

УДК 62-503.5

ДИНАМИКА ПРИЗЕМЛЕНИЯ ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА

Пановко Г.Я., Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Волкова Л.Ю., Серебровский В.В.

ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», Курск, e-mail: teormeh@inbox.ru

Представлены конструктивная и расчетная схемы четырехзвеного прыгающего робота, два звена которого представляют собой стопу и корпус соответственно, а два другие образуют телескопическую ногу. Звенья стопы и ноги, ноги и корпуса могут поворачиваться друг относительно друга при помощи приводов, звенья ноги – совершать линейное относительное движение. Разработана математическая модель движения робота во время одного прыжка, который представляет собой последовательность этапов, характеризующихся определенными видами движения звеньев, записаны дифференциальные уравнения движения робота в матричной форме. В качестве модели силы трения, описывающей взаимодействие звеньев робота с поверхностью, используется модель Кулона. Приведены результаты влияния параметров позиционирования и разгона, точки закрепления звена ноги в корпусе устройства, на динамику его приземления после прыжка, построены диаграммы точек приземления, а также временные зависимости угла поворота корпуса робота в полете.

Ключевые слова: прыгающий робот, этапы прыжка, диаграммы приземления

DYNAMICS OF THE LANDING OF THE FOUR-LINK JUMPING ROBOT

Panovko G.Y., Yatsun S.F., Loktionova O.G., Volkova L.Y., Serebrovsky V.V.

South-West State University, Kursk, e-mail: teormeh@inbox.ru

Constructive and settlement schemes of the four-link jumping robot which two links represent foot and the body respectively and two others form a telescopic leg are submitted. Links of foot and leg, leg and the body can turn from each other by means of drives, leg links to make linear relative movement. The mathematical model of movement of the robot during one jump which represents sequence of the stages, being characterized by certain types of movement of links is developed, the differential equations of movement of the robot in a matrix form are written down. As model of friction force describing interaction of links of the robot with a surface, the Coulomb model is used. Results of influence of parameters of positioning and lift-off, point of fixing of a link of a leg in the device body on dynamics of its landing after a jump are given, diagrams of points of a landing and also temporary dependences of an angle of rotation of the body of the robot in flight are constructed.

Keywords: jumping robot, stages of the jump, diagrams of landing

Большинство роботов, перемещающихся с отрывом от поверхности, также называемых прыгающими, в качестве модуля, разгоняющего устройство и позволяющего отрываться от поверхности, используют ногу, состоящую из нескольких звеньев, которые могут образовывать пары вращательного или поступательного движения [6–11]. Приземление прыгающих роботов может происходить как на ногу, так и на корпус, в первом случае нога должна изготавливаться с учетом ударных нагрузок при приземлении, а во втором этого не требуется, нога может быть достаточно легкой и менее прочной, корпус устройства при этом чаще всего оснащается упруго-вязкими элементами для гашения удара.

В работе представлен прыгающий робот, технология прыжка которого основывается на втором случае, т.е. разгон осуществляется при помощи ноги, а приземление происходит на корпус. Особенностью исследуемого робота является то, что нога может поворачиваться внутри корпуса на любой требуемый угол, когда последний взаимодействует с поверхностью, это означает, что независимо от стороны корпуса, на которую произойдет приземление, робот

сможет совершить следующий прыжок под необходимым углом к горизонту.

Целью данной работы является выявление влияния параметров робота на условия приземления, т.е. на точки корпуса, которые будут находиться на поверхности после прыжка объекта и с которых будет проходить следующий прыжок.

Описание прыгающего робота

Исследуемый четырехзвеновый прыгающий робот состоит из звеньев 1–4, звено 1 которого является стопой, звенья 2 и 3 представляют собой телескопическую ногу, а звено 4 – корпус (рис. 1, а). Приводы 5 и 6, установленные на звеньях 4 и 2 соответственно, обеспечивают повороты звеньев 3 и 1 относительно звеньев 4 и 2. Привод 7, закрепленный на звене 2, позволяет звеньям 2 и 3 поступательно перемещаться друг относительно друга. Привод 7 включает в себя двигатель 8, жестко связанный с ним кулачок 9, и пружины 10. Взвод пружин осуществляется кулачком, а их подвижные концы соединены со звеном 2 ноги. Робот периодически контактирует с горизонтальной опорной поверхностью [2, 4, 5].

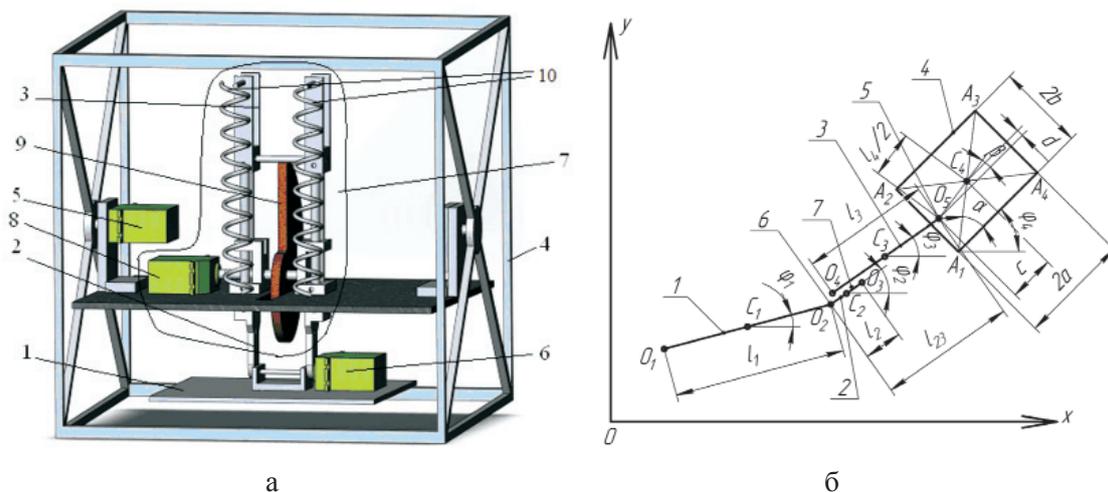


Рис. 1. Прыгающий робот:
а – конструктивная схема; б – расчетная схема

Каждый прыжок объекта представляет собой последовательность этапов, характеризующихся определенными видами движения звеньев [3]. В начальный момент времени корпус робота находится на поверхности, звенья 1–3 втянуты в него и зафиксированы под произвольными углами. На первом этапе происходит поворот звеньев 1–3, жестко связанных между собой, приводом 5 относительно точки закрепления в корпусе до достижения некоторого заданного значения угла φ_2^0 наклона звена 2 к поверхности. После чего на втором этапе звено 1 поворачивается приводом 6 на угол, при котором оно будет параллельно поверхности. На следующем (третьем) этапе наблюдается перемещение звеньев 1 и 2 приводом 7 до взаимодействия звена 1 с поверхностью, после чего (четвертый этап) происходит разгон звеньев 3 и 4 тем же приводом до отрыва звена 1 от поверхности, звенья робота при этом приобретают скорость \dot{l}_{23}^0 . Полет робота, характеризующийся отсутствием взаимодействия всех точек объекта с поверхностью, соответствует пятому этапу, при этом звенья 1 и 2 полностью втягиваются в корпус силой F_{23}^5 , генерируемой приводом 7. Этап приземления (шестой этап) наступает, когда одна или две точки корпуса начнут контактировать с поверхностью, после чего происходит позиционирование объекта (седьмой этап) до тех

пор, пока две точки корпуса не будут взаимодействовать с поверхностью. После этого прыжок завершится. Значения моментов и силы, создаваемых приводами 5–7, будем считать постоянными на каждом из этапов прыжка, а временные интервалы этапов – переменными, что позволяет роботу реализовывать прыжки под разными углами к горизонту и с разной начальной скоростью.

Математическая модель прыгающего робота

Расчетная схема исследуемого робота приведена на рис. 1, б. Введем абсолютную неподвижную систему координат Oxy , в которой будем рассматривать прыжок устройства с горизонтальной шероховатой поверхности, совпадающей с осью Ox . Положим, что звенья 1–4 представляют собой абсолютно твердые тела, причем звенья 1–3 являются стержнями длинами l_p , звено 4 – прямоугольником $A_1A_2A_3A_4$ с размерами $2a \times 2b$. Каждое звено робота обладает массой m_p , которая сосредоточена в центре его симметрии – точке C_i . Длина ноги определяется расстоянием l_{23} между точками O_2 и O_5 , положение последней в корпусе определяется расстоянием $l_4/2$ и углом β между прямой, соединяющей точки C_4 и O_5 , и стороной корпуса A_1A_4 .

Вектор координат, описывающий положение звеньев робота, имеет вид

$$\bar{q} = (x_1 \ y_1 \ x_4 \ y_4 \ \varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_4 \ l_{23})^T, \quad (1)$$

где x_1, y_1, x_4, y_4 – координаты центров масс звеньев 1 и 4, φ_1, φ_2 и φ_4 – углы поворота звеньев 1, 2 и 4, l_{23} – длина ноги робота.

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение робота, записыва-

ется с использованием уравнений Лагранжа второго рода. Кинетическая энергия системы и i -го звена определяются по формулам

$$T = \sum_{i=1}^4 T_i, \quad (2)$$

$T_i = m_i(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) / 2 + J_i \dot{\phi}_i^2 / 2$, (3)
 где \dot{x}_i, \dot{y}_i – проекции скорости центра масс i -го звена на оси Ox и Oy ; $J_{i,i=1..3} = m_i l_i^2 / 12$, $J_4 = m_4(a^2 + b^2)$ – центральные моменты инерции звеньев; $\dot{\phi}_i$ – угловая скорость i -го звена.

Дифференциальные уравнения движения робота представим в матричной форме

$$A_k(q)\ddot{q} + B_k(q)\dot{q}^2 + C_k(q)\dot{\phi}_2 \dot{j}_{23} = F_k. \quad (4)$$

Матрицы $A_k(q), B_k(q), C_k(q), F_k$ определяются на каждом из этапов k движения робота в соответствии с разработанной технологией движения.

$$A_k(q) = \begin{pmatrix} a_{11}^k & a_{12}^k & a_{13}^k & a_{14}^k & a_{15}^k & a_{16}^k & a_{17}^k & a_{18}^k \\ a_{21}^k & a_{22}^k & a_{23}^k & a_{24}^k & a_{25}^k & a_{26}^k & a_{27}^k & a_{28}^k \\ a_{31}^k & a_{32}^k & a_{33}^k & a_{34}^k & a_{35}^k & a_{36}^k & a_{37}^k & a_{38}^k \\ a_{41}^k & a_{42}^k & a_{43}^k & a_{44}^k & a_{45}^k & a_{46}^k & a_{47}^k & a_{48}^k \\ a_{51}^k & a_{52}^k & a_{53}^k & a_{54}^k & a_{55}^k & a_{56}^k & a_{57}^k & a_{58}^k \\ a_{61}^k & a_{62}^k & a_{63}^k & a_{64}^k & a_{65}^k & a_{66}^k & a_{67}^k & a_{68}^k \\ a_{71}^k & a_{72}^k & a_{73}^k & a_{74}^k & a_{75}^k & a_{76}^k & a_{77}^k & a_{78}^k \\ a_{81}^k & a_{82}^k & a_{83}^k & a_{84}^k & a_{85}^k & a_{86}^k & a_{87}^k & a_{88}^k \end{pmatrix}, \quad (5)$$

– матрица коэффициентов при ускорениях,

$$B_k(q) = \begin{pmatrix} b_{11}^k & b_{12}^k & b_{13}^k & b_{14}^k & b_{15}^k & b_{16}^k & b_{17}^k & b_{18}^k \\ b_{21}^k & b_{22}^k & b_{23}^k & b_{24}^k & b_{25}^k & b_{26}^k & b_{27}^k & b_{28}^k \\ b_{31}^k & b_{32}^k & b_{33}^k & b_{34}^k & b_{35}^k & b_{36}^k & b_{37}^k & b_{38}^k \\ b_{41}^k & b_{42}^k & b_{43}^k & b_{44}^k & b_{45}^k & b_{46}^k & b_{47}^k & b_{48}^k \\ b_{51}^k & b_{52}^k & b_{53}^k & b_{54}^k & b_{55}^k & b_{56}^k & b_{57}^k & b_{58}^k \\ b_{61}^k & b_{62}^k & b_{63}^k & b_{64}^k & b_{65}^k & b_{66}^k & b_{67}^k & b_{68}^k \\ b_{71}^k & b_{72}^k & b_{73}^k & b_{74}^k & b_{75}^k & b_{76}^k & b_{77}^k & b_{78}^k \\ b_{81}^k & b_{82}^k & b_{83}^k & b_{84}^k & b_{85}^k & b_{86}^k & b_{87}^k & b_{88}^k \end{pmatrix}, \quad (6)$$

– матрица коэффициентов при центробежных силах инерции,

$$C_k(q) = \begin{pmatrix} c_{11}^k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22}^k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33}^k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{77}^k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{88}^k \end{pmatrix}, \quad (7)$$

– матрица коэффициентов при силах Кориолиса,

$$F_k = (F_{11}^k \ F_{21}^k \ F_{31}^k \ F_{41}^k \ F_{51}^k \ F_{61}^k \ F_{71}^k \ F_{81}^k)^T; \quad (8)$$

– матрица обобщенных сил.

В качестве модели взаимодействия звеньев 1 и 4 с поверхностью будем рассматривать силу симметричного сухого трения, которая будет возникать в одной из крайних точек каждого звена [1]. Причем ограни-

чимся случаем, когда модуль силы трения не будет превышать предельного значения, это означает, что точка опоры с силой трения будет неподвижно зафиксирована на поверхности.

Моделирование движения робота

Для моделирования движения робота разработанная математическая модель реализации одного прыжка преобразована к безразмерному виду при помощи масштабных коэффициентов $M = 0,05$ кг, $T = 0,1$ с, $L = 0,1$ м. Массогабаритные характеристики объекта: $m_1 = 1, m_2 = 1, m_3 = 1, m_4 = 7, a = 1, b = 1, l_1 = 0,5, l_2 = 0,9, l_3 = 0,9, l_{23}^{\min} = 0,4 = 0,4, l_{23}^0 = 1,8$. Начальные условия моделирования: $t = 0, x_4 = a, \dot{x}_4 = 0, y_4 = b, \dot{y}_4 = 0, \varphi_4 = 0, \dot{\varphi}_4 = 0, \varphi_1 = \pi, \dot{\varphi}_1 = 0, \varphi_2 = \pi/2, \dot{\varphi}_2 = 0$.

В работе определены зависимости точек корпуса, на которые будет происходить приземление робота, от ряда варьируемых параметров, в качестве которых рассматриваются: угол β и расстояние l_4 , определяющие положение точки закрепления ноги в корпусе, скорость i_{23}^0 , достигаемая объектом к началу этапа полета, сила F_{23}^5 посредством которой происходит вытягивание звеньев 1 и 2 в корпус во время полета, и угол φ_2^0 , под которым приложена сила, обеспечивающая отрыв робота от поверхности.

По приведенным на рис. 2, 3, 5 диаграммам точек приземления робота видно, что при прохождении силы, отрывающей робота от поверхности, через центр масс корпуса последнего ($\beta = \varphi_2^0, \beta = \varphi_2^0 + \pi$) во время этапа полета корпус не вращается относительно точки C_4 ($\varphi_4 = 0$) и приземление осуществляется одновременно на две точки

корпуса A_1A_4 , с которых происходил отрыв от поверхности (область 0). При диапазонах угла $0 \leq \beta < \varphi_2^0, (\varphi_2^0 + \pi) < \beta \leq 2\pi$ (область 1) на этапе полета робот поворачивается против часовой стрелки на угол, не превышающий $\pi/2$ (рис. 4, в), поэтому первой точкой приземления является A_1 , на седьмом этапе (этапе приземления) наблюдается вращение робота по часовой стрелке до тех пор, пока корпус не начнет взаимодействовать с поверхностью во второй точке – A_4 . При угле $\varphi_2^0 < \beta < (\varphi_2^0 + \pi)$ корпус робота во время полета вращается по часовой стрелке (рис. 4, в), угол поворота не достигает значения $-\pi/2$, поэтому первой точкой приземления будет A_4 . Вторая точка может изменяться, что видно по диаграммам, в области 2 это будет точка A_1 , когда поворот робота по часовой стрелке на этапе приземления не превышает $\pi/4$ (рис. 4, а), а в области 3 – A_3 , что возможно при невыполнении указанного условия (рис. 4, б). Граница между областями 2 и 3 представляет собой кривую, приближающую параболу, выпуклость которой направлена вниз, независимо от третьего варьируемого параметра – i_{23}^0, φ_2^0 и l_4 .

Причем чем дальше от центра масс корпуса расположена точка O_5 закрепления ноги, т.е. чем больше расстояние l_4 , тем при меньшем значении силы F_{23}^5 будет осуществляться переход из второй области в третью при $\varphi_2^0 < \beta \leq \pi$, и, наоборот, для $\pi < \beta < (\varphi_2^0 + \pi)$ переход с ростом l_4 будет наблюдаться при большем значении (рис. 2).

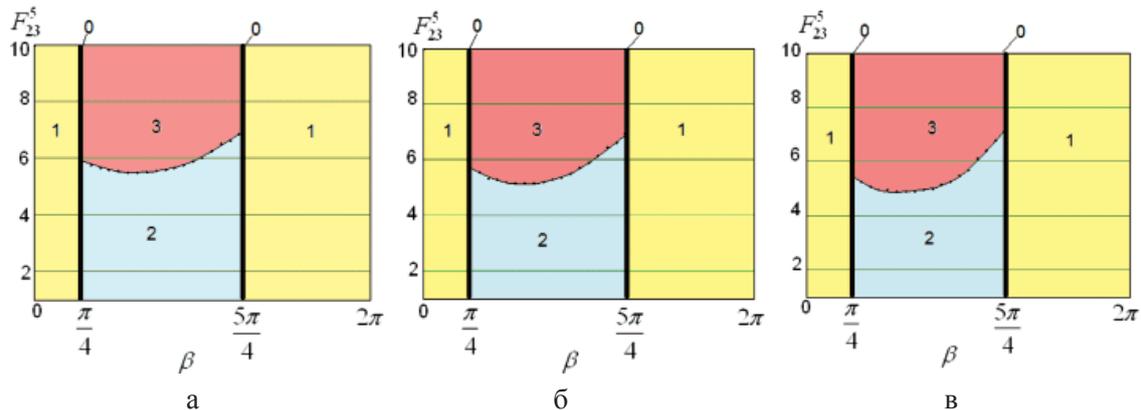


Рис. 2. Диаграммы точек приземления робота при $i_{23}^0 = 4, \varphi_2^0 = \pi/4$:

$a - l_4 = 0,1$; $b - l_4 = 0,15$; $v - l_4 = 0,2$; $0 - \varphi_4 = 0$, приземление на две точки A_1A_4 одновременно; 1 – приземление на точки A_1A_4 , 2 – приземление на точки A_4A_1 , 3 – приземление на точки A_4A_3

По диаграммам рис. 3 видно, что пороговое значение силы F_{23}^5 , при котором происходит переход из области 2 в область 3, возрастает с уменьшением скорости i_{23}^0 , достигаемой объектом к моменту отрыва от поверхности, т.к. чем меньше значение i_{23}^0 ,

тем меньше будет модуль угла поворота корпуса в полете (рис. 4, в).

Анализируя диаграммы, показанные на рис. 5, можно сделать вывод о том, что граница между областями 2 и 3 будет проходить при меньшей силе F_{23}^5 с увеличением угла φ_2^0 .

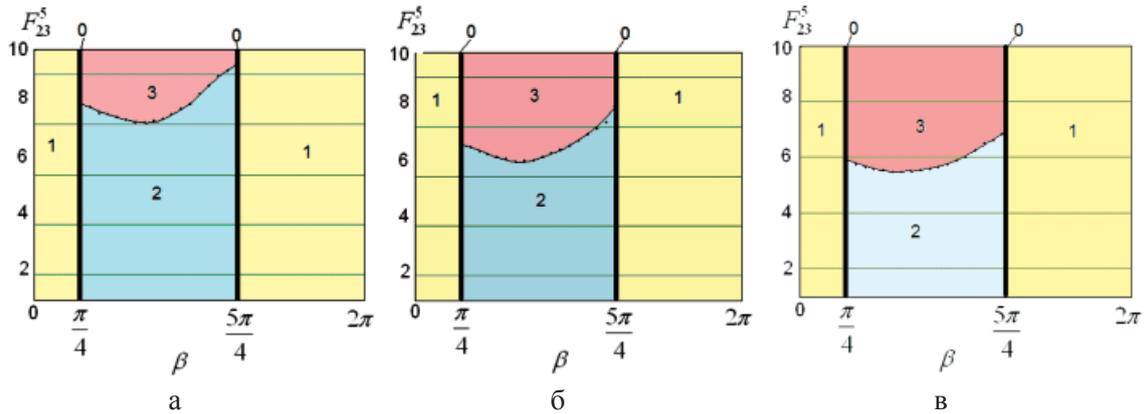


Рис. 3. Диаграммы точек приземления робота при $l_4 = 0,1, \varphi_2^0 = \pi/4$:

$a - i_{23}^0 = 3$; $б - i_{23}^0 = 3,5$; $в - i_{23}^0 = 4$; $0 - \varphi_4 = 0$, приземление на две точки A_1A_4 одновременно;
 1 – приземление на точки A_1A_4 ; 2 – приземление на точки A_4A_1 ; 3 – приземление на точки A_4A_3

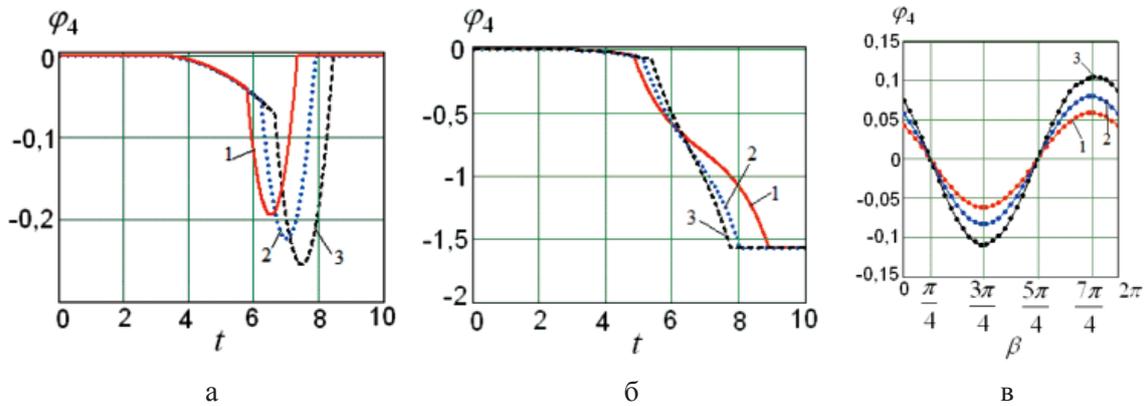


Рис. 4. Графики:

$a - \varphi_4(t)$ при $F_{23}^5 = 2, \beta = \pi/2$, $б - \varphi_4(t)$ при $F_{23}^5 = 6, \beta = \pi/2$, $в - \varphi_4(\beta)$ при $F_{23}^5 = 2$;
 $1 - i_{23}^0 = 3$; $2 - i_{23}^0 = 3,5$; $3 - i_{23}^0 = 4$; $a - F_{23}^5 = 2$, $б - F_{23}^5 = 6$

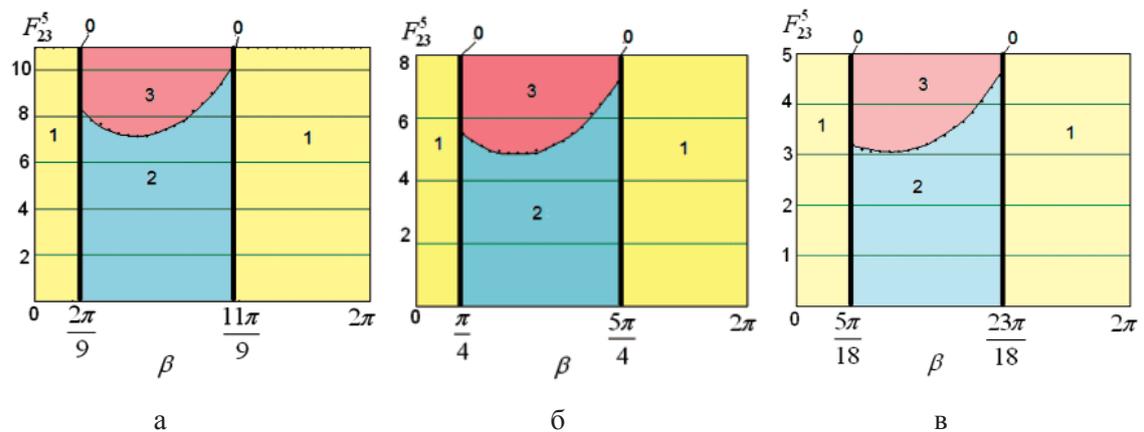


Рис. 5. Диаграммы точек приземления робота при $l_4 = 0,1, i_{23}^0 = 4$:

$a - \varphi_2^0 = 2\pi/9$, $б - \varphi_2^0 = \pi/4$, $в - \varphi_2^0 = 5\pi/18$; $0 - \varphi_4 = 0$, приземление на две точки A_1A_4 одновременно,
 1 – приземление на точки A_1A_4 , 2 – приземление на точки A_4A_1 , 3 – приземление на точки A_4A_3

Заключение

В статье рассмотрен четырехзвенный прыгающий робот, в качестве разгонного модуля использующий ногу, звенья которой могут позиционироваться относительно корпуса, когда последний находится на поверхности, приземление объекта происходит на корпус. Такая конструктивная схема позволяет объекту совершать прыжок с любой из сторон корпуса, что расширяет его функциональные возможности.

В работе в соответствии с разработанной математической моделью прыжка проведено численное моделирование движения робота и выявлено влияние ряда параметров объекта на условия приземления. Установлено, что в случае прохождения линия действия силы, обеспечивающей втягивание ноги в полете, через центр масс корпуса, вращения последнего в полете не происходит и приземление осуществляется на те же точки корпуса, которыми объект взаимодействовал в начале прыжка. В противном случае наблюдается поворот корпуса робота по или против часовой стрелки, причем при вращении против часовой стрелки точки приземления не меняются при вариации угла Φ_2^0 наклона разгоняющей силы, скорости i_{23}^0 отрыва робота от поверхности, положения точки закрепления ноги (l_4, β) и силы F_{23}^5 , с которой нога втягивается в полете, а при вращении по часовой стрелке при малых значениях параметров $\Phi_2^0, l_4, i_{23}^0, F_{23}^5$ точки приземления остаются неизменными, а с увеличением указанных величин наблюдается увеличение угла поворота корпуса в полете и изменение точек приземления.

Список литературы

1. Динамика управляемых движений вибрационных систем / Н.Н. Болотник, И.М. Зейдис, К. Циммерман и др. // Изв. РАН.ТнСУ. – 2006. – № 5. – С. 157–167.
2. Волкова Л.Ю., Серебровский В.В., Яцун С.Ф. Исследование движения многозвенного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 1 (40). – Ч. 2. – С. 12–18.
3. Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю. Исследование влияния закона втягивания ноги в полете на высоту и длину прыжка многозвенного робота // Moderní vymoženosti vědy – 2013: Materiály IX mezinárodní vědecko – praktická conference. – Praha, 2013. – P. 77–81.
4. Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Прыгающий робот // Патент на полезную модель № 126308, дата регистрации 11.10.2012 г.
5. Яцун С.Ф., Рукавицын А.Н., Волкова Л.Ю. Исследование динамики управляемого прыжка робота // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1355–1358.
6. Ahmadi M., Buehler M. Stable control of a simulated one-legged running robot with hip and leg compliance // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1997. – Vol. 13. – № 1. – P. 96–104.
7. Armour R., Paskins K., Bowyer A., Vincent J.F.V., Megill W. Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain // Bioinspiration and Biomimetics Journal. – 2007. – Vol. 2. – P. 65–82.
8. Fischer G. J., Spletzer B. Long range hopping mobility platform // SPIE Unmanned Ground Vehicle Technology Conference, Orlando, USA. – 2003. – P. 83–92.
9. Harrick K., Sukhatme G.S. Robustness experiments for a planar hopping control system // Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies CLAWAR. – Paris, 2002. – P. 349–356.
10. Ishikawa A.I.M., Neki M., Hara J. Energy preserving control of a hopping robot based on hybrid port-controlled hamiltonian modeling // IEEE Conference on Control Applications. – Yokohama, Japan, 2003. – Vol. 2. – P. 1136–1141.
11. Kovac M., Schlegel M., Zufferey J.-C., Floreano D. Steerable miniature jumping robot // Autonomous Robots. – 2010. – Vol. 28. – № 3. – P. 295–306.

References

1. Bolotnik N.N., Zeidis I.M., Zimmerman K. et. al. Dynamics of operated movements of vibration systems // Izv. RAN. TiSU. 2006. no. 5. pp. 157–167.
2. Volkova L.Y., Serebrowsky V.V., Jatsun S.F. Research of movement of the multilink robot moving with a jump from a surface // Izvestia South-West State University. 2012. no. 1 (40). Part 2. pp. 12–18.
3. Jatsun S.F., Volkova L.Y. Research of influence of the law of retraction of a leg in flight on height and length of a jump of the multilink robot // Materiály IX mezinárodní vědecko – praktická conference «Moderní vymoženosti vědy – 2013». Praha. 2013. pp. 77–81.
4. Jatsun S.F., Mishenko V.Ya., Volkova L.Y., Vorochaev A.V. Jumping robot // Patent for useful model no. 126308, 11.10.2012.
5. Jatsun S.F., Rukavitsyn A.N., Volkova L.Y. Research of dynamics of operated jump of the robot // Izvestiya Samara scientific centre of Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 14. no. 4(5). pp. 1355–1358.
6. Ahmadi M., Buehler M. Stable control of a simulated one-legged running robot with hip and leg compliance // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1997. Vol. 13. no. 1. pp. 96–104.
7. Armour R., Paskins K., Bowyer A., Vincent J.F.V., Megill W. Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain // Bioinspiration and Biomimetics Journal. 2007. Vol. 2. pp. 65–82.
8. Fischer G.J., Spletzer B. Long range hopping mobility platform // SPIE Unmanned Ground Vehicle Technology Conference, Orlando, USA. 2003. pp. 83–92.
9. Harrick K., Sukhatme G.S. Robustness experiments for a planar hopping control system // Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies CLAWAR, Paris. 2002. pp. 349–356.
10. Ishikawa A.I.M., Neki M., Hara J. Energy preserving control of a hopping robot based on hybrid port-controlled hamiltonian modeling // IEEE Conference on Control Applications, Yokohama, Japan. 2003. Vol. 2. pp. 1136–1141.
11. Kovac M., Schlegel M., Zufferey J.-C., Floreano D. Steerable miniature jumping robot // Autonomous Robots, vol. 28, no. 3, pp. 295–306, 2010.

Рецензенты:

Кобелев Н.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, ЮЗГУ, г. Курск;

Игнатенко Н.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ЮЗГУ, г. Курск.

Работа поступила в редакцию 15.07.2013.