбежку в полученных результатах можно объяснить особенностями построения имитационных моделей в используемых средах для динамического моделирования технических систем MATLAB Simulink и SimInTech.

ВЫВОДЫ

1. В ходе моделирования системы траекторного управления гусеничным мобильным автономным роботом с учетом его кинематических и динамических параметров получено имитационное моделирование на основе математической модели гусеничного мобильного робота с учетом кинематических и динамических параметров, позволяющее с определенной точностью управлять координатами робота по заранее заданной траектории.

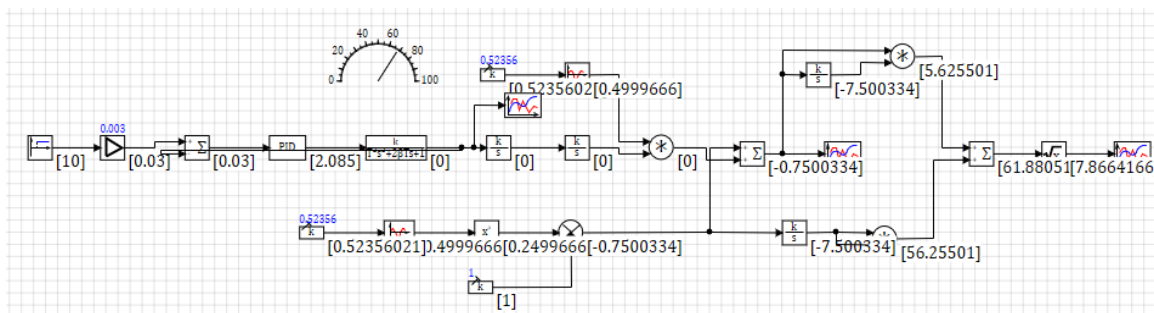


Рис. 11. Имитационная модель динамической части правого электропривода гусеничного робота, выполненная в среде SimInTech

Fig. 11. Simulation model of the dynamic part of the right electric drive of a tracked robot, made in the SimInTech environment

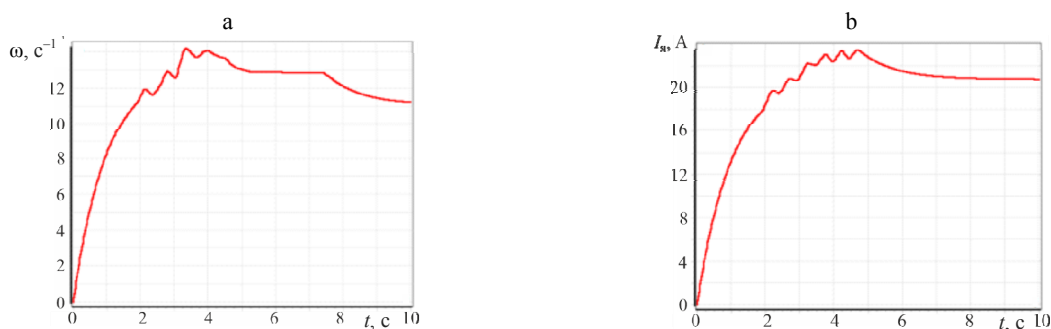


Рис. 12. Графики зависимостей: а – угловой скорости правого катка $\omega(t)$ от времени; б – тока якоря двигателя $I_a(t)$ от времени
 Fig. 12. Graphs: a – right roller angular velocity $\omega(t)$ to time dependence; b – motor rotor current $I_a(t)$ to time dependence

2. Получены в пакетах MATLAB Simulink и SimInTech варианты различного управления движением мобильного робота и повышения устойчивости системы путем внедрения ПИД-регулятора тока якоря и электромагнитного момента.

3. Имитационное моделирование позволяет провести оценку качества динамических параметров системы, которая показала соответствие системы установленным критериям и требованиям, а повышение управляемости гусеничного мобильного автономного робота достигнуто внедрением ПИД-регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

- Farhan, A. S. Dynamic and Kinematic Models and Control for Differential Drive Mobile Robots / A. S. Farhan // *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2013. Vol. 3, Iss. 2. P. 253–263.
- 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: сб. науч. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 17–18 мая 2023 г.: в 2 ч. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. Минск, 2023. Ч. 2. С. 94–102.*
- Романов, П. С. Подходы к созданию интеллектуальной системы управления мобильным роботом [Электронный ресурс] / П. С. Романов, И. П. Романова // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 1. Режим доступа: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_80_romanov.pdf_1ed870ce12.pdf.
- Ahmad, A. M. Modeling, Simulation and Dynamics Analysis Issues of Electric Motor, for Mechatronics Applications, Using Different Approaches and Verification by MATLAB/Simulink / A. M. Ahmad, M. K. Mohammed, A. S. Farhan // *I. J. Intelligent Systems and Applications*. 2013. Vol. 5, No 5. P. 39–57. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2013.05.06>.
- Круглова, Т. Н. Моделирование системы управления полноприводным четырехколесным сельскохозяйственным мобильным роботом / Т. Н. Круглова, А. С. Власов // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2019. Т. 4, № 5. С. 147–154. https://doi.org/10.34031/article_5ce292ca6fa530.67486694.
- Павлюковец, С. А. Математическая модель системы управления мобильным гусеничным роботом с учетом кинематических и динамических параметров / С. А. Павлюковец, А. А. Вельченко, А. А. Радкевич // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2023. № 3. С. 33–38. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-3-33-38>.
- Sandeep, K. M. Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot / K. M. Sandeep, M. Jharna // *Global Journal of Researches in Engineering: H Robotics & Nano-Tech*. 2014. Vol. 14, Iss. 1. P. 1–8.
- Gonzalez, R. Adaptive Control for a Mobile Robot Under Slip Conditions Using an LMI-Based Approach / R. Gonzalez, M. Fiacchini, T. Alamo, J. L. Guzman, F. Rodrigue // *European Journal of Control*. 2010. Vol. 16, Iss. 2. P. 144–155. <https://doi.org/10.3166/ejc.16.144-155>.
- Wheeled Mobile Robotics. From Fundamentals Towards Autonomous Systems / G. Klančar, A. Zdesar, S. Blazic, I. Škrjanc. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 502 p.
- Liu, J. Modeling and Simulation of Robotic Arm in MATLAB for Industrial Applications / J. Liu, Q. Luo // *11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, 24–25 August 2019. IEEE, 2019. P. 346–349. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2019.00086>.

Поступила 02.09.2023

Подписана к печати 14.11.2023

Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

- Farhan A. S. (2013) Dynamic and Kinematic Models and Control for Differential Drive Mobile Robots. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 3 (2), 253–263.
- Pavlyukovets S. A., Vel'chenko A. A., Sin'sin' U., Radkevich A. A., Savko N. O. (2023) On the issue of Controlling a Mobile Robot with Omnidirectional Wheels. *BIG DATA and Advanced Analytics: Collection of Scientific Articles of the IX International Scientific and Practical Conference, Minsk, 17–18 May, 2023. Part 2. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, 2023, 94–102 (in Russian).
- Romanov P. S., Romanova I. P. (2018) Approaches to Creating an Intelligent Control System for a Mobile Robot. *Inzhenernyi Vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, (1). Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_80_romanov.pdf_1ed870ce12.pdf (in Russian).
- Ahmad A. M., Mohammed M. K., Farhan A. S. (2013) 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*, 5 (5), 39–57. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2013.05.06>.
- Kruglova T. N., Vlasov A. S. (2019) Modeling of the Management System of a Four-Drive Four-Wheel Agricultural Mobile Robot. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 4 (5), 147–154 (in Russian). https://doi.org/10.34031/article_5ce292ca6fa530.67486694.
- Pauliukavets S. A., Velchenko A. A., Radkevich A. A. (2023) Mathematical Model of the Control System for Mobile Tracked Robot Taking into Account Kinematic and Dynamic Parameters. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (3), 33–38 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-3-33-38>.
- Sandeep K. M., Jharna M. (2014) Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot. *Global Journal of Researches in Engineering: H Robotics & Nano-Tech*, 14 (1), 1–8.
- Gonzalez R., Fiacchini M., Alamo T., Guzman J. L., Rodrigue F. (2010) Adaptive Control for a Mobile Robot Under Slip Conditions Using an LMI-Based Approach. *European Journal of Control*, 16 (2), 144–155. <https://doi.org/10.3166/ejc.16.144-155>.
- Klančar G., Zdesar A., Blazic S., Škrjanc I. (2017) *Wheeled Mobile Robotics From Fundamentals Towards Autonomous Systems*. Oxford, Butterworth-Heinemann. 502.
- Liu J., Luo Q. (2019) Modeling and Simulation of Robotic Arm in MATLAB for Industrial Applications. *11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, 24–25 August 2019. IEEE, 346–349. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2019.00086>.

Received: 02.09.2023

Accepted: 14.11.2023

Published online: 31.01.2024