

СНИЖЕНИЕ РИСКОВ РАЗРУШЕНИЯ РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ НЕКОТОРЫХ СЦЕНАРИЯХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ВО ВРЕМЯ ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

А.В. Каныгин

kanyyginav1@student.bmstu.ru

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

Аннотация

Рассмотрена проблема снижения рисков разрушения конструкций, которые входят в состав робота вертикального перемещения, в состоянии замкнутой кинематической системы и при некоторых других событиях, возникающих во время функционирования комплекса. Сформулировано техническое задание для конкретной актуальной проблемы и разработаны варианты реализации мер по предотвращению разрушения узлов робота. Предложено деление систем автоматического управления робота на несколько уровней в зависимости от выполняемых ими функций. Рассмотрено проектирование исполнительного уровня робота вертикального перемещения при условии минимизации рисков разрушения. Изучены критические сценарии, возникающие при функционировании робота. Предложен ряд методов, призванных устранить эту проблему различными способами. Показаны особенности и недостатки четырех подходов, описаны затрагиваемые этими подходами области проектирования.

Ключевые слова

Шагающий робот вертикального перемещения, замкнутая кинематическая конструкция, методы предотвращения выхода из строя, предотвращение разрушения, система автоматического управления, переходные процессы, упругие элементы, предохранительные элементы

Поступила в редакцию 17.03.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. Появление мобильных роботов вертикального перемещения (РВП) обусловлено необходимостью автоматизации различных технологических операций, для выполнения которых необходимо совершать движение или находиться в режиме прикрепления к наклонным и вертикальным поверхностям [1, 2].

К настоящему времени в мире создано большое количество прототипов таких роботов, в конструкции которых используются все основные типы движителей (колесный, гусеничный, шагающий) и способы удержания (магнитный, вакуумный, воздушный винт, механические захваты, адгезионные материалы) [3–6].

Общей проблемой подобных роботов является необходимость рассмотрения нежелательных сил и моментов при зацеплении захватных устройств (ЗУ) за опорную поверхность, что требует введения податливости в приводы робота [7]. Данная задача может быть решена с помощью оценки сил и моментов в звеньях манипулятора по токам исполнительных бесколлекторных двигателей [8].

Описание объекта регулирования. Работа человека на вертикальных поверхностях и больших высотах всегда связана с определенным риском, поэтому реализация целенаправленных действий в экстремальных условиях с помощью роботов вместо людей часто является необходимым условием выполнения задач по инспекции, окраске, мойке поверхностей зданий.

Для обеспечения перемещения по наружным поверхностям зданий мобильные роботы могут оснащаться механическими, магнитными, адгезивными, пневматическими вакуумными захватными устройствами.

В конструкции шагающего робота, разработанного на кафедре «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, предложено использовать четыре шарнира вращения и один шарнир линейного перемещения. Обычно шагающий робот может перемещаться по горизонтальным поверхностям. Рассматриваемый прототип имеет возможность перемещаться и по неровным или вертикальным поверхностям, состоящим из различных плоских участков. Робот имеет многоуровневую систему управления, включающую в себя стратегический, тактический и исполнительный уровни. Стратегический уровень предназначен для решения задач планирования движения и обмена данными с управляющим пультом. На тактическом уровне выполняется преобразование команд управления движением, а также вырабатывается реакция на внешние воздействия. Исполнительный уровень служит для управления системой приводов робота вертикального перемещения. В данной статье рассмотрены особенности исполнительного уровня робота вертикального перемещения.

Конструктивная схема РВП изображена на рис. 1.

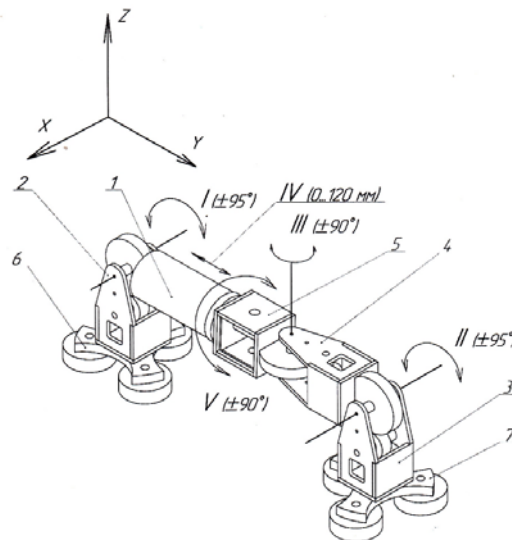


Рис. 1. Конструктивная схема шагающего робота с пятью степенями подвижности (I–V) [9]

Механическая система робота включает в себя центральное звено 1 с телескопическим механизмом поступательного перемещения вдоль оси Y (стрелка IV), боковые звенья 2 и 3 с установленными на их торцах опорами 6 и 7. Опоры 6 и 7 соединены с захватными устройствами. С одной стороны центральное звено 1 связано с боковым звеном 2 через шарнир вращения вокруг оси X (стрелка I), с другой стороны к центральному звену крепится шарнир вращения 5 вокруг оси Y (стрелка V). Шарнир 5 связан шарниром вращения вокруг оси Z (стрелка III) со звеном 4, которое, в свою очередь, связано с боковым звеном 3 через шарнир вращения вокруг оси X (стрелка II). Применение узла поступательного перемещения позволяет менять расстояние между центрами опор 6 и 7. Для удержания робота на вертикальных поверхностях используются электромагниты.

Элементарное передвижение — шаг вперед. Перемещение робота осуществляется следующим образом. Перед началом движения обе опоры 6 и 7 (см. рис. 1) фиксируются на плоской поверхности (вертикальной, наклонной, горизонтальной). Затем одна из опор расфиксируется и перемещается. Набор приводов позволяет роботу сгибаться вдоль продольной оси, поворачивать захватное устройство, а также перемещать захватное устройство вдоль оси.

Постановка задачи. Задача по снижению рисков разрушения элементов РВП состоит в том, чтобы минимизировать нежелательные исходы критических сценариев, возникающих при функционировании робота. Подход к решению поставленной задачи заключается в рассмотрении возможных критических сценариев, локализации проблемных звеньев РВП и обоснованном выборе мер, предотвращающих нежелательные исходы критических сценариев.

Наименее прочное звено РВП. В состав робота вертикального перемещения входит несколько типов звеньев, каждое из которых выполняет свою функцию. Звенья различаются по прочности и минимальному усилию, достаточному для разрушения звена. Наиболее хрупкими звеньями являются редукторы в исполнительных приводах, детали электродвигателей и захватные устройства робота.

Описание критических сценариев. Во время функционирования робота может возникать ряд сценариев, приводящих к потере контроля над роботом или непосредственному выходу из строя и разрушению узлов комплекса. Такими сценариями являются:

- сильное внешнее противодействие;
- встреча с препятствием, которое является неустойчивым;
- состояние замкнутой кинематической конструкции.

Сильное внешнее воздействие представляет собой силу, направленную произвольно по отношению к роботу. Точкой приложения направленной силы служит поверхность робота. Такая ситуация возникает, например, при встрече с препятствием, в которое упирается ЗУ робота, внешним усилием является сила реакции препятствия. Игнорирование такого воздействия может нанести ущерб РВП.

Встреча с неустойчивым препятствием не ведет к повреждению узлов РВП сама по себе. Неустойчивое препятствие сдвигается под воздействием, которое создает робот, при этом нагрузки в электродвигателях робота не превышают допустимых рабочих значений. Однако необходимо обеспечивать неподвижность захватного устройства РВП в пространстве абсолютных координат после процедуры закрепления робота на поверхности. Неподвижность ЗУ обеспечивает возможность сделать следующий шаг и изменять положение робота в пространстве.

Наиболее сложным и опасным состоянием, в котором может находиться РВП, является замкнутое кинематическое состояние. Оно возникает, когда РВП закрепляет оба захватных устройства. При этом любое управляющее воздействие, обрабатываемое моторами, оказывает влияние на другие приводы робота. В системе управления приводами для придания системе нужных свойств используются обратные связи, поэтому такое взаимное влияние электромоторов может привести к непредсказуемым результатам. Предлагаемые меры направлены на снижение рисков разрушения узлов именно в состоянии замкнутой кинематической конструкции.

Меры по предотвращению разрушения звеньев РВП. Деформация и разрушение звеньев являются недопустимыми событиями во время функционирования робота. Для предотвращения таких событий в мехатронике применяют ряд конструктивных и программных мер. Ниже представлен список таких решений, применимых в поставленной задаче:

- программно-аппаратное отслеживание состояния РВП и управляющих сигналов;
- изменение скоростных режимов работы привода;
- использование упругих и демпфирующих элементов;
- использование предохранительных элементов.

Рассмотрим перечисленные инженерные и конструктивные решения.

Отслеживание состояния РВП. Основную опасность в замкнутом кинематическом состоянии представляют рассогласованные сигналы, при обработке которых исполнительный двигатель создает усилие, разрушающее конструкцию РВП.

Упомянутая мера предполагает отслеживать состояние робота. При попадании робота в замкнутую кинематическую ситуацию на исполнительном уровне применяется механизм арбитража сигналов. Система принимает решение, какие управляющие сигналы следует обработать, при этом игнорируя команды, приводящие к разрушению робота.

На рис. 2 изображено два состояния РВП: разомкнутое кинематическое состояние и замкнутое кинематическое состояние. На рисунке показаны различные состояния, в которых может находиться РВП во время своего функционирования.

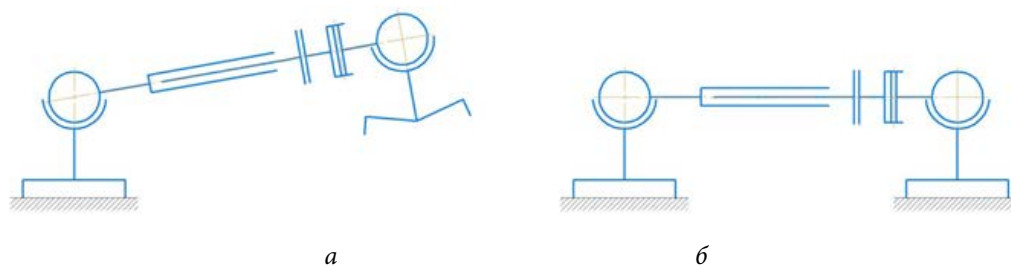


Рис. 2. Различные кинематические состояния РВП:
a — разомкнутое; *б* — замкнутое

Введение в систему управления обратных связей по нескольким параметрам является решением, которое обладает рядом преимуществ. Такой метод является одним из стандартных решений, практика его применений отработана и отлажена. Этот метод позволяет решить проблему исключительно благодаря ресурсам, которыми располагает система управления исполнительного уровня. Однако реализация этого метода является сложной по сравнению с реализацией методов, перечисленных ниже.

Изменение скоростных режимов. При функционировании робота ЗУ будут сближаться с препятствием и фиксироваться на нем. Высокая скорость захватного устройства в момент контакта с препятствием может привести к разрушению.

Изменение скоростных режимов работы привода предполагает изменение переходного процесса системы управления приводами. Обычно в систему вводятся звенья, обеспечивающие быстроту отработки управляющего воздействия, что ведет к наличию перерегулирования в переходном процессе. Большое перерегулирование является гарантией наступления нежелательного события — разрушения ЗУ, поэтому систему автоматического управления следует проектировать с учетом недопустимости с перерегулирования.

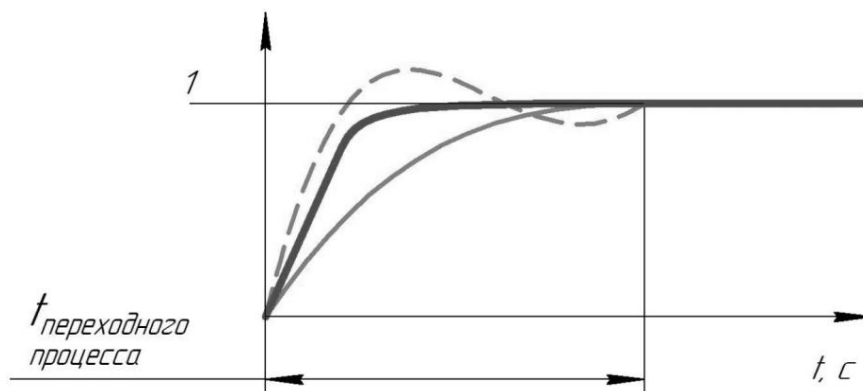


Рис. 3. Варианты переходных процессов исполнительных приводов РВП

На рис. 3 показаны три переходных процесса: переходный процесс системы с единичной отрицательной обратной связью изображен сплошной тонкой линией, переходный процесс с перерегулированием — пунктирной тонкой линией, переходный процесс системы с обратной связью с коррекцией — толстой линией.

Изменение скоростных режимов работы также можно отнести к устоявшимся практикам. С одной стороны, простота этого метода позволяет значительно снизить риск разрушения узлов и конструкций робота при условии, что известны технические параметры проектируемого робота, а также предполагаемая конфигурация препятствий и методов приближения к ним. С другой стороны, такой метод не годится в применении для широкого спектра выполняемых задач. Если параметры рабочего движения значительно изменяются в период функционирования робота, такой метод не позволяет одновременно удовлетворить требованиям быстродействия и надежности. Этот метод решает поставленную задачу также исключительно средствами исполнительного уровня.

Упругие элементы. Важным фактором при разрушении ЗУ от удара о препятствие является давление со стороны корпуса РВП на захватное устройство. Это может произойти вследствие ошибки, при выработке управляющего сигнала в тактическом уровне. Несмотря на то что чувствительные элементы конструкции ЗУ имеют вид концевых выключателей, которые передают данные о касании подошвы, возможно повреждение ЗУ вследствие инерционности системы исполнительного привода.

Вторичным средством предотвращения разрушения подошвы может являться введение в звено продольного упругого или демпфирующего элемента, податливого в силе вдоль оси, перпендикулярной подошве ЗУ (рис. 4, *а*). Также возможно введение в редуктор исполнительного привода сложного плоского спирального упругого элемента (рис. 4, *б*), что предотвратит перекручивание вала или разрушение самого редуктора.

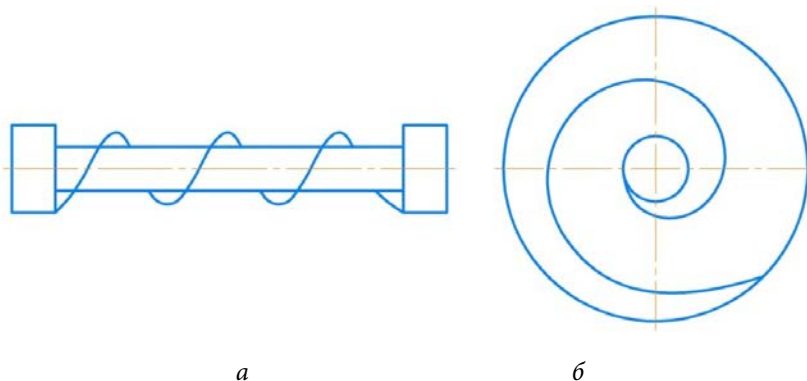


Рис. 4. Продольный (*а*) и спиральный (*б*) упругие элементы

Упругие элементы являются конструктивным решением, которое позволяет расширить границы допустимых рабочих параметров. Упругие и демпфирующие элементы позволяют перераспределить нагрузку, с которой внешняя среда влияет на робота, и предохраняет конструкцию от чрезмерного напряжения. Однако следует учитывать, что упругие элементы имеют свой технический предел. Продольные пружинные конструкции имеют максимальную и минимальную длину, после достижения которой они перестают выполнять свои функции. Их ввод ограничен конструкцией робота.

Предохранительные элементы. Для предотвращения разрушения вала исполнительного двигателя при перегрузках вращательного момента используются предохранительные элементы в виде муфт. Большое количество принципов работы предохранительных муфт позволяет выбрать тип предохранительного элемента, рациональный в применении для каждого из типов исполнительного двигателя (рис. 5).

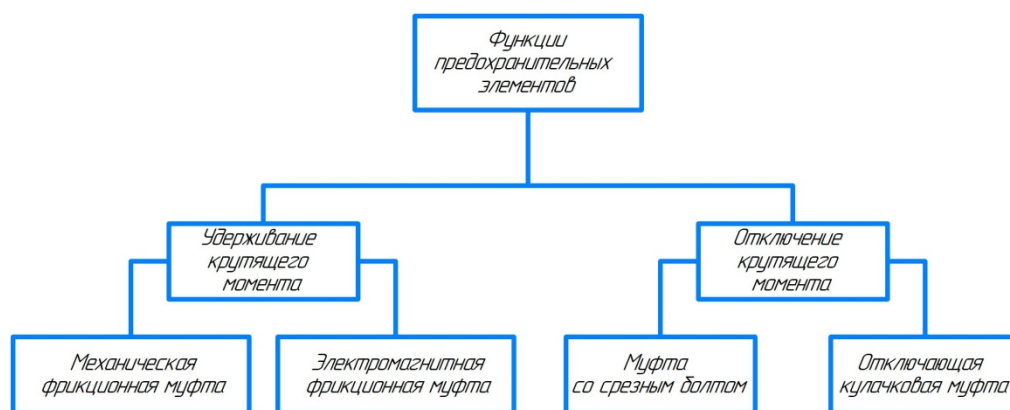


Рис. 5. Типы предлагаемых предохранительных элементов

Предохранительные элементы выполняют задачу, похожую на ту, которая возложена на упругие и демпфирующие элементы. Однако предохранительные элементы обладают существенной особенностью, которая позволяет им выполнять свою задачу более эффективно, нежели обычные упругие элементы. Речь идет о возможности выборочной передачи момента кручения в узлах робота. Например, фрикционные и магнитные предохранительные муфты позволяют не передавать крутящий момент выше определенного значения, при этом магнитные муфты обеспечивают возможность гибко менять граничные значения передаваемого момента во время функционирования робота.

Применение этой меры потребует внесения дополнительных элементов в систему управления приводами, что скажется на технических характеристиках системы. Для включения нелинейных узлов, таких как фрикционные и магнит-

ные муфты, потребуется пересмотреть процедуры проектирования системы управления приводами. Таким образом, данный метод выходит за рамки физического исполнительного уровня.

Заключение. Проведенный анализ показал, что для снижения рисков разрушения конструкции РВП в состоянии замкнутой кинематической системы необходимо комплексное применение следующих программно-аппаратных решений:

- программно-аппаратное отслеживание состояния РВП и управляющих сигналов;
- изменение скоростных режимов работы привода;
- использование упругих и демпфирующих элементов;
- применение предохранительных элементов.

В статье рассмотрены особенности каждой применяемой меры. Обосновано применение программно-аппаратного метода, перечислены варианты переходных процессов, рассмотрено применение упругих элементов и подобраны подходящие типы предохранительных элементов.

Литература

- [1] Dethe R.D., Jaju S.B. Development in wall climbing robots: a review. *IJERGS*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 33–42.
- [2] Zhao Z., Shirkoohi G. Climbing robot design for NDT inspection. *Human-Centric Robotics*, 2018, pp. 259–266. DOI: https://doi.org/10.1142/9789813231047_0033
- [3] Kolhalkar N.R., Patil S.M. Wall climbing robots: a review. *IJEIT*, 2012, vol. 1, no. 5, pp. 227–229.
- [4] Das A., Patkar U.S., Jain S. et al. Design principles of the locomotion mechanism of a wall climbing robot. *Proc. AIR15*, 2015, art. 13. DOI: <https://doi.org/10.1145/2783449.2783462>
- [5] Сырых Н.В., Чашухин В.Г. Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2019, № 5, с. 163–173. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002338819050135>
- [6] Градецкий В.Г., Вешников В.Б., Калиниченко С.В. и др. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М., Наука, 2001.
- [7] Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир, Изд-во ВлГУ, 2010.
- [8] Серебрянный В.В., Бошляков А.А., Огородник А.И. Импедансное позиционно-силовое управление в роботах и механизмах с кинематическими замкнутыми цепями. *Технологии аддитивного производства*, 2019, т. 1, № 1, с. 24–35.
- [9] Серебрянный В.В., Бошляков А.А., Калиниченко С.В. и др. Шагающий робот для перемещения по вертикальным и произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2021, т. 22, № 11, с. 585–593. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.22.585-593>

Каныгин Андрей Владимирович — студент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Каныгин А.В. Снижение рисков разрушения робота вертикального перемещения при некоторых сценариях, возникающих во время его функционирования. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 04(69). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-04-788>

REDUCING THE RISKS OF DESTROYING A VERTICALLY MOVING ROBOT UNDER SOME SCENARIOS THAT OCCUR DURING ITS OPERATION

A.V. Kanygin

kanyginav1@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The problem of reducing the risks of destroying the structures that are part of a vertically moving robot in the state of a closed kinematic system and in some other events that occur during the functioning of the complex is considered. The technical assignment for a particular urgent problem is formulated and options for implementing measures to prevent the destruction of the robot assemblies are developed. The division of robot automatic control systems into several levels, depending on the functions it performs, is proposed. The design of the executive level of a vertically moving robot under the condition of minimizing the risks of destruction is considered. Critical scenarios that arise during the functioning of a robot are studied. A number of methods designed to eliminate this problem in various ways are proposed. The features and drawbacks of the four approaches are shown, and the design areas affected by these approaches are described.

Keywords

Vertically moving robot, closed kinematic structure, failure prevention methods, fracture prevention, automatic control system, transients, elastic elements, safety elements

Received 17.03.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Dethe R.D., Jaju S.B. Development in wall climbing robots: a review. *IJERGS*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 33–42.
- [2] Zhao Z., Shirkoohi G. Climbing robot design for NDT inspection. *Human-Centric Robotics*, 2018, pp. 259–266. DOI: https://doi.org/10.1142/9789813231047_0033
- [3] Kolhalkar N.R., Patil S.M. Wall climbing robots: a review. *IJEIT*, 2012, vol. 1, no. 5, pp. 227–229.
- [4] Das A., Patkar U.S., Jain S. et al. Design principles of the locomotion mechanism of a wall climbing robot. *Proc. AIR15*, 2015, art. 13. DOI: <https://doi.org/10.1145/2783449.2783462>
- [5] Syrykh N.V., Chashchukhin V.G. Wall-climbing robots with permanent-magnet contact devices: design and control concept of the contact devices. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2019, no. 5, pp. 163–173. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002338819050135> (in Russ.). (Eng. version: *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2019, vol. 58, no. 5, pp. 818–827. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064230719050137>)
- [6] Gradetskiy V.G., Veshnikov V.B., Kalinichenko S.V. et al. Upravlyaemoe dvizhenie mobil'nykh robotov po proizvol'no orientirovannym v prostranstve poverkhnostyam [Guided motion of mobile robots on arbitrarily oriented surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 2001 (in Russ.).

- [7] Egorov I.N. Pozitsionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami [Position-force control on robotic and mechatronic devices]. Vladimir, Izd-vo VIGU Publ., 2010 (in Russ.).
- [8] Serebrennyy V.V., Boshlyakov A.A., Ogorodnik A.I. Impedance position-force control in robots and mechanisms with kinematic closed chains. *Tekhnologii additivnogo proizvodstva* [Additive Fabrication Technology], 2019, vol. 1, no. 1, pp. 24–35 (in Russ.).
- [9] Serebrennyy V.V., Boshlyakov A.A., Kalinichenko S.V. et al. Walking robot for moving on vertical and arbitrarily oriented surfaces. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 585–593. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.22.585-593> (in Russ.).

Kanygin A.V. — Student, Department of Robotics Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Kanygin A.V. Reducing the risks of destroying a vertically moving robot under some scenarios that occur during its operation. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 04(69). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-04-788.html> (in Russ.).