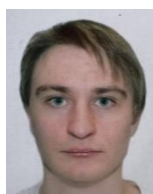


УДК 629.1.02

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-106

Д.В. Бордюгов¹, Е.С. Брискин², Н.Г. Шаронов³

О БЕЗУДАРНОМ РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ВНУТРЕННИМИ МАССАМИ



¹Бордюгов Денис Владимирович,
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (999)625-0818, E-mail: denklopuk@gmail.com.



²Брискин Евгений Самуилович,
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (844)224-8113, E-mail: dpm@vstu.ru.



³Шаронов Николай Геннадьевич,
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (844)224-8113, E-mail: dpm@vstu.ru.

Аннотация

Рассматривается математическая модель и метод управления мобильным роботом, перемещающимся за счет вращения внутренней массы (одно или несколько тел внутри корпуса робота) вокруг вертикальной оси, и поочередно вступающих в контакт с плоской опорной поверхностью стоек, расположенных на корпусе робота.

В процессе перемещения на опорные стойки периодически накладываются или снимаются голономные связи, что позволяет корпусу совершать движение по плоскости.

Математическая модель учитывает дискретное взаимодействие опорных стоек с поверхностью и управление вращением внутренней массы относительно корпуса.

Рассмотрено движение мобильного робота, осуществляющееся за счет согласованного попеременного контакта опор с поверхностью при постоянстве скорости вращения внутренней массы.

Ключевые слова: мобильный робот, голономные связи, внутренняя масса, управление движением.

Введение

Разработка мобильных робототехнических систем с новой структурой и типами движителей [1 – 4] обусловлена потребностью движения того или иного оборудования по плоским, различно ориентированным поверхностям, цилиндрическим направляющим [5] и другим поверхностям.

Относительно новыми с точки зрения конструктивных особенностей и алгоритмов управления приводами движителей можно считать капсульные роботы [6]. Принцип их перемещения заключается во взаимодействии корпуса мобильного робота, внутри которого расположена подвижные части (движители), с окружающей средой или поверхностью. При этом внутренняя масса взаимодействует только с корпусом робота, чаще всего герметичным [7, 8]. Некоторые подобные роботы являются вибрационными, так как в базовом режиме подвижные части совершают периодические колебания [9, 10]. Использование подобных робототехнических систем актуально в условиях ограниченного пространства или экстремальных средах в связи с потенциальной возможностью герметизации робота [11].

Среди существующих типов движителей шагающие или «шагающеподобные» в сравнении с другими выделяются дискретностью взаимодействия с опорной поверхностью, что в условиях неорганизованной среды является существенным преимуществом [12 – 15]. В то же время дискретность взаимодействия (периодическая остановка одной из точек движителя) может быть реализована различным способом. Например, мобильный робот может перемещаться по поверхности за счет дискретного взаимодействия опорных элементов робота с поверхностью и стационарного движения подвижных частей (внутренних масс) в корпусе.

Рассматривается математическая модель и метод управления мобильным роботом, перемещающимся за счет вращения внутренней массы (одно или несколько тел внутри корпуса робота) вокруг вертикальной оси, и поочередно вступающих в контакт с плоской опорной поверхностью стоек, расположенных на корпусе робота. Решается задача определения условий (алгоритма) попеременного расположения опорных стоек, обеспечивающие движение корпуса по плоскости при равномерном вращении внутренней массы относительно перпендикулярной плоскости оси.

Методы

Рассматривается мобильный робот (рис. 1), содержащий корпус 1, в котором расположено внутреннее тело (одно или несколько) 3, совершающее вращательное движение относительно корпуса вокруг оси, перпендикулярной плоскости движения корпуса. Мобильный робот опирается на горизонтально расположенную поверхность N опорами 2, конструкция которых включает стойки 4, закрепленные на корпусе робота, и шаровые опоры, контактирующие с опорной поверхностью 5. В процессе движения внутреннее тело (одно или несколько) совершает вращательное движение вокруг вертикальной оси, а стойки поочередно вступают в контакт с поверхностью, вследствие чего, на движение корпуса робота накладываются или снимаются голономные связи.

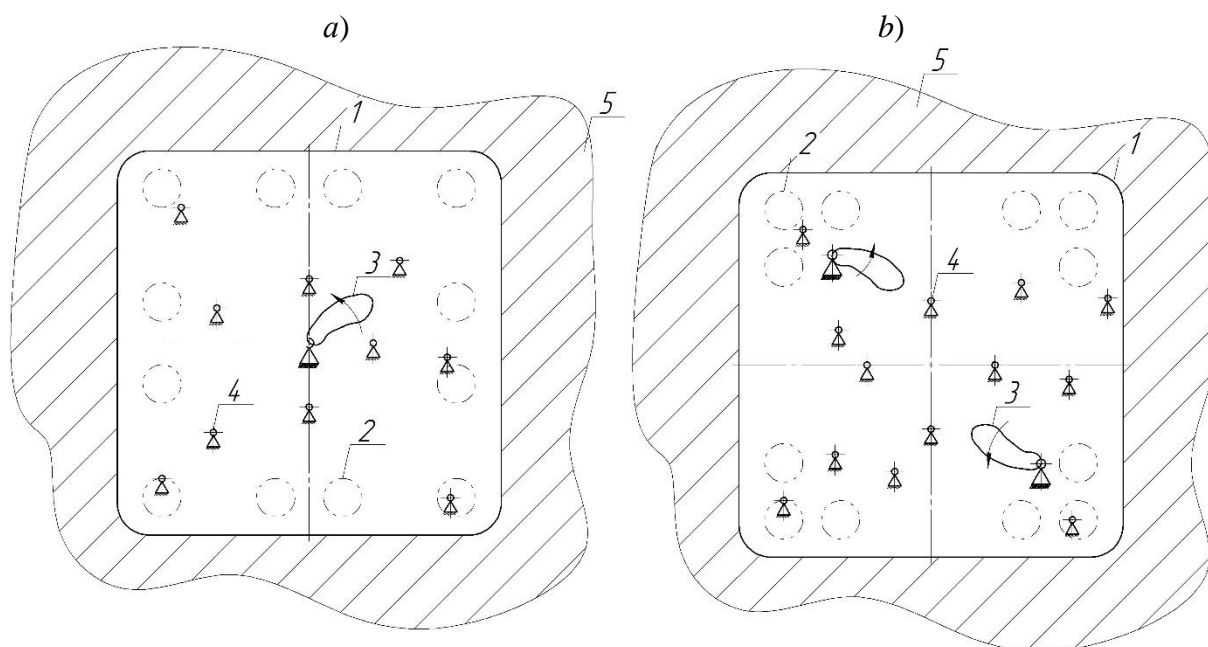


Рис. 1. Кинематическая схема: *a)* робота с одной внутренней массой; *b)* робота с двумя внутренними массами

Расчетная схема движения мобильного робота по горизонтальной плоскости приведена на рис. 2.

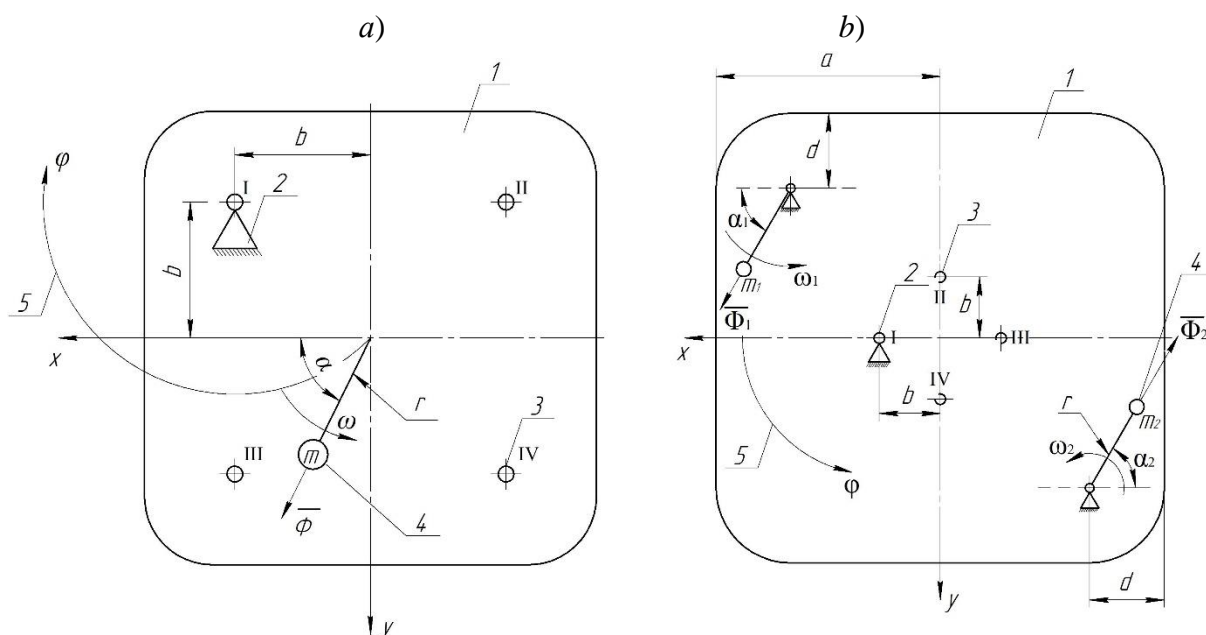


Рис. 2. Расчетная схема мобильного робота: *a)* с одной внутренней массой; *b)* с двумя внутренними массами (Φ , Φ_1 , Φ_2 – силы инерции; m , m_1 , m_2 – массы грузов; r – длина стержня, на котором закреплен груз; b – расстояние от зафиксированной опоры до линии, проходящей через геометрический центр робота; ω , ω_1 , ω_2 – угловые скорости стержней с закрепленными на них грузами; φ – угол поворота корпуса; α , α_1 , α_2 – начальные углы отклонения стержней относительно горизонтальной оси.

Для описания каждого из поворотов мобильного робота используются уравнения (1) вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной стойки

$$\begin{aligned}
 J_a \ddot{\varphi} &= \sum M; \\
 J_a \ddot{\varphi} &= \sum \Phi \cdot l; \\
 J_a \ddot{\varphi} &= \sum (mr\omega^2 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega t) + mr\omega^2 \cdot \sin(\alpha_0 + \omega t)) \cdot l
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Основным условием задаваемого программного движения является отсутствие удара в момент смены стоек, что приводит к периодической остановке корпуса робота в процессе перемещения, при этом подвижная масса на прекращает своего движения.

Результаты

Проведено исследование модельной задачи движения мобильного робота:

– с одной вращающейся с постоянной скоростью внутренней массой (рис. 2, *a*) как механической системы с параметрами $\alpha_0 = 1,0472$ рад; $\omega = 0,5$ рад/с; $b = 0,5$ м; $r = 0,3$ м; $J = 0,735$ кг·м³; $m = 2$ кг;

– с двумя вращающимися с постоянной скоростью внутренними массами (рис. 2, б) как механической системы с параметрами $a = 0,20$ м; $b = 0,02$ м; $d = 0,02$ м; $r_1 = 0,09$ м; $r_2 = 0,10$ м; $m_1 = 1$ кг; $m_2 = 2,5$ кг; $\omega_1 = 0,5$ рад/с; $\omega_2 = 0,5$ рад/с; $\alpha_1 = 1,047$ рад.; $\alpha_2 = 0,52$ рад.

Корпус робота в начале движения считался неподвижным, что соответствует начальным условиям $\varphi_0 = 0$ рад; $\dot{\varphi}_0 = 0$ рад/с.

Для предотвращения удара смена стоек происходит в момент нулевого значения угловой скорости корпуса мобильного робота, что соответствует условию $\dot{\varphi} = 0$ рад/с.

В таблице 1 представлен алгоритм управления стойками робота, соответствующий траектории движения геометрического центра корпуса робота, представленной на рис. 3, а также значения угла поворота корпуса φ , рад.

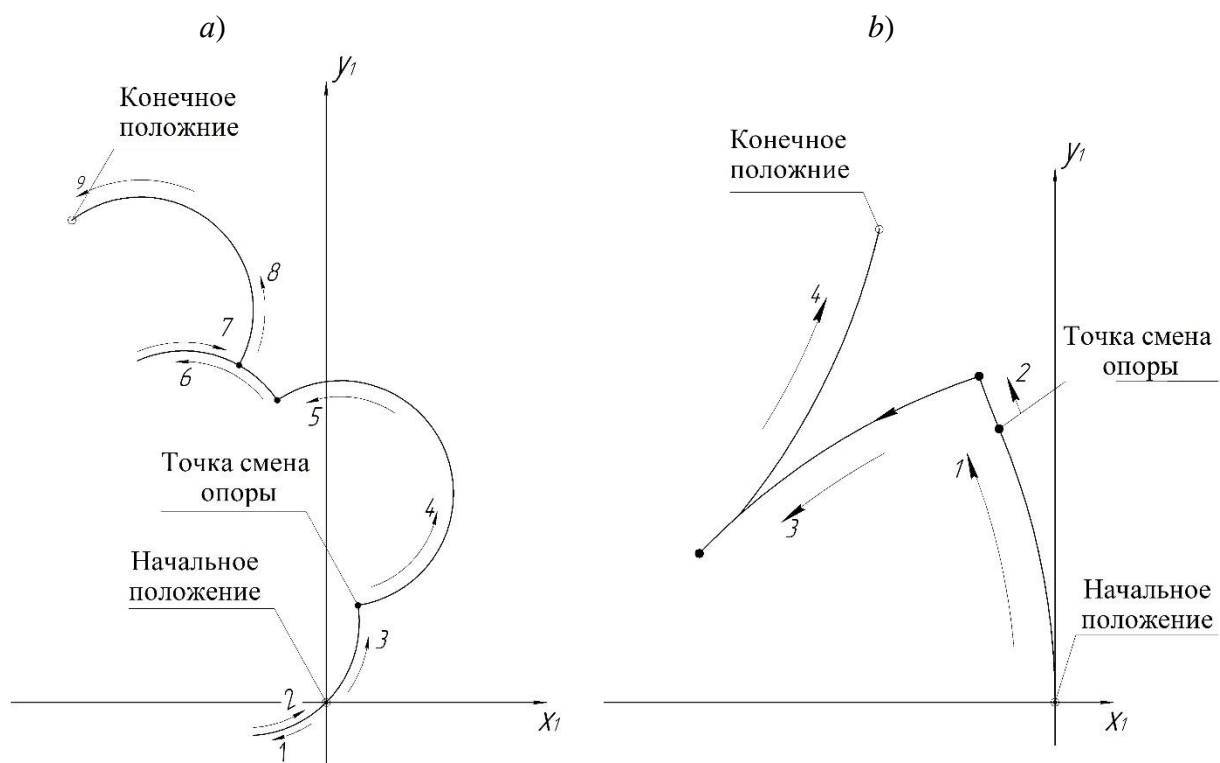


Рис. 3. Изменение положения центра корпуса мобильного робота: а) с одной внутренней массой; б) с двумя внутренними массами

Таблица 1. Алгоритм управления стойками

Промежуток времени движения t , сек.	Угол поворота корпуса мобильного робота φ° .	Стойка, взаимодействующая с поверхностью
Робот с одной внутренней массой		
0 ... 12,53 сек.	0...418,94°.	I опора
12,53 ... 24,35 сек.	418,94...757,50°.	II опора
24,35 ... 36,95 сек.	757,50...1118,54°.	IV опора
36,95 ... 49,33 сек.	1118,54...757,50°.	III опора
Робот с несколькими внутренними массами		
0 ... 5,50 сек.	0 ... 23,17°.	I опора
5,50 ... 8,86 сек.	23,17 ... 18,52°.	III опора
8,86 ... 16,68 сек.	18,52 ... 46,12°.	IV опора
16,68 ... 23,60 сек.	46,12 ... 76,98°.	II опора

Подробнее рассмотрим изменения положения геометрического центра корпуса мобильного робота с несколькими внутренними массами, рис. 3, *b*). В начальный момент времени корпус вращается против часовой стрелки, участок 1, в момент времени 5,50 сек. его угловая скорость равна нулю и происходит смена стойки, после чего корпус начинает вращаться против часовой стрелки, участок 2. Дальнейшее перемещение мобильного робота происходит аналогичным образом.

Заключение

Разработаны кинематические схемы мобильного робота с N опорными стойками и одним или несколькими внутренними телами, совершающими вращательное движение, на основе которой представлена математическая модель динамики движения. Представлены уравнения вращательного движения робота с внутренними массами, совершающими вращательное движение, при произвольном последовательном изменении взаимодействующих с опорной поверхностью стоек.

Определены временные промежутки контакта каждой из стоек с опорной поверхностью, а также значения угла поворота корпуса робота в процессе движения, обеспечивающие отсутствие удара в момент смены стоек. Получена траектория движения геометрического центра корпуса робота, при заданном алгоритме смены опорных стоек.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Караваев, Ю.Л., Килин, А.А. Динамика сфероробота с внутренней омниколесной платформой. *Нелинейная динамика*, 2015, 11(1), С. 187-204.
- [2] Becker, F. *Locomotion Principles for Microrobots Based on Vibrations. Microactuators and Micromechanisms*. 2017, pp. 91-102.
- [3] Болотник, Н.Н., Градецкий, В.Г., Жуков А.А. Мобильный микроробот космического назначения: концепция и перспективы использования. *Космические исследования*. 2019, 57(2), С. 132-138.
- [4] Lozano-Perez, T. *Autonomous robot vehicles*. Springer Science & Business Media. 2012. p. 460.
- [5] Бордюгов, Д.В., Брискин, Е.С., Шаронов, Н.Г. Об управлении движением мобильного робота с двигателями, работающими на эффекте периодического заклинивания. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2023, 4(275), С. 23-28.
- [6] Болотник, Н.Н., Нунупаров, А.М., Чащухин, В.Г. Капсульный вибрационный робот с электромагнитным приводом и возвратной пружиной: динамика и управление движением. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2016, 6, С. 146-160.
- [7] Черноусько, Ф.Л. Управление плоскими движениями тела при помощи подвижной массы. *Прикладная математика и механика*. 2021, 85(4), С. 414-425.
- [8] Xiong Zhan, Jian Xu. Locomotion analysis of a vibration-driven system with three acceleration-controlled internal masses. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(3), available at: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1687814015573766>.
- [9] Болотник, Н.Н., Фигурин, Т.Ю. Оптимальное управление прямолинейным движением твердого тела по шероховатой плоскости посредством перемещения двух внутренних масс. *Прикладная математика и механика*. 2008, 72(2), С. 216-229.
- [10] Chernousko, F.L. Optimal control of vibrationally excited locomotion systems. *Regular and Chaotic Dynamics*. 2013, 18(1-2), pp. 85-99.
- [11] Черноусько, Ф.Л. Оптимальные периодические движения двухмассовой системы в сопротивляющейся среде. *Прикладная математика и механика*. 2008, 72(2), С. 202-215.
- [12] Брискин, Е.С., Калинин, Я.В., Мирошкина, М.В. Об энергетически эффективных режимах движения мобильных роботов с ортогональными шагающими двигателями при преодолении

- препятствий. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2020, 2, С. 75-82.
- [13] Briskin E.S., Shurygin V.A., Chernyshev V.V. Problems of increasing efficiency and experience of walking machines elaborating. Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators: Proceedings of ROMANSY 2014 XX CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. 2014, pp. 383-390.
- [14] Брискин, Е.С., Вершинина, И.П., Малолетов, А.В., Шаронов, Н.Г. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2014, № 3, С. 168.
- [15] Bordyugov, D.V., Briskin, E.S., Sharonov, N.G. The Motion Control Research of the Mobile Robot with Vibrating Propulsion Device Which Discretely Interacting with the Supporting Surface. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022, 324, pp. 421-427.

D.V. Bordyugov, E.S. Briskin, N.G. Sharonov

ABOUT NON-IMPACT MODE OF MOTION OF A MOBILE ROBOT WITH ROTATING INTERNAL MASSES

Volgograd State Technical University, Russia

Abstract

The mathematical model and control method of a mobile robot moving due to the rotation of an internal mass (one or more bodies inside the robot body) around a vertical axis, and alternately coming into contact with a flat support surface of struts located on the robot body are considered.

During the movement process, holonomic liaisons are periodically applied or removed on the support struts, allowing the body to perform in-plane motion.

The mathematical model accounts for discrete interaction of the support legs with the surface and control of the rotation of the internal mass relative to the body.

The motion of the mobile robot is considered, which is realized due to the coordinated alternating contact of the supports with the surface while the rotation speed of the internal mass is constant.

Key words: mobile robot, holonomic communications, internal mass, motion control.

REFERENCES

- [1] Karavaev, Yu.I., Kilin, A.A. The dynamic of a spherical robot with an internal omniwheel platform. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. 2015, 11(1), pp. 187-204.
- [2] Becker, F. *Locomotion Principles for Microrobots Based on Vibrations. Microactuators and Micromechanisms*. 2017, pp. 91-102.
- [3] Bolotnik, N.N., Gradetskii, V.G., Zhukov, A.A. Mobile Space Microrobot: Concept and Application Prospects. *Cosmic Research*. 2019, 57(2), pp. 115-120.
- [4] Lozano-Perez, T. *Autonomous robot vehicles*. Springer Science & Business Media. 2012. p. 460.
- [5] Bordyugov, D.V., Brickin, E.S., Sharonov, N.G. Motion control of the mobile robot with motors working on the preiodic jaming effect. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2023, 4(275), pp. 23-28.
- [6] Bolotnik, N.N., Nunuparov, A.M., Chashchukhin, V.G. Capsule-type vibration-driven robot with an electromagnetic actuator and an opposing spring: Dynamics and control of motion. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2016, 55(6), pp. 986-1000.
- [7] Chernousko, F.L. Control of plane movements of a body by means of a movable mass. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2021, 85(4), pp. 414-425.
- [8] Xiong Zhan, Jian Xu. Locomotion analysis of a vibration-driven system with three acceleration-controlled internal masses. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(3), available at: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1687814015573766>.
- [9] Bolotnik, N.N., Figurina, T.Yu. Optimal control of the rectilinear motion of a rigid body on a rough plane by means of the motion of two internal masses. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2008, 72(2), pp. 126-135.
- [10] Chernousko, F.L. Optimal control of vibrationally excited locomotion systems. *Regular and Chaotic Dynamics*. 2013, 18(1-2), pp. 85-99.
- [11] Chernousko, F.L. The optimal periodic motions of a two-mass system in a resistant medium. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2008, 72(2), pp. 116-125.
- [12] Briskin, E.S., Kalinin, Y.V., Miroshkina, M.V. Energy Efficient Modes of the Motion of Mobile Robots with Orthogonal Stepping Motors when Overcoming Obstacles. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2020, 59(2), pp. 209-216.
- [13] Briskin E.S., Shurygin V.A., Chernyshev V.V. Problems of increasing efficiency and experience of walking machines elaborating. *Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators: Proceedings of*

ROMANSY 2014 XX CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. 2014, pp. 383-390.

- [14] Briskin, E.S., Vershinina, I.P., Maloletov, A.V., Sharonov, N.G. On the control of motion of a walking machine with twin orthogonal rotatory movers. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, 53(3), pp. 464-471.
- [15] Bordyugov, D.V., Briskin, E.S., Sharonov, N.G. The Motion Control Research of the Mobile Robot with Vibrating Propulsion Device Which Discretely Interacting with the Supporting Surface. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022, 324, pp. 421-427.