

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-359-369>

УДК 004.896

Исследование динамических характеристик голономного робота с колесами типа меканум на основе 3D параметрической имитационной модели

Магистрант А. А. Радкевич¹⁾, канд. техн. наук, доц. С. А. Павлюковец¹⁾

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

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

Реферат. В статье проведен анализ динамических показателей четырехколесного мобильного робота, приводимого в движение всенаправленными колесами типа меканум. Для получения информации о его динамических характеристиках разработана компьютерная модель в программной среде блочного моделирования MATLAB Simulink, которая позволила исследовать поведение голономного мобильного объекта с колесами меканум в пуско-тормозных режимах, не только основываясь на его математической модели, но и учитывая массогабаритные параметры робота, внедренные в модель через интеграцию трехмерного цифрового прототипа исследуемого объекта. Изучение динамики всенаправленного робота рассматривалось в рамках моделирования разгона, равномерного движения и торможения объекта на плоскости по прямолинейной траектории. В результате получены зависимости кинематических, динамических и механических характеристик: угловой скорости и вращательного момента каждого колеса от времени, линейной скорости центра масс робота от времени, пройденного роботом пути от времени, ошибки позиционирования при отработке заданного перемещения, пространственной визуализации колебаний скорости. При помощи инструмента Mechanical Explorer с использованием интегрированного в модель цифрового клона исследуемого робота получена анимация движения объекта по траектории. Примененный подход, основанный на интеграции математической блочной и трехмерной параметрической моделей объекта с возможностью визуализации и анимации результатов, позволяет наиболее полно исследовать динамику и кинематику нелинейных мехатронных систем. Полученные данные об ошибках позиционирования и колебаниях скорости в трех координатах позволили сделать вывод о наличии случайных колебаний при движении робота, однако это не оказало заметного влияния на точность отработки заданной траектории.

Ключевые слова: мобильный робот, всенаправленное движение, колесо меканум, голономный объект, движение по траектории, имитационное моделирование, параметрическое моделирование, цифровой прототип, динамические характеристики

Для цитирования: Радкевич, А. А. Исследование динамических характеристик голономного робота с колесами типа меканум на основе 3D параметрической имитационной модели / А. А. Радкевич, С. А. Павлюковец // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 359–369. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-359-369>

Investigation of Dynamic Characteristics of Holonomic Robot with Mecanum wheels Based on 3D Parametric Simulation Model

A. A. Radkevich¹⁾, S. A. Pauliukavets¹⁾

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

Abstract. The paper analyzes dynamic characteristics of a four-wheeled mobile robot driven by omnidirectional mecanum wheels. To obtain information about dynamic characteristics of the robot, a computer model was developed in the MATLAB Simulink block modeling software environment. The constructed simulation model allowed to research the behavior

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

of a holonomic mobile object with mecanum wheels in start-braking modes, based not only on its mathematical model, but also taking into account the weight and size parameters of the robot, introduced into the model through the integration of a three-dimensional digital prototype of the object. The investigation of the omnidirectional robot dynamics was considered within modeling the acceleration, uniform movement and deceleration of an object on a plane along a rectilinear trajectory. As a result, the dependences of kinematic, dynamic and mechanical characteristics were obtained, such as the dependence of angular velocity and torque of each wheel on time; the dependence of linear velocity of the robot's center of mass on time; the dependence of distance traveled by the robot on time; positioning errors while processing a given movement; spatial visualization of speed fluctuations. With the help of Mechanical Explorer tool, using a digital clone of the robot integrated into the model, an animation of the object's movement along the trajectory was obtained. This approach, based on the integration of mathematical block and three-dimensional parametric models of the object with the possibility of visualization and animation of the results, allows to most fully investigate the dynamics and kinematics of nonlinear mechatronic systems. The obtained information of positioning errors and speed fluctuations in three coordinates allowed to conclude that there were random fluctuations during the robot's movement, but their presence did not have a noticeable effect on the accuracy of the specified trajectory. мобильный робот, всенаправленное движение, колесо меканум, голономный объект, движение по траектории, имитационное моделирование, параметрическое моделирование, цифровой прототип, динамические характеристики

Keywords: mobile robot, omnidirectional motion, mecanum wheel, holonomic object, trajectory movement, simulation modeling, parametric modeling, digital prototype, dynamic characteristics

For citation: Radkevich A. A., Pauliukavets S. A. (2024) Investigation of Dynamic Characteristics of Holonomic Robot with Mecanum wheels Based on 3D Parametric Simulation Model. *Science and Technique*. 23 (5), 359–369. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-359-369> (in Russian)

Введение. Постановка цели и определение задач исследования

Проблематика исследования и анализа движения голономного мобильного объекта, то есть такого, который способен непрерывно перемещаться в любых направлениях, ограниченных только его степенями подвижности, опирается на решение сложных задач кинематики и динамики, формализующих поведение объекта как в статическом, так и в динамическом режимах работы. В задаче анализа динамических свойств мобильного робота при известных его параметрах и структуре необходимо основываться на показателях качества системы, а именно точности позиционирования при отработке заданной траектории, отклонении от намеченной координаты в нескольких плоскостях, колебательности переменных в переходных режимах при динамических условиях движения.

Вопросы анализа динамики и кинематики всенаправленных мобильных роботов активно изучаются и отражены в ряде научных исследований. Так, в статье [1] авторы отметили, что кинематика движения мобильных роботов с колесами меканум на плоскости достаточно хорошо исследована, в то время как динамика свободного и управляемого движения практически не рассматривается. В этой же работе представлены уравнения динамики управляемого движения при движении робота на колесах меканум вдоль различных траекторий. Дан-

ному вопросу уделено внимание и в тексте статьи [2], где исследована динамика движения мобильного робота при различных внешних силах, действующих на колеса меканум. Сочетание динамического и кинематического управления роботами на колесах меканум, как отмечено в [3], позволяет повысить точность управления и осуществить его оптимизацию, однако требует проработанную математическую модель системы. В отличие от кинематического управления параметрами скоростей колес либо центра масс робота модель, составленная с учетом динамических факторов (значений моментов, сил трения), демонстрирует более высокую точность при движении.

Ряд исследований посвящен компьютерному моделированию режимов движения всенаправленных мобильных роботов. Как правило, моделирование мобильных роботов на колесах меканум осуществляется для изучения отработки заданной траектории, а сам робот рассматривается с позиции системы управления. В частности, в докладе [4] спрогнозирована траектория для управления шестиколесным мобильным роботом меканум и проведено моделирование системы управления, после чего показано сравнение исходной и воспроизведенной траекторий движения. В работе [5] осуществлена симуляция движения робота на колесах меканум с преодолением препятствий по сигналам от датчика дальности. В статье [6] проведен сравнительный анализ моделирования робота на традицион-

ных и меканум колесах и рассмотрены его электродинамические и электромеханические характеристики.

Приведенный обзор научных исследований показывает, что существует проблема моделирования мобильных всенаправленных роботов для анализа их динамических показателей, которая представляется актуальной. Специфика используемых колес меканум, обладающих сложной кинематикой, зачастую пренебрегается при моделировании из-за большого числа геометрических и механических параметров, в результате чего полученные зависимости в полной мере не отражают реальную динамику движения мобильного робота.

В данной статье предлагается имитационная модель голономного робота с колесами меканум, составленная с учетом не только его кинематики, но и механических и геометрических характеристик, напрямую полученных из интегрированного в модель компонента трехмерного цифрового прототипа рассматриваемого робота. Такой подход, во-первых, позволяет получить динамические показатели, наиболее приближенные к реальным по сравнению с моделью, содержащей только кинематические и динамические составляющие, во-вторых, предоставляет возможность произвести трехмерное параметрическое моделирование цифрового прототипа с его визуализацией, что является более наглядным восприятием результатов моделирования.

Выполнение поставленной цели работы – исследование динамических показателей всенаправленного робота на колесах меканум – основывается на решении таких задач, как:

1) разработка имитационной модели робота с использованием твердотельного цифрового прототипа, учитывающая геометрические и механические параметры, а также кинематику и динамику объекта, на основании его математической модели;

2) моделирование динамических режимов движения робота при помощи составленной имитационной модели;

3) анализ полученных зависимостей, определение ошибки позиционирования и соответствия динамических параметров критериям качества;

4) оценка влияния используемых колес меканум на динамические показатели при движе-

нии голономного робота по результатам моделирования с использованием трехмерного параметрического прототипа.

Для построения имитационной модели формализуем условия движения робота. Геометрические данные объекта отражены в 3D модели робота, сконструированной в SolidWorks и импортированной в MATLAB Simulink. Масса робота 2,16 кг (в том числе масса корпуса 0,4 кг, обода колеса 0,3 кг, ролика колеса 0,01 кг, ступицы 0,05 кг), диаметр колеса 0,092 м, длина ролика 0,047 м, число роликов в колесе 9. Движение происходит в трехмерной системе координат (XYZ) по плоскости, представляющей собой недеформируемую поверхность, сцепление которой с роликами колес происходит без проскальзывания, а все элементы робота жестко связаны между собой.

Разработка компьютерной параметрической 3D модели мобильного робота с колесами меканум

Математическая модель четырехколесного мобильного робота на всенаправленных колесах типа меканум, используемая для блочного представления кинематики и динамики движения, определена авторами в статье [7]. С использованием этой модели, а также построенного в среде автоматизированного проектирования SolidWorks цифрового прототипа объекта, для реализации моделирования в программном пакете MATLAB Simulink собрана блок-схема модели с применением блоков из библиотек Simscape и Simulink с использованием дополнительного набора инструментов Mobile Robotics Simulation Toolbox.

Данный пакет содержит инструментарий для моделирования мобильного робота и разработки алгоритмов управления. В частности, Mobile Robotics Simulation Toolbox предоставляет возможности 3D-визуализации, позволяя симулировать отработку заданной траектории робота через окно Mechanics Explorer. Также была задействована подключенная библиотека Simscape Multibody Multiphysics Library, содержащая блоки механических передач и динамических объектов, позволяющая моделировать нелинейные электромеханические системы. Общий вид имитационной модели движения робота показан на рис. 1.

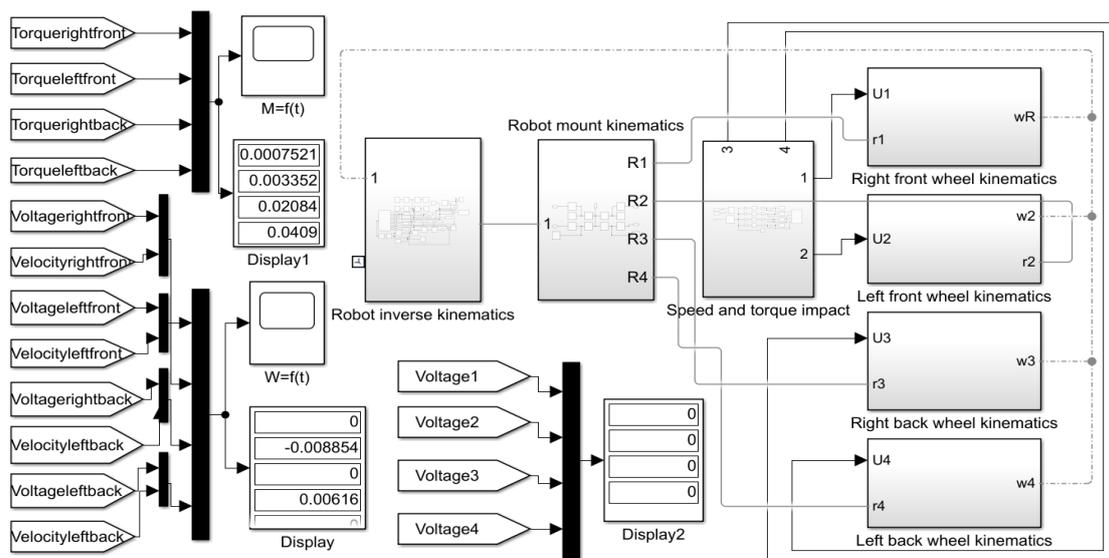


Рис. 1. Общий вид имитационной модели мобильного робота с колесами типа меканум

Fig. 1. General view of simulation model of mobile robot with mecanum wheels

Модель содержит в себе подсистемы инверсной кинематики корпуса и подвески робота и четыре подсистемы кинематики и динамики приводных колес, а также блок задания управляющего воздействия. Выходными величинами для моделируемого робота являются угловые скорости вращения каждого колеса и вращательные моменты колес, полученные через

блоки *Scope* с числовыми значениями, отображаемыми на блоках *Display*. Более детальный анализ состояния робота как твердотельного объекта отображается через графики блока *Cartesian Joint*. Модели подсистем кинематики корпуса и подвески робота, кинематики правого переднего меканум колеса и подсистемы задания скорости и момента отображены на рис. 2–5.

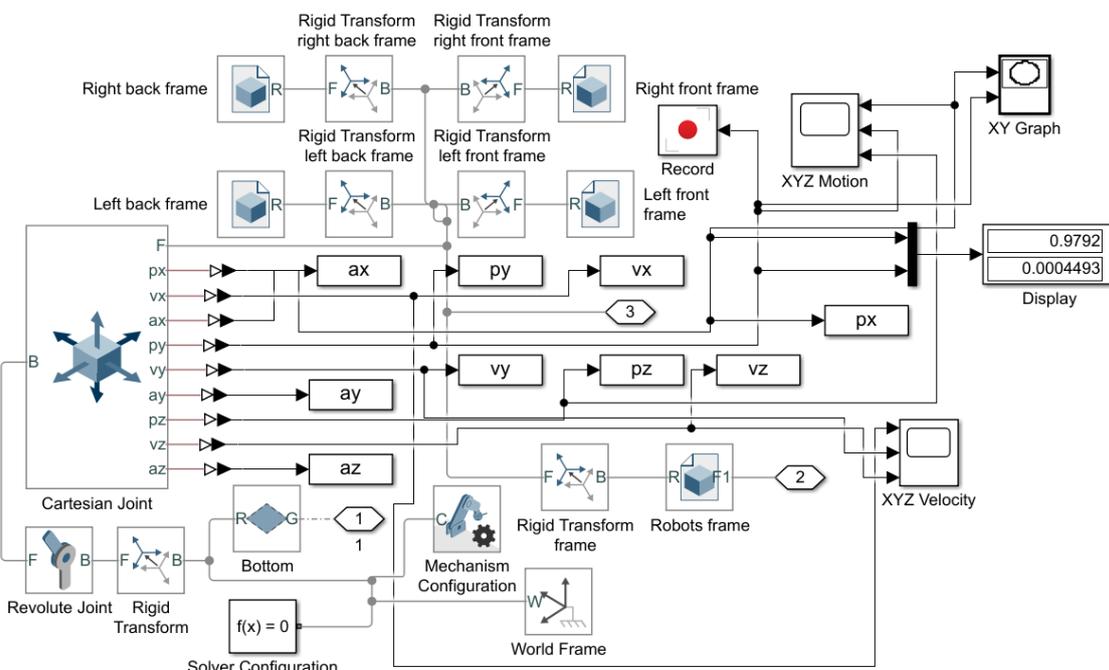


Рис. 2. Модель подсистемы инверсной кинематики робота и кинематики корпуса

Fig. 2. Model of robot inverse kinematics and frame kinematics subsystem

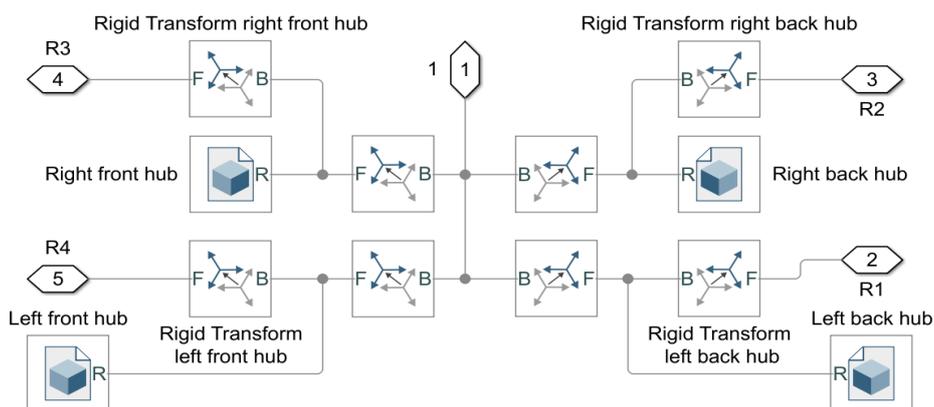


Рис. 3. Модель подсистемы кинематики подвески корпуса робота

Fig. 3. Model of robot frame suspension kinematics subsystem

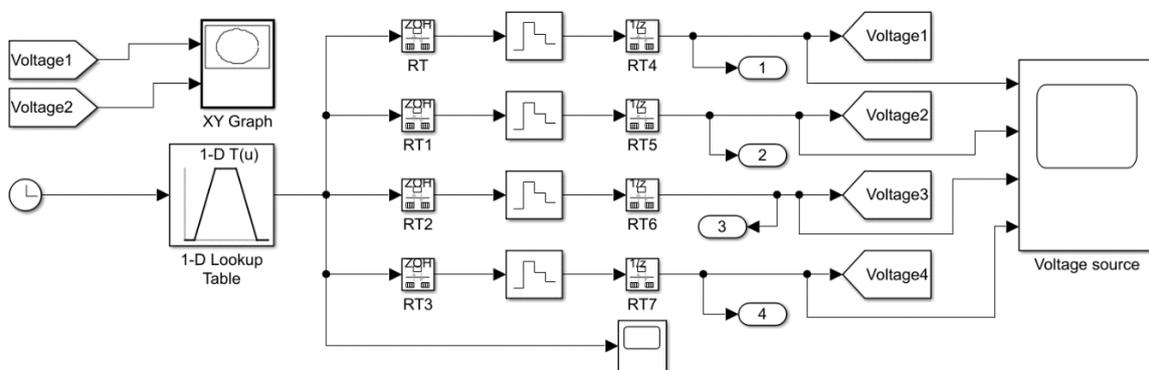


Рис. 4. Модель подсистемы задания управляющего воздействия

Fig. 4. Model of subsystem for specifying control action

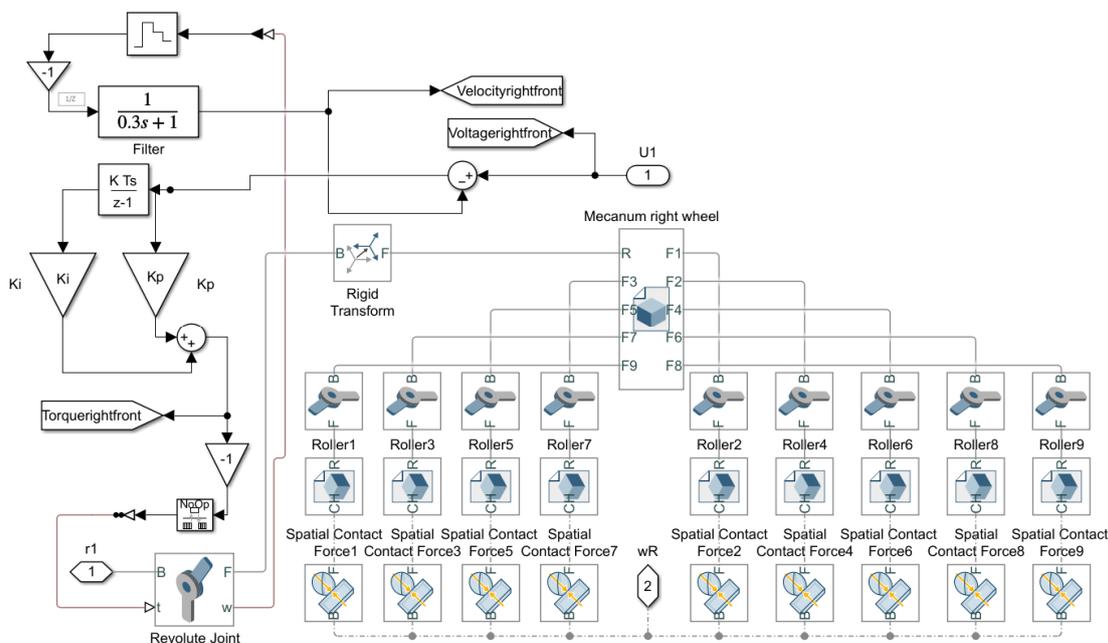


Рис. 5. Модель подсистемы кинематики и динамики правого переднего колеса

Fig. 5. Model of kinematics and dynamics subsystem of right front wheel

Подсистемы кинематики и динамики левого переднего, заднего правого и заднего левого колес механум идентичны подсистеме, изображенной на рис. 5 [8], за исключением того, что в блоке *Rigid Transform* для каждого колеса изменяется угол поворота в плоскости *XYZ*.

Кинематические зависимости задаются в блоках расчета прямой и инверсной задач кинематики с использованием функций MATLAB и при помощи специальных блоков библиотеки *Simscape*, позволяющих произвести интеграцию с пакетом твердотельного 3D моделирования *Solidworks*. Конструкция модели подразумевает жесткую механическую связь всех элементов, за исключением роликов колес, способных свободно вращаться и совершать плоское движение при помощи блока *Spatial Contact Force*.

Через блоки *World Frame*, *Cartesian Joint* и *Rigid Transform* заданы положение и начальные координаты установки отдельных элементов робота. Блок *Revolute Joint* позволил осуществить пространственную ориентацию всех элементов.

При помощи блоков *File Solid* в программу импортирована параметрическая пространственная модель мобильного робота, проанализированная авторами в статьях [7, 9], состоящая из отдельных компонентов: корпуса робота, ободов, ступиц и роликов колес, элементов подвески и сенсоров. Модели объектов составлены с учетом их геометрии и габаритов, указанных во введении, и материалов, аналогичных применяемым при создании роботов. Помимо геометрических параметров в блоке задаются также физические характеристики компонента, такие как масса и момент инерции. Такой подход позволил, во-первых, провести моделирование с учетом реальных геометрических параметров объекта, а во-вторых, получить анимацию траектории движения робота по результатам отработки задающего воздействия.

В модели используются радиус колеса, геометрические данные платформы и начальное пространственное положение робота в качестве его исходных параметров. Управление может быть реализовано либо через задание кинематических переменных, либо с помощью определенного закона. Сигналами управления являются напряжения, подаваемые на двигатели колес, пропорциональные скорости каждого колеса (или центра масс робота). Контур

обратной связи с ПИ-регулятором скорости (коэффициент пропорциональной составляющей 0,02, интегральной – 0,2) в динамической части – электроприводах колес робота поддерживает постоянную угловую скорость их вращения. Фильтрация сигналов скорости происходит через инерционное звено 1-го порядка, сглаживающее колебания и вибрации при движении.

В рамках исследования динамики голономного робота на колесах механум произведено моделирование движения объекта на плоскости в трехмерной системе координат *XYZ* по прямолинейной траектории в течение 8,5 с со следующими участками движения: трогание на протяжении 1 с, равноускоренное движение (разгон) с ускорением 0,115 м/с² на протяжении 2 с, равномерное движение со скоростью 0,23 м/с (5 рад/с для каждого колеса) в течение 2 с, равнозамедленное движение (торможение) с ускорением минус 0,115 м/с² в течение 2 с до нулевой скорости, полная остановка на протяжении 1,5 с.

Результаты моделирования, их анализ и оценка

Проведенное моделирование режима движения, описанного в предыдущем абзаце, позволило выявить и проанализировать ряд зависимостей кинематических, механических и динамических переменных в процессе отработки роботом заданного перемещения. В частности, полученные графики зависимостей угловых скоростей колес от времени $\omega_N = f(t)$ (рис. 6а) и вращающих моментов колес от времени $M_N = f(t)$ (рис. 6б) свидетельствуют о том, что робот отработал установленное нелинейное задание скорости с определенной точностью.

На рис. 6а пунктиром обозначено задающее трапецеидальное воздействие скорости на каждое колесо. График демонстрирует, что каждое колесо совершило отработку перемещения по одному и тому же закону и достигло скорости 5 рад/с к моменту равномерного движения. Инерционность системы сказывается на нелинейном характере графиков с запаздыванием по отработке воздействия: разгон начался через 0,4–0,7 с после поступления сигнала задания, торможение – спустя 0,2 с, полная остановка – от 0,2 с для задних колес до 0,4 с для правого переднего колеса и 1,1 с для левого переднего колеса.

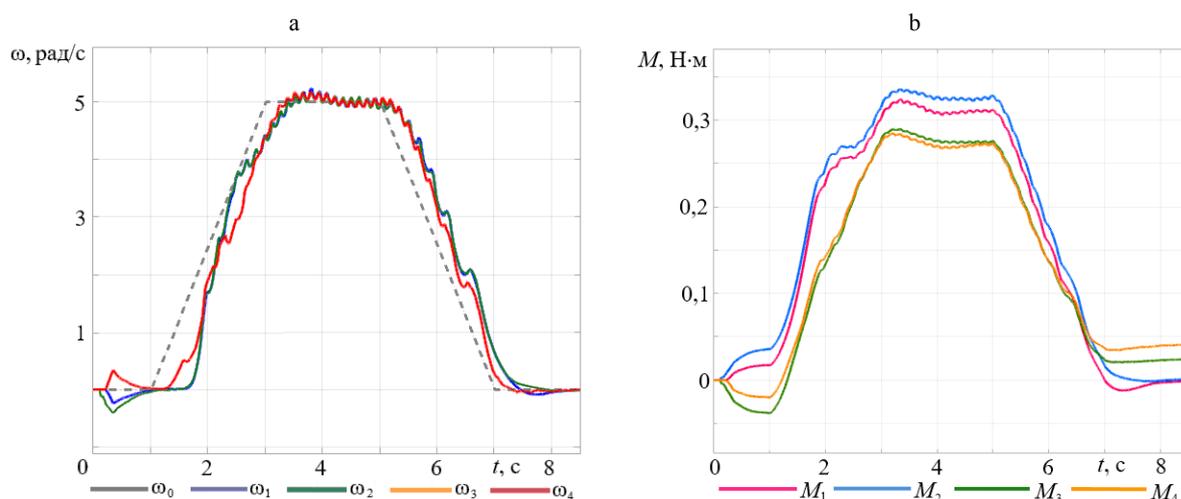


Рис. 6. Графики зависимостей: а – угловых скоростей колес от времени $\omega_N(t)$; б – вращающих моментов колес от времени M_N

Fig. 6. Graphs of dependences: а – angular speeds of wheels on time $\omega_N(t)$; б – wheels torques on time $M_N(t)$

Также присутствуют броски скорости при пуске, достигающие $\pm 0,4$ рад/с, связанные с троганием, и заметные колебания скорости ($\pm 0,2$ рад/с) при равномерном движении, возникшие из-за конструкции колес механум – отсутствия полного непрерывного контакта с поверхностью за период оборота [10]. Графики зависимостей вращающих моментов колес от времени (рис. 6b) повторяют форму графиков скорости, но с заметными отличиями: передние колеса развивают больший момент ($M_1 = 0,32$ Н·м; $M_2 = 0,33$ Н·м), чем задние ($M_3 = 0,27$ Н·м; $M_4 = 0,275$ Н·м). Это свидетельствует о создании тормозного момента задними колесами, а в момент трогания задние колеса и вовсе создают отрицательный момент ($-0,02$ и $-0,04$ Н·м), после остановки – сохраняют вращающий момент ($0,025$ и $0,04$ Н·м) при нулевой скорости движения. Разность значений моментов колес означает, что робот отклоняется от прямолинейной траектории при движении, однако устойчив по скорости за счет внедренных ПИ-регуляторов скорости. Кинематическое управление заданием закона изменения скорости без возможности контроля динамики робота, очевидно, снижает точность позиционирования объекта, но алгоритмы контроля динамического уровня вынуждают использовать более сложные математические модели системы [11, 12].

Анимация движения робота по прямолинейной траектории с записанной траекторией его перемещения получена через инструмент *Mechanics Explorer* и отображена на рис. 7.

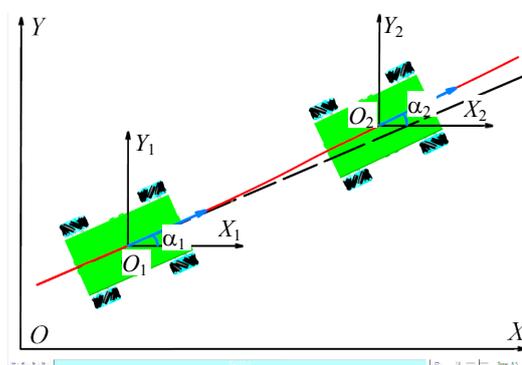


Рис. 7. Анимация движения робота по прямолинейной траектории с фактическим отклонением

Fig. 7. Animation of robot moving along a straight-line trajectory with actual deviation

Показанная на рис. 7 визуализация движения демонстрирует практически линейную траекторию перемещения с некоторым отклонением положения корпуса робота от начального в конце моделирования. Движение плоское в координатных осях OXY содержит перемещение робота из точки с координатами $O_1X_1Y_1$ в точку с координатами $O_2X_2Y_2$ по заданной прямолинейной траектории, обозначенной пунктирной линией черного цвета. Фактически пройденная роботом траектория, изображенная сплошной

линией красного цвета, показывает отклонение при движении, определяемое разностью углов α_2 и α_1 . Суммарное перемещение робота составило 0,97 м за время 8,5 с, а его отклонение от прямолинейной траектории на угол $\Delta\alpha = 1,68^\circ$ заставило отклониться от заданной прямой на 0,057 м. Это дает основания полагать о наличии ошибки позиционирования, возникшей по итогу действия кинематики и динамики колес механум при разгоне и торможении.

Рассмотрим проекции линейной скорости центра масс робота в трехмерной плоскости перемещения XYZ , отображающие действие случайных колебаний, вызванных динамикой механум колес, способствующих отклонению корпуса робота от намеченной траектории (рис. 8а, б, с).

Отображенная на рис. 8а зависимость линейной скорости центра масс робота в плоскости X , то есть в плоскости движения робота, совпадает с графиками скоростей колес (рис. 6а) и является результирующим вектором линейной скорости всех четырех колес. При торможении заметны более резкие скачки скорости, чем при разгоне, связанные с неравномерными значениями моментов к началу торможения. На рис. 8б показаны колебания скорости в плоскости Y , перпендикулярной направлению движения робота. Хотя показания величины скорости, имеющей случайный характер распределения, находятся в основном в пределах от $-0,01$ до $0,01$ м/с, резкое увеличение амплитуды гармоник скорости на промежутке от 3 до 7 с, когда робот совершает равномерное и равнозамедленное движение, достигающих своего пика на отметке $-0,051$ м/с

на 6,7 с (в момент торможения), означает, что именно в этих режимах происходит наибольшее отклонение робота от своей траектории. Необходима лучшая фильтрация сигнала скорости за счет подбора более оптимальных коэффициентов апериодического звена, а также применение контура регулирования динамического момента и контроля динамических параметров. Отображенный на рис. 8с график зависимости линейной скорости робота в плоскости Z показывает колебания, влияющие на его движение со стороны поверхности. При трогании заметен резкий скачок скорости до значений $-0,9$ и $0,22$ м/с. Затем, по мере разгона, число колебаний возрастает и устанавливается в диапазоне $\pm 0,08$ м/с в течение 2–6 с, к концу торможения вновь падает. Данные колебания объясняются профилем поверхности колеса механум, не имеющего непрерывного контакта с поверхностью из-за наличия повернутых на угол 45° роликов, в результате чего с ростом скорости колебания этого параметра становятся все более существенными.

Аналогичным образом проанализируем проекции перемещения робота в трехмерной плоскости XYZ и определим отклонения в позиционировании, основываясь на рис. 9а, б, с.

Как видно из графика на рис. 9а, робот совершил перемещение 0,97 м за 6,8 с, пройдя этапы разгона, равномерного движения и торможения. На протяжении времени от 6,8 до 8,5 с робот находился в состоянии покоя. Кривая, представленная на рис. 9б, является графиком перемещения, которое совершил робот в плоскости, перпендикулярной плоскости движения, иными словами, ошибкой его позиционирования.

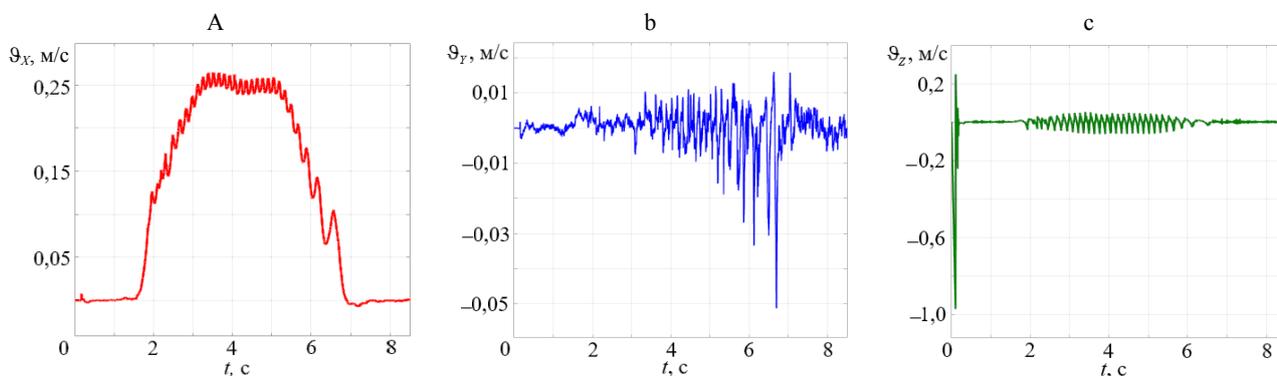


Рис. 8. Графики зависимостей проекций линейной скорости центра масс робота от времени на плоскость:

а – $X \vartheta_X(t)$; б – $Y \vartheta_Y(t)$; с – $Z \vartheta_Z(t)$

Fig. 8. Graphs of projections of linear velocity of the robot's center of mass on time to the plane:

а – $X \vartheta_X(t)$; б – $Y \vartheta_Y(t)$; с – $Z \vartheta_Z(t)$

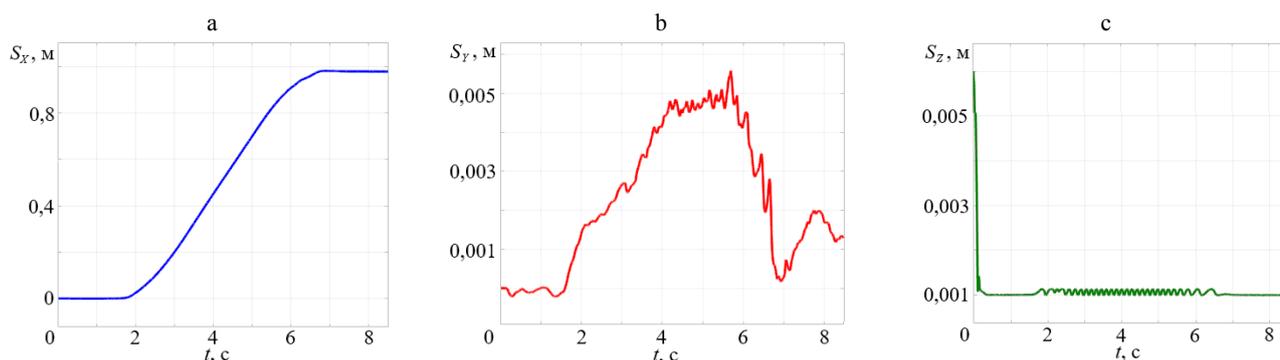


Рис. 9. Графики зависимостей проекций перемещения робота от времени на плоскость:

a – $X S_x(t)$; b – $Y S_y(t)$; c – $Z S_z(t)$

Fig. 9. Graphs of projections of the robot's movement on time to the plane:

a – $X S_x(t)$; b – $Y S_y(t)$; c – $Z S_z(t)$

Как и в случае с графиком скорости (рис. 8b), отклонение при движении имело место на всем протяжении движения робота, начиная с разгона, и не прекратилось даже после его остановки. Это объясняется тем, что задние колеса продолжают создавать вращающий момент и пытаются сместить корпус робота в плоскости XY. Колебания скорости, создаваемые вибрацией колес механум при движении, неизбежно приводят к отклонениям расстояния в плоскости Z, кратковременной потере контакта с поверхностью и тряске робота (рис. 9c), где показано, что при разгоне и движении платформы со скоростью 0,23 м/с вибрации колес приводят к отрыву от поверхности на 0,1–0,4 см, при снижении скорости такие отклонения исчезают.

На рис. 10а выведена ошибка позиционирования робота на всем протяжении пути – зависимость проекции перемещения на плоскость X

от проекции перемещения на плоскость Y. Трехмерное представление колебаний скорости робота изображено на рис. 10b.

График ошибки позиционирования, показанный на рис. 10а, представляет зависимость перемещения робота по оси x от перемещения по оси y. Максимальное отклонение от заданной траектории составило 0,057 м в момент достижения роботом отметки 0,85 м при торможении. По отношению к общему пройденному пути ошибка перемещения составила 5,87 %. Изображенная на рис. 10b пространственная визуализация колебаний скорости робота выявляет случайный характер их размещения и отображает экстремумы, установившиеся на значениях – 0,051 и 0,28 м/с. В целом позиционирование робота при отработке заданной траектории можно оценить как удовлетворительное.

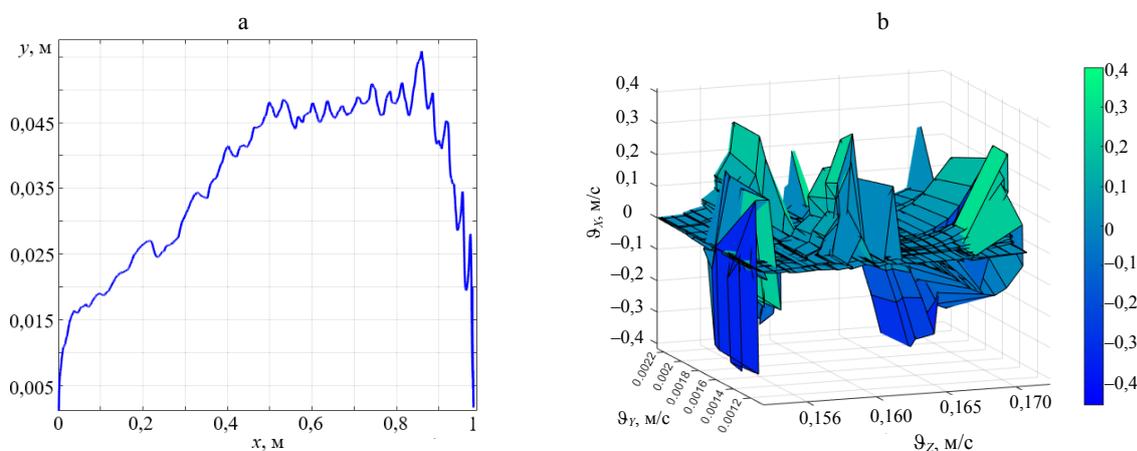


Рис. 10. Графики зависимостей: ошибки позиционирования робота $x = f(y)$ (a)

и колебаний скорости робота в плоскостях XYZ $\vartheta_{x,y,z}(t)$ (b)

Fig. 10. Dependency graphs: robot positioning errors $x = f(y)$ (a) and robot speed fluctuations in XYZ planes $\vartheta_{x,y,z}(t)$ (b)

ВЫВОДЫ

Исследованы динамические характеристики мобильного всенаправленного робота с колесами меканум с применением имитационной модели, позволившей дать оценку, провести анализ и сделать выводы о свойствах и качествах системы.

1. В пакете моделирования MATLAB Simulink создана компьютерная модель робота на колесах меканум с применением технологий твердотельного цифрового прототипа, внедренного в модель, учитывающая массогабаритные параметры, а также кинематику и динамику объекта на основании блочной записи его математической модели.

2. Результатами проведенного моделирования явились полученные зависимости кинематических, динамических и механических характеристик: угловой скорости и вращательного момента каждого колеса от времени; линейной скорости центра масс робота от времени; пройденного роботом пути от времени; ошибки позиционирования при отработке заданного перемещения; пространственной визуализации колебаний скорости; получена анимация движения объекта по траектории.

3. В ходе проведенного анализа полученных графиков установлено:

- максимальная ошибка позиционирования 0,057 м (5,87 %), а угол отклонения робота от начального положения составил 1,68°;

- максимальные колебания скорости в перпендикулярной движению робота плоскости 0,051 м/с в процессе торможения;

- система устойчива по скорости благодаря внедренным ПИ-регуляторам скорости, однако в динамических режимах имеют место значительные пульсации скорости, что требует улучшенного механизма фильтрации;

- вращающий момент колес робота характеризуется разбежкой характеристик, пульсациями величин и слабой устойчивостью из-за отсутствия контроля динамики робота (используется кинематическое управление заданием скорости), что снизило точность позиционирования объекта и повлияло на его отклонение от прямолинейной траектории.

4. Используемые в роботе колеса меканум из-за своей конструктивной особенности – рас-

положенных под углом 45° свободно вращающихся роликов – не могут обеспечивать непрерывный контакт с поверхностью, вследствие чего с увеличением скорости происходят колебания робота (тряска) с отклонением его от поверхности на 0,1–0,4 см и колебания скорости в вертикальной плоскости (вибрация) до ±0,08 м/с. Данная особенность снижает устойчивость робота в динамике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов, А. В. Тележка с омниколесами на плоскости и сфере / А. В. Борисов, А. А. Килин, И. С. Мамаев // *Нелинейная динамика*. 2011. Т. 7, № 4. С. 785–801.
2. Адамов, Б. И. Исследование динамики всенаправленной платформы при различных уровнях детализации моделей меканум-колес и контактных сил / Б. И. Адамов, А. И. Кобрин, Г. Р. Сайпулаев // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. трудов: в 4 т. Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. Т. 1. С. 522–524.
3. Адамов, Б. И. Идентификация параметров математической модели мобильной роботизированной платформы всенаправленного движения KUKA youBot / Б. И. Адамов, А. И. Кобрин // *Мехатроника, автоматизация, управление*. Т. 4, № 4. 2018. С. 251–258.
4. Изюмов, А. А. Моделирование системы управления движением мобильного робота / А. А. Изюмов // *Сборник избр. ст. науч. сессии ТУСУР*. 2020. № 1-1. С. 110–112.
5. Patel, P. S. Dynamic Simulation Model for Different Type of Wheeled Mobile Robotic Drives on Leveled Surface / P. S. Patel, R. Trivedi // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1706. P. 108–117. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012202>.
6. Li, Yu. Modeling and Kinematics Simulation of a Mecanum Wheel Platform in RecurDyn / Yunwang Li [et al.] // *Journal of Robotics*. Vol. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9373580>.
7. Радкевич, А. А. Математическая модель управления движением мобильного робота с колесами всенаправленного типа меканум / А. А. Радкевич [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2024. Т. 22, № 1. С. 82–90. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-82-90>.
8. Nonuniform Dual-Rate Extended Kalman-Filter-Based Sensor Fusion for Path-Following Control of a Holonomic Mobile Robot with Four Mecanum Wheels / R. Pizá [et al.] // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No 7. P. 3560 <https://doi.org/10.3390/app12073560>.
9. Павлюковец, С. А. 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. Богущ [и др.]*. Минск, 2023. Ч. 2. С. 94–102.

10. Abdelrahman, M. A Description of the Dynamics of a Four-Wheel Mecanum Mobile System as a Basis for a Platform Concept for Special Purpose Vehicles for Disabled Persons / M. Abdelrahman [et al.] // 58-th Ilmenau Scientific Colloquium – Shaping the Future by Engineering, Ilmenau, 2014.
11. Hendzel, Z. Modeling of Dynamics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels with the Use of Lagrange Equations of the Second Kind / Z. Hendzel, J. Rykala // Int. J. of Applied Mechanics and Engineering. 2017. Vol. 22, No 1. P. 81–99. <https://doi.org/10.1515/ijame-2017-0005>.
12. Galati, R. Adaptive heading correction for an industrial heavy-duty omnidirectional robot / R. Galati, G. Mantriota, G. Reina // Scientific Reports. 2022. Vol. 12, No 1. Art. No 19608. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24270-x>.
- Поступила 19.02.2024
Подписана в печать 22.04.2024
Опубликована онлайн 30.09.2024
- REFERENCES
1. Borisov A. V., Kilin A. A., Mamaev I. S. (2011) Trolley with Omni-Wheels on a Plane and a Sphere. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 7 (4), 785–801 (in Russian).
2. Adamov B. I., Kobrin A. I., Sajpulaev G. R. (2019) Investigation of the Dynamics of an Omnidirectional Platform at Different Levels of Detail of Mecanum-Wheel Models and Contact Forces. *XII Vserossiiskii s'ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki: sb. trudov. T. 1* [12th All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics: Collection of works. Vol. 1.]. Ufa, Bashkir State University, 522–524 (in Russian).
3. Adamov B. I., Kobrin A. I. (2018) Parametric Identification of the Mathematical Model of the Omnidirectional Mobile Robot KUKA youBot. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 4 (4), 251–258 (in Russian).
4. Izyumov A. A. (2020) Simulation of a Mobile Robot Motion Control System. *Collection of selected articles of the scientific session of TUSUR*, (1-1), 110–112 (in Russian).
5. Patel P. S., Trivedi R. (2020) Dynamic Simulation Model for Different Type of Wheeled Mobile Robotic Drives on Leveled Surface. *Journal of Physics: Conference Series*, 1706, 108–117. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012202>.
6. Li Y., Dai S., Zheng Y., Tian F., Yan X. (2018) Modeling and Kinematics Simulation of a Mecanum Wheel Platform in RecurDyn. *Journal of Robotics*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9373580>.
7. Radkevich A. A., Xinxin W., Velchenko A. A., Pauliukavets S. A. (2024) Mathematical Model of Motion Control of a Mobile Robot with Omnidirectional Mecanum Wheels. *Doklady BGUIR*, 22 (1), 82–90 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-82-90>.
8. Pizá R., Carbonell R., Casanova V., Cuenca Á., Salt Llobregat J. J. (2022) Nonuniform Dual-Rate Extended Kalman-Filter-Based Sensor Fusion for Path-Following Control of a Holonomic Mobile Robot with Four Mecanum Wheels. *Applied Sciences*, 12 (7), 3560. <https://doi.org/10.3390/app12073560>.
9. Pauliukavets 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 9th International Scientific and Practical Conference, Minsk, May 17–18, 2023. Part 2*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 94–102 (in Russian).
10. Abdelrahman M., Zeidis A. I., Bondarev O., Adamov B., Becker F., Zimmermann K. (2014) Description of the Dynamics of a Four-Wheel Mecanum Mobile System as a Basis for a Platform Concept for Special Purpose Vehicles for Disabled Persons. *58-th Ilmenau Scientific Colloquium – Shaping the Future by Engineering*. Ilmenau.
11. Hendzel Z., Rykala Ł. (2017). Modelling of Dynamics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels with the Use of Lagrange Equations of the Second Kind. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 22 (1), 81–99. <https://doi.org/10.1515/ijame-2017-0005>.
12. Galati R., Mantriota G., Reina G. (2022) Adaptive Heading Correction for an Industrial Heavy-Duty Omnidirectional Robot. *Scientific Reports*, 12 (1), 19608. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24270-x>.
- Received: 19.02.2024
Accepted: 22.04.2024
Published online: 30.09.2024