

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-21-34>

## Алгоритм преодоления ползающим роботом лестничного пролета путем заползания на него или сползания

Л.Ю. Ворочаева<sup>1</sup> ✉, С.И. Савин<sup>2</sup>, А.В. Мальчиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>2</sup> Университет Иннополис,  
ул. Университетская 1, г. Иннополис 420500, Российская Федерация

✉ e-mail: mila180888@yandex.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Целью работы является разработка алгоритма последовательных движений трехзвеного ползающего робота, который обеспечивает возможность преодоления устройством лестничных пролетов путем заползания на каждую ступень или сползания с каждой ступени при обратной последовательности этапов. Особенностью робота является сочетание трех типов движений: змее-, черве- и гусеницеподобного, что делает устройство более маневренным и расширяет его функциональные возможности.

**Методы.** Для разработки математической модели движения звеньев ползающего робота на каждом из этапов алгоритма и описания его контактного взаимодействия с опорной поверхностью используется метод динамики многомассовых систем, для формирования связей, ограничивающих движения звеньев, используются методы кинематического и структурного анализа механизма робота.

**Результаты.** В статье представлены результаты численных экспериментов заползания робота на ступень лестничного пролета и сползания с нее, подтверждающие адекватность предложенного алгоритма движения. Положения опорных точек в моменты начала и завершения этапов, длины звеньев, а также углы их поворота в вертикальной плоскости соответствуют значениям этих величин, указанным в алгоритме в виде накладываемых связей и сформулированных условий завершения этапов.

**Заключение.** В статье описан детальный поэтапный алгоритм заползания ползающего робота на ступень лестничного пролета и сползания с нее, показано, что заползание и сползание являются противоположными с точки зрения реализации последовательности этапов операциями. Преимуществом данного алгоритма является универсальность его этапов для подъема робота по лестнице и спуска с нее. Помимо этого этапы алгоритма разработаны таким образом, что опрокидывания робота не происходит.

**Ключевые слова:** трехзвеновый ползающий робот; заползание; сползание; лестничный пролет; алгоритм; этап движения.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента (проект МК-200.2019.1).

**Для цитирования:** Ворочаева Л.Ю., Савин С.И., Мальчиков А.В. Алгоритм преодоления ползающим роботом лестничного пролета путем заползания на него или сползания // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 21-34. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-21-34>.

Поступила в редакцию 09.04.2020

Подписана в печать 27.04.2020

Опубликована 30.06.2020

© Ворочаева Л.Ю., Савин С.И., Мальчиков А.В., 2020

## An Algorithm for Crawling Robot Climbing or Descending Stair Flights

Lyudmila Yu. Vorochaeva <sup>1</sup> ✉, Sergey I. Savin <sup>2</sup>, Andrey V. Mal'chikov <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Innopolis University  
1 Universitetskaya str., Innopolis 420500, Russian Federation

✉ e-mail: mila180888@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The aim of this work is to develop an algorithm for sequential movements of a three-section crawling robot, which enables the device overcoming flights of stairs by crawling on each step or descending each step in the reverse sequence of stages. A special feature of the robot is the combination of three types of movement: snake-, worm - and caterpillar-like, which makes the device more maneuverable and expands its functionality.

**Methods.** To develop a mathematical model of the movement of crawling robot sections at each stage of the algorithm and description of its contact interaction with the surface, the method of dynamics of multi-mass systems is used; methods of kinematic and structural analysis of the robot mechanism are used to form constraints that restrict the movement of the sections.

**Results.** The article presents the results of simulation experiments of a robot crawling on a step of a flight of stairs and descending it, confirming the adequacy of the proposed movement algorithm. Positions of base points at the moments of the beginning and completion of the stages, section lengths and their turning angles in the vertical plane correspond to the values of these variables specified in the algorithm in the form of applied links and laid down conditions for the completion of stages.

**Conclusion.** The article describes a detailed step-by-step algorithm for robot crawling on a step of a stairs flight and descending it; it is shown that crawling and descending are opposite operations from the point of view of sequence of stages implementing. The advantage of this algorithm is the versatility of its stages for moving the robot up and downstairs. In addition, the algorithm stages are designed in such a way that the robot does not roll over.

**Keywords:** tree-section crawling robot; crawling; descending; stair flight; algorithm; movement stage.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding:** The research was carried out with the support of the President Grant (project MK MK-200.2019.1).

**For citation:** Vorochaeva L. Yu., Savin S. I., Mal'chikov A. V. An Algorithm for Crawling Robot Climbing or Descending Stair Flights // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 21-34 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-21-34>.

Received 09.04.2020

Accepted 27.04.2020

Published 30.06.2020

\*\*\*

### Введение

Задача преодоления лестничного пролета робототехническими устройствами

в настоящее время является актуальной и не до конца решенной. Эта задача возникает при движении роботов внут-

ри высотных зданий, а для ее решения учеными предлагаются различные по принципам движения робототехнические системы. Наибольшее распространение получили гусеничные роботы [1-3], двуногие шагающие роботы [4-6], а также различные модификации ползающих роботов [7-14]. Следует отметить, что последние, как правило, представляют собой многомодульные системы, собранные из большого числа однотипных модулей, что приводит к сложностям с реализацией управления данными устройствами. Поэтому в данной работе решено остановиться на рассмотрении задачи преодоления одной ступени лестничного пролета трехзвенным ползающим роботом, особенностью которого является возможность сочетания гусенице-, черве- и змееподобных движений [15].

## Материалы и методы

### Постановка задачи исследования

Ползающий робот представляет собой трехзвенный механизм (каждое звено  $i=1-3$  на рис. 1 показано в виде прямоугольника), звенья которого являются телескопическими (что обеспечивается линейными приводами, не показанными на рис. 1) и имеют длины  $l_i \in [l_{\min}, l_{\max}]$ , где  $l_{\min}$ ,  $l_{\max}$  – минимальное и максимальное значения длины, причем  $l_{\max} = 2l_{\min}$ . Каждые два звена соединены между собой двумя активными шарнирами 4 и 5, обеспечивающими повороты звеньев в двух взаимно перпендикулярных плоскостях на углы  $\varphi_i$  (шарнир 4) и  $\theta_i$  (шарнир 5). Контакт

звеньев с поверхностью может осуществляться в четырех опорных точках  $O_1-O_4$ , коэффициент трения  $f_{1-4}$  в которых является управляемой величиной, что обеспечивается сменой контактных поверхностей, одна из которых имеет коэффициент трения  $f_{\min}$  (при этом опора может скользить по поверхности), а другая –  $f_{\max}$  (при нем опора неподвижна) [16, 17]. Другие варианты управления силой трения в опорах описаны в работах [18-20]. Высота опор считается крайне малой. На рис. 1 зафиксированные на поверхности опоры показаны черными треугольниками. Вектор обобщенных координат, посредством которого описывается движение робота, имеет вид:

$$q = (x_0, y_0, z_0, l_1, l_2, l_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3)^T. \quad (1)$$

Будем рассматривать движение робота в системе координат  $Ax_Py_Pz_P$ , связанной с лестничным пролетом, как показано на рис. 1, ось  $Ax_P$  направлена на нас, точка  $A$  является крайней точкой преодолеваемой ступени. Пусть лестничный пролет состоит из  $P$ -го числа ступеней, длина (вдоль оси  $Ax_P$ ), ширина (вдоль оси  $Ay_P$ ) и высота (вдоль оси  $Az_P$ ) каждой ступени равны  $l_P$ ,  $b_P$  и  $h_P$  соответственно.

### Алгоритм преодоления ступени лестничного пролета

В работе предложен универсальный алгоритм, позволяющий роботу как заползть на ступень пролета, так и сползть с нее (при обратной последовательности этапов), показанный на рис. 1 в виде положений робота в моменты начала и завершения этапов.

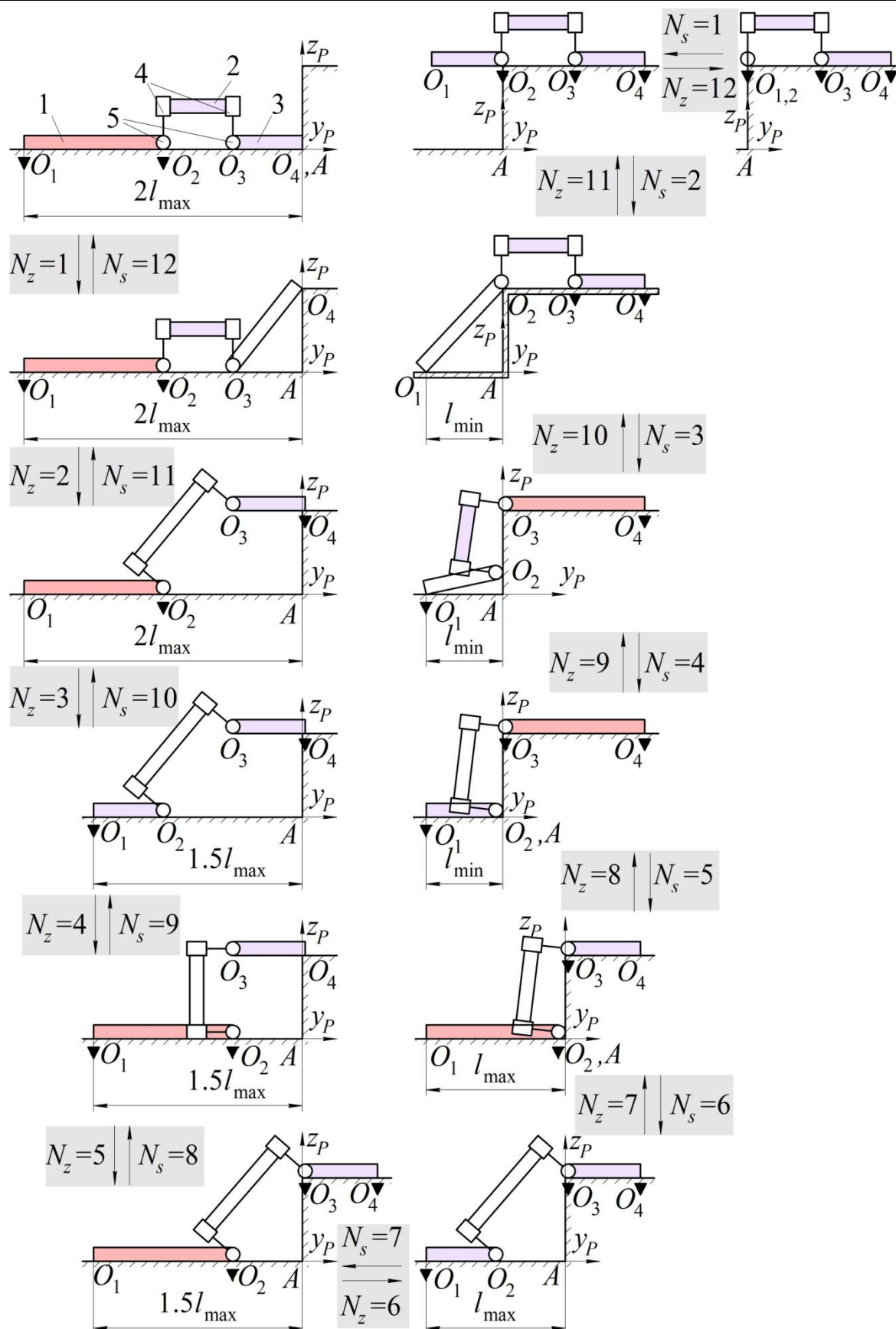


Рис. 1. Алгоритм заполнения / сползания робота

Fig. 1. Robot climbing / descending algorithm

Таблица 1. Описание этапов алгоритма заполнения / сползания робота

Table 1. Description of the stages of the robot climbing / descending algorithm

	Заполнение на ступень / climbing	Сползание со ступени / descending
	Начальное / конечное положение	
	$\mathbf{r}_{O4}^{(P)} = (x_A, y_A, 0)^T, l_1 = l_{\max}, l_{2,3} = l_{\min}, \theta_{1-3}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Этап	$N_z=1$	$N_s=12$
Движение	Поворот звена 3 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и увеличение его длины таким образом, что точка $O_4$ скользит вверх по ступени	Поворот звена 3 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и уменьшение его длины таким образом, что точка $O_4$ скользит вниз по ступени
$N^k$	$z_{O4} = h_p$	$z_{O4} = 0$
Const	$\mathbf{r}_{O1}^{(P)} = (-2l_{\max}, 0, 0)^T, l_1 = l_{\max}, l_2 = l_{\min}, \theta_{1,2}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_3 = l_{\min} / \cos \theta_3^{(P)}$	
q	$\theta_3$	
Этап	$N_z=2$	$N_s=11$
Движение	Повороты звеньев 2 и 3 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и по ней соответственно, увеличение длины звена 2 и уменьшение длины звена 3 таким образом, что ордината точки $O_3$ в системе координат ступени неизменна	Повороты звеньев 2 и 3 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и против нее соответственно, уменьшение длины звена 2 и увеличение длины звена 3 таким образом, что ордината точки $O_3$ в системе координат ступени неизменна
$N^k$	$l_3 = l_{\min}, \theta_3^{(P)} = 0$	$l_2 = l_{\min}, \theta_2^{(P)} = 0$
Const	$\mathbf{r}_{O2}^{(P)} = (-l_{\max}, 0, 0)^T, l_1 = l_{\max}, \theta_1^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_2 \cos \theta_2^{(P)} = l_{\min}, l_3 \cos \theta_3^{(P)} = l_{\min}, l_2 \sin \theta_2^{(P)} + l_3 \sin \theta_3^{(P)} = h_p$	
q	$\theta_2$	
Этап	$N_z=3$	$N_s=10$
Движение	Уменьшение длины звена 1	Увеличение длины звена 1
$N^k$	$l_1 = l_{\min}$	$l_1 = l_{\max}$
Const	$\mathbf{r}_{O4}^{(P)} = (0, 0, h_p)^T, l_2 = \sqrt{l_{\min}^2 + h_p^2}, l_3 = l_{\min}, \theta_{1,3}^{(P)} = 0,$ $\theta_2^{(P)} = \arctg(h_p / l_{\min}), \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	

Продолжение табл. 1 / Table 1 (continuation)

	Заползание на ступень / climbing	Сползание со ступени / descending
Связи	-	
q	$l_1$	
Этап	$N_z=4$	$N_s=9$
Движение	Увеличение длины звена 1, поворот звена 2 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и уменьшение его длины таким образом, что положение точки $O_3$ неизменно	Уменьшение длины звена 1, поворот звена 2 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и увеличение его длины таким образом, что положение точки $O_3$ неизменно
$N^k$	$l_1 = l_{\max}$	$l_1 = l_{\min}$
Const	$\mathbf{r}_{O1}^{(P)} = (-1.5l_{\max}, 0, 0)^T, l_3 = l_{\min}, \theta_{1,3}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi/2$	
Связи	$l_2 \sin \theta_2^{(P)} = h_p, l_1 + l_2 \cos \theta_2^{(P)} = l_{\max}$	
q	$\theta_2$	
Этап	$N_z=5$	$N_s=8$
Движение	Поворот звена 2 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и увеличение его длины таким образом, что звено 3 располагается горизонтально и скользит вдоль оси $Ay_p$	Поворот звена 2 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и уменьшение его длины таким образом, что звено 3 располагается горизонтально и скользит вдоль оси $Ay_p$
$N^k$	$y_{O3}^{(P)} = 0$	$y_{O4}^{(P)} = 0$
Const	$\mathbf{r}_{O2}^{(P)} = (-l_{\min}, 0, 0)^T, l_1 = l_{\max}, l_3 = l_{\min}, \theta_{1,3}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi/2$	
Связи	$l_2 \sin \theta_2^{(P)} = h_p$	
q	$\theta_2$	
Этап	$N_z=6$	$N_s=7$
Движение	Уменьшение длины звена 1	Увеличение длины звена 1
Const	$\mathbf{r}_{O3}^{(P)} = (0, 0, h_p)^T, l_2 = \sqrt{l_{\min}^2 + h_p^2}, l_3 = l_{\min}, \theta_{1,3}^{(P)} = 0, \theta_2^{(P)} = \arctg(h_p / l_{\min}), \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi/2$	
$N^k$	$l_1 = l_{\min}$	$l_1 = l_{\max}$
Связи	-	
q	$l_1$	

Продолжение табл. 1 / Table 1 (continuation)

Этап	$N_z=7$	$N_s=6$
	Заползание на ступень / climbing	Сползание со ступени / descending
Движение	Увеличение длины звена 1, уменьшение длины звена 2 и его поворот в вертикальной плоскости против часовой стрелки	Уменьшение длины звена 1, увеличение длины звена 2 и его поворот в вертикальной плоскости по часовой стрелке
$N^k$	$l_1 = l_{\max}$	$l_1 = l_{\min}$
Const	$\mathbf{r}_{O3}^{(P)} = (0, 0, h_p)^T, l_3 = l_{\min}, \theta_{1,3}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_2 \sin \theta_2^{(P)} = h_p, l_1 + l_2 \cos \theta_2^{(P)} = l_{\max}$	
q	$\theta_2$	
Этап	$N_z=8$	$N_s=5$
Движение	Увеличение длины звена 3, уменьшение длины звена 1	Уменьшение длины звена 3, увеличение длины звена 1
$N^k$	$l_1 = l_{\min}, l_3 = l_{\max}$	$l_1 = l_{\max}, l_3 = l_{\min}$
Const	$\mathbf{r}_{O3}^{(P)} = (0, 0, h_p)^T, l_2 = h_p, \theta_{1,3}^{(P)} = 0, \theta_2^{(P)} = \pi / 2, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	-	
q	$(l_1, l_3)^T$	
Этап	$N_z=9$	$N_s=4$
Движение	Увеличение длины звена 1, уменьшение длины звена 2, поворот звеньев 1 и 2 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и по ней соответственно таким образом, что опора $O_2$ скользит вверх вдоль ступени	Уменьшение длины звена 1, увеличение длины звена 2, поворот звеньев 1 и 2 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и против нее соответственно таким образом, что опора $O_2$ скользит вниз вдоль ступени
$N^k$	$l_2 = l_{\min}$	$l_1 = l_{\min}$
Const	$\mathbf{r}_{O1}^{(P)} = (-l_{\min}, 0, 0)^T, l_3 = l_{\max}, \theta_2^{(P)} = \pi / 2, \theta_3^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_1 \cos \theta_1^{(P)} = l_{\min}, l_1 \sin \theta_1^{(P)} + l_2 = h_p$	
q	$\theta_1$	
Этап	$N_z=10$	$N_s=3$
Движение	Увеличение длины звена 1, уменьшение длины звена 3, поворот звеньев 1 и 2 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и по ней соответственно таким образом, что опора $O_2$ скользит вверх вдоль ступени	Уменьшение длины звена 1, увеличение длины звена 3, поворот звеньев 1 и 2 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и против нее соответственно таким образом, что опора $O_2$ скользит вниз вдоль ступени

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

	Заползание на ступень / climbing	Сползание со ступени / descending
$N^k$	$l_3 = l_{\min}$	$l_3 = l_{\max}$
Const	$\mathbf{r}_{O4}^{(P)} = (l_{\max}, 0, h_p)^T, l_2 = l_{\min}, \theta_3^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_1 \cos \theta_1^{(P)} = l_{\min}, l_2 \cos \theta_2^{(P)} + l_3 = l_{\max}, l_1 \sin \theta_1^{(P)} + l_2 \sin \theta_2^{(P)} = h_p$	
q	$\theta_1$	
Этап	$N_z=11$	$N_s=2$
Движение	Уменьшение длины звена 1 и его поворот в вертикальной плоскости по часовой стрелке таким образом, что ордината точки $O_1$ в системе координат ступени остается неизменной	Увеличение длины звена 1 и его поворот в вертикальной плоскости против часовой стрелки таким образом, что ордината точки $O_1$ в системе координат ступени остается неизменной
$N^k$	$z_{O1} = h_p$	$z_{O1} = 0$
Const	$\mathbf{r}_{O3}^{(P)} = (l_{\min}, 0, h_p)^T, l_{2,3} = l_{\min}, \theta_{2,3}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_1 \cos \theta_1^{(P)} = l_{\min}$	
q	$\theta_1$	
Этап	$N_z=12$	$N_s=1$
Движение	Поворот звена 1 в горизонтальной плоскости против часовой стрелки	Поворот звена 1 в горизонтальной плоскости по часовой стрелке
$N^k$	$x_{O1}^{(P)} = l_{\min}$	$x_{O1}^{(P)} = 0$
Const	$\mathbf{r}_{O2}^{(P)} = (0, 0, h_p)^T, l_{1-3} = l_{\min}, \theta_{1-3}^{(P)} = 0, \varphi_{2,3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	-	
q	$\varphi_1$	
	Конечное / начальное положение	
	$\mathbf{r}_{O2}^{(P)} = (x_A, y_A, h_p)^T, l_{1-3} = l_{\min}, \theta_{1-3}^{(P)} = 0, \varphi_1^{(P)} = \pi, \varphi_{2,3}^{(P)} = \pi / 2$	

Данный алгоритм состоит из двенадцати этапов ( $N_z$  для заползания и  $N_s$  для сползания, причем  $N_s=12-N_z$ ), реализуемые звеньями движения описаны в табл. 1, условия завершения этапов обозначены как  $N^k$ . На каждом из этапов на движения звеньев робота наложены два вида связей: одни из них

обеспечивают постоянство той или иной обобщенной координаты во время выполнения этапа ("Const" в табл. 1), а вторые представляют собой геометрические соотношения между несколькими обобщенными координатами ("Связи" в табл. 1). Вектор обобщенных координат с учетом наложенных связей на



этапах обозначен в табл. 1 как  $q$ . Причем при разработке алгоритма принято допущение о том, что ординаты опорной точки, расположенной в непосредственной близости от оси  $Ax_P$  как перед ступенью, так и непосредственно на ней, считаются равными.

Разработанный алгоритм позволяет роботу преодолевать лестничные пролеты со ступенями, высота и длина которых связаны с длинами звеньев робота следующим образом:

$$\begin{aligned} h_{P_{\max}} &= \sqrt{l_{\max}^2 - l_{\min}^2}, \\ h_{P_{\min}} &= l_{\min}, \quad l_{P_{\min}} = l_{\max}. \end{aligned} \quad (2)$$

Причем этапы алгоритма построены таким образом, что робот всегда со-

храняет вертикальную устойчивость, его опрокидывание не допускается.

## Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования заполнения робота ( $l_{\max}=1$ ) на ступень лестничного пролета с высотой  $h_P=0,7$ , длиной  $l_P=6l_{\max}$  и шириной  $b_P=l_{\max}$  и сползания с нее представлены на рис. 2 в виде графиков изменения координат опорных точек и на рис. 3 в виде зависимостей длин звеньев и углов их поворота в вертикальной плоскости от этапов движения. Значения  $l_{\max}$  и  $h_P$ , указаны в безразмерных величинах.

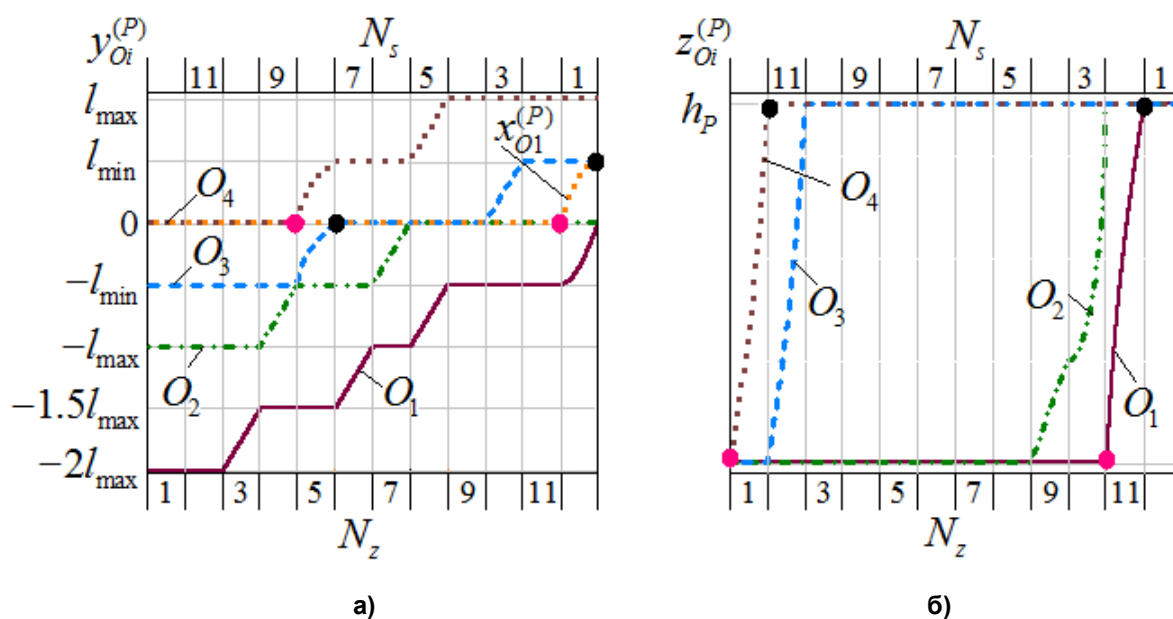


Рис. 2. Графики зависимостей: а –  $x_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$ ,  $y_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$ , б –  $z_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$

Fig. 2. Dependency graphs: а –  $x_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$ ,  $y_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$ , б –  $z_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$

Также на графиках показаны точки (черные для заполнения на ступень и розовые для сползания с нее), соответствующие выполнению условий  $N^k$  за-

вершения этапов движения. Рис. 2 позволяет проанализировать расположение опорных точек в моменты начала и завершения этапов, а также наглядно по-

казывает последовательность размещения опорных точек на ступени (О4 – О3 – О2 – О1) при заползании на нее и на плоскости AxPyP (О1 – О2 – О3 – О4) при сползании.

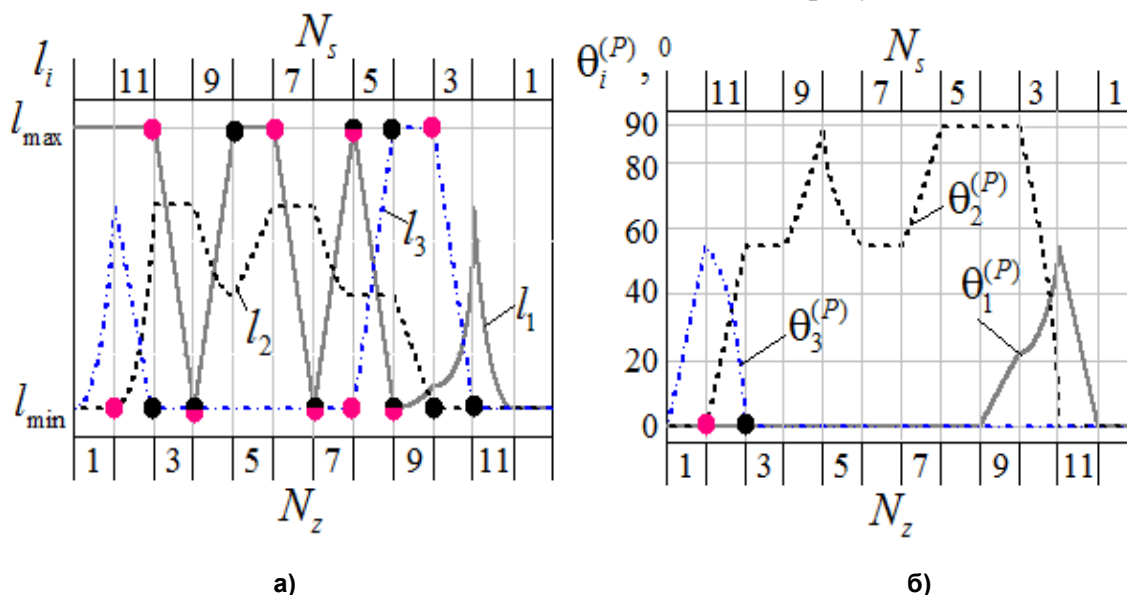


Рис. 3. Графики зависимостей: а –  $l_i(N_z / N_s)$ , б –  $\theta_i^{(P)}(N_z / N_s)$

Fig. 3. Dependency graphs: а –  $l_i(N_z / N_s)$ , б –  $\theta_i^{(P)}(N_z / N_s)$

По графикам рис. 3,а видно, что длины всех звеньев лежат в диапазоне  $l_i \in [l_{\min}, l_{\max}]$ , что также свидетельствует об адекватности разработанного алгоритма, причем

$$l_3(N_z=1/2)=l_2(N_z=3,6)=l_1(N_z=10/11), \quad (3)$$

$$\theta_3^{(P)}(N_z=1/2)=\theta_2^{(P)}(N_z=3,6)=\theta_1^{(P)}(N_z=10/11), \quad (4)$$

где  $N_z=1/2$  и  $N_z=10/11$  соответствуют моментам перехода из этапа 1 в 2 и 10 в 11. Данные равенства длин звеньев и углов их поворота в вертикальной плоскости обусловлены одинаковым расположением звеньев на указанных этапах или моментах переключения между ними.

Изменения положения точек О2-О4 вдоль оси AxP во время всего алгоритма не происходит, поэтому на рис. 2, а эти графики не показаны для большей наглядности рисунка.

## Выводы

В работе предложен и поэтапно описан алгоритм заполнения трехзвенного ползающего робота на ступень лестничного пролета, а также сползания устройства со ступени при выполнении обратной последовательности этапов. Алгоритм позволяет роботу преодолевать лестничные пролеты без потери вертикальной устойчивости и опрокидывания. Адекватность и работоспособность данного алгоритма подтверждена результатами численных экспериментов.

### Список литературы

1. Tao W., Ou Y., Feng H. Research on Dynamics and Stability in the Stairs-climbing of a Tracked Mobile Robot // Intern. J. of Advanced Robotic Systems. 2012. Vol. 9(4). P. 146.
2. Ben-Tzvi P., Ito S., Goldenberg A.A. A mobile robot with autonomous climbing and descending of stairs // Robotica. 2009. Vol. 27(2). P. 171-188.
3. Analysis of stairs-climbing ability for a tracked reconfigurable modular robot / J. Liu, Y. Wang, S. Ma, B. Li // IEEE Intern. Safety, Security and Rescue Robotics: Workshop. Kobe, Japan. 2005. P. 36-41.
4. Multi-objective optimization for a humanoid robot climbing stairs based on Genetic Algorithms / B. Sheng, M. Huaqing, L. Qifeng, Z. Xijing // IEEE Intern. Conf. on Information and Automation. Zhuhai, China. 2009. P. 66-71.
5. Zhang R., Vadakkepat P., Chew C.M. Motion planning of biped robot climbing stairs // Proc. of FIRA Robot World Congress. 2003. P. 1-3.
6. Takahashi Y., Nakayama H., Nagasawa T. Biped robot to assist walking and moving up-and-down stairs // IECON: Proc. of the 24th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. 1998. Vol. 2. P. 1140-1145.
7. Komura H., Yamada H., Hirose S. Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel // Advanced Robotics. 2015. Vol. 29(17). P. 1081-1094.
8. Pfotzer L., Klemm S., Rönnau A., Zöllner J.M., Dillmann R. Autonomous navigation for reconfigurable snake-like robots in challenging, unknown environments // Robotics and Autonomous Systems. 2017. Vol. 89. P. 123-135.
9. Yamada H., Takaoka S., Hirose S. A snake-like robot for real-world inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism) // Advanced Robotics. 2013. Vol. 27(1). P. 47-60.
10. Development and control of articulated mobile robot for climbing steep stairs / M. Tanaka, M. Nakajima, Y. Suzuki, K. Tanaka // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2018. Vol. 23(2). P. 531-541.
11. Development of the snake-like rescue robot "KOHGA" / T. Kamegawa, T. Yarnasaki, H. Igarashi, F. Matsuno // ICRA: Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. New Orleans, USA. 2004. Vol. 5. P. 5081-5086.
12. Yim M., Homans S., Roufas K. Climbing with snake-like robots // IFAC workshop on mobile robot technology. 2001. P. 21-27.
13. Borenstein J., Hansen M., Borrell A. The OmniTread OT-4 serpentine robot—design and performance // J. of Field Robotics. 2007. Vol. 24(7). P. 601-621.

14. Development of control for a serpentine robot / W.R. Hutchison, B.J. Constantine, J. Borenstein, J. Pratt // IEEE Intern. Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Jacksonville, USA. 2007. P. 149-154.
15. Vorochaeva L.Yu., Savin S.I., Yatsun A.S. Solving the Problem of Overcoming a Staircase Flight by a Multi-Link Crawling Robot // Intern. Conf. on Industrial Engineering. Sochi, Russia. 2020 (в печати).
16. Vorochaeva L., Savin S., Yatsun A. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction // Russian J. of Nonlinear Dynamics. 2019. Vol. 15(4). P. 623–632.
17. The study of special positions of a crawling robot when changing its configuration / L.Yu. Vorochaeva, A.V. Malchikov, A.S. Yatsun, A. Martinez // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 747. P. 012094.
18. Яцун С. Ф., Мальчиков А. В., Жакин А. И. Динамические опорные элементы ползающих роботов для движения по наклонным поверхностям // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №. 2-1. С. 89-95.
19. Яцун С. Ф., Мальчиков А. В. Автоматизированный мобильный комплекс для диагностики трубопроводов переменного диаметра // Автоматизация и современные технологии. 2012. №. 12. С. 3-8.
20. Carbone G., Malchikov A., Ceccarelli M., Jatsun S. Design and simulation of Kursk robot for in-pipe inspection // SYROM: Proc. of the 10th IFToMM Intern. Symposium on Science of Mechanisms and Machines. Brasov, Romania. 2010. P. 103-114.

## References

1. Tao W., Ou Y., Feng H. Research on Dynamics and Stability in the Stairs-climbing of a Tracked Mobile Robot. *Intern. J. of Advanced Robotic Systems*, 2012, vol. 9, no. 4, 146 p.
2. Ben-Tzvi P., Ito S., Goldenberg A.A. A mobile robot with autonomous climbing and descending of stairs. *Robotica*, 2009, vol. 27, no. 2, pp. 171-188.
3. Liu J., Wang Y., Ma S., Li B. Analysis of stairs-climbing ability for a tracked reconfigurable modular robot. Proc. IEEE Intern. Safety, Security and Rescue Robotics: Workshop. Kobe, Japan. 2005, pp. 36-41.
4. Sheng B., Huaqing M., Qifeng L., Xijing Z. Multi-objective optimization for a humanoid robot climbing stairs based on Genetic Algorithms. Proc. IEEE Intern. Conf. on Information and Automation. Zhuhai, China. 2009, pp. 66-71.
5. Zhang R., Vadakkepat P., Chew C.M. Motion planning of biped robot climbing stairs. Proc. of FIRA Robot World Congress, 2003, pp. 1-3.

6. Takahashi Y., Nakayama H., Nagasawa T. Biped robot to assist walking and moving up-and-down stairs. *IECON: Proc. of the 24th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*. 1998; vol. 2, pp. 1140-1145.
7. Komura H., Yamada H., Hirose S. Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel. *Advanced Robotics*, 2015, vol. 29, no. 17, pp. 1081-1094.
8. Pftotzer L., Klemm S., Rönnau A., Zöllner J.M., Dillmann R. Autonomous navigation for reconfigurable snake-like robots in challenging, unknown environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, vol. 89, pp. 123-135.
9. Yamada H., Takaoka S., Hirose S. A snake-like robot for real-world inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism). *Advanced Robotics*, 2013, vol. 27, no. 1, pp. 47-60.
10. Tanaka M., Nakajima M., Suzuki Y., Tanaka K. Development and control of articulated mobile robot for climbing steep stairs. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 531-541.
11. Kamegawa T., Yarnasaki T., Igarashi H., Matsuno F. Development of the snake-like rescue robot "KOHGA". *ICRA: Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. New Orleans, USA. 2004; vol. 5, pp. 5081-5086.
12. Yim M., Homans S., Roufas K. Climbing with snake-like robots. *IFAC workshop on mobile robot technology*. 2001: 21-27.
13. Borenstein J., Hansen M., Borrell A. The OmniTread OT-4 serpentine robot—design and performance. *J. of Field Robotics*, 2007, vol. 24, no. 7, pp. 601-621.
14. Hutchison W.R., Constantine B.J., Borenstein J., Pratt J. Development of control for a serpentine robot. *IEEE Intern. Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*. Jacksonville, USA. 2007, pp. 149-154.
15. Vorochaeva L.Yu., Savin S.I., Yatsun A.S. Solving the Problem of Overcoming a Staircase Flight by a Multi-Link Crawling Robot. *Proc. Intern. Conf. on Industrial Engineering*. Sochi, Russia, 2020 (in press).
16. Vorochaeva L., Savin S., Yatsun A. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction. *Russian J. of Nonlinear Dynamics*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 623–632.
17. Vorochaeva L.Yu., Malchikov A.V., Yatsun A.S., Martinez A. The study of special positions of a crawling robot when changing its configuration. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020; vol. 747, 012094 p.
18. Jatsun S.F., Mal'chikov A.V., Zhakin A. I. Dinamicheskie opornye elementy polzayushchikh robotov dlya dvizheniya po naklonnym poverkhnostyam [Dynamic contact elements of crawling robots for moving on inclined surfaces]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, vol. 2-1, pp. 89-95 (In Russ.).

19. Jatsun S.F., Mal'chikov A.V. Avtomatizirovannyi mobil'nyi kompleks dlya diagnostiki truboprovodov peremennogo diametra [Automated mobile system for diagnostics of variable diameter pipelines]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii = Automation and Modern Technologies*, 2012; vol. 12: 3-8 (In Russ.).

20. Carbone G., Malchikov A., Ceccarelli M., Jatsun S. Design and simulation of Kursk robot for in-pipe inspection. SYROM: Proc. of the 10th IFToMM Intern. Symposium on Science of Mechanisms and Machines. Brasov, Romania. 2010: 103-114.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Ворочаева Людмила Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mila180888@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2791-3697>, Reseaher ID: N-7205-2016

**Lyudmila Yu. Vorochaeva**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mila180888@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2791-3697>, Reseaher ID: N-7205-2016

**Савин Сергей Игоревич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мехатроники, управления и прототипирования, Университет Иннополис, г. Иннополис, Российская Федерация, e-mail: s.savin@innopolis.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7954-3144>, Reseaher ID: N-8048-2016

**Sergei I. Savin**, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher at Center for Technologies in Robotics and Mechatronics Components, Innopolis University, Innopolis, Russian Federation, e-mail: s.savin@innopolis.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7954-3144>, Reseaher ID: N-8048-2016

**Мальчиков Андрей Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>

**Andrey V. Mal'chikov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>