

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

О ФОРМИРОВАНИИ БАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ «КАПСУЛЬНОПОДОБНОГО» МОБИЛЬНОГО РОБОТА



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

Рассмотрены вопросы управления движением «капсульноподобного» мобильного робота, оснащённого опорными стойками и внутренним телом, совершающим вращательное движение с постоянной угловой скоростью вокруг неподвижной перпендикулярной опорной поверхности оси. Разработана расчётная схема мобильного робота и математическая модель, описывающая динамику его движения. Получены алгоритмы управления опорными стойками, реализующие базовые траектории движения геометрического центра корпуса мобильного робота (боковое движение, разворот корпуса на 180°). Результаты показали, что за счёт согласованного управления опорными стойками робот способен перемещаться в любом направлении, а также имеет маневренность близкую к «идеальной». Особенность движения, в отличие от известных капсульных роботов, состоит в отсутствии проскальзывания.

Ключевые слова: мобильный робот, капсульные роботы, дискретное взаимодействие, голономные связи.

Введение

Разработка мобильных роботов различных классов и в различных конструктивных исполнениях представляет собой актуальную задачу в области робототехники. Такие устройства находят широкое применение: они используются для выполнения инспекционных операций в подводной среде, передвижения по специализированным поверхностям, а также для преодоления пересечённой и труднопроходимой местности.

Характер движения мобильных роботов определяется типом приводов и движителей, влияющих на их маневренность, устойчивость, скорость и проходимость. По типу движителей такие системы делятся на колесные, гусеничные, шагающие, плавающие, летающие и использующие нетрадиционные движители.

Особый интерес представляют шагающие и шагающеподобные роботы, как наиболее близкие по свойствам к «капсульноподобным». Они дискретно взаимодействуют с опорной поверхностью, что позволяет рассматривать их как системы с изменяемой структурой голономных связей [1-8].

Отдельного внимания заслуживает особый класс мобильных устройств — капсульные роботы. Эти системы относятся к вибрационно-локомоционным механизмам, функционирующим за счёт перемещения тел, находящихся внутри корпуса, чаще всего герметичного и не имеющего выступающих элементов [9-13]. В научных исследованиях [9, 10] движение капсульных роботов объясняется асимметричным перемещением внутреннего тела, вызывающим инерционные силы, воздействующие на корпус. Управление может осуществляться по скорости и ускорению внутреннего тела: в первом случае через изменение скорости движения внутреннего тела при фиксированных границах его перемещения; во втором — через варьирование длины перемещения и величины ускорения внутреннего тела. При этом перемещение корпуса робота происходит с проскальзыванием и возможно в том случае, когда инерционные силы превосходят по значению силы сопротивления среды (например, силы анизотропного трения). Способы управления движением внутренних тел для целенаправленного движения корпуса мобильного робота сложны в реализации. В этой связи перспективным с точки зрения законов и методов организации движения могут быть «капсульноподобные» роботы, в конструкции которых используются опорные элементы, дискретно взаимодействующие с поверхностью, а перемещение корпуса обеспечивается за счёт инерционных сил,

возникающих от стационарного движения внутренних масс. Такой подход позволяет обеспечивать маневренность близкую к «идеальной» [14] и исключить проскальзывание, поскольку в момент контакта опоры фиксируются жёстко.

Рассматривается математическая модель «капсульноподобного» мобильного робота с опорными стойками, управляемыми согласованно, и внутренним телом, совершающим стационарное вращательное движение вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью. Решается задача определения алгоритмов движения мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками, обеспечивающего заданное перемещение из начальной точки в конечную.

Методы

Рассматривается мобильный робот, перемещающийся по плоской ровной поверхности за счет движения по окружности внутреннего тела вокруг неподвижной перпендикулярной опорной поверхности оси с постоянной угловой скоростью, и стоек, расположенных на корпусе робота, которые формируют голономную нестационарную структуру связей путем согласованного взаимодействия каждой из стоек с плоской опорной поверхностью.

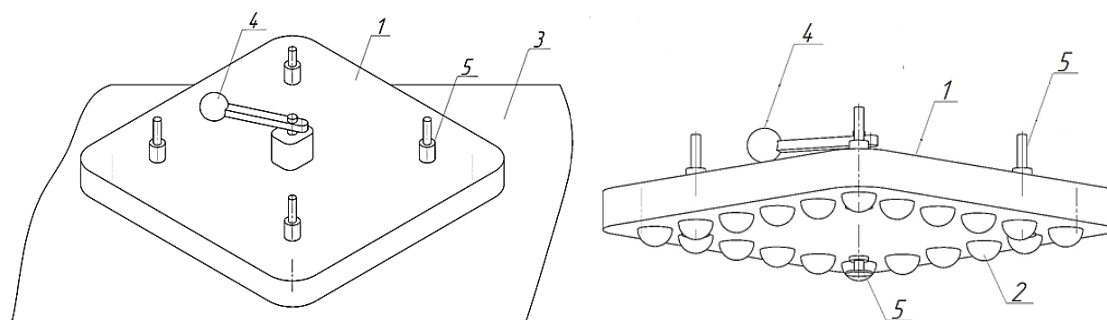


Рис. 1. Схема мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными элементами, дискретно взаимодействующими с поверхностью

На рис. 1 представлена конструктивная схема мобильного робота, включающего корпус 1, опирающийся на опорную поверхность 3 с помощью установленного по периметру набора из N шариковых опор 2. Внутреннее тело 4 размещено внутри корпуса на вертикальной оси, проходящей через его геометрический центр, и осуществляет вращательное движение относительно вертикальной оси. Кроме того, в заранее определённых точках на корпусе робота установлены выдвижные опоры 5 (опорные элементы следует располагать как можно ближе к центру масс корпуса робота, для обеспечения их устойчивости и жесткой фиксации), поочерёдно вступающие в контакт с поверхностью 3.

Для минимизации ударных нагрузок смена активных опор осуществляется в фазе, соответствующей нулевому значению угловой скорости корпуса мобильного робота. Управляемый переход опорной стойки из свободного состояния в режим силового взаимодействия с опорной поверхностью и наоборот обеспечивает реализацию различных по виду и характеру движений мобильного робота.

Рассматривается перемещение робота в одной из фаз движения. Расчетная схема движения мобильного робота представлена на рис. 2.

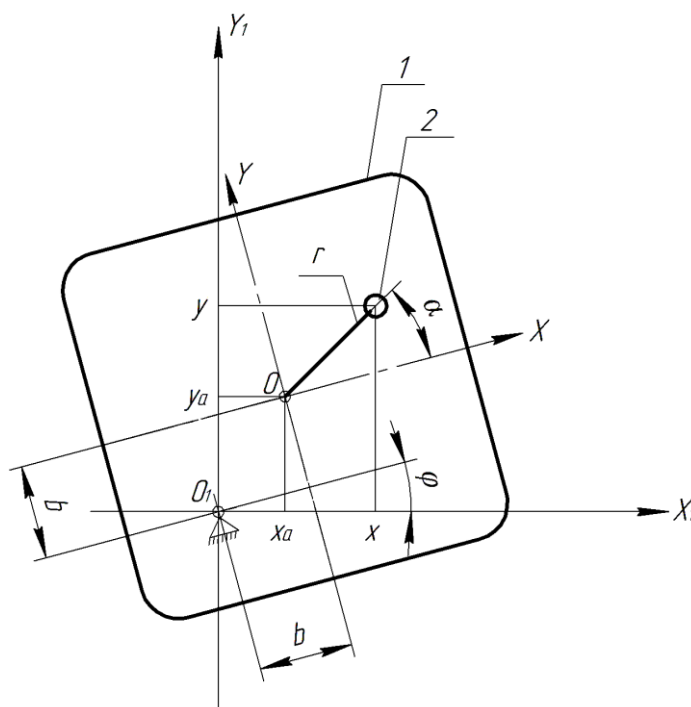


Рис 2. Расчетная схема мобильного робота с вращающимся внутренним телом при движении по горизонтальной плоскости: 1 – корпус мобильного робота; 2 – внутреннее тело

где: b – расстояние от центра корпуса мобильного робота до опоры O_1 , находящейся во взаимодействии с поверхностью; x_a, y_a – координаты центра корпуса мобильного робота 1 в проекции на оси O_1X_1 и O_1Y_1 соответственно; x, y – координаты внутреннего тела 2 в проекции на оси O_1X_1 и O_1Y_1 соответственно; φ – угол поворота корпуса робота относительно горизонтальной оси X_1 ; α – угол поворота тела внутри корпуса относительно горизонтальной оси X ; r – длина стержня, на котором закреплен груз; φ – угол поворота корпуса.

Уравнение динамики движения мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками удобно получить с помощью уравнения Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_{\varphi}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_{\alpha}. \end{cases} \quad (1)$$

где: $\dot{\varphi}, \dot{\alpha}$ – угловая скорость корпуса робота и угловая скорость внутреннего тела соответственно; $T = T_1 + T_2$ – кинетическая энергия системы; $T_1 = \frac{1}{2} J_{1z} \dot{\varphi}^2$ – кинетическая энергия корпуса мобильного робота, J_{1z} – осевой момент инерции корпуса робота, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс; $T_2 = \frac{1}{2} m_2 v^2$ – кинетическая энергия вращающегося внутреннего тела, m_2 – масса внутреннего тела, v_2 – скорость внутреннего тела; Q_{φ}, Q_{α} – обобщенные силы, соответствующие обобщенным координатам φ и α .

Активные силы, совершающие работу при движении системы по горизонтальной поверхности, отсутствуют, соответственно $Q_{\varphi} = 0, Q_{\alpha} = 0$.

Учитывая, что рассматривается установившийся режим движения внутреннего тела: $\dot{\alpha} = \text{const}; \ddot{\alpha} = 0$; и из-за малых ускорений корпуса робота пренебрегаем действием сил инерции, решение системы (1) имеет вид:

$$\ddot{\varphi} \left(J_{1z} + m_2 (2b^2 + r^2 + 2br \cdot (\cos(\alpha) + \sin(\alpha))) \right) = m_2 (\dot{\alpha}^2 br \cdot (\cos(\alpha) - \sin(\alpha))) \quad (2)$$

Результаты

В [15] представлены траектории движения геометрического центра мобильного робота в зависимости от различных алгоритмов смены опорных стоек. Из полученных результатов определяется, что представленный «капсульноподобный» мобильный робот с одним вращающимся внутренним телом и опорными стойками способен перемещаться в любом направлении. Важнейшим этапом исследования является получение базовых траекторий перемещения геометрического центра корпуса мобильного робота (боковое движение, движение по дуге окружности, разворот корпуса робота на 180 градусов и т.д.) для подтверждения близкой к «идеальной» маневренности мобильного робота.

Исследование модельной задачи движения мобильного робота с одной вращающейся с постоянной угловой скоростью внутренней массой (рисунок 2.4, а) как механической системы с параметрами $\alpha_0 = 1,0472$ рад; $\omega = 0,5$ рад/с; $b = 0,05$ м; $r = 0,2$ м; $J_a = 0,1365$ кг·м³; $m = 1$ кг.

Рассматриваются две базовые траектории движения геометрического центра корпуса мобильного робота: боковое движение, разворот корпуса робота на 180 градусов.

Алгоритмы управления опорными стойками:

– Для бокового движения геометрического центра мобильного робота:
 I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора;

– Для разворота корпуса робота на 180 градусов I опора → Все опоры → I опора → Все опоры → I опора → Все опоры → I опора → II опора → Все опоры → II опора;

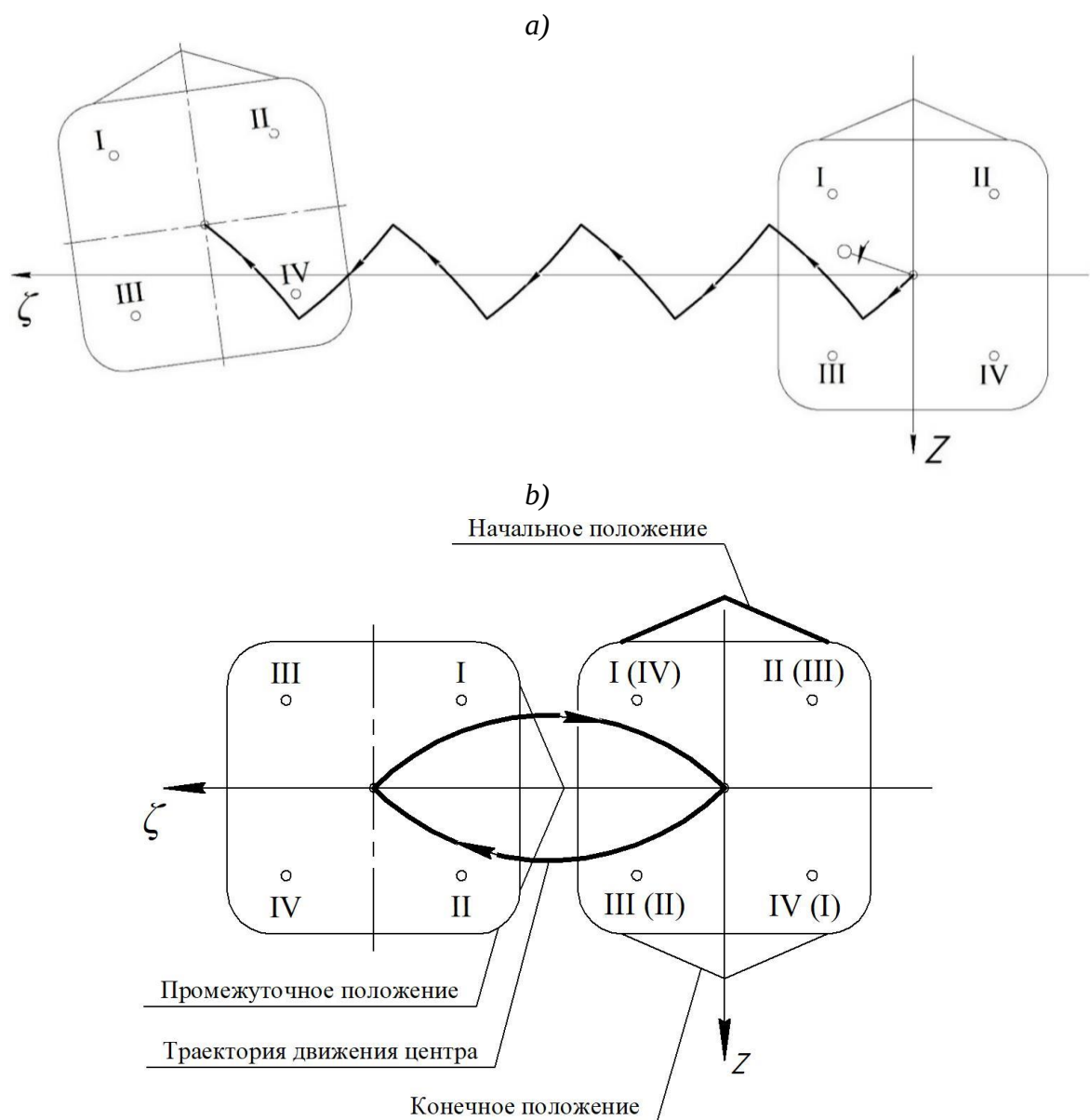


Рис. 4. Изменение положения геометрического центра корпуса мобильного:
 а) боковое движение; б) разворот на 180 градусов (в скобках указаны номера опор в конечном положении робота)

Заключение

Разработана расчетная схема «капсульноподоного» мобильного робота с опорными стойками и внутренним телом, совершающим вращательное движение, на основе которой сформулирована математическая модель, описывающая динамику движения робота.

Получены алгоритмы управления опорными элементами для нескольких базовых траекторий движения геометрического центра корпуса мобильного робота, без учета без учета рысканья корпуса в процессе перемещения, для подтверждения близкой к «идеальной» маневренности робота.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 640 с.
- [2] Охоцимский Д.Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука. Физматлит, 1984. 312 с.
- [3] Лапшин В.В. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов.. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 6. С. 319–335.
- [4] Брискин Е.С. О формировании и точности реализации программных режимов движения мобильных роботов с шагающими движителями. Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25, № 4. С. 195-200.
- [5] Gradetsky, V.G., Knyazkov, M.M., Semenov, E.A., Sukhanov, A.N. Design and Control for Vacuum Contact Devices of Mobile Wall Climbing Robot Application in Complex Environment. Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol. 261. pp. 143-155.
- [6] Брискин Е.С., Калинин Я.В., Малолетов А.В. Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 184-190.
- [7] Parker, R. Robotics in forestry. New Zealand Journal of Forestry. 2016. № 60(4). pp. 8–14.
- [8] Bordyugov, D.V., Briskin, E.S., Sharonov, N.G. Mathematical Model and Design of the Mobile Robot with Propellers Which Working on the Periodic Jamming Effect. Interactive Collaborative Robotics. 9th

- International Conference on Interactive Collaborative Robotics, ICR 2024. 2024. pp. 293-305.
- [9] Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н. Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией. М.: Физматлит, 2022. С. 464.
- [10] Черноусько Ф.Л. Динамика и оптимизация движений мобильных роботов. Актуальные проблемы механики. 50 лет Институту проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. М.: Наука, 2015. С. 34-49.
- [11] Болотник Н.Н., Нунупаров А.М., Чашухин В.Г. Капсульный вибрационный робот с электромагнитным приводом и возвратной пружиной: динамика и управление движением. Известия РАН. Теория и системы управления. 2016. №6. С. 146-160.
- [12] Liu Y., Islam S., Pavlouskaya E., Wiercigroch M. Optimization of the vibro-impact capsule system. J. Mech. Eng. 2016. V. 62. pp. 430-439.
- [13] Song, L, Dai, Yu, Luyao, W, Zhang, W, Ji, Yi, Cao, Yu, Wei, J, Wang, F, Zhong, J, Yang, J, Feng, L. Motion Control of Capsule Robot Based on Adaptive Magnetic Levitation Using Electromagnetic Coil. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2022. pp. 1-12.
- [14] Брискин Е. С. Специальные проблемы мобильной робототехники. Волгоградский государственный технический университет. Волгоград. 2020. 60 с.
- [15] Бордюгов Д. В. Управление тормозными приводами опорных стоек робота с вращающимся внутренним твердым телом. XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов, Москва, 17–20 июня 2024 года. Москва. 2024. С. 1557-1561.

ABOUT FORMATION OF BASIC MOTION TRAJECTORIES OF A “CAPSULE-LIKE” MOBILE ROBOT

Volgograd State Technical University, Russia

Abstract

We considered the issues of motion control of a “capsule-like” mobile robot equipped with support struts and an internal body making rotational motion with constant angular velocity around a fixed axis perpendicular to the support surface. A computational scheme of the mobile robot and a mathematical model describing the dynamics of its motion are developed. Algorithms for controlling the support struts that realize the basic trajectories of motion of the geometric center of the mobile robot body (lateral motion, 180° turn of the body) have been obtained. The results show that due to the coordinated control of the support legs, the robot is able to move in any direction and has maneuverability close to “ideal”. The peculiarity of the motion, unlike known capsule robots, is the absence of slippage.

Key words: mobile robot, capsule robots, discrete interaction, holonomic communications.

REFERENCES

- [1] Artobolevsky, I.I. Theory of mechanisms and machines: Textbook for universities. Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1988, P. 640.
- [2] Okhotsimskiy, D.E. Mechanics and motion control of an automatic walking machine. Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1984, P. 312.
- [3] Lapshin, V.V. Theory of mechanisms and machines: Textbook for universities. Science and education: scientific edition of Bauman Moscow State Technical University. 2014, № 6, pp. 319-335.
- [4] Briskin, E.S. On the formation and accuracy of the implementation of the program modes of movement of mobile robots with walking propulsion devices. Mechatronics, automation, control. 2024, 25, № 4. pp. 195-200.
- [5] Gradetsky, V.G., Knyazkov, M.M., Semenov, E.A., Sukhanov, A.N. Design and Control for Vacuum Contact Devices of Mobile Wall Climbing Robot Application in Complex Environment. Studies in Systems, Decision and Control. 2020, Vol. 261, pp. 143-155.
- [6] Briskin, E.S., Kalinin, Y.V., Maloletov, A.V. On controlling the adaptation of orthogonal walking movers to the supporting surface. Journal of

- Computer and Systems Sciences International. 2017, Vol. 56, No. 3, pp. 519-526.
- [7] Parker, R. Robotics in forestry. *New Zealand Journal of Forestry*. 2016, № 60(4), pp. 8–14.
 - [8] Bordyugov, D.V., Briskin, E.S., Sharonov, N.G. Mathematical Model and Design of the Mobile Robot with Propellers Which Working on the Periodic Jamming Effect. *Interactive Collaborative Robotics. 9th International Conference on Interactive Collaborative Robotics, ICR 2024*. 2024, pp. 293-305.
 - [9] Chernousko, F.L., Bolotnik, N.N. Dynamics of mobile systems with controlled configuration. Moscow: Fizmatlit. 2022, P. 464.
 - [10] Chernousko, F.L. Dynamics and motion optimization of mobile robots. *Actual problems of mechanics*. Moscow: Nauka, 2015, pp. 34-49.
 - [11] Bolotnik, N.N. 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, Vol. 55, No. 6, pp. 986-1000.
 - [12] Liu Y., Islam S., Pavlouskaya E., Wiercigroch M. Optimization of the vibro-impact capsule system. *J. Mech. Eng.* 2016, V. 62, pp. 430-439.
 - [13] Song, L, Dai, Yu, Luyao, W, Zhang, W, Ji, Yi, Cao, Yu, Wei, J, Wang, F, Zhong, J, Yang, J, Feng, L. Motion Control of Capsule Robot Based on Adaptive Magnetic Levitation Using Electromagnetic Coil. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2022, pp. 1-12.
 - [14] Briskin, E.S. Special problems of mobile robotics. Volgograd State Technical University. Volgograd. 2020, P. 60.
 - [15] Bordyugov, D.V. Control of braking actuators of robot support legs with rotating internal solid body. *XIV All-Russian meeting on control problems*. Moscow, 2024, pp. 1557-1561.