

3. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. *Upravlenie robotami* [Robotics control], Moscow, Bauman MGTU Publ., 2000. 91 p.
4. Korolev V. A., Sulyaev S. A., Vorotnikov S. A., Luchin A. N. Robototekhnicheskie ustroystva v rastenievodstve. [Robotic devices in crop production]. *Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya resursov pri proizvodstve sel'skokhozyaystvennoy produktsii : sbornik dokladov* [Improving resource efficiency in the production of agricultural products. Proceedings], Tambov, 2011, pp. 42–43.
5. Lobeyko V. I., Polyakov S. V., Starusev A. V. Otsenka kachestva funktsionirovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya na etape ikh ispytaniy [Quality assessment of the functioning of the automated control systems at the stage of testing]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian journal: management and high technologies], 2012, no. 2, pp. 53–59.
6. Shakhinpur M. *Kurs robototekhniki* [Course of robotics], Moscow, Mir Publ., 1990. 528 p.
7. *Biblioteka dlya kontrolya peresecheniy 3D obektov ColDet* [Library to control the intersections of 3D objects ColDet]. Available at: <http://sourceforge.net/projects/coldet> (accessed 27.03.2016).
8. *Biblioteka dlya planirovaniya dvizheniya OMPL* [Library for motion planning OPML]. Available at: <http://ompl.kavrakilab.org/> (accessed 27.03.2016).
9. *Zhivye izgorodi i topiarnye formy iz khvoynykh derevev i kustarnikov* [Hedges and topiary forms from coniferous trees and shrubs]. Available at: <http://www.hedgegrow.ru/article/page299.php> (accessed 27.03.2016).
10. Korotkovs V. I. Generirovanie traektorii dvizheniya manipulyatora mobilnogo robota pri obrabotke obektov s parametricheski zadavaemoy formoy [Generating a trajectory of manipulator of a mobile robot when handling objects with parametrically defined form]. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik. MGTU im. N. E. Baumana* [Youth Science and Technology Bulletin. MSTU. Bauman], 2016, no. 5. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/839625.html> (accessed 20.05.2016).
11. *Opisanie algoritma RRT-Connect* [Description of the algorithm RRT-Connect]. Available at: <https://personalrobotics.ri.cmu.edu/files/courses/papers/Kuffner00-rrtconnect.pdf> (accessed 27.03.2016).
12. *Freyrvork dlya programmirovaniya robotov ROS* [ROS framework for programming robots]. Available at: <http://www.ros.org/> (accessed 27.03.2016).
13. *CAM-sistema dlya promyshlennykh robotov Robotmaster* [CAM-system for industrial robots Robotmaster]. Available at: <http://www.robotmaster.com/> (accessed 23.12.2015).
14. *CAM-sistema dlya promyshlennykh robotov SprutCAM Robot* [CAM-system for industrial robots Sprutcam Robot]. Available at: <http://www.sprutcam.com/home/sprutcam-robot> (accessed 23.12.2015).
15. *CAM-sistema dlya promyshlennykh robotov Delcam Power MILL Robot* [CAM-system for industrial robots Delcam Powermill Robot]. Available at: <http://www.delcam.com/software/robotics/> (accessed 23.12.2015).

УДК 621.865.8

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХОПОРНЫМ КОЛЕСНО-ШАГАЮЩИМ РОБОТОМ¹

Статья поступила в редакцию 14.04.2016, в окончательном варианте 06.06.2016.

Антонов Антон Вадимович, студент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: ant.ant.rk@gmail.com

Воротников Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: vorotn@bmstu.ru

Выборнов Николай Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: do_vybornov@aspu.ru

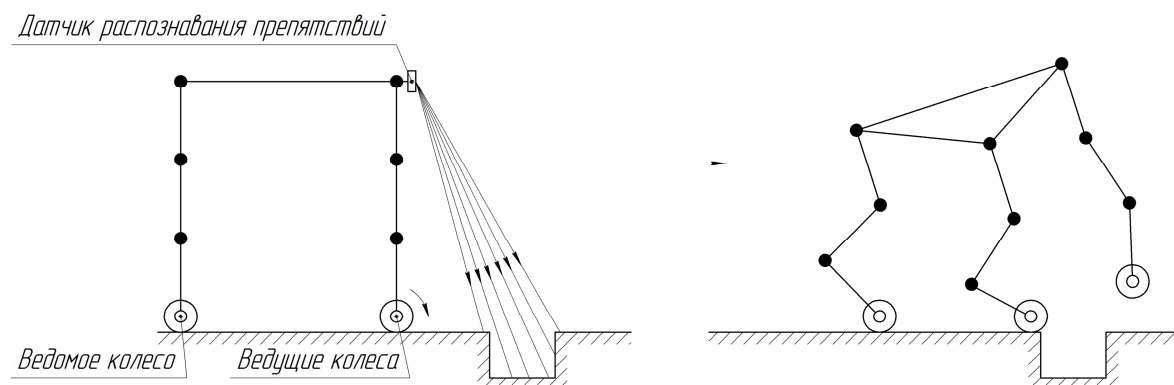
Описаны кинематическая схема трехопорного (трехногого) колесно-шагающего робота и конструкция макета, построенная в среде SolidWorks. Представлена многоуровневая система управления роботом, построенная по иерархическому принципу. Указаны виды возможных движений робота. Разработан алгоритм ходьбы робота по ровной поверхности, описаны фазы его движения, соответствующие разработанному алгоритму. Создана математическая модель движения робота в среде MATLAB. Проведено моделирование выбранного алгоритма движения и получены результаты, характеризующие изменение обобщенных координат в шарнирах робота; перемещение кон-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №16-07-01080.

цов его ног в вертикальном направлении; перемещение робота в целом в направлении его движения. Приведены результаты моделирования, характеризующие изменение угловых скоростей и моментов нагрузки в шарнирах робота на примере одной из его ног. Выполнен содержательный анализ полученных результатов.

Ключевые слова: шагающий трехногий робот, кинематическая схема, система управления, ходьба, алгоритм движения, фазы движения, математическое моделирование, обобщенные координаты, угловые скорости, моменты нагрузки

Графическая аннотация



THE CONTROL SYSTEM OF A THREE-POINT WHEEL-LEGGED ROBOT

Antonov Anton V., student, Bauman Moscow State Technical University, 5, 2-aya Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation, e-mail: vlad2.vik@mail.ru

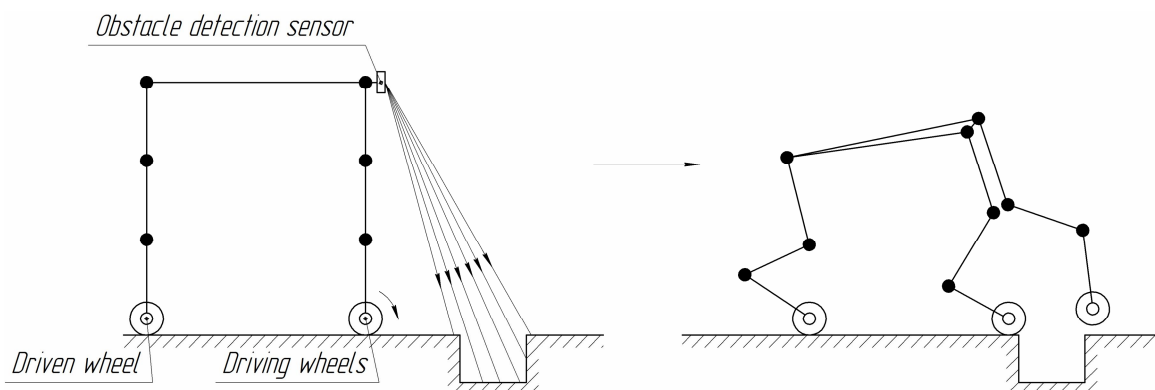
Vorotnikov Sergey A., Ph.D. (Engineering), Bauman Moscow State Technical University, 5, 2-aya Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation, e-mail: vorotn@bmstu.ru

Vibornov Nicholay A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Astrakhan State University, 20a Tatishchev St, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: do_vybornov@aspu.ru

A kinematic diagram of the three-point (three-legged) wheel-legged robot and a construction of its layout, built in SolidWorks, are shown. A layered hierarchic control system of the robot is presented. Robot possible motion types are considered. An algorithm of walking over the flat surface is developed, movement phases of this algorithm are shown and a mathematical model of the robot motion is built in MATLAB. Chosen movement algorithm modeling was conducted; results of generalized coordinates changes in the robot joints, of the robot legs tips movement in the vertical direction and of the robot movement in its motion direction are obtained. Results of angular velocities and load torques changes in the robot joints are presented through the example of the one of its legs. The analysis of the obtained results is made.

Keywords: legged three-point robot, kinematic diagram, control system, walking, movement algorithm, movement phases, mathematical modeling, generalized coordinates, angular velocities, load torques

Graphical annotation



Введение. В настоящее время робототехника развивается по нескольким направлениям, причем значительное внимание уделяется созданию и использованию подвижных робототехнических систем (РТС). При этом возникает ряд вопросов, связанных с обеспечением эффективности перемещения РТС в пространстве, которые не в полной мере раскрыты в существующих публикациях [1]. Поэтому целью данной статьи является рассмотрение одного из таких малоисследованных вопросов – управления перемещением трехопорным колесно-шагающим роботом.

Общая характеристика проблематики статьи. В настоящее время наиболее распространенны мобильные роботы с колесным типом шасси. Использование колес для движения позволяет обеспечить высокую маневренность РТС, простоту конструкции и методов управления. Однако наряду с достоинствами у колесного способа передвижения есть и ряд недостатков. В частности, для обеспечения возможности перемещения по неровным поверхностям приходится усложнять конструкцию, увеличивать количество колес. А такие препятствия, как широкая канава или высокая ступенька, преодолеть при помощи колес относительно небольшого диаметра практически невозможно.

Шагающие роботы имеют более высокую проходимость, но при этом обладают сложной конструкцией и системой управления, а также невысокой скоростью движения. Шагающие роботы могут иметь разное количество ног, причем считается, что в рамках модели статической устойчивости «шесть ног» – оптимальное решение с точки зрения обеспечения проходимости и скорости передвижения.

Роботы с четырьмя ногами также можно рассматривать в рамках этой модели. Они обычно имеют меньшие габариты, вес и более простую конструкцию. Однако их профильная и опорная проходимость меньше, чем у шестиногих РТС, скорость движения при прочих равных условиях также меньше. Двунogie роботы могут иметь самые малые размеры, но при описании их движения уже необходимо воспользоваться гораздо более сложной моделью динамической устойчивости, кроме того и сама организация таких движений весьма сложна.

Совместное использование в гибридной конструкции РТС колес и ног позволяет учесть преимущества и частично компенсировать недостатки двух указанных способов перемещения (колесных и шагающих). При помощи колес РТС может довольно быстро перемещаться при отсутствии препятствий, а при встрече с препятствием – использовать режим ходьбы для его преодоления. Недостатком гибридной конструкции по сравнению с чисто колесной является некоторое утяжеление конструкции и, как следствие, ухудшение динамических характеристик; увеличение энергопотребления.

Приведем примеры *колесно-шагающих* машин: аппарат, созданный ВНИИТМ [2], робот ATH-LETE [5], экскаватор Kaiser [11], аппарат ALDURO [13], гибридный робот [14, 22] и ряд других разработок [3, 4, 8, 21].

В общем случае, для устойчивого перемещения на колесах достаточно трех точек контакта с поверхностью. Однако, большинство колесно-шагающих роботов обладают минимум четырьмя колесами. Это можно объяснить сложностью осуществления устойчивого перемещения на трех опорных точках. В то же время, при использовании трехногой конструкции можно уменьшить число необходимых движителей – при соответствующей организации (реализации) алгоритма передвижения. Примером трехногой шагающей РТС является робот STriDER [9, 10, 16, 15], но его конструкция не позволяет дополнительно использовать колеса для движения в режиме езды по ровной поверхности.

В данной статье представлены конструкция и система управления макетом трехножного робота (далее – робота), построенного по схеме трехопорной колесно-шагающей мобильной платформы и способного перемещаться как в режиме езды на колесах, так и в режиме ходьбы.

Общая характеристика разработанной РТС. В качестве исходных данных для разработки использовалась виртуальная модель трехопорной колесно-шагающей платформы, построенная в графической среде SolidWorks (рис. 1). При выборе параметров модели учитывались технические возможности и ограничения по изготовлению полноценного твердотельного макета робота средствами 3D-печати. Укажем основные технические характеристики описываемого макета:

- форма платформы – равносторонний треугольник со стороной 200 мм;
- максимальная высота робота – 152 мм;
- масса робота – 0,43 кг.

Таким образом, необходимо было разработать систему управления, алгоритм движения и изготовить действующий макет робота с колесными опорами в виде плоских многозвенных механизмов. При этом предполагается, что робот должен быть способен выполнять движения типа «езда», «ходьба» и «прыжок».

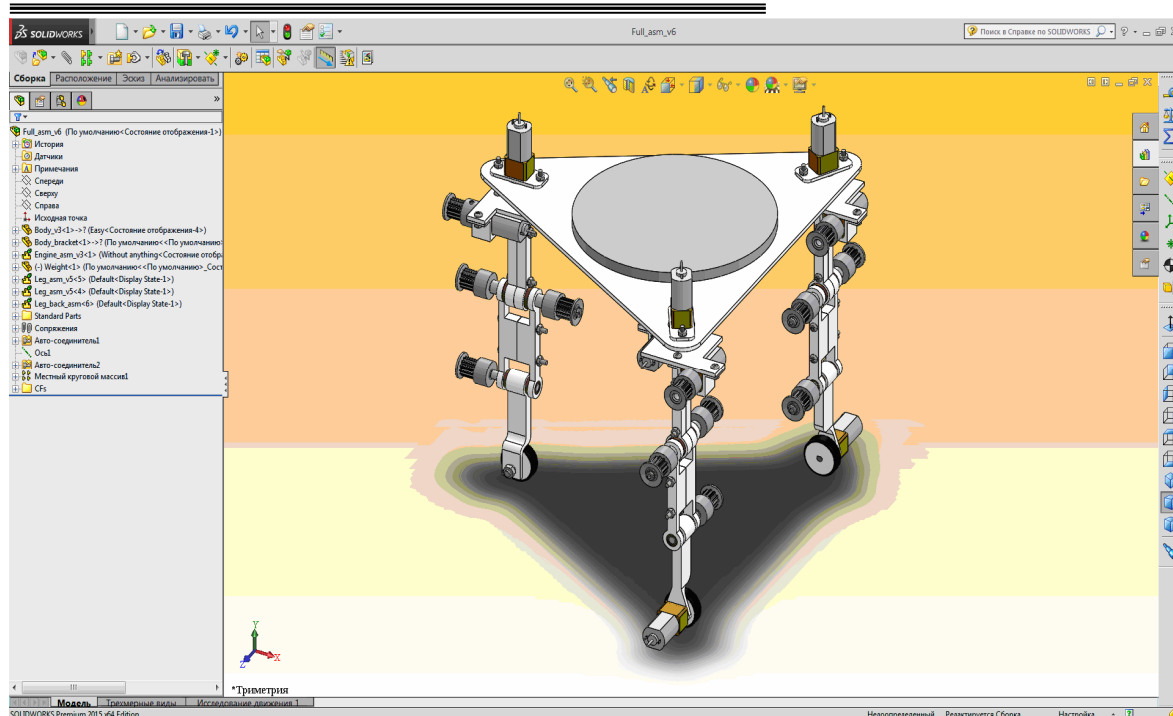


Рис. 1. Модель макета робота в среде SolidWorks

Система управления. На рисунке 2 представлена структурная схема системы управления роботом. Она построена по иерархическому принципу и содержит три уровня:

- 1) супервизорный (включающий пульт управления на основе планшетного компьютера);
- 2) верхний (управляющий);
- 3) нижний (приводной).

При такой структуре управления возможно обеспечение функционирования робота как в ручном (оператором через удаленный пульт управления), так и в автоматическом режимах.

Верхний уровень системы управления включает в себя систему ориентации робота и бортовой компьютер. Система ориентации представляет собой набор гироскопов, акселерометров и датчиков, позволяющих установить текущие положение и ориентацию робота в пространстве. Данные, полученные от этой системы, а также от оператора и от датчиков приводов робота, обрабатываются на бортовом компьютере РТС. На основе полученных данных решается обратная задача кинематики о положении – определение значений обобщенных координат робота для осуществления заданного движения. Если на пути робота встречаются препятствия, то в работу включаются специальные алгоритмы по их преодолению. Результатом работы верхнего уровня системы управления являются управляющие команды, поступающие на приводы робота.

Нижний уровень системы управления РТС включает в себя блок источников энергии, набор приводов робота, а также конструкцию собственно робота. Полученные на верхнем уровне управляющие команды поступают на приводы робота. Каждый привод состоит из блока регуляторов, двигателя, механической передачи и блока датчиков. На основе полученных от верхнего уровня команд приводы вырабатывают усилия, необходимые для осуществления заданного движения, и передают их на исполнительные механизмы робота. Данные от датчиков приводов используются как регуляторами соответствующих приводов, так и на верхнем уровне системы управления – при решении обратной задачи кинематики о положении РТС в пространстве.

Алгоритм движения. Конструкция и система управления робота позволяют ему выполнять движения различных типов: езда, ходьба, прыжки (табл. 1). Из всех возможных способов движения для конкретности выберем один – ходьбу по ровной поверхности в направлении продольной оси робота (табл. 1, пункт 2.1). Далее в статье описано моделирование именно этого вида движения.

Рассмотрим кинематическую структуру для модели макета робота, приведенной на рисунке 1. Ноги (опоры) присоединены к платформе при помощи вращательных шарниров. Каждая из ног при помощи еще двух шарниров образует плоский двухзвенный механизм. К концам левой и правой ног присоединены мотор-редукторы, на валы которых установлены колеса. Также к концу задней ноги присоединено колесо «рояльного типа». Таким образом, заднее колесо является пассивным (ведомым), а два передних колеса – управляемыми (ведущими). Однако в рассматриваемом ниже алгоритме движения (для пункта 2.1 табл. 1) колеса считаются заторможенными и образуют единое целое со звеном ноги. Таким образом, кинематическая схема представляет собой механизм с 9-ю вращательными шарнирами.

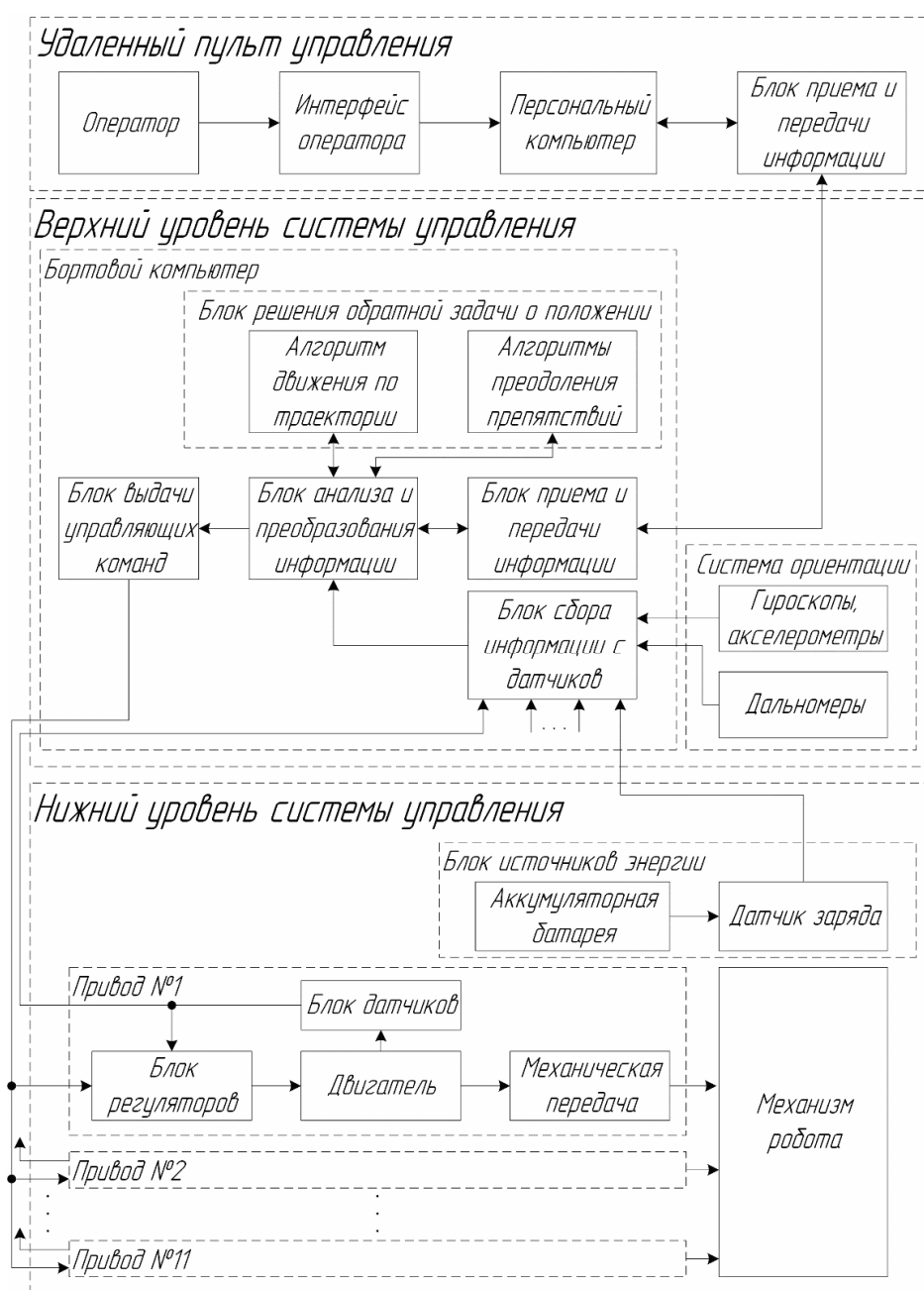


Рис. 2. Структурная схема системы управления роботом

Таблица 1

Возможные движения робота

Тип движения				
Класс движения	1.1. Движение по ровной поверхности. Повороты за счет изменения скорости колес	1.2. Движение по ровной поверхности. Повороты за счет изменения ориентации колес	1.3. Подъем в горку с сохранением ориентации платформы	1.4. Спуск с горки с сохранением ориентации платформы
1. Езда	1.1. Преодоление препятствий различного вида	1.6. Проезд под объектом	1.7. Проезд над объектом	1.8. Движение в перевернутом положении
	2.1. Движение по ровной поверхности	2.2. Преодоление препятствий различного вида	2.3. Подъем и дальнейшее движение из перевернутого положения	
2. Ходьба	3.1. Движение по ровной поверхности	3.2. Преодоление препятствий различного вида		
3. Прыжки				

Для того чтобы робот находился в устойчивом состоянии, необходим одновременный контакт всех трех ног с опорной поверхностью. Если хотя бы одна из ног будет в состоянии отрыва от поверхности, то робот начнет падать. Этот факт и был использован при составлении алгоритма ходьбы: сохраняя две ноги в контакте с опорной поверхностью, третьей ногой робот совершает толчок и после ее отрыва от поверхности переносит ногу в направлении своего движения. После «приземления» ноги происходит подготовка к переносу точки контакта следующей ноги, затем аналогичным образом осуществляется ее перенос и т.д. Таким образом, выбранный способ перемещения заключается в последовательном выполнении циклов движения, каждый из которых включает в себя нескольких фаз (табл. 2). Конечное состояние каждой фазы является начальным для следующей за ней. Каждая фаза имеет два состояния: начальное и промежуточное (табл. 2). Ноги, осуществляющие движения внутри фазы, на рисунках в таблице 2 обозначены утолщенной линией. Стрелкой показано направление движения.

Таблица 2

Название фазы	Иллюстративная схема	
	Начальное состояние	Промежуточное состояние
Подготовка к переносу левой ноги		
Перенос левой ноги		
Подготовка к переносу правой ноги		
Перенос правой ноги		
Подготовка к переносу задней ноги		
Перенос задней ноги		

Обозначения: + – координата постоянная ($q = \text{const}$); $\circ$ – координата изменяется по известному закону ($q = q^*(t)$); $\square$ – координата вычисляется из решения обратной задачи кинематики о положении РТС в пространстве. Несколько расположенных друг в друге символов обозначают несколько возможных состояний для данной фазы.

Моделирование. Итак, согласно выбранному алгоритму ходьбы, движение робота заключается в поочередных отрывах и переносах его ног. При этом необходимо учитывать силу отталкивания ноги робота от опорной поверхности. При недостаточной силе отрыва не произойдет, и нога робота будет волочиться по поверхности, т.е. ходьба как таковая будет отсутствовать. Если же сила отталкивания окажется избыточной, то произойдет переворот робота. Фактически величина силы отталкивания зависит от скорости изменения угла в шарнире: чем быстрее величина угла достигает своего конечного значения, тем больше сила отталкивания, и наоборот.

В ходе моделирования необходимо было установить, с какой скоростью необходимо изменять углы в шарнирах при отталкивании, чтобы обеспечить выбранный алгоритм ходьбы.

Моделирование проводилось в среде MATLAB с использованием пакета моделирования механизмов SimMechanics. Этот пакет является простым и эффективным средством моделирования, позволяющим описать кинематику и динамику робота [6, 7, 12, 17] без ввода каких-либо соотношений в явном виде [18–20]. Модель робота и ее графическая интерпретация представлены на рисунке 3 (а, б).

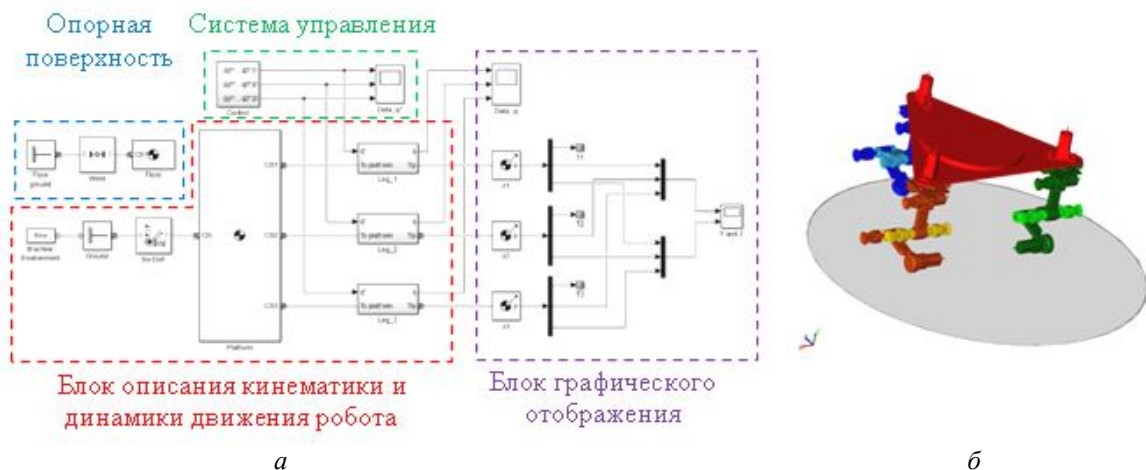


Рис. 3. Модель робота в среде MATLAB (а) и ее графическое представление (б)

Графики изменений обобщенных координат для каждой ноги робота показаны на рисунке 4а. Графики перемещения точек ног, связанных с осями шарниров заторможенных колес (для задней ноги – точки контакта с опорной плоскостью), в вертикальном направлении и в направлении движения робота приведены на рис. 4б. Обобщенные координаты q_1 , q_2 и q_3 для каждой из ног отсчитываются последовательно от платформы к концу ноги.

Анализ рисунка 4 а – в позволяет сделать следующие выводы.

1. Как следует из графиков на рисунке 4а общее время цикла движения составляет около 4,6 с, а среднее время переноса каждой из ног в новую точку опоры составляет примерно 0,2 с. При этом резкие изменения координаты q_1 на этих графиках связаны с особенностями вычислений в пакете MATLAB: областью определения угловых величин является отрезок $[-180^\circ, +180^\circ]$. Таким образом, большая часть времени, затрачиваемого на перемещение робота, уходит на подготовку к переносам ног.

2. По графикам на рисунке 4б можно также видеть, что максимальная высота подъема каждой ноги над опорной поверхностью (для выбранных размеров макета) в среднем имеет значение, равное 7 мм. Это значение может быть больше, если увеличить силу отталкивания. Однако при этом возрастет общее время одного цикла перемещения, поскольку больше времени будет затрачено на подъем и приземление. Отметим, что высота подъема ноги ограничивает максимальную высоту препятствий, которые могут быть преодолены шагающей РТС.

3. Также, согласно графикам на рисунке 4в, перемещение робота в направлении движения за один цикл перемещения ног составляет примерно 35 мм или около 20 % длины робота.

4. Диаметр колеса макета составляет 18 мм. При выбранном способе перемещения макет робота преодолел препятствие шириной 35 мм, что почти вдвое больше диаметра колеса, и высотой 7 мм, что составляет примерно половину диаметра колеса. Известно, что колесо не может преодолевать

ямы, рвы, канавы шириной больше своего диаметра и ступеньку высотой свыше половины диаметра. Таким образом, преодоление ступеньки высотой 7 мм в режиме езды при диаметре колеса 18 мм потребовало бы значительных усилий, а переход через канаву шириной 35 мм и вовсе потребовал бы колес вдвое большего диаметра. Для преодоления подобных препятствий также возможно использование движителя гусеничного типа, однако он обеспечивает меньшую скорость передвижения и обладает значительно более сложной конструкцией.

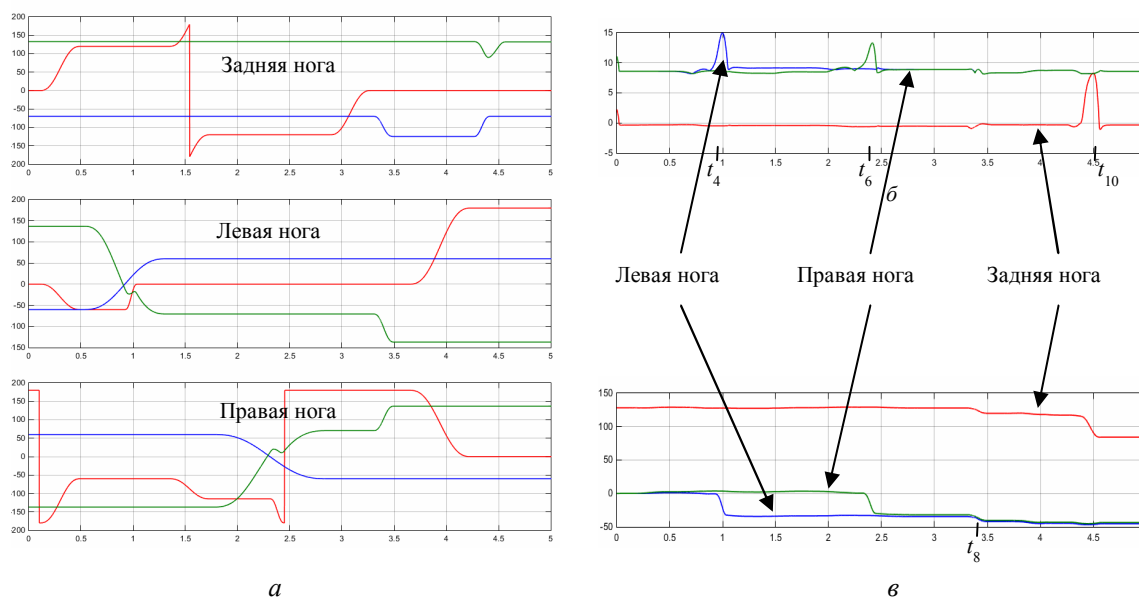


Рис. 4. *а* – изменение обобщенных координат (град – единицы измерения на графике, по аналогии с мм дальше) со временем (выражено в секундах) для ног робота по рис. 3б: q_1 – красная, q_2 – синяя, q_3 – зеленая; *б* – изменение координат точек ног, связанных с осями шарниров колес (для задней ноги – точки контакта) в вертикальном направлении (мм); *в* – изменение координат тех же точек в направлении движения робота (мм)

На рис. 5 приведены графики изменения угловых скоростей и моментов нагрузки в шарнирах ног робота q_1, q_2 и q_3 на примере левой ноги.

Приведем результаты анализа этих зависимостей.

1. Из графиков изменения угловой скорости (рис. 5а) следует, что сначала в интервале времени $(t_1, t_2) \approx (0,2 - 0,5)$ секунды происходит подготовка к переносу левой ноги. Далее, в момент времени $t_2 \approx 0,5$ секунды начинается отталкивание ноги от опорной поверхности, и при $t_4 \approx 0,9$ секунды угловая скорость в шарнире q_2 максимальна. Как видно из графиков на рис. 4б, в этот момент происходит отрыв левой ноги от поверхности. После отрыва угловая скорость в шарнире q_3 в интервале времени $(t_4, t_5) \approx (0,9 - 1,1)$ секунды начинает резко изменяться: это обусловлено изменением расстояния между концами левой и задней ног и связанным с этим изменением решения обратной задачи кинематики.

2. Из графиков на рис. 5б следует, что в момент времени $t_3 \approx 0,8$ секунды возникает резкое изменение момента нагрузки во всех шарнирах, обусловленное отрывом ноги робота от опорной поверхности. В момент времени $t_5 \approx 1,1$ секунды также происходит скачкообразное изменение момента во всех шарнирах, на этот раз обусловленное «приземлением» левой ноги. Аналогичные скачки моментов нагрузки возникают в моменты времени $t_6 \approx 2,4$ с и $t_{10} \approx 4,5$ с, когда происходят отрывы и приземления правой и задней ног соответственно. Однако воздействие при этом передается (через корпус робота) также и на левую ногу.

Для экспериментальной проверки результатов, полученных при моделировании, был создан макет робота с использованием средств 3D-печати. На рис. 6 приведены положения макета на разных этапах его движения (см. табл. 2). В качестве двигателей использованы мотор-редукторы «Pololu MicroMetal Gearmotor HP with Extended Motor Shaft».

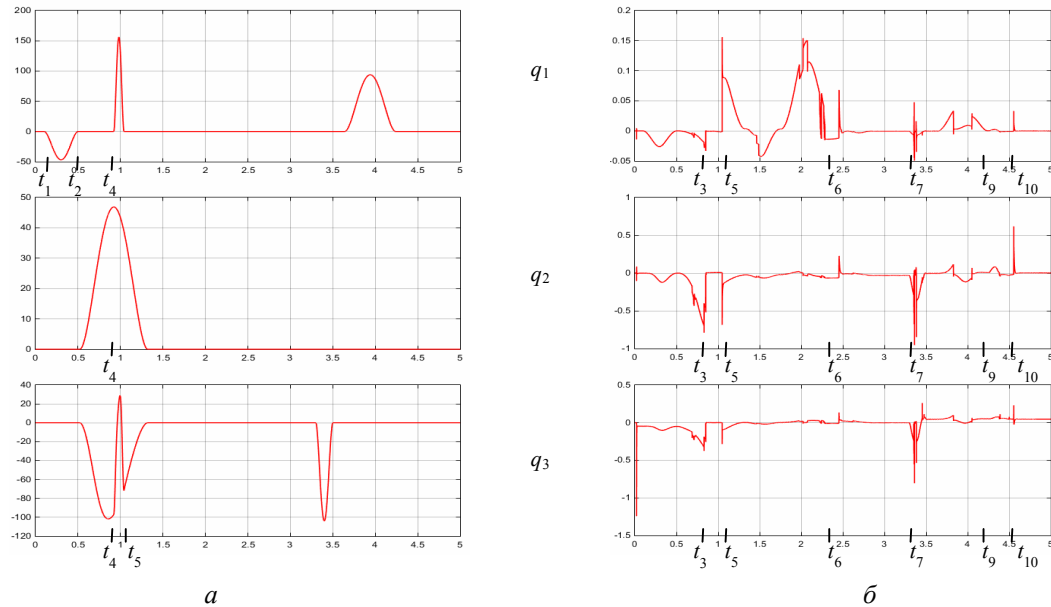


Рис. 5. *а* – изменение угловых скоростей, об/мин; *б* – изменение моментов (Н×м) для левой ноги по шарнирам q_1 , q_2 и q_3 сверху вниз соответственно

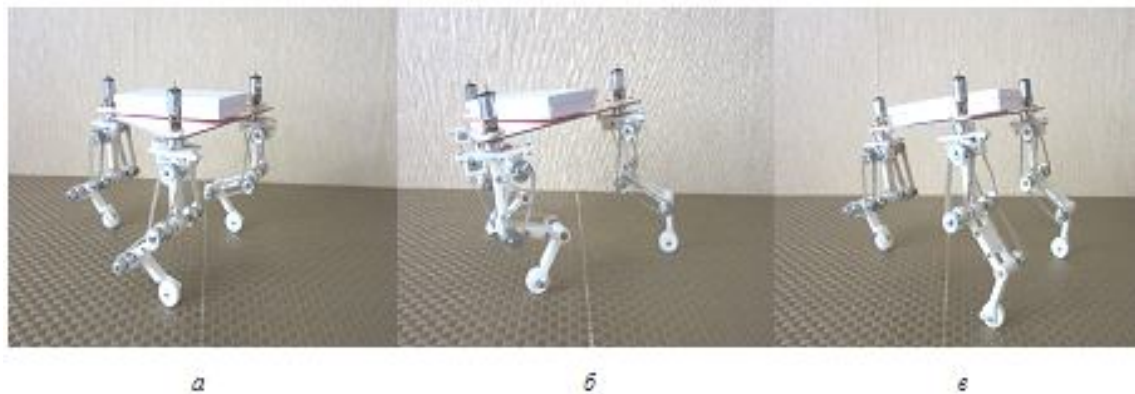


Рис. 6. Макет робота в начальном состоянии фаз 1 (*а*) и 3 (*б*); в промежуточном состоянии фазы 5 (*в*) – нумерация фаз соответствует таблице 2

Заключение. В статье описана конструкция макета трехногого колесно-шагающего робота, с кинематической схемой в виде трехопорной платформы с девятью шарнирными сочленениями. Подобная конструкция позволяет при необходимости применять различные режимы движения: езду, ходьбу и прыжки через препятствия.

Предложена иерархическая система управления роботом, на верхнем уровне которой осуществляется решение прямой и обратной задач о положении конечностей робота, а на нижнем – рассчитываются режимы управления приводами этих конечностей.

Разработан алгоритм выполнения ходьбы макетом, рассмотрены отдельные фазы выбранного алгоритма. Кроме того, проведено моделирование движения макета робота в среде MATLAB с использованием пакета SimMechanics. В итоге получены и проанализированы результаты моделирования, характеризующие изменения скоростей и моментов нагрузок в шарнирах робота.

Список литературы

1. Брумштейн Ю.М. Робототехнические системы: вопросы разработки / Ю. Брумштейн, М. Ильменский, И. Колесников // Интеллектуальная собственность. Авторское право и смежные права. – 2016. – № 4. – С. 49–64.
2. Колесные планетоходы ВНИИТМ. – Режим доступа: <http://www.enlight.ru/post/6055/vniitm.pdf> (дата обращения 01.06.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
3. Малолетов А. В. Динамика и оптимизация структуры, параметров и алгоритмов управления движением шагающих машин со двоянными шагающими движителями : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / А. В. Малолетов. – Волгоград, 2015. – 316 с.
4. Павловский В. Е. О разработках шагающих машин / В. Е. Павловский // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – Москва, 2013. – 32 с.
5. ATHLETE (All-Terrain, Hex-Limbed, Extra-Terrestrial Explorer). – Режим доступа: http://www.nasa.gov/pdf/390539main_Athlete%20Fact%20Sheet.pdf (дата обращения 01.06.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз.англ.
6. Craig J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control / J. J. Craig. – 3rd edition. – Pearson, 2004. – 408 p.
7. Featherstone R. Rigid Body Dynamics Algorithms / R. Featherstone. – Springer, 2007. – 272 p.
8. Gronowicz A. Idea of a quadruped wheel-legged robot / A. Gronowicz, J. Szrek // Archive of Mechanical Engineering. – 2009. – Vol. 56, issue 3. – P. 253–278.
9. Heaston J. Design of a novel tripedal locomotion robot and simulation of a dynamic gait for a single step. Master's thesis / J. Heaston. – Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006. – 75 p.
10. Heaston J. STriDER: Self-Excited Tripedal Dynamic Experimental Robot / J. Heaston // 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2007. – P. 2776–2777.
11. Kaiser. – Режим доступа: <http://www.kaiser.li/en/home/> (дата обращения 01.06.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
12. Meghdari A. Dynamics Modeling of a Humanoid Robot / A. Meghdari // ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. – 2005. – P. 153–158.
13. Muller G. Modeling, simulation, and model-based control of the walking machine ALDURO / G. Muller, M. Schneider, M. Hiller // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2000. – P. 142–152.
14. Ottaviano E. Design Improvements and Control of a Hybrid Walking Robot / E. Ottaviano, S. Vorotnikov, M. Ceccarelli, P. Kurenev // Robotics and Autonomous Systems. – 2011. – Vol. 59, issue 2. – P. 128–141.
15. Ren P. Kinematics analysis of two parallel locomotion mechanisms. PhD dissertation / P. Ren. – Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2010. – 161 p.
16. Ren P. Instantaneous Kinematics and Singularity Analysis of a Novel Three-Legged Mobile Robot with Active S-R-R-R Legs / P. Ren, D. Hong // ASME 2008 International Design Engineering Conference and Computers and Information in Engineering Conference. – 2008. – P. 1195–1206.
17. Siciliano B. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano. – Springer, 2008. – 1611 p.
18. Silva M. Multi-legged walking robot modelling in MATLAB/SimMechanics and its simulation / M. Silva // 2013 8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation. – 2013. – P. 226–231.
19. SimMechanics 2. User's Guide. – 2007. – 840 p.
20. Simulation of a humanoid robot. – Режим доступа: <http://embeddedprogrammer.blogspot.ru/2012/08/simulation-of-humanoid-robot.html> (дата обращения 01.06.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
21. Szrek J. Idea of wheel-legged robot and its control system design / Szrek J., P. Wojtowicz // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. – 2010. – Vol. 58, issue 1. – P. 43–50.
22. Tavolieri C. A design of a new leg-wheel walking robot / C. Tavolieri // 2011 Mediterranean Conference on Control & Automation. – 2007. – P. 1–6.

References

1. Brumshteyn Yu.M., Ilmenskiy M., Kolesnikov I. *Robototekhnicheskiesistemy: voprosyrazrabotki* [Robotic systems: issues of development]. *Intellektualnaya sobstvennost. Avtorskoye parvo i smezhnyye prava* [Intellectual property. Copyright and adjacent rights], 2016, issue 4, pp. 49–64.
2. Maloletov A. V. *Dinamika i optimizatsiyastruktury, parametrov i algoritmovupravleniyadvizheniyemshagayushchikh mashin so sdvoyennymi shagayushchimi dvizhitelyami* [Dynamics and optimization of the structure, parameters and algorithms of motion control of the walking machines with doubled walking drives], Volgograd, 2015. 316 p.
3. *Kolesnyye planetokhody VNIITM* [VNIITM wheeled rovers]. Available at: <http://www.enlight.ru/post/6055/vniitm.pdf> (accessed 01.06.2016).
4. Pavlovskiy V. E. *O razrabotkakh shagayushchikh mashin* [About walking machines development]. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* [M.V. Keldysh IAM Preprints], Moscow, 2013. 32 p.
5. *ATHLETE (All-Terrain, Hex-Limbed, Extra-Terrestrial Explorer)*. Available at: http://www.nasa.gov/pdf/390539main_Athlete%20Fact%20Sheet.pdf (accessed 01.06.2016).
6. Craig J. J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 3rd edition. Pearson Publ., 2004. 408 p.

7. Featherstone R. *Rigid Body Dynamics Algorithms*, Springer, 2007. 272 p.
8. Gronowicz A., Szrek J. Idea of a quadruped wheel-legged robot. *Archive of Mechanical Engineering*, 2009, vol. 56, issue 3, pp. 253–278.
9. Heaston J. *Design of a novel tripedal locomotion robot and simulation of a dynamic gait for a single step. Master's thesis*, Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University Publ. House, 2006. 75 p.
10. Heaston J. STriDER: Self-Excited Tripedal Dynamic Experimental Robot. *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 2776–2777.
11. Kaiser. Available at: <http://www.kaiser.li/en/home/> (accessed 01.06.2016).
12. Meghdari A. Dynamics Modeling of a Humanoid Robot. *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2005, pp. 153–158.
13. Muller G., Schneider M., Hiller M. Modeling, simulation, and model-based control of the walking machine ALDURO. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, pp. 142–152.
14. Ottaviano E., Vorotnikov S., Ceccarelli M., Kurenev P. Design Improvements and Control of a Hybrid Walking Robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, vol. 59, issue 2, pp. 128–141.
15. Ren P. *Kinematics analysis of two parallel locomotion mechanisms*, Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University Publ. House, 2010. 161 p.
16. Ren P., Hong D. Instantaneous Kinematics and Singularity Analysis of a Novel Three-Legged Mobile Robot with Active S-R-R-R Legs. *ASME 2008 International Design Engineering Conference and Computers and Information in Engineering Conference*, 2008, pp. 1195–1206.
17. Siciliano B. *Springer Handbook of Robotics*, Springer, 2008. 1611 p.
18. Silva M. Multi-legged walking robot modelling in MATLAB/SimMechanics and its simulation. *2013 8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, 2013, pp. 226–231.
19. *SimMechanics 2. User's Guide*, 2007. 840 p.
20. *Simulation of a humanoid robot*. Available at: <http://www.embeddedprogrammer.blogspot.ru/2012/08/simulation-of-humanoid-robot.html> (accessed 01.06.2016).
21. Szrek J., Wojtowicz P. Idea of wheel-legged robot and its control system design. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 2010, vol. 58, issue 1, pp. 43–50.
22. Tavolieri C. A design of a new leg-wheel walking robot. *2011 Mediterranean Conference on Control & Automation*, 2007, pp. 1–6.

УДК 004.896.001.63

ВНУТРИТРУБНАЯ ДИАГНОСТИКА ГАЗОПРОВОДОВ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ. **ЧАСТЬ 1. ГИБРИДНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ** **ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОБОТА ВНУТРИ ТРУБЫ**

Статья поступила в редакцию 07.05.2016, в окончательном варианте 22.06.2016.

Голубкин Игорь Александрович, аспирант, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: golubkin@inbox.ru

Щербатов Иван Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, 414025, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: sherbatov2004@mail.ru

Инспекция газопроводов с применением роботизированных устройств различных конструкций является крайне актуальной научной и практической задачей. Большая протяженность и сложная конфигурация трубопроводов обуславливают необходимость применения высокоэффективных систем диагностирования дефектов и неисправностей изнутри труб. В работе показана возможность построения математической модели перемещения колесного робота с трехопорным кинематическим механизмом внутри трубы на основе использования набора типовых ситуаций. Предложена гибридная математическая модель перемещения робота внутри трубы, основанная на анализе и описании набора типовых ситуаций, возникающих в процессе перемещения. Модель состоит из аналитической части (расчет радиуса робота и силы прижатия колес) и продукционной части. Показаны результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенного подхода и адекватность построенной модели реальному процессу перемещения робота.

Ключевые слова: газопровод, внутритрубная диагностика, робот, перемещение в трубе, типовая ситуация, гибридная модель, нечеткие множества, диагностика, информационные технологии