

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА

П.В. Рубцов

rubtsovpv@student.bmstu.ru

SPIN-код: 9823-2272

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен вопрос актуальности прыгающих роботов в настоящее время, а также их потенциальные возможности. Проведен сравнительный анализ моделей прыгающих роботов, оценены их преимущества и недостатки. Выполнено моделирование прыжка и приземления выбранного робота на основе его математической модели, включающей в себя семь последовательных этапов движения конструкции и ее звеньев, в программе MATLAB Simulink. В полученной модели были реализованы базовые элементы управления. Описаны особенности состояния отдельных звеньев в зависимости от текущего состояния системы в целом. Разработан графический интерфейс для проведения симуляций при различных значениях параметров. Приведены результаты моделирования перемещения данного робота при различных конструкционных, внешних и целевых параметрах.

Ключевые слова

Математическая модель, MATLAB Simulink, прыгающий робот, управление, пятизвенный прыгающий робот, моделирование движения, алгоритм управления движением, MATLAB App designer

Поступила в редакцию 26.10.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Одним из относительно новых направлений робототехники является разработка систем, способных при необходимости перемещаться с отрывом от поверхности. Внимание на устройства,двигающиеся с отрывом от поверхности (прыгающие роботы), обратили многие ученые и компании [1] со всего мира. Такие роботы обладают повышенной проходимостью по сильно пересеченной местности в сравнении с колесными, гусеничными и шагающими аналогами. Область применения прыгающих роботов (ПР) довольно широка: таких роботов используют в военно-разведывательных целях, при обследовании природных или техногенных катастроф, при исследовании космических тел и т. д. В перспективе ПР могут найти применение в промышленности и в народном хозяйстве. Одной из главных проблем разработки ПР является недостаточность исследования динамики прыжка самого устройства и выдача рекомендаций по его проектированию.

Постановка задачи. Были поставлены следующие задачи:

- 1) выбрать модель робота;
- 2) по его математической модели составить компьютерную модель;
- 3) выполнить моделирование движения робота;
- 4) оценить результаты.

Выбор модели робота. Прыгающие роботы могут быть охарактеризованы различными способами. Способ движения по поверхности может быть исключительно прыжковый или смешанный — состоять из прыжков и передвижения посредством колес. Исключительно прыжковый способ менее вариационный, а также проигрывает в скорости передвижения смешанному. Другим важным критерием является способ позиционирования устройства до отрыва. Выделяют следующие три способа [2]:

- 1) поворот корпуса относительно звена разгонного модуля;
- 2) поворот разгонного модуля относительно корпуса;
- 3) поворот корпуса вместе с разгонным модулем.

Первые два способа являются наиболее простыми для управления приводом, а также обеспечивают высокую точность позиционирования прыжка [3].

Для разгона робота могут использоваться пары вращательного движения или пары поступательного движения. При использовании пары вращательного движения направление вектора скорости системы в момент отрыва зависит от углов между звеньями в момент отрыва, что усложняет задачу управлением высотой и дальностью прыжка. Применение поступательных пар исключает недостатки, которые появляются из-за использования пар вращательного движения. При отрыве от поверхности разгоняющая сила направлена под фиксированным углом относительно горизонта, что упрощает задачу управления высотой и длиной прыжка по средствам регулирования угла наклона.

По типу приземления прыгающие роботы могут быть разделены на две группы:

- 1) приземляющиеся на звенья ноги;
- 2) приземляющиеся на корпус.

Первый вариант наиболее распространен в двухзвенных роботах, а также в тех роботах, которые с помощью вращательной пары имитируют прыжок человека или животного. Способ приземления на корпус возможен в случае конструкции робота, позволяющей ему втягивать звенья ноги в корпус с последующей фиксацией. В первом варианте важно провести прочностные расчеты, а также обеспечить защиту от повреждений. Во втором случае звенья ноги могут быть достаточно легкими, в то время как колеса робота должны быть прочными, а корпус обладать достаточными демпфирующими свойствами.

В результате анализа материалов [2–7] была выбрана модель колесного пятизвенного робота как наиболее компромиссный вариант, обеспечивающий простоту управления в совокупности с удовлетворительной точностью прыжка, гибкостью вариаций движения и конструкции. Схожая конструкция присуща роботу, разработанному компанией Boston Dynamics [8]. Для отрыва от поверхности и набора скорости используется поступательная пара. Приземление происходит на корпус, звенья во время полета задвигаются в корпус.

Расчетная схема робота. Расчетная схема выбранной модели аналогична схеме, рассмотренной в работе [3], и приведена на рис. 1.

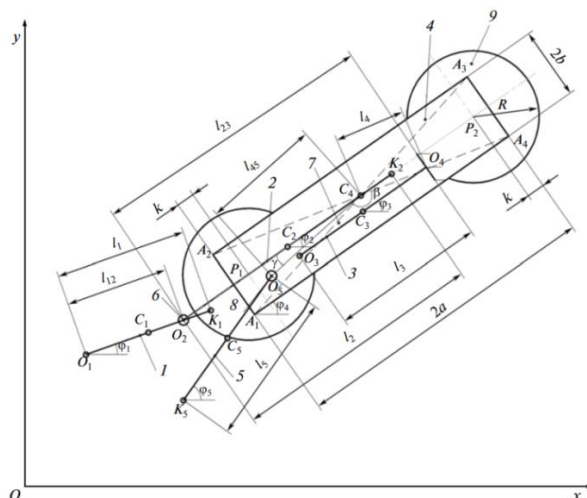


Рис. 1. Расчетная схема робота

Звенья 1–5 образуют прыжковый механизм, позволяющий роботу производить разгон поступательной парой сил. Звено 1 является опорной стопой при прыжке, звенья 2 и 3 образуют саму ногу робота, звено 4 является корпусом робота, а звено 5 – опорой. Звенья 1 и 2 соединены вращательным приводом δ , звенья 2 и 3 образуют поступательную пару под действием привода γ , звено 3 жестко крепится в корпусе. Привод δ обеспечивает поворот звена 5 вокруг звена 3, сам робот имеет четыре колеса 9, каждое из которых оснащено своим приводом. Исходя из заданной схемы будем считать постоянными величинами массы звеньев, длины l_1 – l_5 , величины a, b, k, R , угол β . Во время прыжка углы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_4, \varphi_5$, а также длина l_{23} будут изменяться.

Алгоритм прыжка. Будем считать опорную шероховатую поверхность горизонтальной. В начальный момент времени будем считать, что робот находится в состоянии покоя. Прыжок представляет собой набор из семи последовательных этапов, каждый из которых характеризует конкретные виды передвижения звеньев [2] (рис. 2). Более подробно алгоритм описан в работах [2, 3].

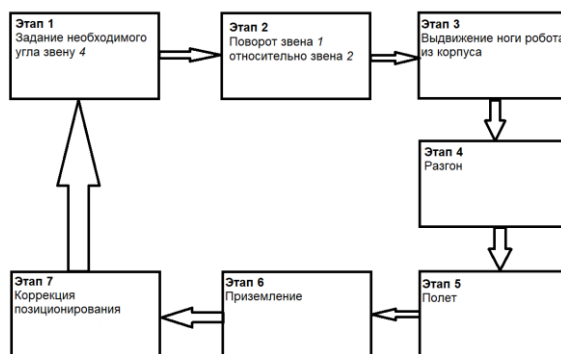


Рис. 2. Алгоритм прыжка робота

Математическая модель. Математическая модель описана в работах [3–7]. На их основе была составлена модель, описывающая прыжок робота в среде MATLAB Simulink. На рис. 3 представлена часть разработанной модели, которая описывает поведение системы на первом этапе. В правой части рисунка располагаются слагаемые дифференциального уравнения, в левой части находится комплекс управления. На рисунке m_1, m_2, m_3, m_4 — массы соответствующих звеньев, X_{c4} и Y_{c4} — координаты центра масс звена 4 по осям X и Y соответственно. Основной проблемой стало удержание робота в необходимом положении на первых четырех этапах, так как угол наклона φ_4 не должен отклоняться от заданного значения более чем на 0,01 рад, чтобы сохранять точность прыжка. Для этого было реализовано базовое управление логикой библиотеки Stateflow [9, 10]. При достижении заданной величины система переходит в режим мягкого управления, отслеживая по обратной связи текущее состояние и изменяя добавочный момент таким образом, чтобы появляющиеся ускорения были погашены. Такое решение способно обеспечить необходимый угол с заданной точностью во временном промежутке, достаточном для выполнения первых четырех этапов прыжка (рис. 4).

По достижению необходимого угла наклона φ_4 начинается второй этап прыжка. Звено 1 поворачивается вокруг звена 2, при этом все остальные элементы системы должны быть статичны. По достижению необходимого параллельного положения звена 1 начнется третий этап, в котором звено 1 будет установлено на опорную поверхность, и его положение будет неизменным до начала полета.

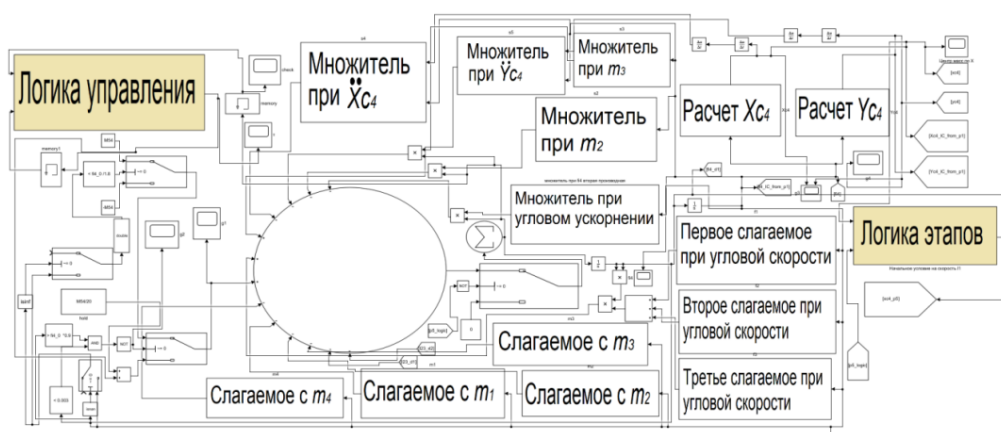


Рис. 3. Схема первого этапа

Каждому из вышеперечисленных этапов соответствует свое дифференциальное уравнение, переключение между этапами реализовано с помощью блоков библиотеки Stateflow.

Основной интерес представляет пятый этап, соответствующий временному промежутку, когда робот оторвался от поверхности, но еще не приземлился. Пятый этап начинается сразу после того, как робот оттолкнулся от опорной по-

верхности. На этом этапе происходит поворот звена 1 в исходное положение, затягивание ноги робота обратно в корпус, а также само передвижение робота. Положение робота на этом этапе описывается пятью обобщенными координатами. Схема данного этапа частично представлена на рис. 5. На рисунке показана схема решения пяти дифференциальных уравнений по пяти обобщенным координатам. X_{c4} и Y_{c4} — координаты центра масс звена 4 по осям X и Y соответственно, φ_4 и φ_1 — углы отклонения соответствующих звеньев, l_{23} — перемещение звена 2 относительно звена 3. Математическая модель этого этапа состоит из системы дифференциальных уравнений, поэтому для рационализации модели были использованы метки go to.

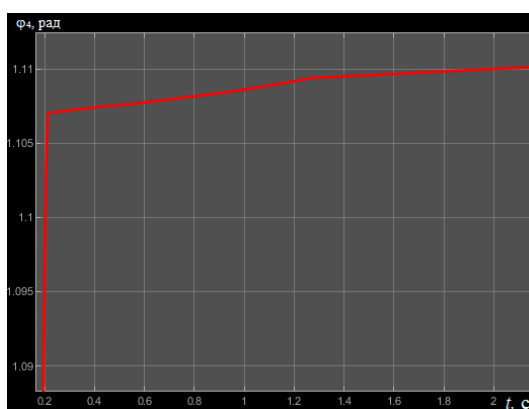


Рис. 4. Изменение угла φ_4 на первых четырех этапах



Рис. 5. Частичная схема пятого этапа

Полет робота оканчивается, как только одно из его колес коснется поверхности. В зависимости от различных факторов робот может войти в устойчивое положение (приземление на четыре колеса) или в неустойчивое. При неустойчивом приземлении робот корректирует свое положение. Схема коррекции положения аналогична схеме на рис. 3. При приземлении робота происходит удар, который является причиной появления угловой скорости координаты φ_4 .

На рис. 6–8 приведены графики перемещения центра масс звена 4, а также значения угла φ_4 на протяжении всего прыжка. Данные получены в ходе симуляции при начальной высоте равной нулю, заданному углу наклона в $\pi/3$ и высоте приземления равной 0,7 м. Как видно из графиков, во время этапов 2–4 робот сохранял необходимый угол наклона, и, соответственно положение центра масс. Во время прыжка робот поднялся на 1,13 м относительно начального положения и преодолел расстояния в 2,17 м при силе отталкивания от поверхности 1000 Н. Приземление произошло на передние колеса, так как угол φ_4 стал меньше нуля. После приземления робот скорректировал свое положение и вошел в положение равновесия. Для более наглядного проведения последующих симуляций был разработан графический интерфейс с помощью расширения MATLAB App Designer (рис. 9). Как видно на графиках, алгоритм управления исправно функционирует.

Была проведена симуляция прыжка робота аналогичной конструкции, но с увеличенной массой. Также была увеличена сила, развиваемая приводом 7 для отрыва от земли, и момент, развиваемый колесами робота. Результаты представлены на рис. 10. Как видно на графиках, с увеличением массы робота увеличилось время всего прыжка, в первую очередь из-за более длительной подготовки к прыжку. Также можно выделить более длительное время восстановления робота после прыжка.

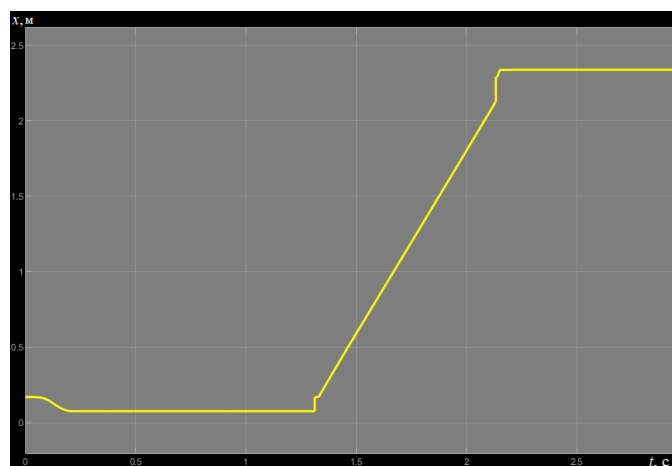


Рис. 6. Перемещение центра масс звена 4 по оси X

Было проведено моделирование прыжка робота, обладающего более крупным корпусом и радиусом колес в условиях притяжения марса. Также было задано, что робот спрыгивает на поверхность, имеющую высоту меньше на один метр, при этом угол наклона корпуса в момент отрыва от поверхности имеет величину, равную $\pi/4$ (рис. 11). Резкий скачок на графиках угла и координаты Y обуславливается ошибкой дискретизации сигнала касания поверхности и блока тегоу, который избавляет систему от алгебраической петли. Большой угол падения робота увеличивает время на восстановление после приземления.

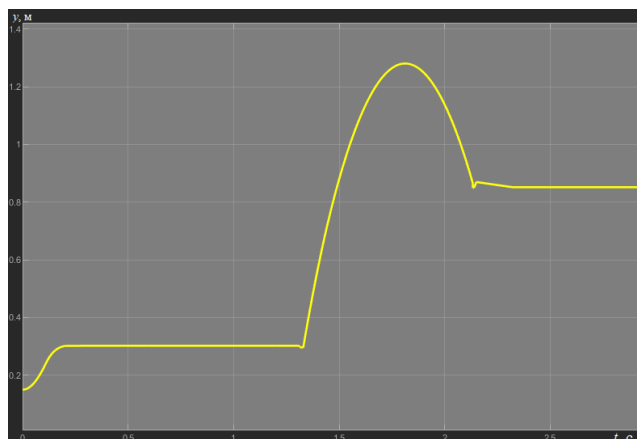


Рис. 7. Перемещение центра масс звена 4 по оси Y



Рис. 8. Зависимость угла ϕ_4 от времени на протяжении всего прыжка

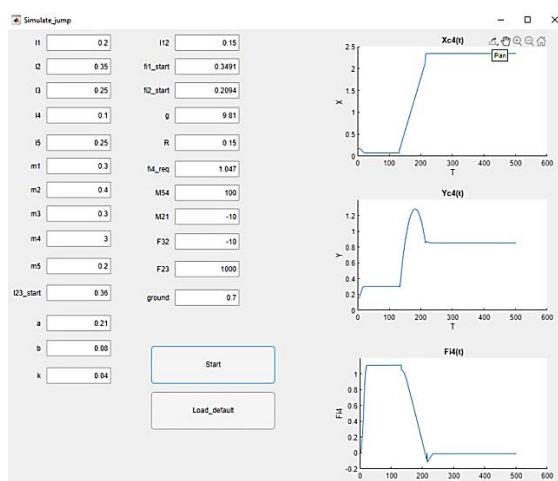


Рис. 9. Графический интерфейс модели

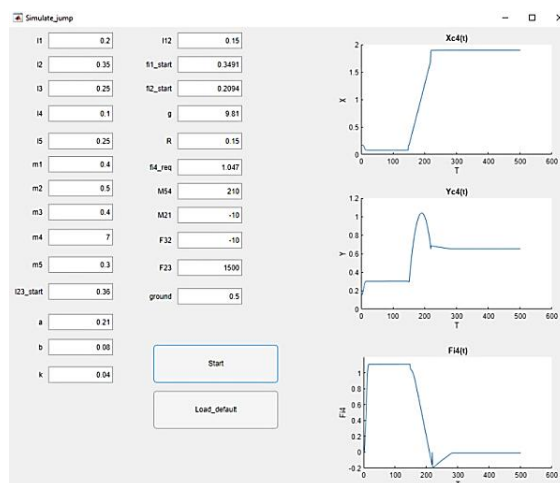


Рис. 10. Симуляция нагруженного робота

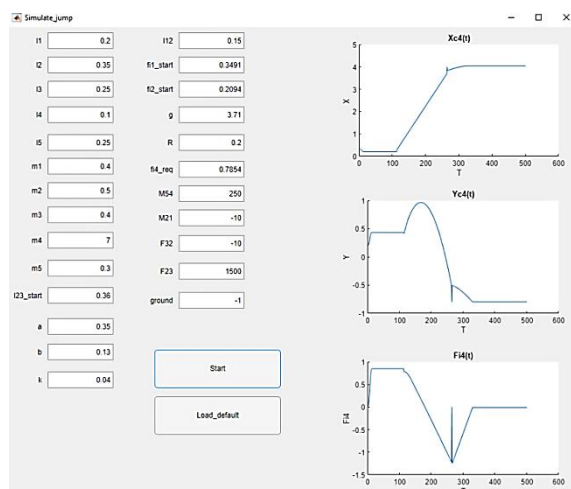


Рис. 11. Симуляция крупного робота в условиях притяжения Марса

Заключение. В результате анализа литературы проведенных исследований была разработана модель движения прыгающего робота, выбрано базовое управление и разработан графический интерфейс к данной модели. Проведено моделирование прыжков робота при различных параметрах и условиях.

Проведение исследования позволяет провести обоснованный подбор необходимых конструкторских параметров для изготовления прыгающего робота под конкретные задачи.

Литература

- [1] Ackerman E. Boston dynamics sand flea robot demonstrates astonishing jumping skills. *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, 2012, pp. 156–163.
- [2] Ворочаева Л.Ю., Мальчиков А.В., Савин В.И. Конструктивные особенности и классификация прыгающих роботов. *Cloud of science*, 2018, № 3, с. 473–497.

- [3] Ворочаева Л.Ю., Яцун С.Ф. Математическое моделирование управляемого движения колесного пятизвенного прыгающего робота. *Изв. РАН. ТуСУ*, 2015, № 4, с. 68–93. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002338815030166>
- [4] Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю. Моделирование движения многозвенного прыгающего робота и исследование его характеристик. *Изв. РАН. ТуСУ*, 2013, № 4, с. 137–149. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002338813030153>
- [5] Яцун С.Ф., Лупехина И.В. Исследование управляемого движения прыгающего мини-робота. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*, 2011, № 2, с. 10–15.
- [6] Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Прыгающий робот для проведения поисковых работ. *Экстремальная робототехника*, 2013, № 1, с. 152–165.
- [7] Лапшин В.В. Динамика и управление движением прыгающего аппарата. *Изв. АН СССР. МТТ*, 1983, № 5, с. 42–51.
- [8] Legacy robots. *bostondynamics.com: веб-сайт*. URL: <https://www.bostondynamics.com/legacy> (дата обращения: 03.08.2020)
- [9] Демченко Н.И., Масанов Д.В. Применение механизма Stateflow в задачах автоматического регулирования. *Инновационное развитие техники и технологий в промышленности*. М., РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020, с. 162–166.
- [10] Десятов А.Д., Сирота А.А. Имитационное моделирование сложных динамических систем в интегрированной инструментальной среде MATLAB + Simulink + Stateflow. *Вестник ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии*, 2006, № 2, с. 62–69.

Рубцов Петр Васильевич — студент бакалавриата кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Коновалов Константин Владимирович, аспирант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Рубцов П.В. Моделирование движения прыгающего робота. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 11(52). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-11-653>

SIMULATION OF THE MOVEMENT OF A JUMPING ROBOT

P.V. Rubtsov

rubtsovvp@student.bmstu.ru

SPIN-code: 9823-2272

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers the issues of jumping robots relevance and their potentialities. A comparative analysis of the models of jumping robots is carried out, their advantages and disadvantages are evaluated. The jumping and landing of the selected robot was simulated in the MATLAB Simulink program based on its mathematical model, which includes seven sequential stages of structure and its links movement. In the resulting model, the basic controls were implemented. The features of the state of individual links are described depending on the current state of the system as a whole. A graphical interface has been developed for carrying out simulations at various values of the parameters. The results of modeling the movement of this robot for various design, external and target parameters are presented.

Keywords

Mathematical model, MATLAB Simulink, jumping robot, control, five-bar jumping robot, motion simulation, motion control algorithm, MATLAB App designer

Received 26.10.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Ackerman E. Boston dynamics sand flea robot demonstrates astonishing jumping skills. *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, 2012, pp. 156–163.
- [2] Vorochaeva L.Yu., Mal'chikov A.V., Savin V.I. Design features and classification of jumping robots. *Cloud of science*, 2018, no. 3, pp. 473–497 (in Russ.).
- [3] Vorochaeva L.Yu., Yatsun S.F. Mathematical simulation of the controlled motion of the five-link wheeled jumping robot. *Izv. RAN. TiSu*, 2015, no. 4, pp. 68–93. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002338815030166> (in Russ.). (Eng. version: *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2015, vol. 54, no. 4, pp. 567–592. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064230715030168>)
- [4] Yatsun S.F., Volkova L.Yu. Simulation of motion of a multilink jumping robot and investigation of its characteristics. *Izv. RAN. TiSU*, 2013, no. 4, pp. 137–149. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002338813030153> (in Russ.). (Eng. version: *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2013, vol. 52, no. 4, pp. 637–649. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064230713030155>)
- [5] Yatsun S.F., Lupekhina I.V. Movement of the jumping minirobot. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2011, no. 2, pp. 10–15 (in Russ.).
- [6] Yatsun S.F., Volkova L.Yu., Vorochaev A.V. The jumping robot for carrying out search works. *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme Robotics], 2013, no. 1, pp. 152–165 (in Russ.).
- [7] Lapshin V.V. Dynamics and motion control of a hopping machine. *Izv. AN SSSR. MTT*, 1983, no. 5, pp. 42–51 (in Russ.).
- [8] Legacy robots. *bostondynamics.com: website*. URL: <https://www.bostondynamics.com/legacy> (accessed: 03.08.2020)

- [9] Demchenko N.I., Masanov D.V. Primenenie mekhanizma Stateflow v zadachakh avtomaticheskogo regulirovaniya. Innovatsionnoe razvitie tekhniki i tekhnologii v promyshlennosti [Using Stateflow mechanism for automated regulation problems. Innovative development of technics and technologies in industry]. Moscow, RGU im. A.N. Kosygina Publ., 2020, pp. 162–166 (in Russ.).
- [10] Desyatov A.D., Sirota A.A. Simulation of complex dynamic systems in integrated development environment Matlab + Simulink + Stateflow. *Vestnik VGU. Ser. Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies], 2006, no. 2, pp. 62–69 (in Russ.).

Rubtsov P.V. — Student, Department of Robotic Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Konovalov K.V., PhD Student, Department of Robotic Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Rubtsov P.V. Simulation of the movement of a jumping robot. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 11(52). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-11-653.html> (in Russ.).