

УДК 62-503.5

UDC 62-503.5

ЭТАПЫ ДВИЖЕНИЯ ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО РОБОТА, ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ С ОТРЫВОМ ОТ ПОВЕРХНОСТИ

STAGES OF MOVEMENT OF THE FOURLINK ROBOT MOVING WITH THE JUMP FROM THE SURFACE

Локтионова Оксана Геннадьевна
д.т.н., доцент

Loktionova Oksana Gennadievna
Dr.Sci.Tech., associate professor

*Юго-Западный государственный университет,
Курск, Россия
e-mail: teormeh@inbox.ru*

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

Яцун Сергей Федорович
д.т.н., профессор

Jatsun Sergey Fedorovich
Dr.Sci.Tech., professor

*Юго-Западный государственный университет,
Курск, Россия,
e-mail: teormeh@inbox.ru*

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

Серебровский Вадим Владимирович
д.т.н., профессор

Serebrovsky Vadim Vladimirovich
Dr.Sci.Tech., professor

*Юго-Западный государственный университет,
Курск, Россия*

South-West State University, Kursk, Russia

Волкова Людмила Юрьевна
аспирантка

Volkova Lyudmila Yurievna
postgraduate student

*Юго-Западный государственный университет,
Курск, Россия
e-mail: mila180888@yandex.ru*

*South-West State University, Kursk, Russia
e-mail: mila180888@yandex.ru*

Приведена расчетная схема четырехзвеного 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

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

Ключевые слова: ПРЫГАЮЩИЙ МНОГОЗВЕННЫЙ РОБОТ, ЭТАПЫ ПРЫЖКА, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЭТАПОВ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЫЖКА, ВЫСОТА, ДЛИНА

Keywords: MULTILINK JUMPING ROBOT, STAGES OF JUMP, SEQUENCE OF STAGES, CHARACTERISTICS OF THE JUMP, HEIGHT, LENGHT

Введение

Интерес к прыгающим роботам в последние годы все время возрастает, проектируются и исследуются различные по конструкции и способу прыжка роботы, параметры прыжка (высота и длина) которые

также сильно отличаются. Общим для большинства ученых, занимающихся прыгающими роботами, 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 описанного в данной работе 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

Исследуемый прыгающий робот состоит из четырех звеньев $i=1\div 4$, связанных между собой приводами вращательного 5, 6 и поступательного 7 движения, звено 1 соответствует стопе, звенья 2 и 3 – ноге, звено 4 – корпусу (рис. 1). Звено 3 установлено в центре симметрии звена 4 – точке C_4 [6-9].

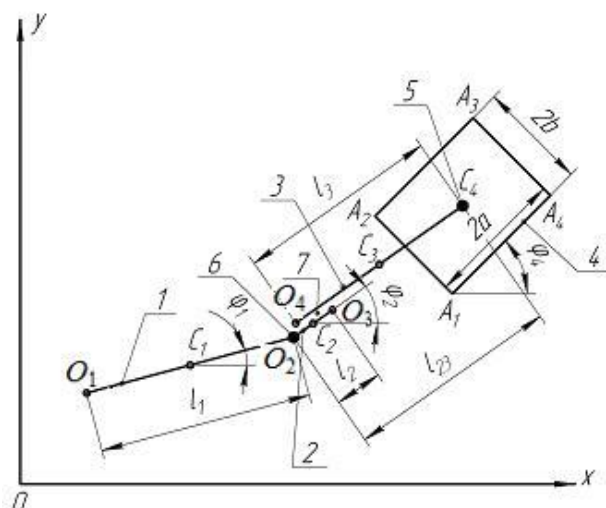


Рис. 1 Расчетная схема многозвенного прыгающего робота: 1 – 4 - звенья, 5 – 7 – приводы

Движение робота происходит в вертикальной плоскости Oxy , в которой звенья $i=1\div 3$ представляют собой стержни длинами l_i , а звено 4 имеет вид прямоугольника с размерами $2a \times 2b$. Массы звеньев m_i сосредоточены в центрах их симметрии – точках C_i . Углы наклона звеньев к оси Ox равны $j_1, j_2, j_3 = j_2, j_4$, относительное перемещение звеньев 2 и 3 – l_{23} .

Взаимодействие робота с опорной поверхностью

При нахождении робота на поверхности, взаимодействие с последней может происходить звеном 1 или 4. При этом возникают распределенные силы трения и нормальной реакции. Будем считать, что если на поверхности находится звено 1, то нормальные реакции будут приводиться к крайним точкам O_1 и O_2 (N_{O1}, N_{O2}) звена, а сила трения F_{fr} - к точке O_2 , что обусловлено конструктивными особенностями опорного элемента в этой точке, имеющего форму иглы.

Когда на поверхности находится звено 4, взаимодействие с последней может происходить в одной из точек $A_j, j=1 - 4$, или в двух точках, если

одна из сторон корпуса параллельна оси Ox . В первом случае точка контакта представляет собой центр приведения сил трения и нормальной реакции, во втором случае приведенные нормальные реакции будут сосредоточены в крайних точках стороны корпуса, находящейся на поверхности, а приведенная сила трения только в одной из данных точек – в последней точке отрыва корпуса от поверхности или в первой точке приземления. Это объясняется тем, что точки A_j звена 4 оснащены опорными элементами (рис. 2), силы трения в которых с поверхностью являются управляемыми величинами, что достигается применением специальных приводов, изменяющих свойства этих элементов. То есть, в одной из точек контакта звена 4 с поверхностью сила трения может иметь некоторое ненулевое значение, а в другой - быть равной нулю.

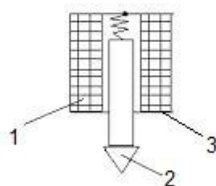


Рис. 2 Опорные элементы в точках A_j корпуса: 1 – электромагнитный привод, 2 – опорный элемент при ненулевой силе трения, 3 – опорный элемент при нулевой силе трения

Для удобства точку, в которой возникает сила трения, будем обозначать K . Взаимодействие этой точки с поверхностью может описываться различными моделями силы трения: сухое кулоново трение, трение с уменьшенной динамической составляющей, трение с непрерывно падающей характеристикой (некулоново трение) [10, 11]. Положим, что возникающая сила трения описывается моделью Кулона [12]:

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

где F_{0x} – горизонтальная проекция равнодействующей всех сил, кроме силы сухого трения, приложенных к звену, взаимодействующему с поверхностью; f – коэффициент трения скольжения; N – нормальная реакция в точке K ; \dot{x}_K – скорость точки K вдоль оси Ox . Рассмотрим случай, когда значение силы трения всегда меньше предельного

$$|F_{0x}| < fN, \quad (2)$$

то есть, скольжения звена робота, контактирующего с поверхностью, не происходит.

Математическая модель прыжка робота

Для разработки математической модели запишем вектор координат q , которым будет определяться положение звеньев робота

$$\bar{q} = (x_1 \ y_1 \ x_4 \ y_4 \ j_1 \ j_2 \ j_4 \ l_{23})^T, \quad (3)$$

где x_1, y_1, x_4, y_4 – координаты центров масс звеньев 1 и 4, j_1, j_2 и j_4 – углы поворота звеньев 1, 2 и 4, l_{23} – длина ноги робота. Углы j_1 и j_2 будем определять как углы между соответствующими звеньями и положительным направлением оси Ox , угол j_4 – как угол, под которым сторона корпуса A_1A_4 наклонена к горизонтальной оси.

Система дифференциальных уравнений движения робота в матричной форме имеет вид

$$A(q)\ddot{q} + B(q)\dot{q}^2 + C(q)j\dot{q}_{23} = F. \quad (4)$$

где $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ – матрицы коэффициентов, F – матрица обобщенных сил.

Этапы прыжка робота

Прыжок устройства начинается из положения, в котором звено 4 робота находится на поверхности, звенья 1, 2 и 3 полностью втянуты в корпус (звено 4) – $l_{23} = l_{23}^{\min}$ – и расположены под некоторыми

произвольными углами к горизонту: $j_1, j_2, j_3=j_2$ и представляет собой последовательность семи этапов ($k=1\div 7$).

1 этап. Звенья 1 – 3, жестко связанные между собой, поворачиваются относительно точки C_4 за счет момента M_{43} , создаваемого приводом 5, до выполнения условия $j_2=j_2^0$, где j_2^0 – угол наклона звеньев 2 и 3 к оси Ox , под которым действует сила, отрывающая робота от поверхности. Обобщенной координатой выступает угол j_2 :

$$a_{66}^1 j_2^2 + b_{66}^1 j_2^2 = F_{61}^1. \quad (5)$$

2 этап. Звено 1 поворачивается относительно точки O_2 под действием момента M_{21} , формируемого приводом 6, до тех пор, пока не выполнится условие $j_1=j_1^0=p$. Дифференциальное уравнение по j_1 имеет вид

$$a_{55}^2 j_1^2 = F_{51}^2. \quad (6)$$

3 этап. 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

$$a_{88}^3 l_{23}^2 = F_{81}^3. \quad (7)$$

4 этап. 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} , которая является начальной скоростью этапа полета. В качестве обобщенной координаты выступает l_{23} .

$$a_{88}^4 l_{23}^2 = F_{81}^4. \quad (8)$$

5 этап. 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

$$a_{33}^5 \ddot{\varphi}_4 + a_{37}^5 \ddot{\varphi}_4 + a_{38}^5 \ddot{\varphi}_4 + b_{37}^5 j_4^2 + c_{33}^5 l_{23} \dot{\varphi}_4 = F_{31}^5, \quad (9)$$

$$a_{44}^5 \ddot{\varphi}_4 + a_{47}^5 \ddot{\varphi}_4 + a_{48}^5 \ddot{\varphi}_4 + b_{47}^5 j_4^2 + c_{44}^5 l_{23} \dot{\varphi}_4 = F_{41}^5, \quad (10)$$

$$a_{77}^5 \ddot{\varphi}_4 + a_{73}^5 \ddot{\varphi}_4 + a_{74}^5 \ddot{\varphi}_4 + a_{78}^5 \ddot{\varphi}_4 + b_{77}^5 j_4^2 + c_{77}^5 l_{23} \dot{\varphi}_4 = F_{71}^5, \quad (11)$$

$$a_{88}^5 \ddot{\varphi}_4 + a_{83}^5 \ddot{\varphi}_4 + a_{84}^5 \ddot{\varphi}_4 + a_{87}^5 \ddot{\varphi}_4 + b_{87}^5 j_4^2 = F_{81}^5. \quad (12)$$

6 этап. 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 j_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.

7 этап. 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

$$a_{77}^7 \ddot{\varphi}_4 + b_{77}^7 j_4^2 = F_{71}^7. \quad (13)$$

В формулах (5) – (13) использованы обозначения

a_{mn}^k , $m=1\div 8$, $n=1\div 8$ – коэффициенты при вторых производных обобщенных координат,

b_{mn}^k , $m=1\div 8$, $n=1\div 8$ – коэффициенты при квадратах первых производных обобщенных координат,

F_{mn}^k , $m=1\div 8$, $n=1\div 8$ – 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 j_2^0 и j_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. Диаграмма логических уровней управляющих параметров представлена на рис. 3, 0 – отсутствие сигнала, ± 1 – наличие сигнала.

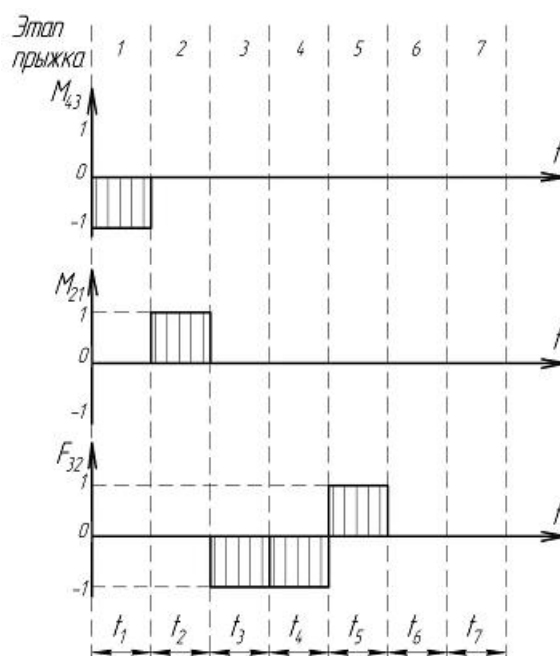


Рис. 3 Циклограмма управляющих моментов и сил

Высота и длина прыжка варьируются за счет изменения временных интервалов $t_1 - t_5$ этапов 1 – 5, что позволяет формировать различные значения угла j_2^0 , под которым происходит разгон устройства, скорости v_{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:

$$l_{23}^{\min} + l_1 \leq b, l_{23}^{\min} + l_1 \leq a, l_2 \leq b, l_2 \leq a, l_3 \leq b, l_3 \leq a, l_{23}^0 > \frac{b}{\sin j_2^0}. \quad (14)$$

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: $m_1=1, m_2=1, m_3=1, m_4=7, a=1, b=1, l_1=0.5, l_2=0.9, l_3=0.9, l_{23}^{\min}=0.4, l_{23}^0=1.8, \theta_{23}^0=4, j_2^0=\pi/4$. Моделирование проводится при начальных условиях: $t=0, x_4=a, \dot{x}_4=0, y_4=b, \dot{y}_4=0, j_4=0, \dot{j}_4=0, j_1=p, \dot{j}_1=0, j_2=p/2, \dot{j}_2=0$.

На рис. 4 – 7 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.

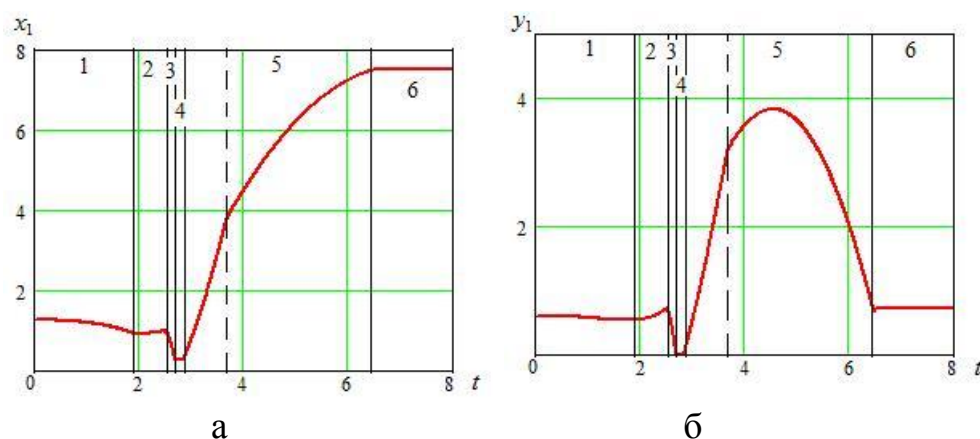


Рис. 4 Графики зависимостей: а – $x_1(t)$, б – $y_1(t)$

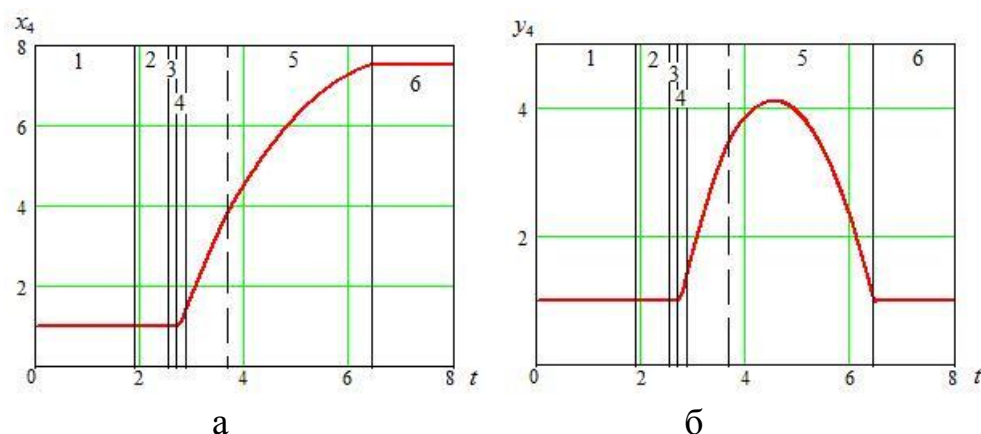


Рис. 5 Графики зависимостей: а – $x_4(t)$, б – $y_4(t)$

На первых трех этапах, во время которых происходит позиционирование робота, центр масс корпуса неподвижен ($x_4 = \text{const}$, $y_4 = \text{const}$, $j_4 = \text{const}$). Звено 1 на первом этапе поворачивается вместе со звеном 2 ($\Delta j_1 = \Delta j_2$) до тех пор, пока не станет справедливым условие $j_2 = j_2^0$ (в рассматриваемом случае $j_2^0 = \pi/4$), что также отражается на временных зависимостях координат центра масс стопы.

Во время второго этапа происходит поворот звена 1 против часовой стрелки до достижения значения $j_1 = \pi$, траектория $y_1(x_1)$ на этом этапе имеет форму дуги окружности.

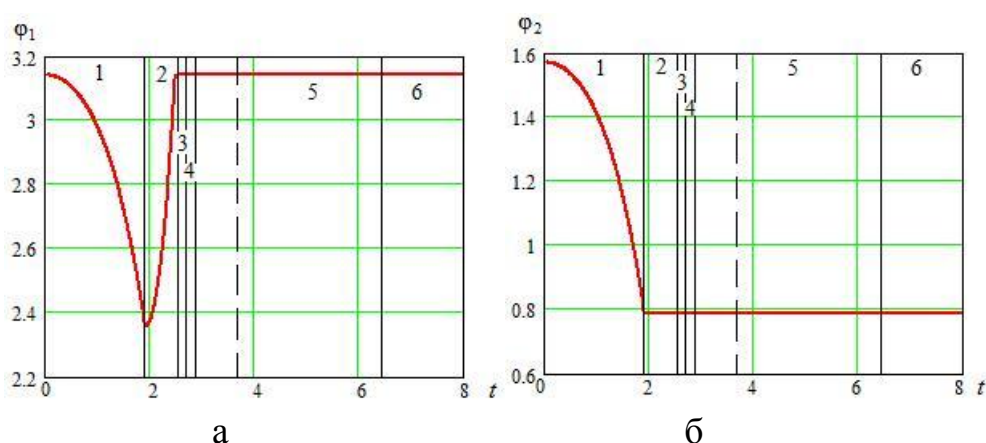


Рис. 6 Графики зависимостей: а – $j_1(t)$, б – $j_2(t)$

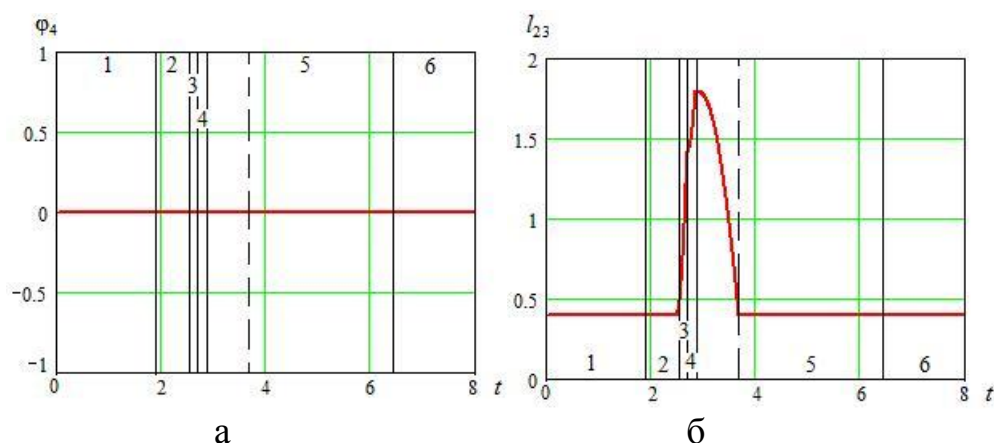


Рис. 7 Графики зависимостей: а – $j_4(t)$, б – $l_{23}(t)$

На третьем этапе наблюдается выдвижение звеньев 1 и 2 до взаимодействия звена 1 с поверхностью, что находит отражение на графиках рис. 4, 6а, 7б, причем изменение координат точки C_1 равно $\Delta x_1 = \Delta l_{23} \cos j_2^0$, $\Delta y_1 = \Delta l_{23} \sin j_2^0$, 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 по ветви параболы, что видно по графику рис. 7б, 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 $\Delta x_4 = \Delta l_{23} \cos j_2^0$, $\Delta y_4 = \Delta l_{23} \sin j_2^0$. 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. 6, 7а.

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. 7б. Звенья 1 и 2 перемещаются относительно корпуса до тех пор, пока значение l_{23} не станет равным начальному ($l_{23} = l_{23}^{\min}$), это наблюдается до момента времени, отмеченного на всех графиках пунктирной линией. На этом участке пятого этапа (до пунктирной 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 $\dot{x}_1 = \dot{x}_4 + \dot{l}_{23} \cos j_2$, $\dot{y}_1 = \dot{y}_4 + \dot{l}_{23} \sin j_2$. 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 разработанного алгоритма и программы моделирования прыжка робота, что подтверждается соответствием характера изменения координат вектора q описанной последовательности этапов движения устройства.

Заключение

В статье рассматривается 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 // Micro-engineering, EPFL. 2001. 65 p.
2. 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.
3. Zeglin G. Uniroo: 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. et al. A miniature 7g jumping robot // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. Pasadena. 2008. P. 373–378.

6. 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.

7. 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.

8. Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю. Управление высотой и длиной прыжка робота путем его позиционирования и разгона // Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технологии. 2012. № 2. Ч. 1 С. 210-213.

9. Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю. Исследование влияния закона втягивания ноги в полете на высоту и длину прыжка многозвенного робота // Materiály IX mezinárodní vědecko - praktická conference «Moderní vymoženosti vědy – 2013». Praha, Str. 77-81.

10. Лушников Б.В. Компьютерное моделирование динамики элемента сухого некулонова трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т.12. №1(2). С.439-444.

11. Лушников Б.В. Испытательный стенд для идентификации динамических параметров сухого некулонова трения // Фундаментальные исследования. 2012. №3. Ч.3. С. 238-241.

12. Болотник Н. Н., Зейдис И.М., Циммерман К. и др. Динамика управляемых движений вибрационных систем // Изв. 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 r.

2. 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.

3. Zeglin G. Uniuro: A One-Legged Dynamic Hopping Robot // Massachusetts Institute of Technology. 1991. 65 r.

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

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

6. Volkova L.Ju., Serebrovskij V.V., Jacun S.F. Issledovanie dvizhenija mnogozvennogo robota, peremeshhajushhegosja s otrivom ot poverhnosti // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. № 1 (40). Ch. 2. S. 12-18.

7. Jacun S.F., Rukavicyn A.N., Volkova L.Ju. Issledovanie dinamiki upravljaemogo pryzhka robota // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2012. Т. 14. №4(5). S. 1355 – 1358.

8. Jacun S.F., Volkova L.Ju. Upravlenie vysotoj i dlinoj pryzhka robota putem ego pozicionirovanija i razgona // Izvestija JuZGU. Serija Tehnika i tehnologii. 2012. № 2. Ch. 1 S. 210-213.

9. Jacun S.F., Volkova L.Ju. Issledovanie vlijanija zakona vtjagivaniija nogi v polete na vysotu i dlinu pryzhka mnogozvennogo robota // Materiály IX mezinárodní vědecko - praktická conference «Moderní vymoženosti vědy – 2013». Praha, Str. 77-81.

10. Lushnikov B.V. Komp'juternoe modelirovanie dinamiki jelementa suhogo nekulonova trenija // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2010. Т.12. №1(2). S.439-444.

11. Lushnikov B.V. Ispytatel'nyj stand dlja identifikacii dinamicheskikh parametrov suhogo nekulonova trenija // Fundamental'nye issledovanija. 2012. №3. Ch.3. S. 238-241.
12. Bolotnik N. N., Zejdis I.M., Cimmerman K. i dr. Dinamika upravljaemyh dvizhenij vibracionnyh sistem // Izv. RAN.TiSU. 2006. №5. S. 157–167.