

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА РЕЖИМЫ РАЗГОНА ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ЕГО ЦЕНТРА МАСС

© 2018

Л.Ю. Ворочаева, кандидат технических наук,
доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники
С.И. Савин, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники
Юго-Западный государственный университет, Курск (Россия)

Ключевые слова: прыгающий робот; режимы разгона; время разгона; система управления; траектория центра масс.

Аннотация: Особенностью всех робототехнических систем, движущихся с периодическим отрывом от опорной поверхности, является наличие фазы полета, во время которой управлять движением робота и корректировать его траекторию крайне проблематично. Поэтому актуальной является задача обеспечения движения устройства во время разгона и его отрыва от поверхности с такими параметрами, чтобы система вела себя корректно во время полета. В данной работе эта задача решается путем формирования желаемой траектории центра масс робота во время разгона устройства.

Робот состоит из корпуса и разгонного модуля, образованного тремя звеньями, два из которых представляют поступательную пару, а другие соединены между собой и с корпусом посредством вращательных шарниров. Траектория центра масс робота во время разгона формируется таким образом, чтобы за требуемое время было достигнуто определенное численное значение скорости, вектор которой направлен под заданным углом к горизонту. Для обеспечения такой траектории движения разработана система управления с регулятором, построенным на линейном квадратичном программировании.

В результате проведенного численного моделирования установлено наличие шести режимов разгона при варьировании управляющих параметров: во время одних робот контактирует с поверхностью в двух опорных точках, которые либо неподвижны, либо скользят по поверхности; во время других происходит отрыв одной из двух опорных точек или опрокидывание устройства (в случае, когда отрыв точки опоры происходит в первые моменты разгона). Построены диаграммы режимов разгона, которые могут использоваться для определения диапазонов допустимых параметров прыгающего робота для осуществления разгона в требуемом режиме.

ВВЕДЕНИЕ

Многозвенные механизмы, движение которых сопряжено с периодической потерей контакта с опорной поверхностью, представляют как теоретический, так и практический интерес [1–3]. Среди таких механизмов можно особо выделить устройства, перемещающиеся посредством прыжков [4; 5]. В отличие от шагающих механизмов, сохраняющих контакт с опорной поверхностью в каждый момент времени, движение прыгающих роботов включает фазу полета, на протяжении которой возможности коррекции траектории робота ограничены [6–9]. В связи с этим особенно важным является точное управление роботом на протяжении фазы разгона и отрыва от опорной поверхности.

Данная задача усложняется тем, что характер отрыва от опорной поверхности зависит от динамики робота в процессе разгона: отрыв может начаться с обнуления одной или более нормальных реакций в точках контакта с опорной поверхностью или с проскальзывания робота вдоль опорной поверхности. Временной промежуток между началом отрыва от опорной поверхности и полной потерей контакта с ней также может варьироваться и зависит от динамики устройства. Это указывает на важность решения задачи управления прыгающим роботом на этапе разгона не только с точки зрения обеспечения заданной траектории движения центра масс, но и с позиции управления характером отрыва робота от опорной поверхности.

Задача управления многозвенным механизмом, осуществляющим периодическое контактное взаимодей-

ствие с опорной поверхностью, включает в себя следующие подзадачи: определение желаемых последовательностей точек контакта, задание желаемых траекторий звеньев или отдельных точек робота, определение задающих воздействий для системы управления роботом (решение обратной задачи кинематики), синтез и настройка регулятора. В этой работе остановимся на одной из этих подзадач – определении желаемой траектории движения центра масс робота.

Цель работы – выявление зависимостей между управляемыми параметрами, характеризующими разгон робота (направление скорости центра масс в процессе разгона и задаваемая желаемая скорость центра масс в момент отрыва), и характеристиками получаемого движения робота (время и режим отрыва от опорной поверхности).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА

В работе рассматривается прыгающий робот (рис. 1), состоящий из стопы 1, звеньев разгонного модуля 2 и 3 и корпуса 4 [10–12]. Движение робота происходит в вертикальной плоскости *Oxy*; поверхность, с которой осуществляется прыжок, является горизонтальной твердой шероховатой. Будем считать, что звенья стопы и разгонного модуля представляют собой абсолютно твердые стержни длинами l_i , а корпус имеет форму прямоугольника с размерами $a \times b$. Центры масс звеньев – точки C_i – одновременно являются и центрами их симметрии. Особенностью исследуемого робота является

то, что он симметричен относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс корпуса.

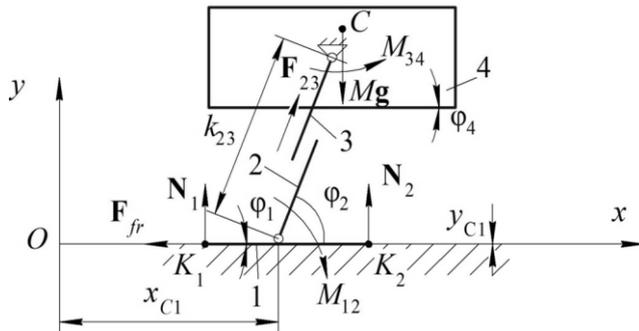


Рис. 1. Расчетная схема прыгающего робота

Звенья стопы и разгонного модуля, разгонного модуля и корпуса соединены между собой парами вращательного движения с установленными в них приводами, генерирующими моменты M_{12} и M_{34} , а непосредственно звенья разгонного модуля – парой поступательного движения с соответствующим приводом и создаваемой им силой F_{23} . Центр масс робота расположен в точке C с координатами $C(x_C, y_C)$, равными

$$x_C = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i x_{Ci}}{\sum_{i=1}^4 m_i},$$

$$y_C = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i y_{Ci}}{\sum_{i=1}^4 m_i}.$$

Масса робота

$$M = \sum_{i=1}^4 m_i.$$

В качестве обобщенных координат прыгающего робота будем рассматривать координаты x_{C1} и y_{C1} центра масс стопы, абсолютные углы поворота звеньев ϕ_1, ϕ_2 и ϕ_4 относительно оси Ox , отсчитываемые против часовой стрелки, а также длину разгонного модуля k_{23} . Вектор обобщенных координат q имеет вид:

$$q = (\phi_1, x_{C1}, y_{C1}, \phi_2, k_{23}, \phi_4)^T.$$

Взаимодействие робота с поверхностью осуществляется двумя крайними точками стопы – K_1 и K_2 . При этом положим, что в обеих точках возникают нормальные реакции N_1 и N_2 , а в одной точке K_1 – сила трения F_{fr} , описываемая моделью Кулона [13; 14].

$$F_{fr} = \begin{cases} -fN_1 \operatorname{sgn}(v_{K1}), & \text{если } v_{K1} \neq 0; \\ -F_0, & \text{если } v_{K1} = 0, |F_0| \leq fN_1; \\ -fN_1 \operatorname{sgn}(F_0), & \text{если } v_{K1} = 0, |F_0| > fN_1. \end{cases}$$

где F_0 – горизонтальная проекция равнодействующей всех сил, кроме силы сухого трения, приложенных к точке контакта;

f – коэффициент трения скольжения;

N_1 – нормальная реакция в точке K_1 ;

v_{K1} – скорость точки K_1 .

Здесь рассматривается случай, когда сила трения действует лишь в одной точке контакта. Это позволяет решить задачу определения реакций опоры аналитически, получив одно возможное решение. В общем случае силы трения могут действовать в нескольких точках контакта или быть распределенными.

РЕЖИМЫ РАЗГОНА

Разгон робота осуществляется следующим образом. В начальный момент разгона робот находится в положении, аналогичном показанному на рис. 1, $\phi_2=90^\circ$. Разгон происходит за счет движения поступательной пары под действием силы F_{23} , при этом разгонный модуль поворачивается моментом M_{12} на требуемый угол ϕ_2^0 осуществления прыжка, а корпус разворачивается моментом M_{34} таким образом, чтобы его ориентация относительно поверхности оставалась неизменной, т. е. $\phi_4=0$. Разгон осуществляется в течение интервала времени t_r , к моменту завершения которого поступательная пара достигает своей наибольшей длины $k_{23} = k_{23}^{\max}$, центр масс приобретает скорость v_C , вектор которой направлен под углом θ_C к оси Ox . После этого происходит удар звеньев робота друг о друга и отрыв устройства от поверхности. В данной работе рассматривается движение робота от начала разгона до момента удара звеньев.

Разгон робота может происходить как при контакте с поверхностью двух опорных точек, так и при отрыве одной из них, причем контактные точки могут оставаться неподвижными или скользить вдоль опорной поверхности. Возможные режимы разгона приведены на рис. 2.

В таблице 1 приведены условия осуществления каждого из режимов разгона робота, а также связи, накладываемые при этом на систему, и вектор обобщенных координат.

Будем считать, что в случае, когда происходит отрыв точки K_1 , точка приложения силы трения перемещается в оставшуюся контактную точку K_2 (рис. 3).

Запишем формулы для вычисления нормальных реакций и проекции равнодействующей всех сил на ось Ox для рассмотренных вариантов разгона.

При двух контактных точках (режимы 1 и 2) нормальные реакции вычисляются по формулам [15]:

$$N_1 = Mg \frac{x_{K1K2} - x_{CK1}}{x_{K1K2}} - \sum_{i=3}^4 m_i \ddot{y}_{Ci} \frac{x_{K1K2} - x_{CiK1}}{x_{K1K2}} - \sum_{i=3}^4 m_i \ddot{x}_{Ci} \frac{y_{CiK1}}{x_{K1K2}},$$

$$N_2 = \frac{1}{x_{K1K2}} \left(Mg x_{CK1} + \sum_{i=3}^4 m_i \ddot{x}_{Ci} y_{CiK1} - \sum_{i=3}^4 m_i \ddot{y}_{Ci} x_{CiK1} \right),$$

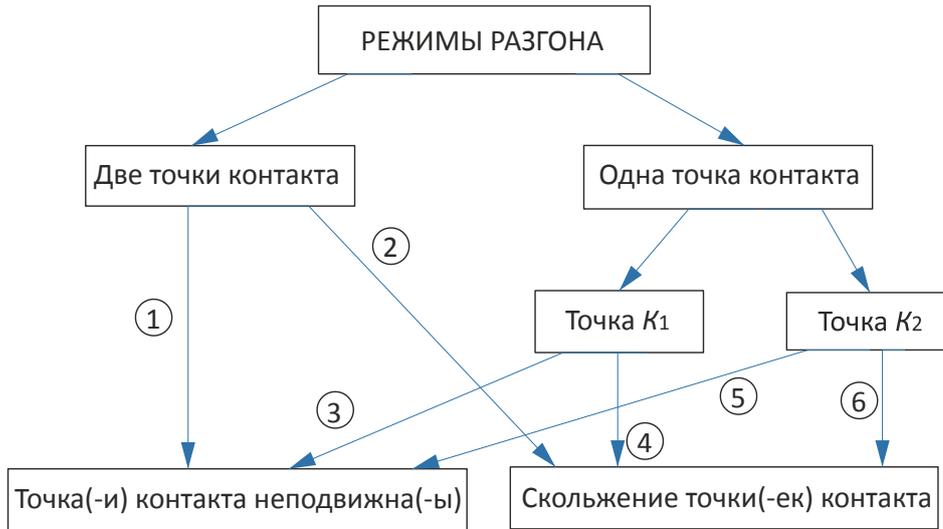


Рис. 2. Возможные режимы разгона прыгающего робота

Таблица 1. Режимы разгона прыгающего робота

1. Разгон при двух неподвижных точках контакта		
$(N_1 > 0) \wedge (N_2 > 0) \wedge (F_0 \leq fN_1)$	$x_{C1} = \text{const}, y_{C1} = \text{const}, \varphi_1 = \text{const}$	$\mathbf{q} = (\varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$
2. Разгон при двух точках контакта, скользящих по поверхности		
$(N_1 > 0) \wedge (N_2 > 0) \wedge (F_0 > fN_1)$	$y_{C1} = \text{const}, \varphi_1 = \text{const}$	$\mathbf{q} = (x_{C1}, \varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$
3. Разгон при одной неподвижной точке контакта K_1		
$(N_1 > 0) \wedge (N_2 = 0) \wedge (F_0 \leq fN_1)$	$x_{K1} = \text{const}, y_{K1} = \text{const}, x_{C1} = f(\varphi_1), y_{C1} = f(\varphi_1)$	$\mathbf{q} = (\varphi_1, \varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$
4. Разгон при одной точке контакта K_1 , скользящей по поверхности		
$(N_1 > 0) \wedge (N_2 = 0) \wedge (F_0 > fN_1)$	$y_{K1} = \text{const}, y_{C1} = f(\varphi_1)$	$\mathbf{q} = (\varphi_1, x_{C1}, \varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$
5. Разгон при одной неподвижной точке контакта K_2		
$(N_1 = 0) \wedge (N_2 > 0) \wedge (F_0 \leq fN_2)$	$x_{K2} = \text{const}, y_{K2} = \text{const}, x_{C1} = f(\varphi_1), y_{C1} = f(\varphi_1)$	$\mathbf{q} = (\varphi_1, \varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$
6. Разгон при одной точке контакта K_2 , скользящей по поверхности		
$(N_1 = 0) \wedge (N_2 > 0) \wedge (F_0 > fN_2)$	$y_{K2} = \text{const}, y_{C1} = f(\varphi_1)$	$\mathbf{q} = (\varphi_1, x_{C1}, \varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$

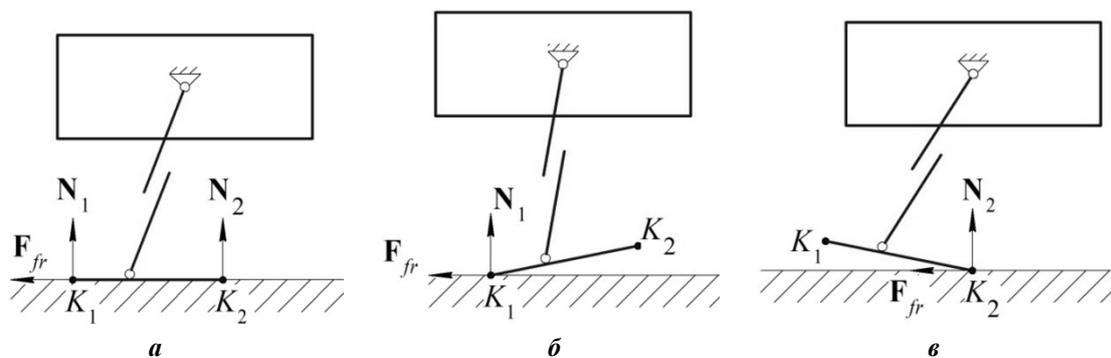


Рис. 3. Варианты контактного взаимодействия стопы робота с опорной поверхностью: а – две точки контакта; б – одна точка контакта K_1 ; в – одна точка контакта K_2

где \ddot{x}_{Ci} , \ddot{y}_{Ci} – проекции ускорения центра масса i -го звена на оси Ox и Oy ;

x_{K1K2} , x_{CK1} , x_{CK1} – расстояния между точками K_2 , C , C_i и K_1 вдоль оси Ox ;

y_{CK1} – расстояния между точками C_i и K_1 вдоль оси Oy .

Сила трения покоя $F_{fр}$ записывается следующим образом:

$$F_{fр} = \sum_{i=3}^4 m_i \ddot{x}_{Ci}.$$

При одной точке контакта K_1 (режимы 3 и 4) или K_2 (режимы 5 и 6) получим

$$N_1(N_2) = Mg - \sum_{i=1}^4 m_i \ddot{y}_{Ci},$$

сила трения покоя $F_{fр}$ при этом вычисляется по ранее приведенной формуле.

Приведенные режимы разгона робота можно сгруппировать следующим образом:

- 1) разгон при неподвижно расположенной на поверхности стопе;
- 2) разгон при скольжении стопы по поверхности;
- 3) разгон при отрыве точки K_1 стопы от поверхности;
- 4) разгон при отрыве точки K_2 стопы от поверхности.

Приемлемыми для реализации будем считать только те режимы разгона, при которых контакт стопы с поверхностью происходит в двух точках, так как в противном случае робот может неконтролируемо менять свою ориентацию до отрыва от поверхности, причем точное измерение его ориентации в таком режиме движения становится относительно сложной задачей. Отсутствие или наличие скольжения робота при одной точке контакта с поверхностью в данном случае несущественно, поэтому при проведении моделирования разгона робота будем отслеживать именно эти четыре режима разгона.

ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Определение задающих воздействий

Рассмотрим случай, когда желаемая траектория центра масс робота задана полиномиальной функцией:

$$\mathbf{r}_C^*(t) = \begin{bmatrix} \sum_{p=1}^n a_{p,x} t^p \\ \sum_{p=1}^n a_{p,y} t^p \end{bmatrix},$$

где $a_{i,x}$, $a_{i,y}$ – постоянные коэффициенты.

Эти коэффициенты будем находить, используя два краевые условия: заданное начальное положение центра масс $\mathbf{r}_C^*(0)$ и заданную конечную скорость центра масс $\dot{\mathbf{r}}_C^*(t_f)$, которую будем задавать ее модулем v_C и ориентацией θ_C :

$$\dot{\mathbf{r}}_C^*(t_f) = \begin{bmatrix} v_C \cos \theta_C \\ v_C \sin \theta_C \end{bmatrix}.$$

Для нахождения временных зависимостей обобщенных координат, позволяющих реализовать желаемую траекторию центра масс робота, будем использовать алгоритмы решения обратной задачи кинематики, описанные в работе [16]. Решением обратной задачи кинематики являются желаемые временные зависимости обобщенных координат $\mathbf{q}^*(t)$, использующиеся в качестве задающих воздействий системой автоматического управления. Рис. 4 а показывает временные зависимости $\mathbf{q}^*(t)$ для случая, когда $v_C=3$ м/с, $t_f=2$ с, $\alpha\theta_C=88^\circ$.

Из рис. 4 а видно, что основной объем движения производится линейным приводом разгонного модуля (зависимость $q_4(t)$) и приводом поворота разгонного модуля относительно стопы (зависимость $q_5(t)$). Обе кинематические пары реализуют движение с ненулевым начальным ускорением; движения такого типа создают повышенные требования к быстродействию системы управления, в частности, они требуют возможности быстрого изменения управляющих воздействий.

Описание регулятора

На этапе разгона рассматриваемый робот представляет собой механическую систему с контактным взаимодействием с опорной поверхностью, что означает, что на его уравнения движения наложены механические связи. В данном случае будем полагать, что уравнения движения робота записаны с использованием набора обобщенных координат \mathbf{q} , а механические связи заданы в явном виде. Для того чтобы управлять такими механическими системами, разработан ряд методов, некоторые из которых приведены в работах [17; 18]. Одним из удобных подходов к управлению такими системами является использование модификаций линейного квадратичного регулятора [19; 20]. Здесь будем использовать регулятор такого типа. Общий вид регулятора представлен выражением

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* - \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{q} - \mathbf{q}^* \\ \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}^* \end{bmatrix},$$

где \mathbf{u}^* – значение управляющего воздействия, получаемое решением обратной задачи динамики;

\mathbf{K} – матрица коэффициентов регулятора, получаемая решением алгебраического уравнения Риккати, преобразованного с учетом действия механических связей [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализ работы системы управления

Рассмотрим результаты численного моделирования движения робота. На рис. 4 б приведены временные зависимости обобщенных координат $\mathbf{q}(t)$, найденные в результате математического моделирования.

Сравнивая результаты, показанные на рис. 4 а и 4 б, можно сделать вывод, что система управления обрабатывает задающие воздействия достаточно точно. При этом следует заметить, что результаты, показанные на рис. 4 б, охватывают лишь часть временного промежутка, показанного на рис. 4 а. Это связано с тем, что моделирование прерывается, как только робот начинает осуществлять отрыв от поверхности, что происходит до того, как центр масс робота обрабатывает всю заданную для него траекторию.

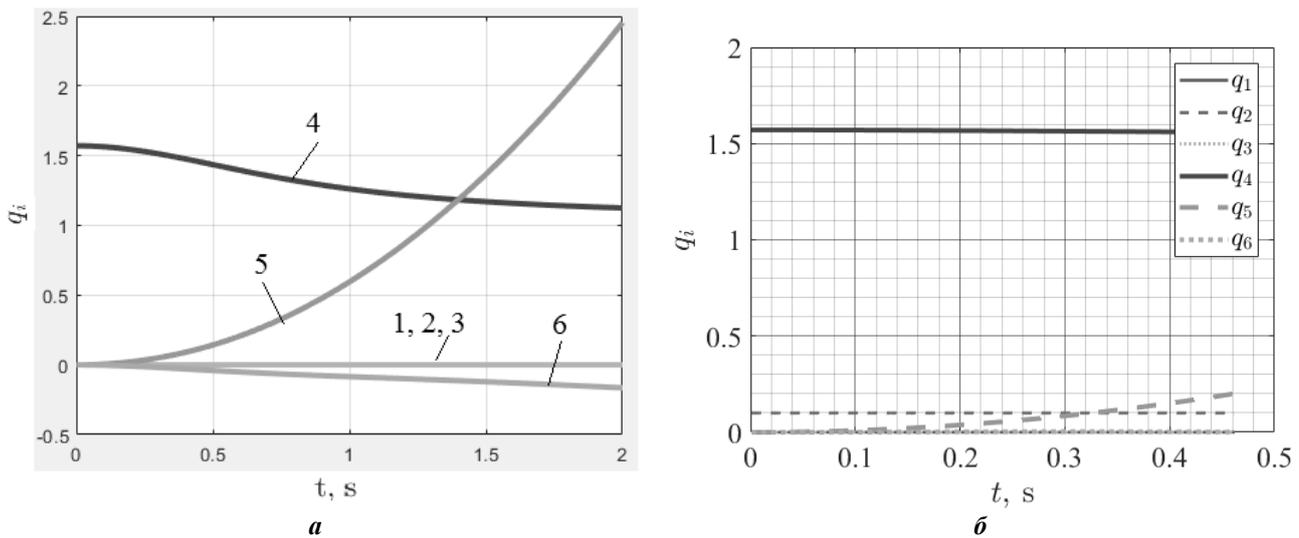


Рис. 4. Временные зависимости обобщенных координат:

a – полученные решением обратной задачи кинематики, номер графика соответствует индексу обобщенной координаты; *б* – полученные путем численного интегрирования уравнений движения устройства

Исследование режимов разгона

Рассмотрим, как параметры v_c и θ_c влияют на время T разгона робота, под которым будем понимать время, необходимое устройству для полного раздвижения поступательной пары, или обнуления одной из двух нормальных реакций в контактных точках, или появления проскальзывания опор по поверхности, что может быть записано следующим образом:

$$t = T, (k_{23} = k_{23}^{\max}) \vee (N_1 = 0) \vee (N_2 = 0) \vee (|F_{fr}| > F_0).$$

На рис. 5 *a–в* и рис. 6 *a–в* показаны зависимости $T(\theta_c)$ при трех значениях скорости v_c для двух различных вариантов времени t_r , в течение которого эта скорость должна быть достигнута, а также для двух значений длины стопы l_1 . А на рис. 5 *г–е* и рис. 6 *г–е* показаны режимы разгона робота, где приняты следующие обозначения:

- 1 – разгон при двух точках опоры стопы без проскальзывания;
- 2 – разгон при двух точках стопы с проскальзыванием;
- 3 – разгон при отрыве точки K_1 ;
- 4 – разгон при опрокидывании точки K_1 ;
- 5 – разгон при отрыве точки K_2 ;
- 6 – разгон при опрокидывании точки K_2 .

Опрокидыванием опорной точки будем называть обнуление ее нормальной реакции в начале разгона (на выбранном начальном временном промежутке $0 \leq t \leq 0,005$ с), а отрывом – обнуление нормальной реакции, возникающее после окончания начала разгона.

Отметим, что графики рис. 5, рис. 6 симметричны относительно угла $\theta_c = 90^\circ$; это означает, что при прыжке влево и вправо вдоль оси Ox робот во время разгона ведет себя одинаково, что обусловлено симметричностью его конструкции относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс корпуса.

По приведенным графикам видно, что при малой длине стопы и малом времени t_r при очень узком диапа-

зоне углов $\theta_c \approx 90^\circ$ разгон завершается при $T \approx 0,4$ с при выполнении условия $k_{23} = k_{23}^{\max}$, причем по мере роста скорости центра масс это время сокращается: $T > 0,4$ с при $v_c = 3$ м/с; $T = 0,4$ с при $v_c = 4$ м/с; $T < 0,4$ с при $v_c = 5$ м/с. При диапазонах углов $10^\circ \leq \theta_c \leq 70^\circ$ и $\approx 110^\circ \leq \theta_c \leq 170^\circ$ время разгона $T = 0$ с. Это означает, что, как только робот начинает движение, происходит обнуление одной из нормальных реакций (при $10^\circ \leq \theta_c \leq 70^\circ$ – реакции N_1 , а при $\approx 110^\circ \leq \theta_c \leq 170^\circ$ – реакции N_2) и опрокидывание устройства. Это обусловлено малым временем достижения скорости v_c , приводящим к большим значениям угловой скорости $\dot{\phi}_2$, а также низкой устойчивостью робота за счет малой длины стопы. Диапазон углов θ_c , при которых наблюдается опрокидывание робота, расширяется по мере увеличения значения v_c . В оставшихся диапазонах углов время разгона мало и при приближении θ_c к 90° плавно возрастает до 0,5–1 с, в этих случаях разгон завершается также при обнулении одной из двух нормальных реакций, но не мгновенно, что подтверждается графиками режимов разгона на рис. 5 *г–е*.

Режим проскальзывания в данном случае отсутствует, но при увеличении времени t_r и длины стопы l_1 появляется и наблюдается при малых углах наклона вектора v_c к горизонту, что видно по рис. 6. Помимо этого соответствующие графики иллюстрируют, что увеличение времени, необходимого для достижения скорости v_c , и уменьшение ее значения приводят к тому, что режимы опрокидывания и отрыва контактных точек перестают существовать, а режим разгона робота при двух неподвижных точках опоры наблюдается при более широком диапазоне углов θ_c . При $v_c = 1$ м/с этот диапазон составляет $10^\circ \leq \theta_c \leq 170^\circ$, при $v_c = 2$ м/с – $20^\circ \leq \theta_c \leq 160^\circ$, а при $v_c = 3$ м/с – $30^\circ \leq \theta_c \leq 150^\circ$, т. е. данный диапазон углов незначительно сокращается по мере увеличения значения v_c .

Для большей наглядности зависимостей режимов разгона робота от значений управляющих параметров,

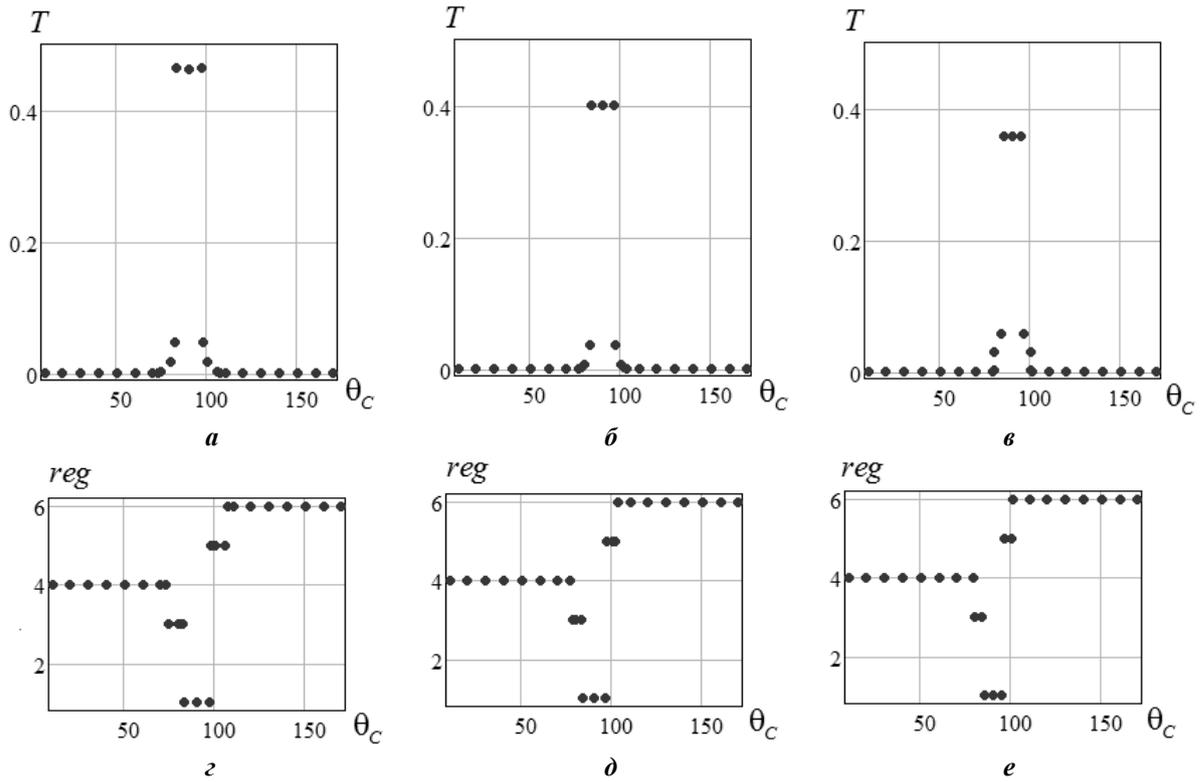


Рис. 5. Результаты математического моделирования при $t_r=2$ с, $l_1=0,1$ м:
а-в – графики $T(\theta_C)$; д-е – режимы разгона; а, д – $v_C=3$ м/с; б, е – $v_C=4$ м/с; в, е – $v_C=5$ м/с

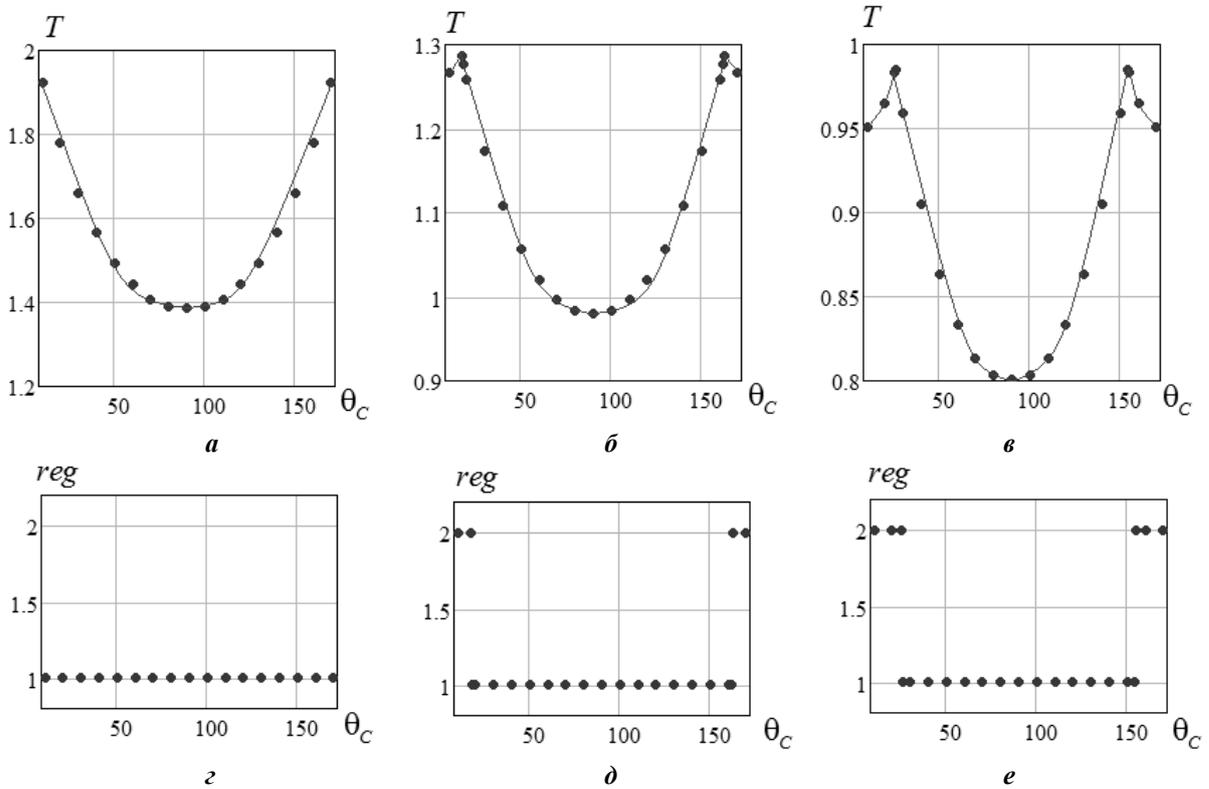


Рис. 6. Результаты математического моделирования при $t_r=6$ с, $l_1=0,4$ м:
а-в – графики $T(\theta_C)$; д-е – режимы разгона; а, д – $v_C=1$ м/с; б, е – $v_C=2$ м/с; в, е – $v_C=3$ м/с

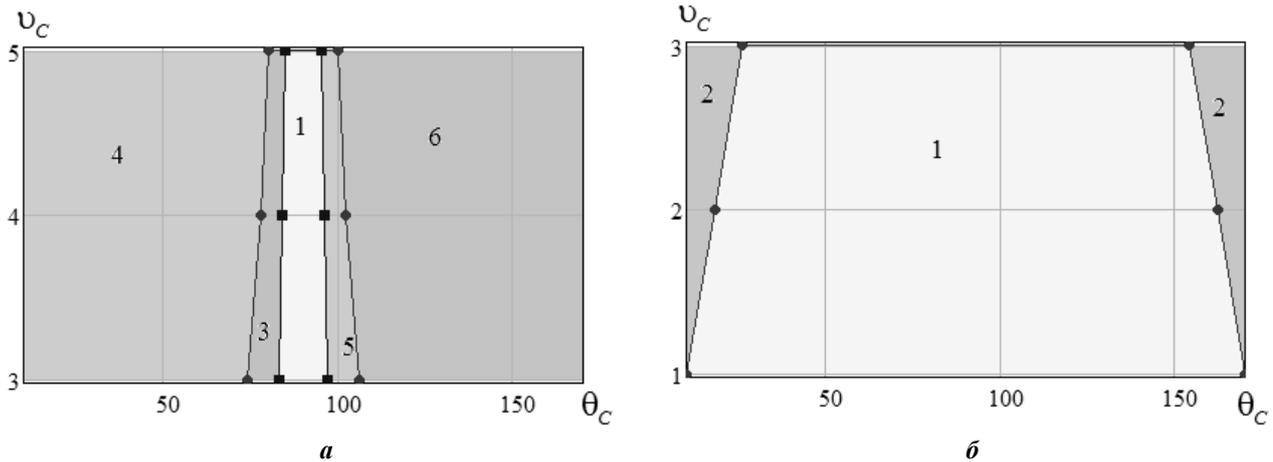


Рис. 7. Диаграммы режимов разгона $v_C(\theta_C)$: а – $t_r=2$ с, $l_1=0,1$ м; б – $t_r=6$ с, $l_1=0,4$ м

к которым относятся значение скорости v_C , угол θ_C наклона ее вектора к горизонту, а также время t_r достижения этой скорости, на рис. 7 представлены диаграммы режимов разгона.

Данные диаграммы будут востребованы при определении областей допустимых параметров робота, при которых его разгон происходит без отрыва одной из контактных точек или при отсутствии проскальзывания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Для реализации управляемого движения прыгающих роботов важно иметь возможность управлять режимами их разгона. В работе было продемонстрировано, что режимы контактного взаимодействия прыгающих роботов и опорной поверхности могут меняться в зависимости от выбранных параметров разгона. Удалось установить области параметров разгона робота (желаемой скорости центра масс и угла, задающего направление этой скорости), реализующие различные режимы контактного взаимодействия. Одним из важных результатов является то, что область параметров, реализующих режим разгона при наличии двух точек опоры стопы без проскальзывания, в значительной степени зависит от выбора длины стопы, а также от выбора времени разгона. Это указывает на то, что выбор конструктивных параметров и параметров системы управления прыгающего робота может производиться путем задания таких значений этих величин, которые бы обеспечивали требуемую форму областей параметров разгона. При некорректном выборе длины стопы или времени разгона область параметров, соответствующая желаемому режиму работы робота, может стать слишком малой для реализации прыжков в заданном направлении. Также удалось установить зависимость между моментом отрыва робота и величиной и направлением желаемой скорости центра масс в момент отрыва. Данная зависимость имеет гладкий участок и точки разрыва, причем положение этих точек также связаны с упомянутыми выше конструктивными параметрами робота и параметрами его системы управления.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovač M., Fuchs M., Guignard A., Zufferey J.C., Floreano D. A miniature 7g jumping robot // Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2008. P. 373–378.
2. Zaitsev V., Gvirzman O., Hanan U.B., Weiss A., Ayali A., Kosa G. A locust-inspired miniature jumping robot // Bioinspiration & biomimetics. 2015. Vol. 10. № 6. P. 066012.
3. Niiyama R., Nagakubo A., Kuniyoshi Y. Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system // Proceeding – IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2007. P. 2546–2551.
4. Noh M., Kim S.-W., An S., Koh J.-S., Cho K.-J. Flea-inspired catapult mechanism for miniature jumping robots // IEEE Transactions on Robotics. 2012. Vol. 28. № 5. P. 1007–1018.
5. Kovač M., Fauria O., Zufferey J.C., Floreano D. The EPFL jumpglider: A hybrid jumping and gliding robot with rigid or folding wings // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2011. P. 1503–1508.
6. Яцун С.Ф., Ворочаева Л.Ю. Исследование высоты и дальности полета прыгающего робота с системой крыльев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 3. С. 116–123.
7. Яцун С.Ф., Рукавицын А.Н., Волкова Л.Ю. Исследование динамики управляемого прыжка робота // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4-5. С. 1355–1358.
8. Ворочаева Л.Ю., Яцун С.Ф. Математическое моделирование управляемого движения колесного пятизвенного прыгающего робота // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. № 4. С. 68–93.
9. Волкова Л.Ю., Яцун С.Ф. Моделирование движения многозвенного прыгающего робота и исследование его характеристик // Известия РАН. Теория и системы управления. 2013. № 4. С. 137–149.
10. Волкова Л.Ю., Яцун С.Ф. Изучение влияния положения точки закрепления ноги прыгающего робота в корпусе на характер движения устройства // Нелинейная динамика. 2013. Т. 9. № 2. С. 327–342.

11. Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Этапы движения четырехзвенного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 181. С. 109–118.
12. Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Исследование режимов разгона четырехзвенного прыгающего аппарата // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 24. С. 86–92.
13. Bolotnik N., Pivovarov M., Zeidis I., Zimmermann K. Dynamics and Control of a Two-Module Mobile Robot on a Rough Surface // *Mechanisms and Machine Science*. 2014. Vol. 22. P. 141–148.
14. Ворочаева Л.Ю., Яцун А.С., Яцун С.Ф. Моделирование движения пятизвенного ползающего робота с управляемым трением по поверхности с препятствиями // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 191–216.
15. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 304 с.
16. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Методы управления движением шагающих внутритрубных роботов // *Cloud of Science*. 2018. Т. 5. № 1. С. 163–195.
17. Caron S., Pham Q.-C., Nakamura Y. Leveraging Cone Double Description for Multi-contact Stability of Humanoids with Applications to Statics and Dynamics // *Robotics: Science and Systems*. 2015. Vol. 11. P. 1–9.
18. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–6.
19. Mason S., Rotella N., Schaal S., Righetti L. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints // *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. 2016. P. 63–68.
20. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Modification of Constrained LQR for Control of Walking in-pipe Robots // 11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics). 2017. P. 1–6.
21. Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Этапы движения четырехзвенного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 181. С. 109–118.
22. Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Исследование режимов разгона четырехзвенного прыгающего аппарата // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 24. С. 86–92.
23. Bolotnik N., Pivovarov M., Zeidis I., Zimmermann K. Dynamics and Control of a Two-Module Mobile Robot on a Rough Surface // *Mechanisms and Machine Science*. 2014. Vol. 22. P. 141–148.
24. Ворочаева Л.Ю., Яцун А.С., Яцун С.Ф. Моделирование движения пятизвенного ползающего робота с управляемым трением по поверхности с препятствиями // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 191–216.
25. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 304 с.
26. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Методы управления движением шагающих внутритрубных роботов // *Cloud of Science*. 2018. Т. 5. № 1. С. 163–195.
27. Caron S., Pham Q.-C., Nakamura Y. Leveraging Cone Double Description for Multi-contact Stability of Humanoids with Applications to Statics and Dynamics // *Robotics: Science and Systems*. 2015. Vol. 11. P. 1–9.
28. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–6.
29. Mason S., Rotella N., Schaal S., Righetti L. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2016, pp. 63–68.
30. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Modification of Constrained LQR for Control of Walking in-pipe Robots. *11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics)*, 2017, pp. 1–6.
31. Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu. A study of the height and length of the jumping robot with a system of wings. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii*, 2016, no. 3, pp. 116–123.
32. Yatsun S.F., Rukavitsyn A.N., Volkova L.Yu. Research of the operated robot dynamics. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, vol. 14, no. 4-5, pp. 1355–1358.
33. Vorochaeva L.Yu., Yatsun S.F. Mathematical simulation of the controlled motion of the five-link wheeled jumping robot. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2015, vol. 54, no. 4, pp. 567–592.
34. Volkova L.Yu., Yatsun S.F. Simulation of motion of a multilink jumping robot and investigation of its characteristics. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2013, vol. 52, no. 4, pp. 637–649.
35. Volkova L.Yu., Yatsun S.F. Studying of regularities of movement of the jumping robot at various positions of a point of fixing of foot. *Nelineynaya dinamika*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 327–342.
36. Yatsun S.F., Loktionova O.G., Volkova L.Yu., Vorochaev A.V. Stages of movement of the four-link jumping robot. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2013, no. 181, pp. 109–118.
37. Jatsun S.F., Volkova L.Yu., Vorochaev A.V. Investigation of acceleration modes of the four-link jumping device. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 19, no. 24, pp. 86–92.
38. Bolotnik N., Pivovarov M., Zeidis I., Zimmermann K. Dynamics and Control of a Two-Module Mobile Robot on a Rough Surface. *Mechanisms and Machine Science*, 2014, vol. 22, pp. 141–148.
39. Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Yatsun S.F. Simulation of the motion of a five-link crawling robot with controlled friction on a surface having obstacles. *Journal of Computer and Systems Science International*, 2017, vol. 56, no. 3, pp. 527–552.
40. Zhuravlev V.F. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki* [Fundamentals of theoretical mechanics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008. 304 p.
41. Savin S.I., Vorochaev L.Yu. Control methods for in-pipe walking robots. *Cloud of Science*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 163–195.
42. Caron S., Pham Q.-C., Nakamura Y. Leveraging Cone Double Description for Multi-contact Stability of Humanoids with Applications to Statics and Dynamics. *Robotics: Science and Systems*, 2015, vol. 11, pp. 1–9.
43. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2017, pp. 1–6.
44. Mason S., Rotella N., Schaal S., Righetti L. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2016, pp. 63–68.
45. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Modification of Constrained LQR for Control of Walking in-pipe Robots. *11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics)*, 2017, pp. 1–6.

REFERENCES

1. Kovač M., Fuchs M., Guignard A., Zufferey J.C., Floreano D. A miniature 7g jumping robot. *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2008, pp. 373–378.
2. Zaitsev V., Gvirsmann O., Hanan U.B., Weiss A., Ayali A., Kosa G. A locust-inspired miniature jumping robot. *Bioinspiration & biomimetics*, 2015, vol. 10, no. 6, p. 066012.
3. Niiyama R., Nagakubo A., Kuniyoshi Y. Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system. *Proceeding – IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 2546–2551.
4. Noh M., Kim S.-W., An S., Koh J.-S., Cho K.-J. Flea-inspired catapult mechanism for miniature jumping robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, vol. 28, no. 5, pp. 1007–1018.
5. Kovač M., Fauria O., Zufferey J.C., Floreano D. The EPFL jumpglider: A hybrid jumping and gliding robot with rigid or folding wings. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011, pp. 1007–1018.

**THE STUDY OF INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF MASS CENTER TRAJECTORY
OF A JUMPING ROBOT ON ITS ACCELERATION MODES**

© 2018

L.Yu. Vorochaeva, PhD (Engineering), assistant professor of Chair of Mechanics, Mechatronics and Robotics

S.I. Savin, PhD (Engineering), senior researcher of Chair of Mechanics, Mechatronics and Robotics

Southwest State University, Kursk (Russia)

Keywords: jumping robot; acceleration modes; acceleration time; control system; mass center trajectory.

Abstract: The characteristic property of all robotic systems moving with the repeated liftoff from the support surface is the flight phase when it is extremely difficult to control the movement of a robot and correct its trajectory. Therefore, it is relevant to ensure the movement of a device during acceleration and its liftoff from the surface with such parameters that the system behaves properly during the flight. The authors of the paper solved this issue by the formation of the desired trajectory of the robot's mass center during the acceleration of the device.

The robot consists of a body and acceleration module formed by three elements, two of which are a sliding pair and the other are connected to each other and to the body by means of rotary joints. The trajectory of the robot's mass center during the acceleration is formed in such a way that, during the required time, the certain numerical value of velocity is achieved, the vector of which is directed at the specified angle to the horizon. To provide such a trajectory of movement, the authors developed the control system with the controller built on the linear quadratic programming.

In the result of numerical simulation, six acceleration modes when varying the control parameters are determined: during some of them, a robot contacts the surface in two supporting points that are either stationary or sliding along the surface; during the other, the liftoff of one of the two supporting points or the tilting of the device (in the case when the liftoff of a supporting point takes place at the first moments of acceleration) takes place. The authors drew the diagrams of the acceleration modes that can be used to determine the ranges of permissible parameters of a jumping robot for accelerating in the required mode.