

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧЕТЫРЕХНОГО МОБИЛЬНОГО ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА

## SIMULATION OF THE MOVEMENT OF A 4-LEGGED MOBILE JUMPING ROBOT

*K. Perkov*

*Summary.* This article discusses the need to create a mobile jumping inspection robot. The search and analysis of the concepts of existing models of jumping robots is carried out, the advantages and disadvantages of each design are highlighted. Based on the existing solutions, the concept of a jumping four-legged jumping mobile robot is proposed. The initial calculations of the design of this model are carried out. The process of modeling a mobile jumping robot in the Matlab Simulink Simscape simulation environment is considered. The process of the robot's jump and the process of preparing the robot for the jump are considered. The jump piston and combustion were calculated, and a mathematical model of the jump cylinder was created in Matlab Simulink, and its power characteristics were obtained. The behavior of the robot during the flight is also studied. A mathematical model of the vertical leg lift drive is created, and is used in modeling the entire operation. The results of this simulation are presented.

*Keywords:* mathematical model, mobile robot, 4-legged, Matlab Simulink Simscape, motion simulation, jumping robot, wheeled robot, walking robot.

*Перьков Кирилл Александрович*

*Московский Государственный Технический  
университет имени Николая Эрнестовича Баумана,  
Москва  
notany11@mail.ru*

*Аннотация.* В данной статье рассмотрены вопрос необходимости создания мобильного прыгающего инспекционного робота. Проведен поиск и анализ концептов существующих моделей прыгающих роботов, выделены преимущества и недостатки конструкций каждого. На основании существующих решений предложен концепт прыгающего четырехного прыгающего мобильного робота. Проведены первичные расчеты конструкции этой модели. Рассмотрен процесс моделирования мобильного прыгающего робота в среде моделирования Matlab Simulink Simscape. Рассмотрен процесс прыжка робота и процесс подготовки робота к прыжку. Произведен расчет прыжкового поршня, сгорания, а также создана математическая модель прыжкового цилиндра в Matlab Simulink, и получены его силовые характеристики. А также исследовано поведение робота в процессе полета. Создана математическая модель привода вертикального подъема ноги, и использована в моделировании всего робота. Приведены результаты этого моделирования.

*Ключевые слова:* математическая модель, мобильный робот, 4-х ногий, Matlab Simulink Simscape, моделирования движения, прыгающий робот, колесный робот, ходячий робот.

## Введение

**В** настоящее время мобильные робототехнические системы достаточно широко применяются для инспекции и обследования различных объектов и территорий, в том числе труднодоступных для человека. Особенное место занимают, роботы осуществляющие прыжки, поскольку позволяют перемещаться с большой проходимостью, по неструктурированной среде. Расширяя применения таких роботов.

В рамках работы над статьей, были проверены разнообразные источники. В целом можно выделить следующие типы прыжковых движителей.

1. Масс-инерционные движители. Прыжок осуществляется за счет раскрученных деталей. Например, в [1] есть постоянная вращающаяся масса, с вязи чем даже небольшие прилагаемые усилия позволяют совершать прыжки, и она же заставляет робота прыгать. Чаще всего такие роботы могут двигаться только постоянно прыгая, что приводит к сверхпотреблению энергии. А также к тому, что

работы в местности с высокой проходимостью не способны ускорится. Что приводит к малой общей скорости робота в смешанной среде, а также сложности точного управления движением.

2. Движители, так или иначе запаасающие механическую энергию. В этих роботах имеется 2 движителя основной, в данных случаях колесный, и вспомогательный, предназначенный для прыжка. И при необходимости совершить прыжок, энергия медленно запаасается, а затем резко высвобождается и совершается прыжок. Ярким представителем, является робот Sandflea [2] который на борту имеет пневмобаллон с наполненным газом высокого давления и при необходимости сделать прыжок, газ перекачивается в прыжковый поршень. В роботе Юла [3] для этих целей используется пружина, однако робот является очень малогабаритным, и не подходит для инспекционных задач.
3. Движители, создающие достаточную мощность для совершения прыжка, без накопления энергии. В работах [4] и [5], представлены работы подобные Sand flea, но с движителем, получающим

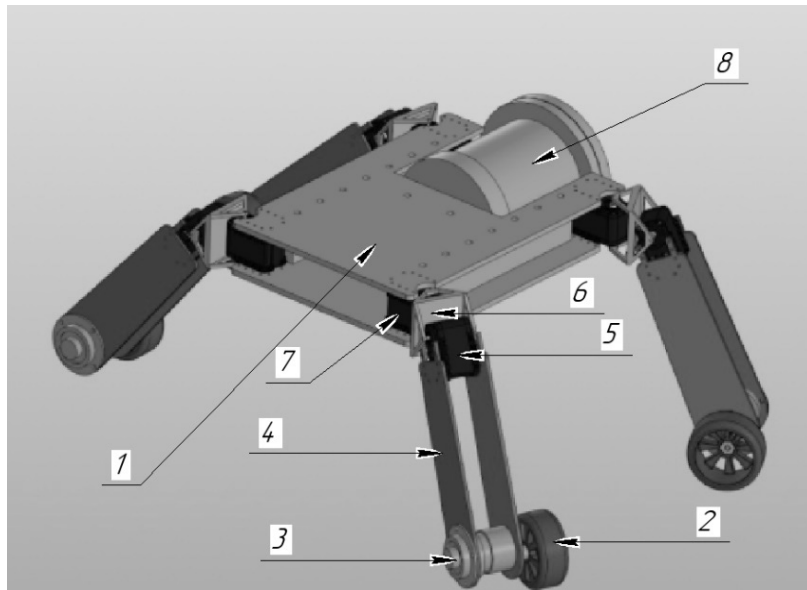


Рис. 1. Общая конструкция робота.

достаточно энергии без ее накопления. А в свою очередь, в работе [6] достаточную силу создает привод продольного перемещения, однако этот робот не имеет дополнительного движителя, что сокращает область его применения. В статье [7] рассматривается робот, создающий достаточное усилие пневмоприводом. Также очень важным концептом является робот из [8], в нем усилие создается сгоранием газа в поршне, однако, к сожалению, авторы не смогли разработать систему перезарядки, поэтому этот робот способен прыгать лишь 1 раз. Помимо вышеперечисленных, в [10] приведен 6-ногий робот, способный прыгать за счет мощности основных, приводов, однако высота его прыжка незначительна.

Взяв за основу роботов из [8] и [2] было решено, попробовать создать робота, который мог бы совершать прыжки за счет энергии сгорания, так как это в будущем позволит перевести всего робота, на двигатель сгорания. В то же время энергия, запасенная в единице массы будет максимальна. Также робот должен совершать не единственный прыжок, а несколько. При этом для упрощения перемещения в неструктурированной среде была добавлена возможность хождения.

Сформулируем требования к этому роботу:

1. Малогабаритность (до 30 см в длину и поперечном сечении)
2. Автономность до (6 часов)
3. Высокая проходимость (возможность перемещаться в неструктурированной среде города и села)

4. Наличие инспекционного оборудования (полезная нагрузка 500 грамм)

#### Описание конструкции робота

Мобильный прыгающий робот, должен отвечать ранее поставленным требованиям. Вид робота представлен на рисунке 1.

На рисунке 4 изображено следующее:

- 1 — Корпус робота
- 2 — Колесо робота
- 3 — Привод колеса робота(3-й)
- 4 — 2 звено робота
- 5 — Привод, отвечающий за вертикальное перемещение ноги, (2-й) в качестве этого привода был выбран шаговый двигатель
- 6 — Переходная деталь между 1 и 2 приводом
- 7 — Привод, отвечающий за маневрирование в горизонтальном пространстве. В качестве этого привода был выбран шаговый двигатель
- 8 — Прыжковый цилиндр

#### Кинематическая схема мобильного робота

Была разработана кинематическая схема робота, которая представлена на рисунке 2.

Предложенная кинематическая схема позволяет преодолевать препятствия в неструктурированной среде, при этом перемещение может осуществляется быстро и энергоэффективно, за счет колес.

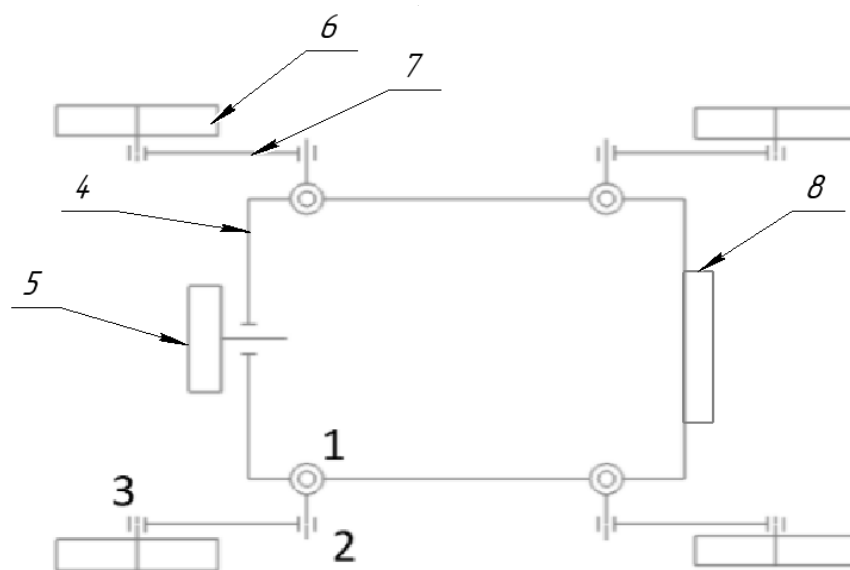


Рис. 2. Кинематическая схема робота

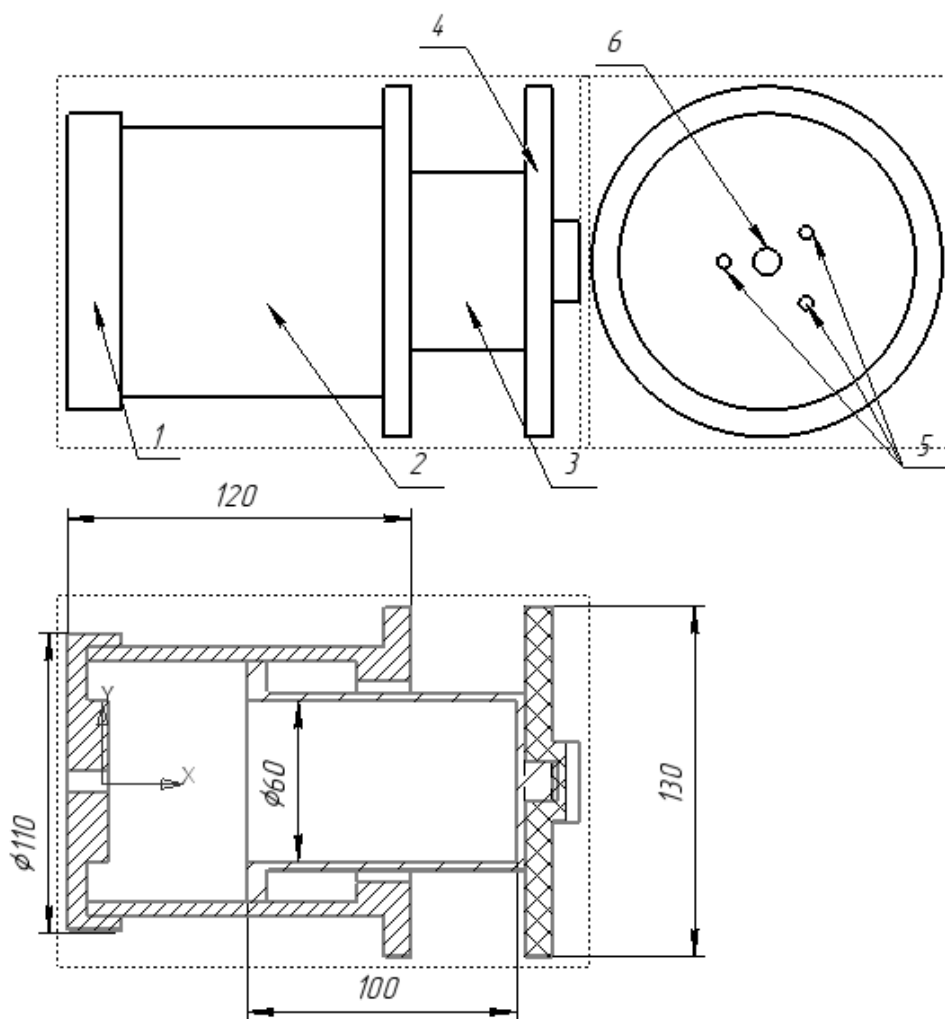


Рис. 3. Поршень в разрезе.

Постановка задачи моделирования

В рамках данной статьи, была создана математическая модель исследуемого робота в Matlab Simulink Simscape. В том числе модель прыжкового поршня и двигателя вертикального перемещения ноги (2 на рисунке 2).

Основные задачи поставленные при проведении моделирования:

1. Получить приблизительную силовую характеристику прыжкового привода
2. Проверить робота на возможность прыжка в соответствии с ТЗ, т.е. робот должен прыгать более чем на 1 метр в длину.
3. Проверить поведение робота, в частности привода второй кинематической пары, при процедурах прыжка мобильного робота. кинематическая схема представлена на рисунке 2.

Создание модели прыжкового привода

Проектируемый в данной статье робот при полной массе  $m=10$  кг должен уметь прыгать на 1 метр. Прыжки осуществляются не часто, несколько раз за все время автономной работы. Для выполнения поставленной задачи предлагается использовать химическую реакцию горения метана в воздухе. Этот способ имеет наименьший КПД и прост в реализации. И несмотря на то что КПД минимален, количество энергии, запасенное в 1 единице веса топлива, делает этот способ оптимальным.

Сам привод представляет из себя газовый поршень, внутри которой происходит сгорание заранее подготовленной газовой-воздушной смеси, при прыжке, робот упирается поршнем в землю, и происходит прыжок. Схема поршня представлена на рисунке 3.

На рисунке 6 изображены следующие компоненты

1. Нижняя крышка камеры сгорания.
2. Цилиндр камеры сгорания.
3. Поршень, сама движущаяся часть поршня
4. Опорная крышка поршня.
5. Отверстия для подвода и удаления газов из камеры сгорания.
6. Отверстие для свечи воспламенения

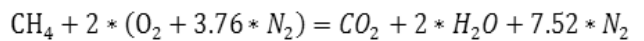
Построение физико-математической модели привода

Для создания модели необходимо понимать принципы работы привода, и математические основы. Эти выкладки приведены в далее.

В качестве модели будет выбрана однофазная модель. Это значит, что в рамках моделирования будут приняты следующие допущения:

1. Процесс сгорания происходит мгновенно и равномерно.
2. Затем в изохорно-адиабатическом процессе происходит переход выделившейся энергии в внутреннюю энергию газа.
3. Затем происходит процесс адиабатического расширения. В рамках этого процесса считаем, что теплообмена между газом и стенками нет. Поскольку процесс проходит очень быстро энергетические потери можно не учитывать.

В качестве химической реакции была взята реакция горения метана в воздухе.



А изменение температуры в результате реакции согласно [1] равно

$$\Delta T = 1404 K$$

Тогда температура, которая установится в результате процесса равна

$$TK = T0 + \Delta T = 1687 K$$

Теперь нужно промоделировать процесс адиабатического расширения. Основой для моделирования является первый закон термодинамики для закрытой системы

$$\delta Q = \delta U - \delta A$$

Где  $\delta A = \delta PV$  — элементарная работа газа

И уравнения Менделеева-Клапейрона

$$PV = nRT$$

Для нашей системы они примут вид системы

$$\begin{cases} PV = RT(N_{CO_2} + N_{H_2O} + N_{N_2}) \\ \delta PV = R(\frac{6}{2}(N_{CO_2} + N_{H_2O}) + \frac{5}{2}N_{N_2})\delta T \end{cases}$$

Для получения точных данных было проведено численное моделирование во времени, с использованием средств ЭВМ

Моделирование идет до тех пор пока  $li < lmax$ ,  $lmax$  в свою очередь менялось чтобы понять какое оно должно быть.  $mP$ - принято равное 10 кг. Максимальная раз-

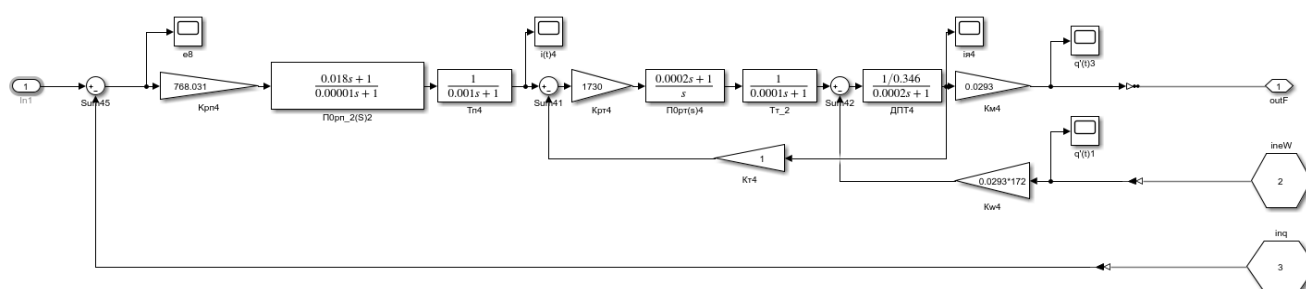


Рис. 4. Модель привода вертикального перемещения ноги, созданная в Matlab Simulink.

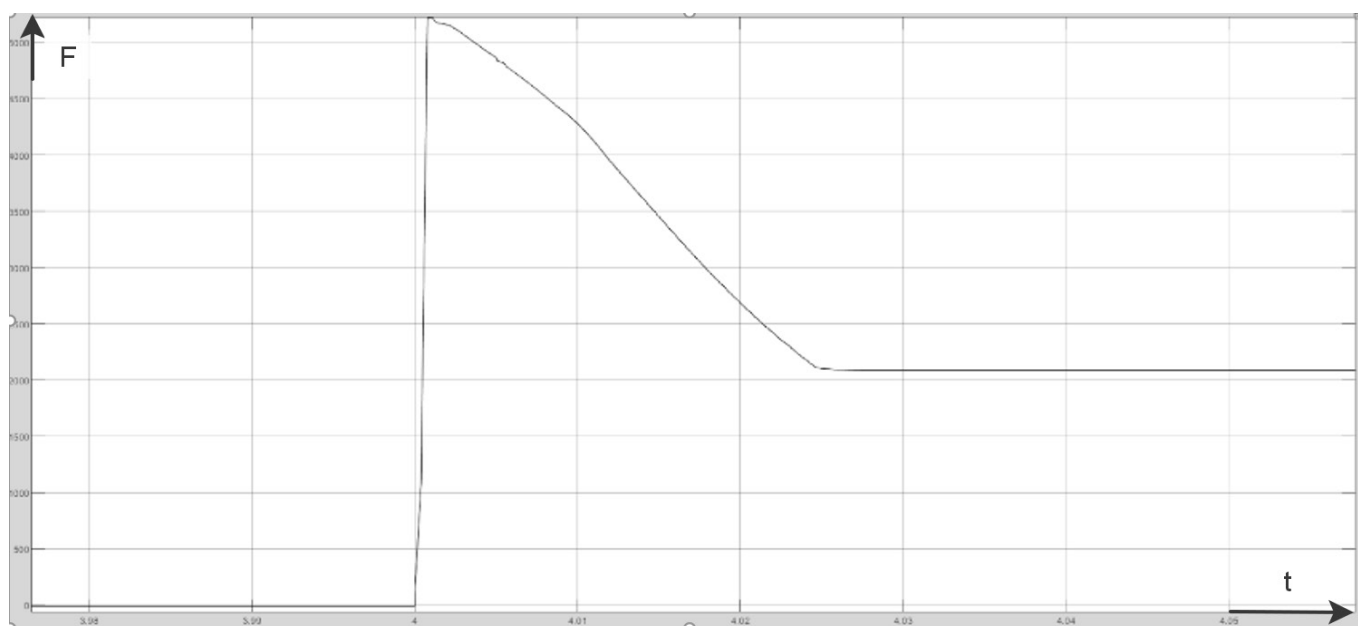


Рис. 5. График силы прыжкового привода-цилиндра внутреннего сгорания

виваемая скорость равна 6.28 м/с, что удовлетворяет поставленным требованиям. При этом максимальное давление в поршне  $P_{max}=6$  атм, а максимальная температура газа в поршне в процессе сгорания  $T_{max}=1687$  К.

Также, в результате расчета был получен график, иллюстрирующий изменения параметров смеси газов во времени, в результате процесса сгорания. Данная система является нелинейной, значит получить ее передаточную функцию невозможно.

#### Создание модели привода вертикального перемещения ноги

Модель привода, созданная в Matlab Simulink, представлена на рисунке 4.

Данный привод отправляет на кинематическую пару значение силы, развиваемое приводом, назад в обрат-

ной связь приходит положение, а также скорость для моделирования внутренней обратной связи привода по скорости.

#### Результаты моделирования

В результате проведенного моделирования были получены следующие результаты. График силы, создаваемой прыжковым двигателем, представлен на рисунке 5.

График положения заднего привода 2 степени, который осуществляет опору для подъема робота на дыбы, приведен на рисунке 6.

Далее на рисунке 7 представлен график изменение координаты центра масс робота по оси z.

На рисунках первым этапом (первые 2 секунды) происходит приземление робота с высоты 20 см. Этот

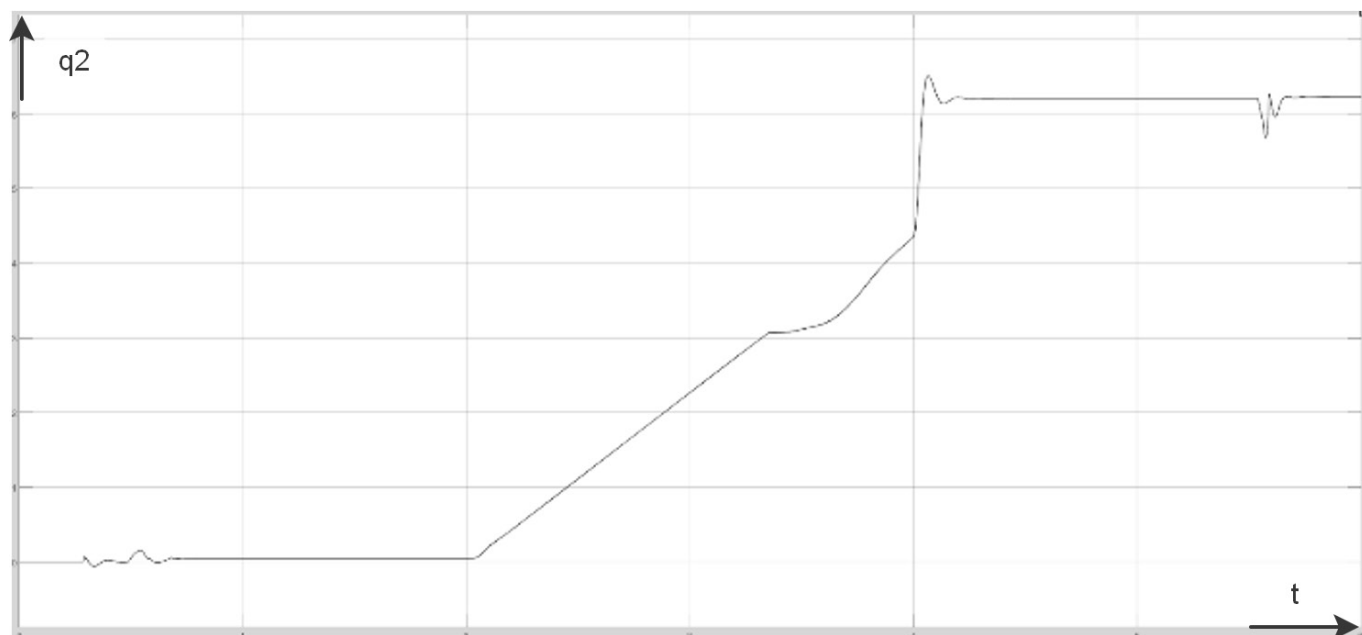


Рис. 6. График положения заднего привода второй степени.

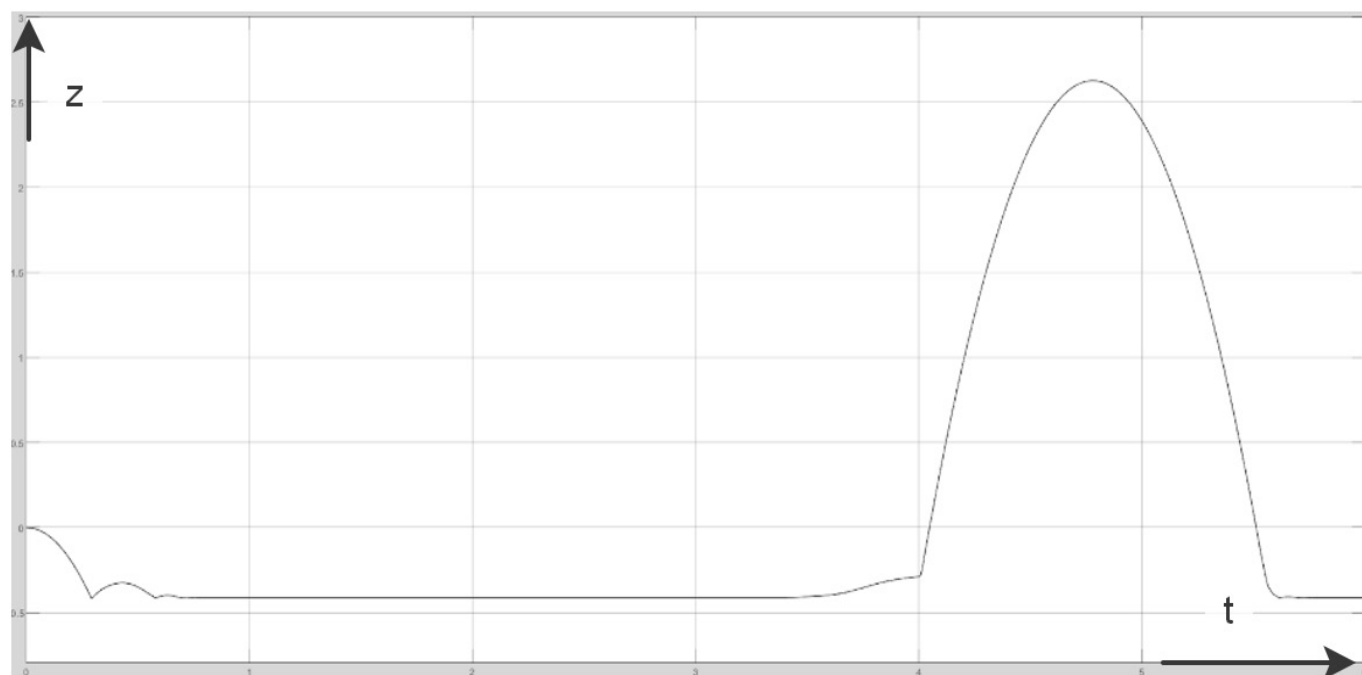


Рис. 7. Изменение координаты  $z$  центра масс робота.

период характеризуется максимальной установившейся ошибкой в 0.03 радианы. Затем (3 и 4 секунда) робот встает на дыбы. В этот период ошибка также составляет низкие значения. Следующим этапом моделирования, является период прыжка (4–5 секунд). В данный момент одновременно происходит быстрая операция сгорания

газа, и дополнительное отталкивание роботом своими задними ногами от пола. Прыжковый цилиндр развивает расчетную силу в 2 кН на протяжении нескольких миллисекунд. И затем идет период приземления. Также по результатам моделирования получена длина прыжка в 3 метра. Что удовлетворяет поставленным требованиям.

## Заключение

В результате написания данной статьи, был создан концепт 4-х ногого мобильного прыгающего робота, была получена его модель. Было проведено моделирование процедуры прыжка робота, а также его приземления.

В результате моделирования были получены следующие результаты. Было получено что робот может прыгать на высоту до 2 метров. Также были получены примерные результаты воздействия на приводы. Были уточнены Физико-кинематические параметры мобильного робота, и подтверждена возможность его существования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сапронов К.А. Динамика прыгающего робота с вращающейся массой, оснащенного системой виброизоляции навесного оборудования // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Курский государственный технический университет. Курск, 2009
2. Ackerman E. Boston dynamics sandflea robot demonstrates astonishing jumping skills/ Proc/ IEEE Conf. on Robotics and Automation? 2012. pp. 156–163
3. Волкова Л.Ю., Яцун С.Ф. Моделирование движения многозвенного прыгающего робота и исследование его характеристик // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2013. № 4. С. 137.
4. Ворочаева Л.Ю., Яцун С.Ф. Математическое моделирование управляемого движения колесного пятизвенного прыгающего робота // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 4. С. 68.
5. Рубцов П.В. Моделирование движения прыгающего робота // Политехнический молодежный журнал. — 2020. — № 11(52). — С. 4. — DOI 10.18698/2541–8009–2020–11–653.
6. Волкова Л.Ю., Яцун С.Ф. Моделирование движения многозвенного прыгающего робота и исследование его характеристик // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2013. № 4. С. 137.
7. Комаров С.С., Мискатин Н.И. Стабилизация движения прыгающих пневмоупругих роботов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2008. — Т. 11. — № 2. — С. 97–104.
8. Zhihui Miao Wheeled hopping robot with combustion-powered actuator. International Journal of Advanced Robotic Systems January-February 2018: 1–14
9. Петров Н.В. Разработка учебного шагающего мобильного робота // Политехнический молодежный журнал. 2019. № 9 (38). С. 7.
10. Портола В.А., Луговцова Н.Ю., Торосян Е.С. Расчет процессов горения и взрыва, 2012, с 36–40

© Перьков Кирилл Александрович ( notany11@mail.ru ).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана