



УДК 62-503.5

*С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, Л.Ю. Волкова, А.В. Ворочаев***ЭТАПЫ ДВИЖЕНИЯ ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО РОБОТА,
ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ С ОТРЫВОМ ОТ ПОВЕРХНОСТИ***S.F. Jatsun, O.G. Loktionova, L.Yu. Volkova, A.V. Vorochaev***STAGES OF MOVEMENT OF THE FOURLINK ROBOT MOVING
WITH THE JUMP FROM THE SURFACE**

Приведена расчетная схема четырехзвенного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности, прыжок устройства описан в виде последовательности этапов, на каждом из которых звенья робота совершают определенные виды движения, разработана математическая модель в виде дифференциальных уравнений, описывающих движение робота на всех этапах, представлены результаты численного моделирования прыжка в соответствии с указанной последовательностью этапов.

ПРЫГАЮЩИЙ МНОГОЗВЕННЫЙ РОБОТ. ЭТАПЫ ПРЫЖКА. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЭТАПОВ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЫЖКА. ВЫСОТА. ДЛИНА.

The settlement scheme of the four-link robot moving with a jump from a surface is provided, the jump of the device is described in the form of sequence of stages, on each of which links of the robot make certain types of movement, the mathematical model in the form of the differential equations describing movement of the robot at all stages is developed, results of numerical modeling of a jump according to the specified sequence of stages are presented.

MULTILINK JUMPING ROBOT. STAGES OF THE JUMP. SEQUENCE OF STAGES. CHARACTERISTICS OF THE JUMP. HEIGHT. LENGTH.

Интерес к прыгающим роботам в последние годы все время возрастает, проектируются и исследуются различные по конструкции и способу прыжка роботы, параметры прыжка которых также сильно отличаются. Общим для большинства ученых, занимающихся прыгающими системами, является представление прыжка робота в виде некоторой последовательности этапов, каждый из которых характеризуется особым видом движения звеньев. Так, в [1] рассматриваются четыре этапа: подготовка к прыжку при нахождении объекта на поверхности, разгон устройства до отрыва от поверхности, движение при отсутствии взаимодействия с поверхностью, приземление. Аналогичные этапы прыжка описываются в [2]. Один прыжок робота представлен в виде последовательности восьми этапов в [3]: подготовка к прыжку, разгон, переход из состояния, когда объект взаимодействует с поверхностью, к отрыву от поверхности,

отрыв от поверхности, полет вверх, полет вниз, приземление. Миниатюрный робот-кузнечик, описанный в [4], совершает один прыжок за три этапа: подготовка к прыжку, разгон, движение в воздухе. В [5] прыжок робота характеризуется двумя этапами: нахождение на поверхности и движение с отрывом от нее, которые связывают два перехода — разгон и приземление.

Прыжок изученного в данной статье многозвенного прыгающего робота представлен в виде последовательности восьми этапов, каждому из которых соответствуют определенные виды движения звеньев, описанные в виде математической модели с учетом наложенных на этапах связей.

Расчетная схема робота

Рассматривается аппарат, состоящий из прыжкового и колесных модулей, трехмерная модель которого приведена на рис. 1 а. Прыжковый модуль состоит из звеньев 1–4,

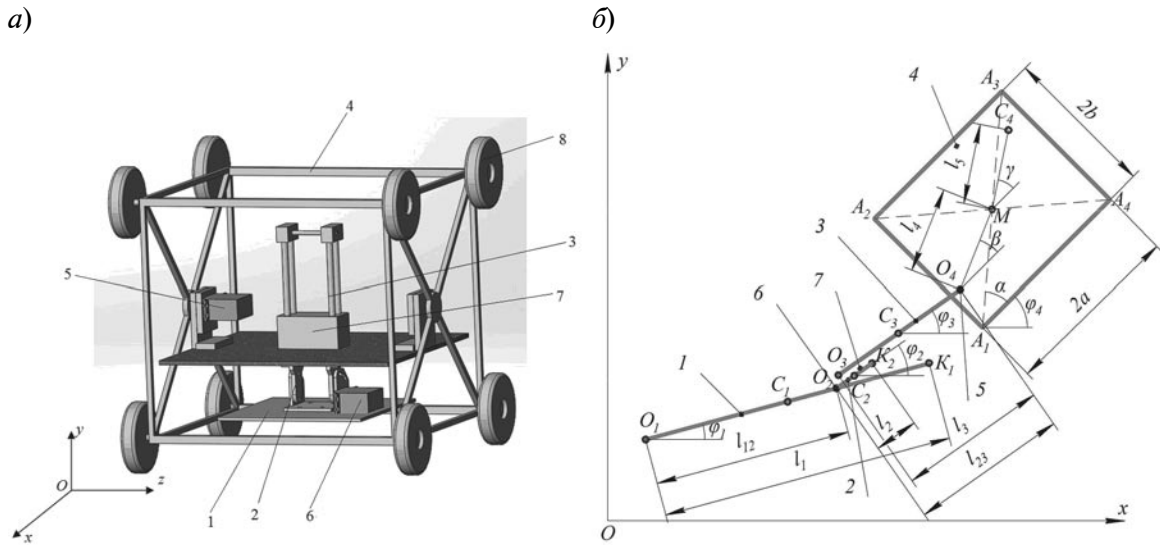


Рис. 1. Четырехзвенный прыгающий робот: а – конструктивная схема; б – расчетная схема
1–4 – звенья, 5–7 – приводы

причем звено 1 является стопой, звенья 2 и 3 образуют ногу, а звено 4 представляет собой корпус. На звеньях 4 и 2 закреплены приводы вращательного движения 5 и 6 соответственно, обеспечивающие поворот звеньев 3 и 1 относительно звеньев 4 и 2. На звене 2 также установлен привод поступательного движения 7, позволяющий звеньям 2 и 3 перемещаться друг относительно друга.

Корпус представляет собой каркас в форме параллелепипеда, в вершинах которого установлены колесные модули 8. Движение объекта по поверхности происходит за счет колес, для преодоления препятствий используется прыжковый модуль.

Движение робота происходит в вертикальной плоскости Oxy с горизонтальной шероховатой абсолютно твердой поверхности, совпадающей с осью Ox (рис. 1 б). Звенья $i = 1 \div 3$ представляют собой стержни длинами l_i , а звено 4 имеет вид прямоугольника с размерами $2a \times 2b$. Массы m_i , $i = 1 \div 3$, звеньев сосредоточены в центрах их симметрии – точках C_i . Центр масс корпуса находится в точке C_4 , смещенной относительно центра симметрии прямоугольника (точки M) на расстояние l_5 под углом γ , определяемым как угол между прямой MC_4 и стороной корпуса A_1A_4 . Длина ноги определяется расстоянием l_{23} между точка-

ми O_2 и O_4 , положение последней в корпусе задается расстоянием l_4 и углом β между прямой, соединяющей точки M и O_4 , и стороной корпуса A_1A_4 [6–9].

Взаимодействие робота с опорной поверхностью

При нахождении робота на поверхности взаимодействие с последней может происходить звеном 1 или 4. При этом возникают силы трения и нормальной реакции. Будем считать, что наличие в вершинах каркаса корпуса колес не оказывает влияния на общие принципы реализации прыжка, поэтому учитывать их размеры, форму, положение точек закрепления в корпусе не будем. При этом положим, что колеса обеспечивают точечный контакт корпуса с поверхностью, причем контактными точками являются крайние точки стороны корпуса, параллельной поверхности, условно обозначим их K и P , или одна из крайних точек корпуса K , если ни одна из его сторон не параллельна поверхности. Примем допущение, что в первом случае в двух точках опоры будут возникать нормальные реакции N_K и N_P , а сила трения F_{fr} только в одной из них – точке K , а во втором случае точка контакта K представляет собой центр приведения сил трения и нормальной реакции.

При взаимодействии с поверхностью звена 1 нормальная реакция является силой, распределенной по площади соприкосновения. В качестве центров ее приведения будем рассматривать крайние точки звена 1, условно K и P , сила трения при этом возникает только в одной контактной точке K . Если взаимодействие звена 1 с поверхностью является точечным, то эта точка является точкой приложения сил трения и нормальной реакции так же, как и для звена 4.

Положим, что возникающая сила трения описывается следующей моделью [10–12]:

$$F_{fk} = \begin{cases} -fN_K \operatorname{sgn}(\dot{x}_K), & \text{если } \dot{x}_K \neq 0; \\ -F_0, & \text{если } \dot{x}_K = 0, |F_0| \leq fN_K; \\ -fN_K \operatorname{sgn}(F_0), & \text{если } \dot{x}_K = 0, |F_0| > fN_K, \end{cases} \quad (1)$$

где F_0 – горизонтальная проекция равнодействующей всех сил, кроме силы сухого трения, приложенных к звену, взаимодействующему с поверхностью; f – коэффициент трения скольжения; N_K – нормальная реакция в точке K ; \dot{x}_K – скорость точки K вдоль оси Ox .

При нахождении одного из звеньев 1 или 4 на поверхности возможны несколько вариантов движения объекта (подэтапов):

1. Звено неподвижно лежит на поверхности и взаимодействует с ней в двух точках. Это возможно в том случае, когда нормальные реакции в точках контакта имеют некоторые положительные значения, а модуль силы трения не превышает предельного значения

$$(N_K > 0) \wedge (N_P > 0) \wedge (|F_{fk}| < F_0). \quad (2)$$

2. Звено взаимодействует с поверхностью в двух точках и перемещается вдоль оси Ox . Такой вариант будет наблюдаться при положительных нормальных реакциях в обеих точках контакта и при превышении предельной силы трения:

$$(N_K > 0) \wedge (N_P > 0) \wedge (|F_{fk}| \geq F_0). \quad (3)$$

3. Звено контактирует с поверхностью в одной точке, которая неподвижна. Такой

вид взаимодействия с поверхностью возможен, если одна из нормальных реакций обнуляется, а сила трения в опоре по модулю меньше предельной:

$$(N_K > 0) \vee (N_P = 0) \wedge (|F_{fk}| < F_0). \quad (4)$$

4. Звено взаимодействует с поверхностью в одной точке, которая движется вдоль оси Ox . Это происходит, когда нормальная реакция в одной из контактных точек становится равной нулю и опора отрывается от поверхности, а сила трения в оставшейся контактной точке имеет значение, по модулю большее, чем предельная сила трения

$$(N_K > 0) \vee (N_P = 0) \wedge (|F_{fk}| \geq F_0). \quad (5)$$

Рассмотрим случай, когда значение силы трения всегда меньше предельного $|F_0| < fN$, то есть скольжения звена робота, контактирующего с поверхностью, не происходит.

Математическая модель прыжка робота

Для разработки математической модели запишем матрицу-столбец координат g , представляющую собой матрицу восьми координат, при помощи которых можно описать движение объекта на любом этапе прыжка: $g_1 = x_1$, $g_2 = y_1$, $g_3 = x_4$, $g_4 = y_4$ – координаты центров масс звеньев 1 и 4 в абсолютной системе; $g_5 = \varphi_1$, $g_6 = \varphi_2$ и $g_7 = \varphi_4$ – углы поворота соответствующих звеньев; $g_8 = l_{23}$ – длина ноги устройства

$$g = (g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ g_5 \ g_6 \ g_7 \ g_8)^T. \quad (6)$$

Система дифференциальных уравнений движения робота в матричной форме имеет вид

$$A_{km}(g)\ddot{g} + B_{km}(g)D(\dot{g})\dot{g} + C_{km}(g)\dot{g}_6\dot{g}_8 = Q_{km}, \quad (7)$$

где $A_{km}(g)$ – матрица коэффициентов при ускорениях; $B_{km}(g)$ – при центробежных силах инерции; $C_{km}(g)$ – при ускорениях Кориолиса; Q_{km} – матрица обобщенных сил. Матрица $D(\dot{g})$ представляет собой диагональную матрицу производных матрицы g .

Этапы прыжка робота

Прыжок устройства начинается из положения, в котором звено 4 робота находится на поверхности, звенья 1, 2 и 3 полностью

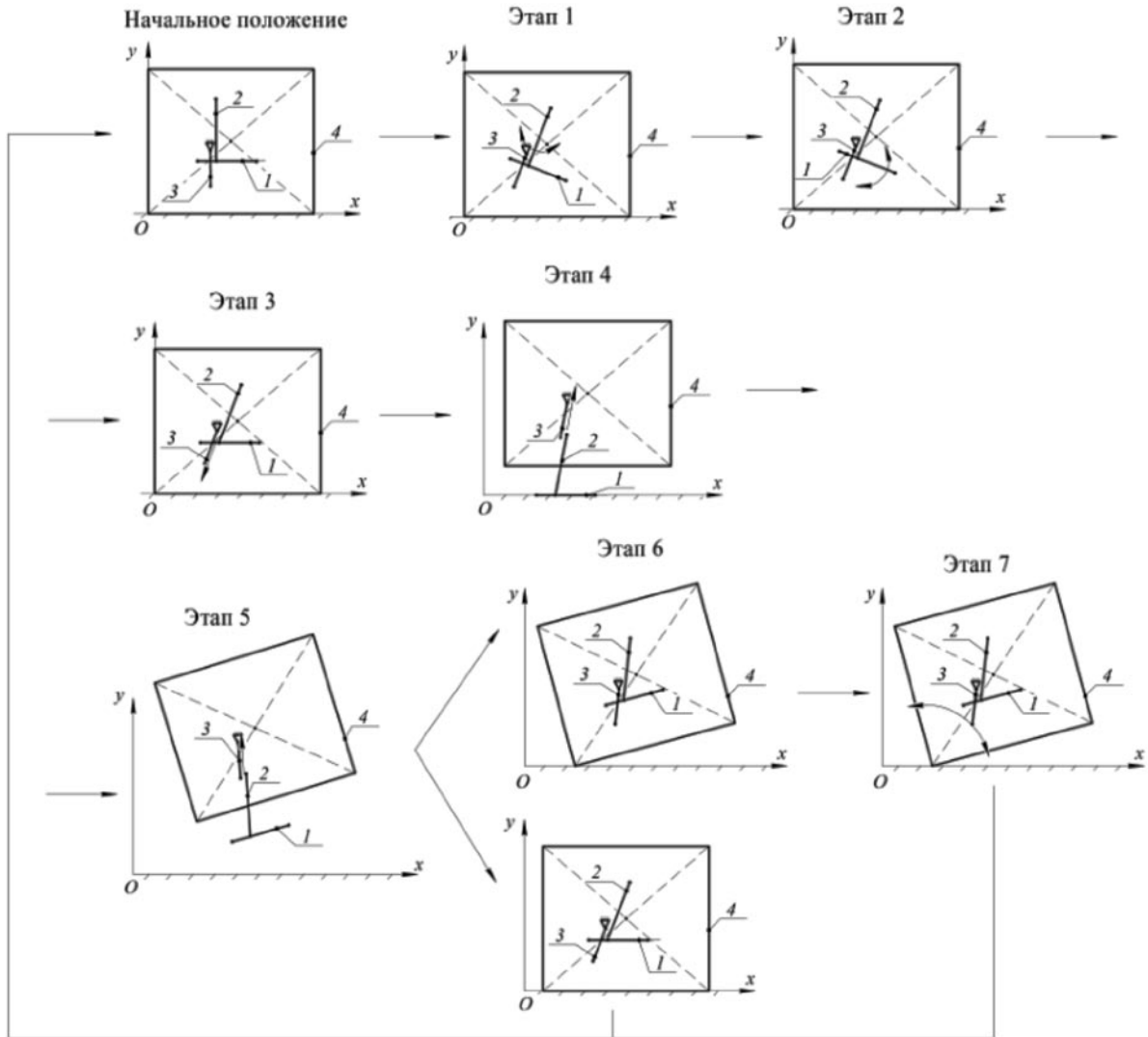


Рис. 2. Этапы прыжка четырехзвенного прыгающего робота

втянуты в корпус – $l_{23} = l_{23}^{\min}$ – и расположены под некоторыми произвольными углами к горизонту $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 = \varphi_2$, и представляет собой последовательность семи этапов $k = 1 \div 7$ (рис. 2).

Этап 1. Звенья 1–3, жестко связанные между собой, поворачиваются относительно точки C_4 за счет момента M_{43} , создаваемого приводом 5, до выполнения условия $\varphi_2 = \varphi_2^0$, где φ_2^0 – угол наклона звеньев 2 и 3 к оси Ox , под которым действует сила, отрывающая робота от поверхности. Обобщенной координатой выступает угол φ_2 :

$$a_{66}^1 \ddot{\varphi}_2 + b_{66}^1 \dot{\varphi}_2^2 = F_{61}^1. \quad (8)$$

Этап 2. Звено 1 поворачивается относительно точки O_2 под действием момента M_{21} , формируемого приводом 6, до тех пор, пока не выполнится условие $\varphi_1 = \varphi_1^0 = \pi$. Дифференциальное уравнение по φ_1 имеет вид

$$a_{55}^2 \ddot{\varphi}_1 = F_{51}^2. \quad (9)$$

Этап 3. Звенья 1 и 2, жестко связанные между собой, перемещаются относительно звена 3 при помощи силы F_{32} , генерируемой приводом 7, до взаимодействия звена 1 с поверхностью, что описывается дифференциальным уравнением

$$a_{88}^3 \ddot{\varphi}_{23} = F_{81}^3. \quad (10)$$

Этап 4. Жестко связанные между собой звенья 3 и 4 перемещаются относительно звена 2 за счет создаваемой приводом 7 силы F_{23} до отрыва звена 1 от поверхности. К концу этого этапа все звенья робота приобретают скорость \dot{l}_{23}^0 , которая является начальной скоростью этапа полета. В качестве обобщенной координаты выступает l_{23} :

$$a_{88}^4 \ddot{l}_{23} = F_{81}^4. \quad (11)$$

Этап 5. Полет робота, во время которого все звенья движутся с отрывом от поверхности. При этом звенья 1 и 2, связанные между собой, втягиваются в корпус за счет силы F_{32} , формируемой приводом 7, до выполнения условия $l_{23} = l_{23}^{\min}$. Движение робота на данном этапе описывается четырьмя обобщенными координатами:

$$a_{33}^5 \ddot{x}_4 + a_{37}^5 \ddot{\phi}_4 + a_{38}^5 \ddot{l}_{23} + b_{37}^5 \dot{\phi}_4^2 + c_{33}^5 \dot{l}_{23} \dot{\phi}_4 = F_{31}^5, \quad (12)$$

$$a_{44}^5 \ddot{y}_4 + a_{47}^5 \ddot{\phi}_4 + a_{48}^5 \ddot{l}_{23} + b_{47}^5 \dot{\phi}_4^2 + c_{44}^5 \dot{l}_{23} \dot{\phi}_4 = F_{41}^5, \quad (13)$$

$$a_{77}^5 \ddot{\phi}_4 + a_{73}^5 \ddot{x}_4 + a_{74}^5 \ddot{y}_4 + a_{78}^5 \ddot{l}_{23} + b_{77}^5 \dot{\phi}_4^2 + c_{77}^5 \dot{l}_{23} \dot{\phi}_4 = F_{71}^5, \quad (14)$$

$$a_{88}^5 \ddot{l}_{23} + a_{83}^5 \ddot{x}_4 + a_{84}^5 \ddot{y}_4 + a_{87}^5 \ddot{\phi}_4 + b_{87}^5 \dot{\phi}_4^2 = F_{81}^5. \quad (15)$$

Этап 6. Приземление робота на одну или две точки корпуса. В первом случае скорость точки контакта становится равной нулю, а все звенья робота приобретают некоторую угловую скорость ϕ_4^* , после чего прыжок переходит в следующий этап. Во втором случае при приземлении на две точки корпуса их скорости обнуляются, и объект становится неподвижным, прыжок завершается.

Этап 7. Все звенья робота поворачиваются относительно точки контакта до тех пор, пока вторая точка корпуса не начнет взаимодействовать с поверхностью. Дифференциальное уравнение по обобщенной координате ϕ_4 записывается следующим образом:

$$a_{77}^7 \ddot{\phi}_4 + b_{77}^7 \dot{\phi}_4^2 = F_{71}^7. \quad (16)$$

В формулах (7)–(16) использованы обозначения: a_{pn}^k , $p = 1 \div 8$, $n = 1 \div 8$ – коэффициенты при вторых производных обобщенных координат; b_{pn}^k , $p = 1 \div 8$, $n = 1 \div 8$ – коэф-

фициенты при квадратах первых производных обобщенных координат; Q_{pn}^k , $p = 1 \div 8$, $n = 1 \div 8$ – обобщенные силы по обобщенным координатам.

Управляющие моменты и силы

Для исследуемого робота управление параметрами прыжка происходит на этапах позиционирования объекта и его разгона до отрыва от поверхности (этапы 1–4), а также непосредственно во время полета (этап 5). Этапы приземления 6 и 7 неуправляемые. Управляющими воздействиями являются моменты M_{43} , M_{21} , создаваемые приводами 5 и 6, посредством которых соответствующие звенья робота поворачиваются на углы ϕ_2^0 и ϕ_1^0 , и сила F_{32} , формируемая приводом 7, за счет которой звенья 2 и 3 поступательно перемещаются друг относительно друга.

Будем рассматривать указанные величины как кусочно-постоянные функции, численные значения которых на каждом из этапов прыжка являются постоянными. Высота и длина прыжка варьируются за счет изменения временных интервалов t_1 – t_5 этапов 1–5, что позволяет формировать различные значения угла ϕ_2^0 , под которым происходит разгон устройства, скорости \dot{l}_{23}^0 отрыва объекта от поверхности, а также скорости и ускорения относительного перемещения звеньев 2 и 3 во время полета.

Моделирование движения робота

В соответствии с последовательностью этапов движения прыгающего робота на геометрические размеры звеньев наложены следующие ограничения:

$$l_{23}^{\min} + l_1 \leq b, \quad l_{23}^{\min} + l_1 \leq a, \quad l_2 \leq b, \quad (17)$$

$$l_2 \leq a, \quad l_3 \leq b, \quad l_3 \leq a, \quad l_{23}^0 > \frac{b}{\sin \phi_2^0}.$$

При численном моделировании прыжка устройства использовался переход к безразмерным параметрам при помощи масштабных коэффициентов $M = 0,05$ кг, $T = 0,1$ с, $L = 0,1$ м. Объектом моделирования является прыгающий робот, обладающий следующими массогабаритными параметрами:

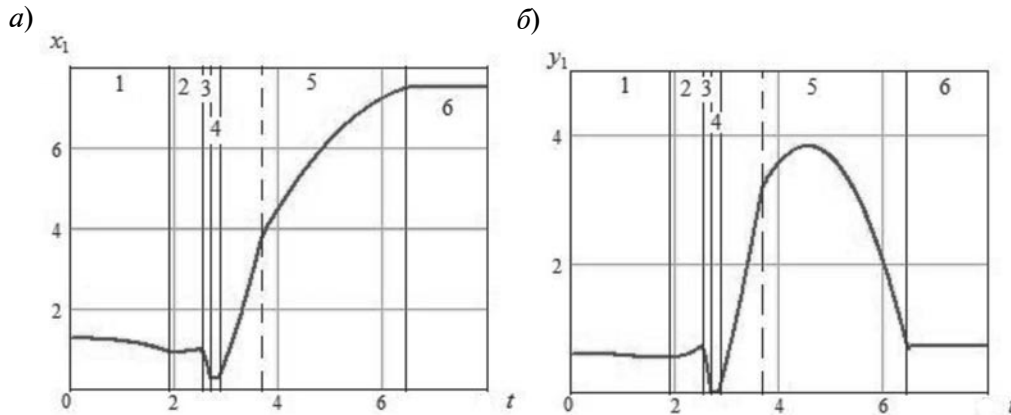


Рис. 3. Графики зависимостей: *a* – $x_1(t)$; *б* – $y_1(t)$

$m_1 = 1, m_2 = 1, m_3 = 1, m_4 = 7, a = 1, b = 1, l_1 = 0,5, l_2 = 0,9, l_3 = 0,9, l_{23}^{\min} = 0,4, l_{23}^0 = 1,8, l_4 = 0, l_{23}^0 = 4, \varphi_2^0 = \pi / 4$. Моделирование проводится при начальных условиях: $t = 0, x_4 = a, \dot{x}_4 = 0, y_4 = b, \dot{y}_4 = 0, \varphi_4 = 0, \dot{\varphi}_4 = 0, \varphi_1 = \pi, \dot{\varphi}_1 = 0, \varphi_2 = \pi / 2, \dot{\varphi}_2 = 0$.

На рис. 3–6 приведены временные зависимости координат, посредством которых описывается движение прыгающего робота, а также показаны этапы одного прыжка. По данным графикам видно, что моделируемое движение робота соответствует разработанной и описанной последовательности этапов.

На первых трех этапах, во время которых происходит позиционирование робота, центр масс корпуса неподвижен ($x_4 = \text{const}, y_4 = \text{const}, \varphi_4 = \text{const}$). Звено 1 на первом этапе поворачивается вместе со звеном 2 ($\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2$) до тех пор, пока не станет спра-

ведливым условие $\varphi_2 = \varphi_2^0$ (в рассматриваемом случае $\varphi_2^0 = \pi / 4$), что также отражается на временных зависимостях координат центра масс стопы.

Во время второго этапа происходит поворот звена 1 против часовой стрелки до достижения значения $\varphi_1 = \pi$, траектория $y_1(x_1)$ на этом этапе имеет форму дуги окружности.

На третьем этапе наблюдается выдвигание звеньев 1 и 2 до взаимодействия звена 1 с поверхностью, что находит отражение на графиках рис. 3, 5 *a*, 6 *б*, причем изменение координат точки C_1 равно $\Delta x_1 = \Delta l_{23} \cos \varphi_2^0, \Delta y_1 = \Delta l_{23} \sin \varphi_2^0$, углы наклона звеньев к оси Ox не меняются. Завершению третьего этапа соответствует выполнение условия $y_1 = 0$, это означает, что звено 1 лежит на поверхности. Изменение величины l_{23} под действием постоянной силы F_{32} происходит

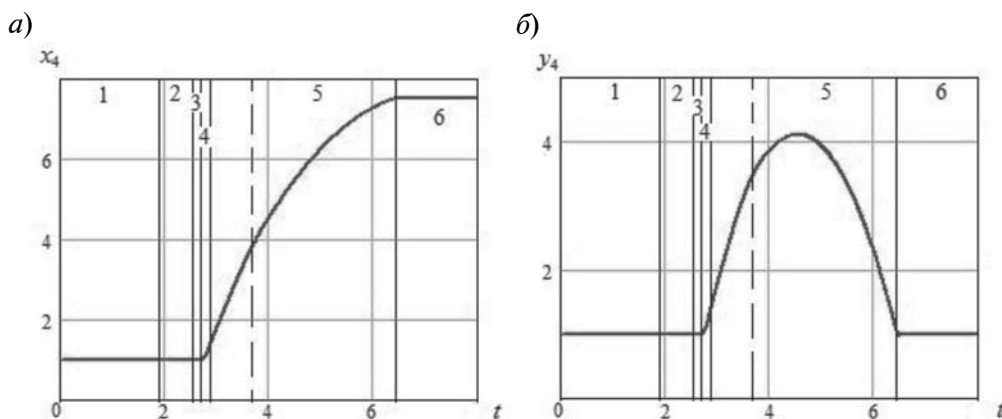
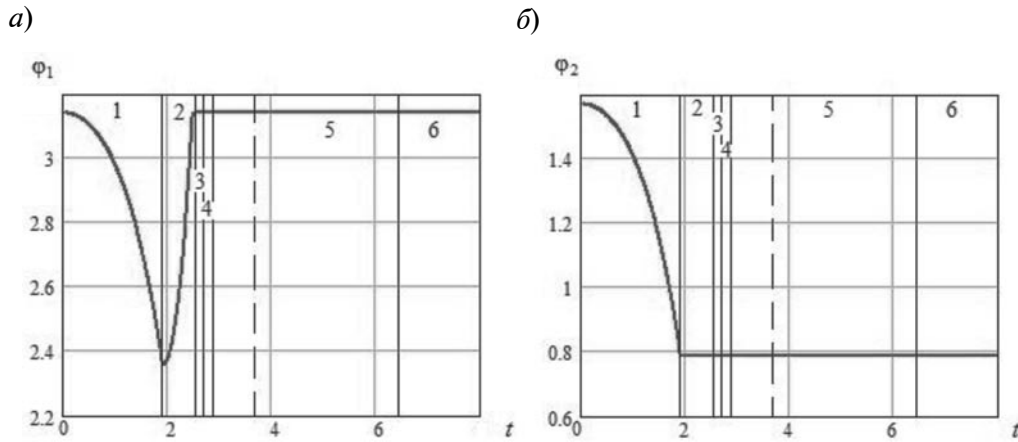


Рис. 4. Графики зависимостей: *a* – $x_4(t)$; *б* – $y_4(t)$

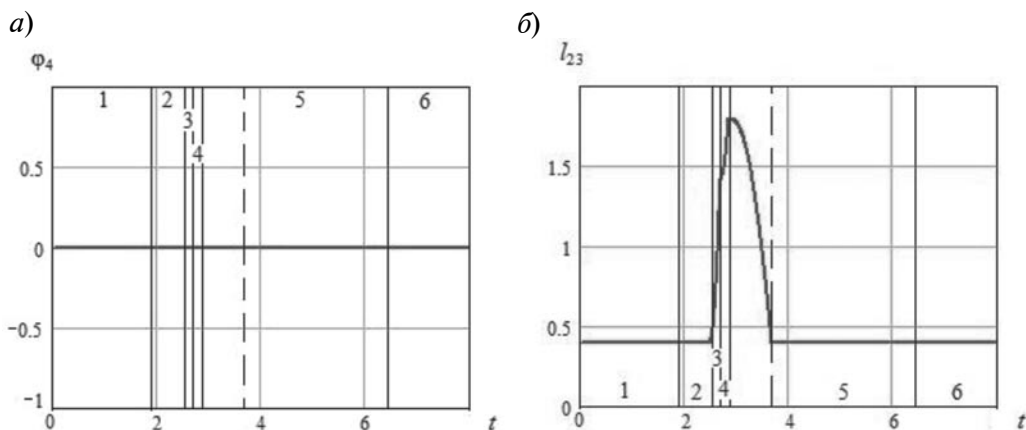
Рис. 5. Графики зависимостей: *a* – $\varphi_1(t)$; *б* – $\varphi_2(t)$

по ветви параболы, что видно по графику рис. 6 *б*, характер изменения x_1 и y_1 аналогичен.

Четвертый этап происходит при взаимодействии звена 1 с поверхностью, что подтверждается графиками рис. 4 ($x_1 = \text{const}$, $y_1 = 0$) и характеризуется перемещением звеньев 3 и 4 относительно звена 2 в положительных направлениях осей Ox и Oy , т. е. увеличением расстояния l_{23} . На этом этапе наблюдается возрастание координат центра масс корпуса, причем справедливы следующие соотношения $\Delta x_4 = \Delta l_{23} \cos \varphi_2^0$, $\Delta y_4 = \Delta l_{23} \sin \varphi_2^0$. Увеличение длины l_{23} происходит под действием постоянной силы F_{23} , значит, характер изменения этой обобщенной координаты так же, как и значений x_4 и y_4 , параболический. Поворота звеньев на данном этапе не происходит, что видно

по графикам рис. 5, 6 *а*.

Пятый этап, во время которого робот движется с отрывом от поверхности, характеризуется изменением координат центров масс всех звеньев робота, а также втягиванием звеньев 1 и 2 в корпус. В моделируемом прыжке линии действия разгоняющей силы и силы, посредством которой звенья 1 и 2 втягиваются в корпус, проходят через центр масс последнего, поэтому вращения корпуса относительно его центра масс в полете не происходит, что находит отражение на графике рис. 6 *б*. Звенья 1 и 2 перемещаются относительно корпуса до тех пор, пока значение l_{23} не станет равным начальному ($l_{23} = l_{23}^{\text{min}}$). Это наблюдается до момента времени, отмеченного на всех графиках пунктирной линией. На данном участке пятого этапа (до пунктир-

Рис. 6. Графики зависимостей: *a* – $\varphi_4(t)$; *б* – $l_{23}(t)$

ной линии) изменения координат центров масс звеньев 1 и 4 различны и $\Delta x_1 > \Delta x_4$, $\Delta y_1 > \Delta y_4$, т. к. скорость звена 1 больше скорости звена 4 и в проекциях на оси Ox и Oy равна $\dot{x}_1 = \dot{x}_4 + \dot{l}_{23} \cos \varphi_2$, $\dot{y}_1 = \dot{y}_4 + \dot{l}_{23} \sin \varphi_2$. После того как втягивание ноги завершится, все звенья робота будут двигаться с одинаковыми скоростями и ускорениями, поэтому изменения координат точек C_1 и C_4 будут равными: $\Delta x_1 = \Delta x_4$, $\Delta y_1 = \Delta y_4$. На графиках $x_1(t)$, $y_1(t)$ в момент времени, когда прекращается втягивание ноги, виден излом, до которого подъем графиков более крутой, а после — более пологий, что подтверждает правильность моделирования.

Движение робота переходит в шестой этап, когда одна или две точки корпуса начнут взаимодействовать с опорной поверхностью. В связи с тем что в рассматриваемом случае поворота корпуса робота в полете не происходит, приземление будет осуществляться на те же точки корпуса, с каких начинался первый этап прыжка, т. е. на точки A_1 и A_4 . На графике $y_4(t)$ видно, что в момент начала этапа б значение ординаты центра масс корпуса равно значению y_4 в момент начала прыжка, это означает что точки A_1 и A_4 лежат на поверхности. Изменения координат центров масс звеньев 1 и

4 во время этого этапа не наблюдается, т. к. в соответствии с принятой моделью трения скорости точек контакта с поверхностью равны нулю. Углы поворота звеньев также остаются постоянными.

Анализ представленных в работе графиков свидетельствует о правильности разработанных алгоритма и программы моделирования прыжка робота, что подтверждается соответствием характера изменения координат вектора g описанной последовательности этапов движения устройства.

В статье рассмотрен прыгающий робот, один прыжок которого представлен в виде последовательности восьми этапов. Разработана математическая модель поэтапного движения робота, условия перехода из одного этапа в другой, а также связи, наложенные на движения звеньев робота на каждом из этапов.

В соответствии с данной математической моделью проведено численное моделирование прыжка робота, результаты которого позволяют подтвердить правильность разработанной программы и проследить последовательность этапов движения на временных зависимостях характеристик робота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zufferey, J.-C. First Jumps of the 3D Bow Leg Hopper [Text] / J.-C. Zufferey // Micro-engineering, EPFL. — 2001. — 65 p.
2. Ishikawa, A. Energy preserving control of a hopping robot based on hybrid port-controlled hamiltonian modelling [Text] / A. Ishikawa, M. Neki, J. Hara // IEEE Conf. on Control Applications. — Yokohama, Japan, 2003. — Vol. 2. — P. 1136–1141.
3. Zeglin, G. Uniuro: A One-Legged Dynamic Hopping Robot [Text] / G. Zeglin. — Massachusetts Institute of Technology, 1991. — 65 p.
4. Sato, A. A Planar Hopping Robot with One Actuator: Design, Simulation, and Experimental Results [Text] / A. Sato. — Department of Mechanical Engineering, Montreal, Canada, 2004. — 106 p.
5. Kovac, M. A miniature 7g jumping robot [Text] / M. Kovac, M. Fuchs, A. Guignard // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation. — Pasadena, 2008. — P. 373–378.
6. Волкова, Л.Ю. Исследование движения многозвального робота, перемещающегося с отрывом от поверхности [Текст] / Л.Ю. Волкова, В.В. Серебровский, С.Ф. Яцун // Известия Юго-Западного гос. ун-та. — 2012. — № 1(40). — Ч. 2. — С. 12–18.
7. Яцун, С.Ф. Исследование динамики управляемого прыжка робота [Текст] / С.Ф. Яцун, А.Н. Рукавицын, Л.Ю. Волкова // Известия Самарского науч. центра РАН. — 2012. — Т. 14. — № 4(5). — С. 1355–1358.
8. Яцун, С.Ф. Управление высотой и длиной прыжка робота путем его позиционирования и разгона [Текст] / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова // Известия Юго-Западного гос. ун-та. Техника и технологии. — 2012. — № 2. — Ч. 1. — С. 210–213.
9. Яцун, С.Ф. Исследование влияния закона втягивания ноги в полете на высоту и длину прыжка многозвального робота [Текст] / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова // Mater. IX Mezinárodní vědecko-praktická conf. Moderní vymoženosti vědy — 2013. — Praha. — С. 77–81.
10. Лушников, Б.В. Компьютерное моделирование динамики элемента сухого некулонова трения [Текст] / Б.В. Лушников // Известия

Самарского науч. центра РАН. – 2010. – Т. 12. – № 1(2). – С.439–444.

11. **Лушников, Б.В.** Испытательный стенд для идентификации динамических параметров сухого некулонова трения [Текст] / Б.В. Лушников // *Фундаментальные исследования*. – 2012.

– № 3. – Ч. 3. – С. 238–241.

12. **Болотник, Н.Н.** Динамика управляемых движений вибрационных систем [Текст] / Н.Н. Болотник, И.М. Зейдис, К. Циммерман, С.Ф. Яцун // *Известия РАН ТИСУ*. – 2006. – № 5. – С. 157–167.

REFERENCES

1. **Zufferey J.-C.** First Jumps of the 3D Bow Leg Hopper / *Micro-engineering, EPFL*. – 2001. – 65 p.

2. **Ishikawa A., Neki M., Hara J.** Energy preserving control of a hopping robot based on hybrid port-controlled hamiltonian modelling / *IEEE Conf. on Control Applications*. – Yokohama, Japan, 2003. – Vol. 2. – P. 1136–1141.

3. **Zeglin G.** Uniuroo: A One-Legged Dynamic Hopping Robot. – Massachusetts Institute of Technology, 1991. – 65 p.

4. **Sato A.** A Planar Hopping Robot with One Actuator: Design, Simulation, and Experimental Results. – Department of Mechanical Engineering, Montreal, Canada, 2004. – 106 p.

5. **Kovac M., Fuchs M., Guignard A.** A miniature 7g jumping / *Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation*. – Pasadena, 2008. – P. 373–378.

6. **Volkova L.Yu., Serebrovsky V.V., Jatsun S.F.** Issledovanie dvizheniya mnogozvennogo robota, peremeschayuschegosya s otrivom ot poverhnosti [Research of movement of the multilink robot moving with a jump from a surface] // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gos. un-ta*. – 2012. – № 1 (40). – Ch. 2. – S. 12–18. (rus)

7. **Jatsun S.F., Rukavitsyn A.N., Volkova L.Yu.** Issledovanie dinamiki upravlyaemogo pryizhka robota [Research of dynamics of operated jump of the robot] / *Izvestiya Samarskogo nauch. tsentra RAN*. – 2012. – Т. 14. – № 4 (5). – S. 1355–1358. (rus)

8. **Jatsun S.F., Volkova L.Yu.** Upravlenie vyisotoy i dlinoy pryizhka robota putem ego pozitsionirovaniya i razgona [Control of high and length of the jump by its positioning and lift-off] / *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gos. un-ta*. – 2012. – № 2. – Ch. 1. – S. 210–213. (rus)

9. **Jatsun S.F., Volkova L.Yu.** Issledovanie vliyaniya zakona vtyagivaniya nogi v polete na vyisotu i dlinu pryizhka mnogozvennogo robota [Investigation of the influence of the law of the retraction of leg on high and length of the jump of the multilink jumping robot] / *Mater. IX Mezinárodní vědecko-praktická conf. Moderní vymoženosti vědy* – 2013. – Praha. – P. 77–81.

10. **Lushnikov B.V.** Kompyuternoe modelirovanie dinamiki elementa suhogo nekulonova treniya [Computer modelling of the dynamics of the element of dry no-Coulomb friction] / *Izvestiya Samarskogo nauch. tsentra RAN*. – 2010. – Т. 12. – № 1(2). – S. 439–444. (rus)

11. **Lushnikov B.V.** Ispytatelnyiy sten dlya identifikatsii dinamiceskikh parametrov suhogo nekulonova treniya [Test bench for identification of the dynamic parameters of dry no-Coulomb friction] / *Fundamentalnyie issledovaniya*. – 2012. – № 3. – Ч. 3. – С. 238–241. (rus)

12. **Bolotnik N.N., Zeidis I.M., Zimmerman K. et. al.** Dinamika upravlyaemykh dvizheniy vibratsionnykh sistem [Dynamics of operated movements of vibration systems] / *Izvestiya RAN TISU*. – 2006. – № 5. – S. 157–167. (rus)

ЯЦУН Сергей Федорович – *заведующий кафедрой теоретической механики и мехатроники Юго-Западного государственного университета, доктор технических наук, профессор.*

305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

E-mail: teormeh@inbox.ru

JATSUN, Sergey F. *South-West State University.*

305040, 50 let Oktyabry Str. 94, Kursk, Russia.

E-mail: teormeh@inbox.ru

ЛОКТИОНОВА Оксана Геннадьевна – *проректор по учебной работе Юго-Западного государственного университета, доктор технических наук, профессор.*

305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

E-mail: teormeh@inbox.ru

ЛОКТИОНОВА, Оксана G. *South-West State University.*
305040, 50 let Oktyabry Str. 94, Kursk, Russia.
E-mail: teormeh@inbox.ru

ВОЛКОВА Людмила Юрьевна – аспирант Юго-Западного государственного университета.
305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.
E-mail: mila180888@yandex.ru

VOLKOVA, Lyudmila Yu. *South-West State University.*
305040, 50 let Oktyabry Str. 94, Kursk, Russia.
E-mail: mila180888@yandex.ru

ВОРОЧАЕВ Александр Валерьевич – студент Юго-Западного государственного университета.
305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.
E-mail: teormeh@inbox.ru

VOROCHEV, Alexander V. *South-West State University.*
305040, 50 let Oktyabry Str. 94, Kursk, Russia.
E-mail: teormeh@inbox.ru