

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 621.865

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-53-61

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРЫГАЮЩИМ РОБОТОМ ЛЕСТНИЧНОГО ПРОЛЕТА

Рассмотрено преодоление прыгающим роботом лестничных пролетов с различным числом ступеней несколькими вариантами, отличающимися числом прыжков и числом перепрыгиваемых за каждый из них ступеней. Установлено влияние на время передвижения и затрачиваемую при этом энергию варианта реализации прыжка и угла, под которым направлен вектор скорости отрыва

устройства от поверхности. Проведена оптимизация движения робота по лестничному пролету с точки зрения минимизации времени движения и затрачиваемой энергии.

Ключевые слова: прыгающий робот, лестничный пролет, препятствие, время движения, энергия, оптимизация.

L.Yu. Vorochaeva, S.I. Savin, A.V. Malchikov

INVESTIGATION OF STAIR FLIGHT OVERCOMING BY JUMPING ROBOT

In the paper there is considered a stair flight overcoming by a wheel jumping robot during lifting upon it. The robot consists of a casing, an accelerating module ensuring device separation from a surface and a wheel platform at the expense of which a robot moves on even surfaces and it is positioned in front of a stair flight. The latter is characterized with the footstep number, a length and a height of each footstep that defines the number of robot jumps (from one up to footstep number), and also a height and a length of each jump.

In the work there are introduced and described basic parameters of a stair flight, jump characteristics and also the limitations imposed upon a rate of robot separation from a surface and an angle of its vector and specified by staircase parameters. As qualitative criteria of the stair flight overcoming are energy and time spent at that. As a result of the computational modeling it is determined that at stair flight jumping over in a single bound the required rate of separation of the jumping robot from a surface and also energy and time spent for a jump increase with the growth of the

staircase number in the stair flight at that a rate and time – according to curvilinear laws, and energy – proportionally to the number of staircases in the stair flight. Besides, there are investigated six versions for jumping robot to overcome stair flights with the different number of staircases, at that the number of staircases to jump over in a single bound at each version of jump series fulfillment is equal. At that there is no clear regularity between energy and the number of jumps carried out (and staircases to jump over) and time spent increases with the increase of the jump number. The optimization of jumping robot motion on a stair flight from the point of view of the minimization of time and energy consumption is carried out as a result of which the necessity to overcome a staircase in one bound irrespective of the number of footsteps is carried out.

Key words: jumping robot, stair flight, obstacle, time of motion, energy, optimization.

Введение

Практическое применение прыгающих роботов прежде всего связано с их возможностями преодолевать различные препятствия [1-5]. Например, в работе [1] предложен метод активной регулировки высоты и длины прыжка робота в зависимости от размеров препятствия за счет из-

менения длины передачи «винт - гайка» и длины ног устройства. Для обнаружения и определения размеров препятствия используется инфракрасный датчик. Статья [2] посвящена разработке прыгающего робота, перемещающегося по неровной местности с целью сбора информации об

окружающей среде (экологической ситуации) и перепрыгивающего встречающиеся на его пути препятствия. В работе [3] рассматривается комбинированная робототехническая система, которая может перемещаться по поверхности за счет специальных опорных механизмов, а может совершать прыжки для преодоления больших по размерам препятствий, которые без отрыва от поверхности преодолеть невозможно. В ходе проведенных авторами исследований установлено, что для совершения более вертикальных прыжков робот

перед ними должен быть неподвижен, а для реализации прыжков с большей длиной и меньшей высотой робот во время разгона должен перемещаться по поверхности.

В данной статье решено остановиться на изучении движения прыгающего робота, ранее описанного в работах [6-9], оснащенного колесами для перемещения по достаточно ровной поверхности, при преодолении им одного из возможных типов препятствий - лестничного пролета.

Описание колесного прыгающего робота

В работе будем рассматривать колесного прыгающего робота, схема которого в

вертикальной плоскости Oxy показана на рис. 1а [6-9].

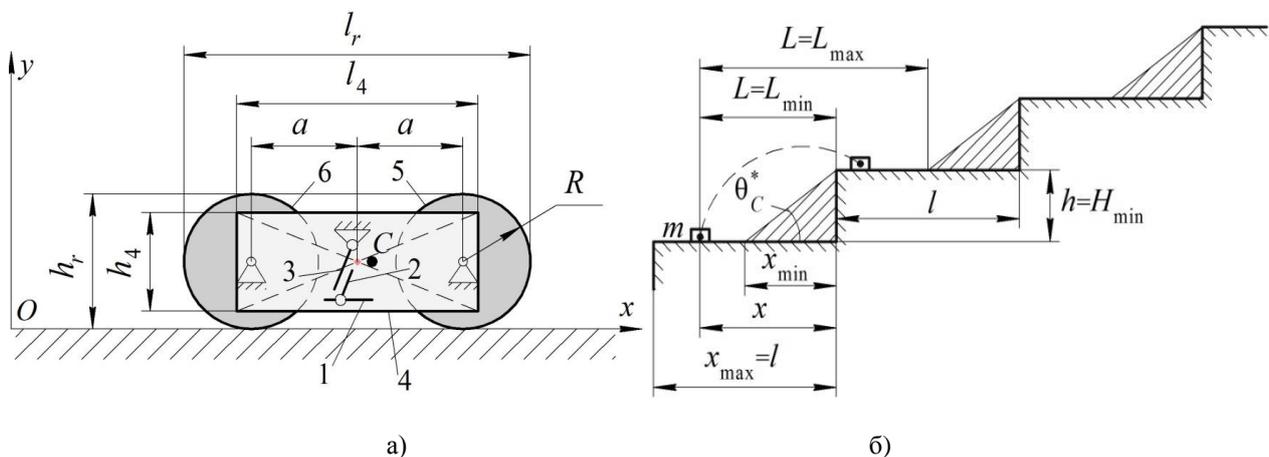


Рис. 1. Схемы колесного прыгающего робота (а) и преодоления лестничного пролета (б)

Робот состоит из корпуса 4, разгонного модуля, образованного звеньями 1-3, и колесной платформы, представленной четырьмя колесами (на рис. 1а показаны только два из них - 5 и 6). Колесная платформа обеспечивает качение робота по достаточно ровной местности. Кроме того, за счет вращения колес в полете возможно управление ориентацией робота для обеспечения приземления на все колеса одновременно [6]. Корпус имеет размеры $l_4 \times h_4$, колеса радиусом R установлены в корпусе на расстоянии a от его центра симметрии. Тогда габаритные размеры робота равны

$$l_r = 2a + 2R, h_r = 2R.$$

Все звенья устройства имеют массы m_i , $i=1-6$, центры масс являются центрами

симметрии. Робот для совершения прыжка приобретает скорость v_c , являющуюся скоростью отрыва устройства от поверхности. Вектор скорости направлен под углом θ_c к горизонту. C - центр масс объекта, координаты которого равны

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^6 m_i x_{Ci}}{m}, y_c = \frac{\sum_{i=1}^6 m_i y_{Ci}}{m},$$

где x_{Ci} , y_{Ci} - координаты центра масс каждого из звеньев; m - масса робота, $m = \sum_{i=1}^6 m_i$.

Принципы реализации роботом прыжка описаны в статьях [7; 9].

Преодоление лестничного пролета

Будем рассматривать движение прыгающего робота вверх по лестничному пролету, число ступеней в котором равно n (рис. 1б). Для удобства описания основных понятий, связанных с преодолением роботом лестничного пролета, будем считать, что робот имеет форму прямоугольника с размерами l_r х h_r , равными габаритным размерам устройства. Пусть длина и высота каждой ступени равны l и h соответственно. Перед прыжком робот располагается на расстоянии x от ступени:

$$x \in [x_{\min}, x_{\max}].$$

Здесь x_{\min} и x_{\max} - минимальное и максимальное значения x , вычисляемые по формулам

$$L = v_C^2 \sin 2\theta_C / g, \quad L \in [x + (n-1)l, x + nl - x_{\min}],$$

$$H = v_C^2 \sin^2 \theta_C / 2g, \quad H \in [nh, H_{\max}],$$

где g - ускорение свободного падения, а расстояние H_{\max} ограничено высотой потолка лестничного пролета.

$$p \in [p_{\min}, p_{\max}], \quad p_{\min} = 1, \quad p_{\max} = n.$$

Число перепрыгиваемых за один прыжок ступеней при этом

$$N \in [N_{\min}, N_{\max}], \quad N_{\min} = 1 \text{ при } p = p_{\max}, \quad N_{\max} = n \text{ при } p = p_{\min}.$$

Пусть каждый прыжок робота характеризуется затрачиваемой на его реализацию энергией

$$W_i = mv_{Ci}^2 / 2, \quad i = 1 \dots p,$$

и временем T_i , представляющим собой время с момента отрыва робота от поверхности до момента завершения прыжка.

Тогда для преодоления лестничного пролета роботу потребуется энергия

$$W = \sum_{i=1}^p W_i$$

и время

$$T_{vs} = T + T_r p,$$

где $T = \sum_{i=1}^p T_i$ - время, затрачиваемое роботом на прыжки; T_r - время подготовки ро-

Моделирование движения робота

Перейдем к моделированию движения робота по лестничному пролету, для этого осуществим переход к безразмерным величинам. Рассмотрим преодоление лест-

$$x_{\min} = h \operatorname{ctg}(\theta_C^*) + (a + R) - \Delta x,$$

$$x_{\max} = l - (a + R) - \Delta x,$$

где $\Delta x = x_C - x_{C4}$; x_{\min} представляет собой расстояние, в пределах которого робот не должен располагаться на ступени в связи с невозможностью совершения при этом прыжка, ограниченное высотой h последней и минимальным углом наклона вектора скорости отрыва робота от поверхности к горизонту θ_C^* ; величина x_{\max} обусловлена длиной ступени.

К характеристикам прыжка робота будем относить его длину L и высоту H , вычисляемые по формулам

Преодоление лестничного пролета может быть реализовано с использованием различного числа прыжков p - от 1 до равного числу ступеней:

бота к прыжку (время позиционирования и взведения разгонного модуля).

Т.е. время, требуемое для преодоления лестничного пролета, складывается из времени реализации прыжков и времени, необходимого для подготовки к совершению каждого прыжка.

При определении оптимального варианта преодоления лестничного пролета в качестве критериев оптимизации будем рассматривать энергию W , затрачиваемую на отрыв робота от поверхности, и время T_{vs} , которое требуется на перепрыгивание всех ступеней в пролете.

$$p, N = \min(W, T_{vs}).$$

ничного пролета, состоящего из $n=12, 18$ или 20 ступеней, длина и высота каждой ступени равны $l = h = 0,2$. Остановимся на изучении такого варианта прыжков, при

котором $x = x_{\max}$, а приземление происходит в крайнюю точку ступени, т.е. $L = l$. Это позволяет роботу совершать серии прыжков без дополнительного позиционирования на ступени. Также будем считать, что за счет управления ориентацией робота в полете [6] его приземление происходит на передние и задние колеса одновременно. Наличие отскоков от поверхности после приземления или скольжение по ней не рассматриваются.

Исследование одного прыжка. Вначале остановимся на рассмотрении одного прыжка, за который робот может перепрыгнуть от 1 до n ступеней. На рис. 2 для примера показаны траектории центра масс робота при перепрыгивании $N_i=1-6$ ступеней при двух углах наклона вектора скорости отрыва к горизонту, минимально и

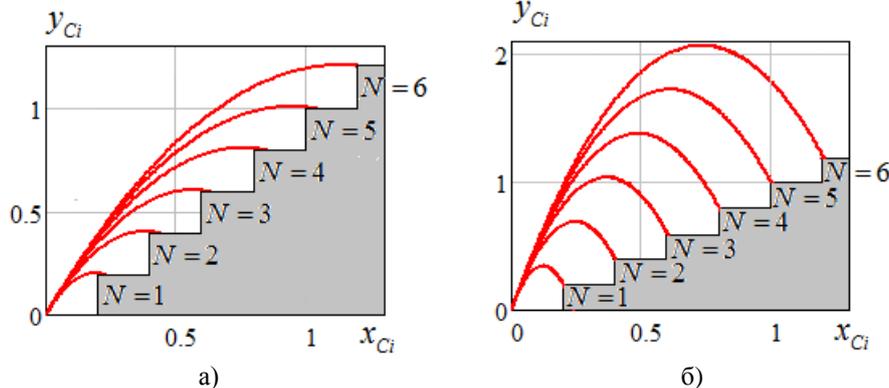


Рис. 2. Графики $y_c(x_c)$ при $N_i=1-6$: а - $\theta_c^{\min} = 65^\circ$; б - $\theta_c^{\max} = 80^\circ$

На рис. 3 представлены требуемые скорость отрыва v_{Ci} , время прыжка T_i и затрачиваемая на прыжок энергия W_i в зависимости от числа $N_i = 1-20$ перепрыгиваемых ступеней также при двух углах θ_c . Зависимости скорости v_{Ci} и времени T_i представляют собой кривые, возрастающие по мере увеличения числа перепрыгиваемых ступеней, а график $W_i(N_i)$ - наклонная прямая, также возрастающая с ростом N_i .

Между двумя зависимостями 1 и 2, соответствующими минимально и максимально допустимым углам θ_c , на каждом графике находится область допустимых значений каждой из исследуемых величин: v_c , W_i и T_i .

максимально допустимых: $\theta_c^{\min} = 65^\circ$ и $\theta_c^{\max} = 80^\circ$. Следует отметить, что значение угла θ_c^{\min} в данном случае определяется как минимальное значение угла, при котором возможно приземление робота в крайнюю точку ступени, а значение угла θ_c^{\max} обусловлено конструктивными возможностями механизма разгона.

По данным зависимостям видно, что в первом случае приземление на ступень происходит практически сразу после прохождения высшей точки прыжка. Во втором случае прыжки существенно выше, высота прыжка при перепрыгивании 6 ступеней почти в 2 раза превышает высоту, на которую происходит приземление ($H \gg Nh$).

Преодоление лестничных пролетов с разным числом ступеней. Рассмотрим преодоление прыгающим роботом лестничных пролетов с числом ступеней $n = 12, 18, 20$. Будем исследовать их преодоление за такое число прыжков p , при котором число перепрыгиваемых каждый раз ступеней одинаково. Также будем рассматривать запрыгивание робота на лестничный пролет за один прыжок. В таблице приведены варианты (*var*) преодоления лестничных пролетов с указанием числа прыжков p и числа N перепрыгиваемых при этом ступеней. Цветовая гамма ячеек будет пояснена в дальнейшем. Следует отметить, что число ступеней в лестничных пролетах выбрано таким образом, что $var = 6$.

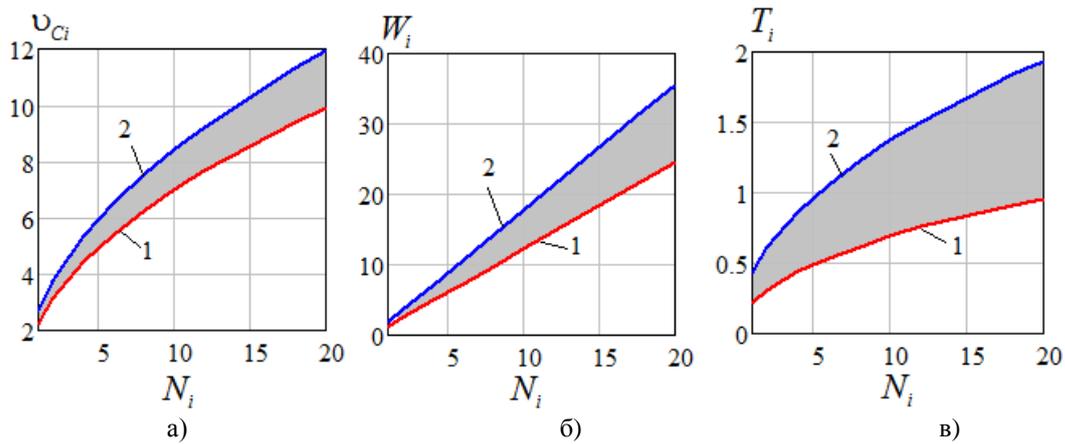


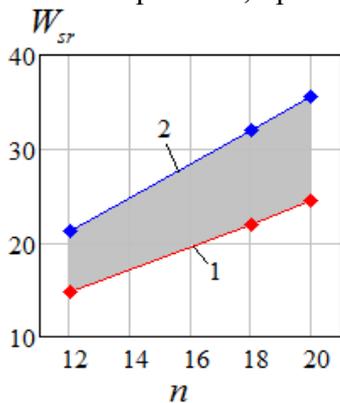
Рис. 3. Графики: а - $v_{Ci}(N_i)$; б - $W_i(N_i)$; в - $T_i(N_i)$ (1 - $\theta_c = 65^\circ$, 2 - $\theta_c = 80^\circ$)

Таблица

Варианты преодоления прыгающим роботом лестничных пролетов

var	n=12				n=18				n=20			
	$\theta_c=65^\circ$		$\theta_c=80^\circ$		$\theta_c=65^\circ$		$\theta_c=80^\circ$		$\theta_c=65^\circ$		$\theta_c=80^\circ$	
	p	N	p	N	p	N	p	N	p	N	p	N
1	1	12	1	12	1	18	1	18	1	20	1	20
2	2	6	2	6	2	9	2	9	2	10	2	10
3	3	4	3	4	3	6	3	6	4	5	4	5
4	4	3	4	3	6	3	6	3	5	4	5	4
5	6	2	6	2	9	2	9	2	10	2	10	2
6	12	1	12	1	18	1	18	1	20	1	20	1

На рис. 4 и 5 приведены диаграммы энергий W , затрачиваемых на преодоление лестничного пролета при том или ином варианте прыжков для двух значений угла θ_c . Представленные диаграммы имеют случайный характер, выявить зависимость затрачиваемой энергии W от числа прыжков, числа перепрыгиваемых за каждый прыжок ступеней, угла отрыва робота от поверхности и т.д. не представляется возможным. При этом для всех диаграмм справедливо утверждение, что для преодоления лестничного пролета при минимально затрачиваемой энергии необходимо совершать число прыжков, равное числу



ступеней, т.е. за каждый прыжок перепрыгивать одну ступень:

$$W = W_{\min} \text{ при } p = n.$$

Исследование средней энергии при преодолении лестничного пролета. Наиболее интересным с точки зрения исследования и более информативным является график зависимости средней кинетической энергии (рис. 6), затрачиваемой на преодоление лестничного пролета и вычисляемой по формуле

$$W_{sr} = \frac{\sum_{j=1}^{var} W_j}{var}.$$

Рис. 6. График $W_{sr}(n)$:

1 - $\theta_c^{\min} = 65^\circ$; 2 - $\theta_c^{\max} = 80^\circ$

Данный график при каждом значении угла θ_c представляет собой наклонную прямую, причем при θ_c^{\max} угол наклона прямой к горизонтالي незначительно больше, чем при θ_c^{\min} . Между двумя прямыми 1 и 2 располагается область допустимых значений W_{sr} .

Исследование времени преодоления лестничного пролета. Перейдем к исследованию еще одного критерия преодоления роботом лестничного пролета – времени перепрыгивания T (рис. 7). По графикам видно, что независимо от числа ступеней в лестничном пролете время, затрачиваемое на перепрыгивание его ступеней, плавно возрастает от параметра p по криволинейному закону, выпуклость кривой

направлена вверх, причем при угле θ_C^{\min} кривая возрастает более полого. Это приводит к тому, что диапазон допустимых значений времени T расширяется с увеличением числа прыжков p . Отсюда следует, что для наиболее быстрого преодоления лестничного пролета необходимо совершать как можно меньшее число прыжков (в предельном случае - 1).

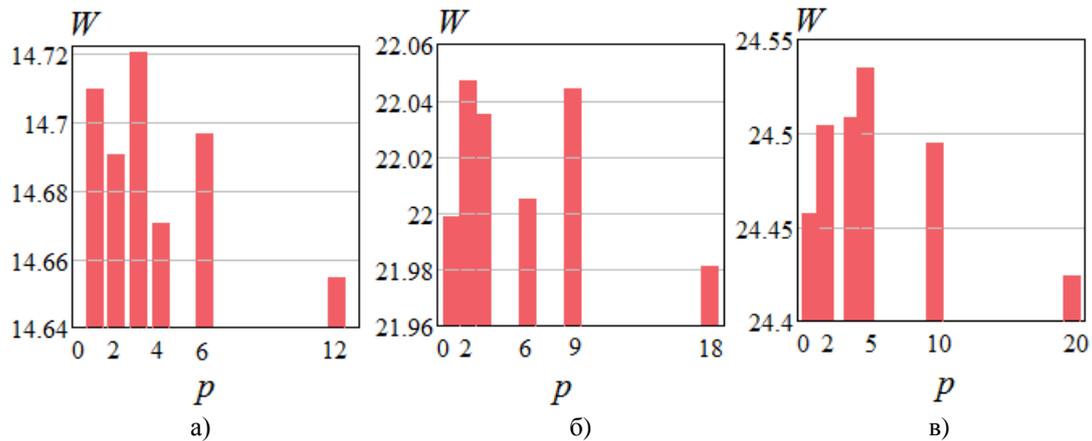


Рис. 4. Графики $W(p)$ при $\theta_C^{\min} = 65^\circ$: а - $n = 12$; б - $n = 18$; в - $n = 20$

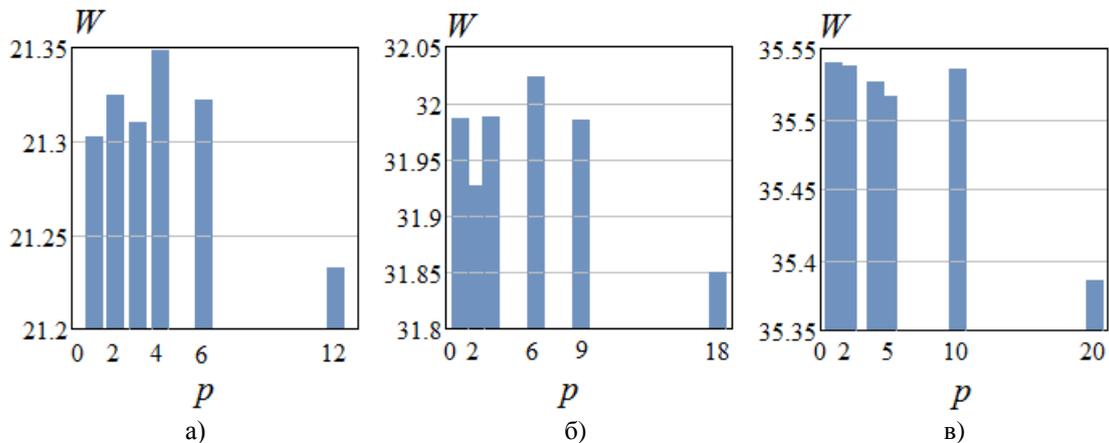


Рис. 5. Графики $W(p)$ при $\theta_C^{\max} = 80^\circ$: а - $n = 12$; б - $n = 18$; в - $n = 20$

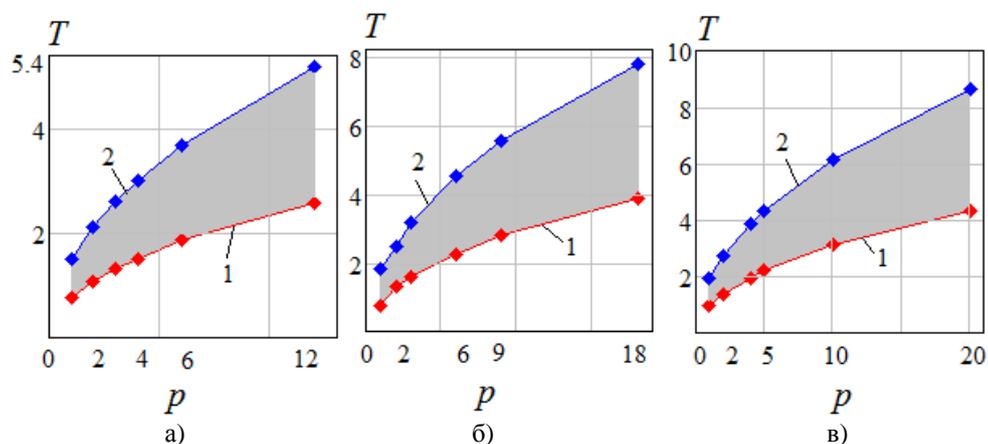


Рис. 7. Графики $T(p)$: а - $n = 12$; б - $n = 18$; в - $n = 20$ (1 - $\theta_C^{\min} = 65^\circ$, 2 - $\theta_C^{\max} = 80^\circ$)

Оптимизация

Перейдем к оптимизации движения прыгающего робота по лестничному пролету, целью которой является выбор такого значения числа прыжков p , при котором будет наблюдаться оптимальное соотношение кинетической энергии W и времени T_{vs} преодоления пролета. Для этого построены диаграммы $W(T_{vs})$ при двух значениях угла θ_C^{\min} (рис. 8) и θ_C^{\max} (рис. 9).

На представленных диаграммах точками показаны значения $W(T_{vs})$ и выделе-

ны четыре области I - IV. Область I содержит оптимальные значения энергии и времени преодоления лестничного пролета. В области II затрачиваемая на преодоление лестничного пролета энергия больше оптимальной, а время преодоления - меньше оптимального. В области III, наоборот, затрачиваемая энергия меньше оптимальной, а время - больше оптимального. В четвертой области и время, и затрачиваемая энергия больше оптимальных значений.

$$\begin{cases} W_I = W_{opt}, \\ T_{vsI} = T_{vsopt}. \end{cases} \quad \begin{cases} W_{II} > W_{opt}, \\ T_{vsII} < T_{vsopt}. \end{cases} \quad \begin{cases} W_{III} < W_{opt}, \\ T_{vsIII} > T_{vsopt}. \end{cases} \quad \begin{cases} W_{IV} > W_{opt}, \\ T_{vsIV} > T_{vsopt}. \end{cases}$$

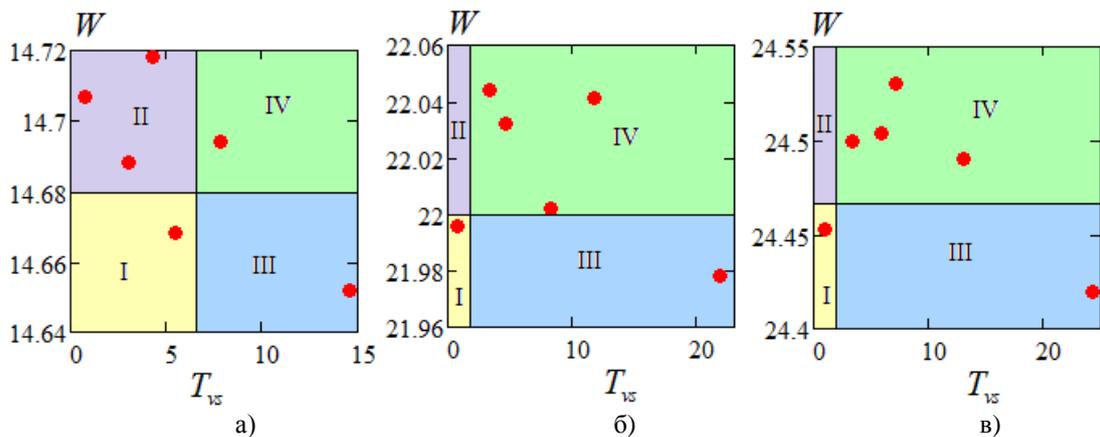


Рис. 8. Оптимизационные диаграммы $W(T_{vs})$ при $\theta_C^{\min} = 65^\circ$: а - $n = 12$; б - $n = 18$; в - $n = 20$

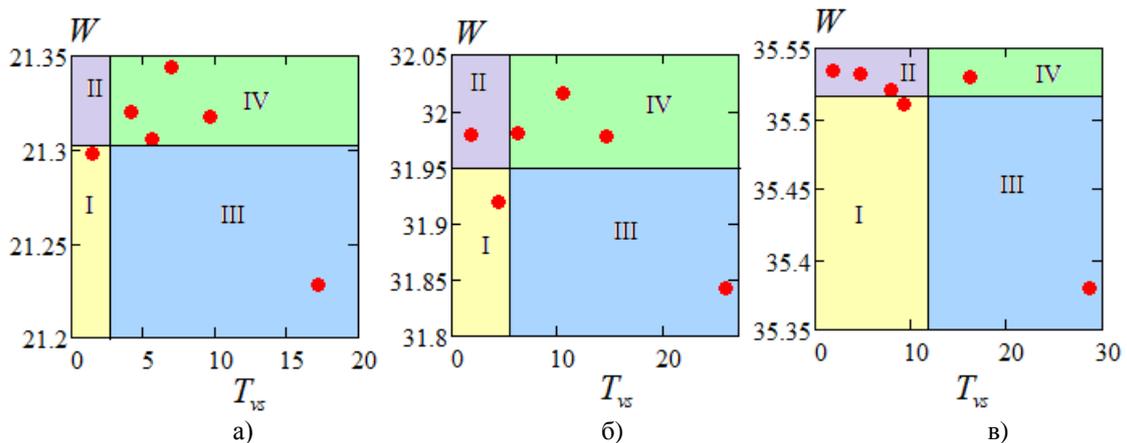


Рис. 9. Оптимизационные диаграммы $W(T_{vs})$ при $\theta_C^{\max} = 80^\circ$: а - $n = 12$; б - $n = 18$; в - $n = 20$

В таблице соответствующими цветами показаны значения числа прыжков p и числа преодолеваемых за каждый прыжок ступеней N во всех четырех областях диаграмм. На основании анализа данной таб-

лицы можно сделать вывод о том, что чаще всего в качестве оптимального числа прыжков выступает $p=1$, когда либо происходит преодоление всего лестничного пролета за один прыжок ($var 1$), либо зна-

чения p и соответствующего ему N близки между собой (*var 4*). В то же время нельзя однозначно говорить о том, что любой

Заключение

В работе рассмотрено движение колесного прыгающего робота при преодолении им лестничного пролета (при движении вверх по нему). Введены основные понятия перемещения по лестницам. В результате моделирования установлено, что энергия, затрачиваемая роботом на преодоление лестничных пролетов с разным числом ступеней, не имеет четкой зависимости от числа прыжков и перепрыгивае-

лестничный пролет лучше преодолевать за один прыжок.

мых при этом ступеней, а время прыжков плавно возрастает с увеличением числа p . В качестве оптимизируемых параметров прыжков рассмотрены затрачиваемая энергия и время преодоления лестничного пролета, выделены четыре области двух указанных параметров. Установлено, что, как правило, оптимальным является вариант преодоления лестничного пролета за один прыжок.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-31-00075.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zhang J., Yang X., Song G., Zhang Y., Fei S., Song A. Structural-parameter-based jumping-height-and-distance adjustment and obstacle sensing of a bio-inspired jumping robot // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2015. Vol. 12, № 6. P. 66.
- Shin Y.H., Ryu K., Kim T.J., Lee J.H., Choi J.Y., Yim C.H., Kim D.H. Mechanism and control of a jumping robot // *IEEE Intern. Conf. on Control, Automation and Systems*. Seoul, South Korea, 2007. P. 2499-2502.
- Lambrecht B.G.A., Horchler A.D., Quinn R.D. A small, insect-inspired robot that runs and jumps // *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain, 2005. P. 1240-1245.
- Kim D.H., Lee J.H., Kim I., Noh S.H., Oho S.K. Mechanism, control, and visual management of a jumping robot // *Mechatronics*. 2008. Vol. 18, № 10. P. 591-600.
- Zhao J., Yan W., Xi N., Mutka M.W., Xiao L. A miniature 25 grams running and jumping robot // *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. Hong Kong, China, 2014. P. 5115-5120.
- Яцун С.Ф., Ворочаева Л.Ю., Савин С.И. Исследование вопросов управления ориентацией колесного прыгающего робота в полете // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2019. № 4. С. 236-243.
- Ворочаева Л.Ю., Савин С.И. Исследование влияния на режимы разгона прыгающего робота параметров траектории его центра масс // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2018. № 3 (45). С. 22-30.
- Ворочаева Л.Ю., Мальчиков А.В., Савин С.И. Определение диапазонов допустимых значений геометрических параметров колесного прыгающего робота // *Известия ЮЗГУ*. 2018. Т. 22, № 1 (76). С. 76-84.
- Vorocheva L., Savin S. Study of the Acceleration Modes of a Jumping Robot for Two Cases of Realisation // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proc. IEEE Conf. Omsk, Russia, 2018*. P. 1-6.
- Kim D.H., Lee J.H., Kim I., Noh S.H., Oho S.K. Mechanism, control, and visual management of a jumping robot // *Mechatronics*. 2008. Vol. 18, № 10. P. 591-600.
- Zhao J., Yan W., Xi N., Mutka M.W., Xiao L. A miniature 25 grams running and jumping robot // *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. Hong Kong, China, 2014. P. 5115-5120.
- Yatsun S.F., Vorocheva L.Yu., Savin S.I. Investigations of problems in orientation control of wheel jumping robot during flight // *Mechatronics, Automation, Control*. 2019. No.4. pp. 236-243.
- Vorocheva L.Yu., Savin S.I. Investigation of robot mass center path parameters impact upon jumping robot acceleration // *Science Vector of Togliatti State University*. 2018. No.3 (45). pp. 22-30.

8. Vorochaeva L.Yu., Malchikov A.V., Savin S.I. Definition of allowable values range for geometrical parameters of wheel jumping robot // *Proceedings of SWSU*. 2018. Vol.22, No.1 (76). pp. 76-84.

9. Vorochaeva L., Savin S. Study of the Acceleration Modes of a Jumping Robot for Two Cases of Realisation // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proc. IEEE Conf. Omsk, Russia*, 2018. P. 1-6.

Ссылка для цитирования:

Ворочаева Л.Ю., Савин С.И., Мальчиков А.В. Исследование преодоления прыгающим роботом лестничного пролета // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 2. С. 53 –61. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-53-61.

Статья поступила в редакцию 16.11.19.

Рецензент: д.т.н., профессор Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева

Савин Л.А.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 09. 01. 20.

Сведения об авторах:

Ворочаева Людмила Юрьевна, к.т.н., доцент Юго-Западного государственного университета, e-mail: mila180888@yandex.ru.

Савин Сергей Игоревич, к.т.н., с.н.с. Университета Иннополис, e-mail: s.savin@innopolis.ru.

Vorochaeva Lyudmila Yurievna, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., South-Western State University, e-mail: mila180888@yandex.ru.

Savin Sergey Igorevich, Can. Sc. Tech., SSW, University of Innopolis, e-mail: s.savin@innopolis.ru.

Мальчиков Андрей Васильевич, к.т.н., доцент Юго-Западного государственного университета, e-mail: zveroknnp@gmail.com.

Malchikov Andrey Vasilievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., South-Western State University, e-mail: zveroknnp@gmail.com.