

УДК 62-503.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА, ОСНАЩЕННОГО КРЫЛЬЯМИ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ¹

О.Г. Локтионова (*teormeh@inbox.ru*)

Л.Ю. Ворочаева (*mila180888@yandex.ru*)

А.В. Ворочаев (*sasha-vorochaev@yandex.ru*)

Юго-Западный государственный университет, Курск

В работе рассматривается прыгающе-летающий робот, крылья которого обеспечивают планирование устройства во время этапа полета, разработана математическая модель движения аппарата, особое внимание уделено взаимодействию крыльев с окружающей средой.

Введение

В современном мире разработке конструкций и исследованию движения прыгающих роботов уделяется большое внимание российских и зарубежных ученых, что объясняется хорошей проходимостью таких устройств при движении по неровной и пересеченной местности [Armour и др., 2007], [Hyon и др., 2002], [Stoeter и др., 2002], [Weiss, 2001]. Это в перспективе позволит внедрять их в различные области промышленности и хозяйства, например, использовать для мониторинга местности, проведения поисковых и спасательных работ, а также разведывательных мероприятий в военных целях. Использование прыгающими роботами крыльев, посредством которых обеспечивается их планирование во время прыжка, расширяет функциональные возможности аппаратов за счет увеличения дальности прыжка и высоты, с которой может осуществляться прыжок, последнее достигается путем снижения скорости устройства при падении на поверхность [Burdick и др., 2003], [Roberts и др., 2008]. Все это говорит об актуальности темы исследования.

1. Описание прыгающего робота, оснащенного системой крыльев

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-08-00581).

В работе рассматривается робот, состоящий из прыжкового и летательного модулей, трехмерная модель которого приведена на рис. 1. Прыжковый модуль образован звеньями 1 – 4, причем звено 1 представляет собой стопу, звенья 2 и 3 образуют ногу, а звено 4 является корпусом. На звеньях 4 и 2 установлены приводы вращательного движения 6 и 7 соответственно, посредством которых обеспечивается поворот звеньев 3 и 1 относительно звеньев 4 и 2. На звене 2 закреплен привод поступательного движения 8, обеспечивающий перемещение звеньев 2 и 3 друг относительно друга. Корпус представляет собой каркас в форме параллелепипеда. Летательный модуль состоит из крыльев 5, поворот относительно корпуса и раскрытие которых осуществляется приводом 9. Движение устройства по поверхности происходит за счет прыжков и раскрытия крыльев в наивысшей точке прыжка. Последнее позволяет увеличить дальность полета робота и уменьшить скорость его падения, что, в свою очередь, защищает устройство от повреждения при прыжке с большой высоты.

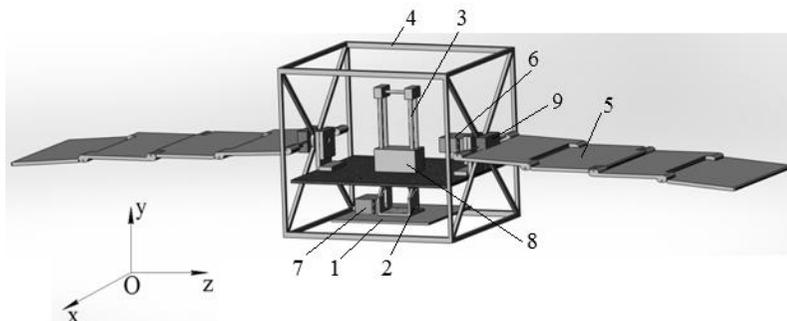


Рис. 1. Трехмерная модель прыгающе-летающего робота

2. Математическая модель движения робота во время полета

Для разработки математической модели прыгающе-летающего аппарата рассмотрим схему, показанную на рис. 2.

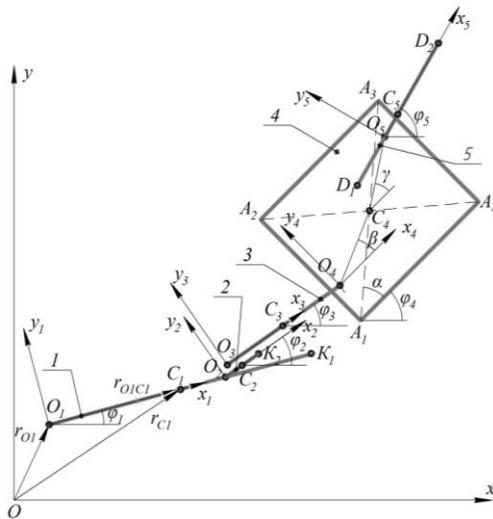


Рис. 2. Расчетная схема прыгающе-летающего робота

Будем считать, что все звенья устройства являются абсолютно твердыми телами, причем звенья 1 – 3, 5 представляют собой стержни длинами $l_i, i=1-3, 5$, а звено 4 – прямоугольник $A_1A_2A_3A_4$ размерами $2ax2b$. Центры масс $m_i, i=1-5$, звеньев сосредоточены в центрах их симметрии – точках C_i . Положим, что масса крыльев очень мала, поэтому учитывать ее в математической модели не будем. Длина ноги задается расстоянием l_{23} между точками O_2 и O_4 , положение последней в корпусе определяется расстоянием l_4 и углом β . Положение точки O_5 закрепления крыла в корпусе задается расстоянием C_4O_5 и углом γ .

Методика прыжка и математические модели этапов были описаны в работах [Волкова и др., 2013], [Яцун и др., 2013а], [Яцун и др., 2013б]. Отличием данной модели является наличие крыльев, поэтому особое внимание уделено влиянию среды на прыжок. Поэтому в статье записаны дифференциальные уравнения, описывающие поведение робота только на этапе полета.

Во время этого этапа аппарат движется с отрывом от поверхности, центр масс корпуса перемещается вдоль осей Ox и Oy , а также корпус может вращаться относительно его центра масс. Звенья 3 и 5 жестко зафиксированы в корпусе устройства, звенья 2 и 1 – между собой. Звенья ноги 1 и 2 во время полета втягиваются в корпус при помощи силы F_{32} , формируемой приводом 7, до тех пор, пока длина ноги не станет наименьшей ($l_{23}=l_{23}^{\min}$), это соответствует случаю, когда время втягивания

ноги в корпус меньше времени полета (рис. 3, а). Крылья 5 используются для планирования аппарата после достижения им высшей точки прыжка.

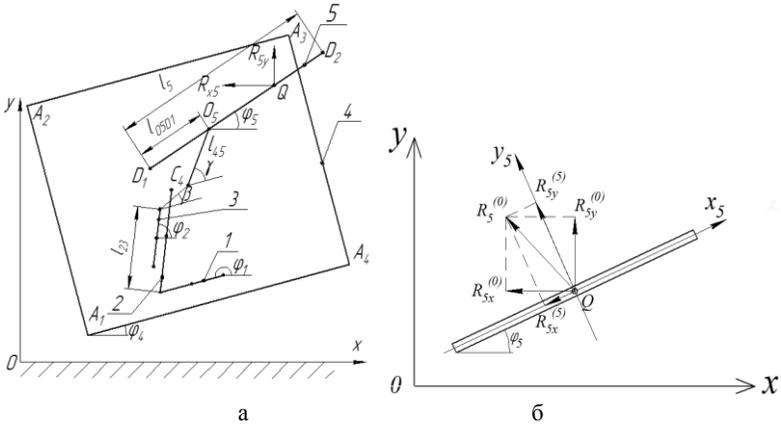


Рис. 3. а - Расчетная схема прыгающе-летающего робота на этапе полета, б – Схема приложения аэродинамической силы к крылу

На этом этапе движение робота описывается четырьмя дифференциальными уравнениями по обобщенным координатам x_{C4} , y_{C4} , φ_4 , l_{23} :

$$a_{11}\ddot{x}_{C4} + a_{13}\ddot{\varphi}_4 + a_{14}\ddot{l}_{23} + b_{13}\dot{\varphi}_4^2 + c_{11}l_{23}\dot{\varphi}_4 = R_{5x}, \quad (2.1)$$

$$a_{22}\ddot{y}_4 + a_{23}\ddot{\varphi}_4 + a_{24}\ddot{l}_{23} + b_{23}\dot{\varphi}_4^2 + c_{22}l_{23}\dot{\varphi}_4 = -(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g + R_{5y}, \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} a_{33}\ddot{\varphi}_4 + a_{31}\ddot{x}_4 + a_{32}\ddot{y}_4 + a_{34}\ddot{l}_{23} + b_{33}\dot{\varphi}_4^2 + c_{33}l_{23}\dot{\varphi}_4 = \\ = (m_1 + m_2 + m_3)g \frac{l_4}{2} \cos(\varphi_4 + \beta) + M_5 \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$a_{44}\ddot{l}_{23} + a_{41}\ddot{x}_4 + a_{42}\ddot{y}_4 + a_{43}\ddot{\varphi}_4 + b_{43}\dot{\varphi}_4^2 = F_{32} - (m_1 + m_2)g \sin \varphi_2, \quad (2.4)$$

где a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , $i=1-4, j=1-4$ – коэффициенты.

В качестве точки приложения аэродинамической силы будем рассматривать точку Q крыла, положение которой определяется следующим образом:

$$l_{D1Q} = \frac{(3Al_5^2 + 4Bl_5 + 6C)l_5}{4Al_5^2 + 6Bl_5 + 12C}, \quad (2.5)$$

где A , B и C - коэффициенты.

Проекции аэродинамической силы, приложенной к точке Q , вычисляются по формулам (рис. 3, б):

$$R_{5x} = \frac{C_R \rho S_5^{O5x5}}{2} \cdot \dot{y}_Q^{(5)} \left| \dot{y}_Q^{(5)} \right| \cos \varphi_5, \quad (2.6)$$

$$R_{5y} = \frac{C_R \rho S_5^{O5x5}}{2} \cdot \dot{y}_Q^{(5)} \left| \dot{y}_Q^{(5)} \right| \sin \varphi_5, \quad (2.7)$$

где ρ - массовая плотность воздуха, C_R - безразмерный коэффициент аэродинамической силы, S_5^{O5x5} - площадь крыла вдоль оси O_5x_5 , $\dot{y}_Q^{(5)}$ - проекция скорости точки Q на ось O_5y_5 .

Аэродинамические силы определяются из условий:

$$R_{5x} = \begin{cases} R_{5x}, & \text{если } \dot{y}_{C4} < 0 \\ 0, & \text{если } \dot{y}_{C4} \geq 0 \end{cases}, \quad R_{5y} = \begin{cases} R_{5y}, & \text{если } \dot{y}_{C4} < 0 \\ 0, & \text{если } \dot{y}_{C4} \geq 0 \end{cases}. \quad (2.8)$$

Момент, создаваемый аэродинамическими силами, имеет вид:

$$M_5 = R_{5x} (l_{45} \cos(\gamma + \varphi_4) - (l_{O5D1} - l_{D1Q}) \cos \varphi_5) - R_{5y} (l_{45} \sin(\gamma + \varphi_4) - (l_{O5D1} - l_{D1Q}) \sin \varphi_5). \quad (2.9)$$

3. Исследование влияния крыльев на траекторию полета

Разработанная математическая модель позволила провести исследование влияния аэродинамических сил и момента на траекторию движения центра масс корпуса прыгающе-летающего робота. Моделирование проводилось для робота массой 0,1 кг с размерами корпуса $a=0,1$ м, $b=0,1$ м и длиной крыла $l_{D1D2}=0.2$ м. Массовая плотность воздуха $\rho=1.2$ кг·с²/м⁴, коэффициент аэродинамической силы $C_R=0.6$. Рассмотрим случай, когда крыло закреплено в корпусе в точке C_5 , совпадающей с центром масс корпуса ($l_{45}=0$ м), вращения робота в полете при этом не происходит, положение точки Q на крыле остается неизменным и равным $l_{D1Q} = 0,5l_5$ (рис. 4).

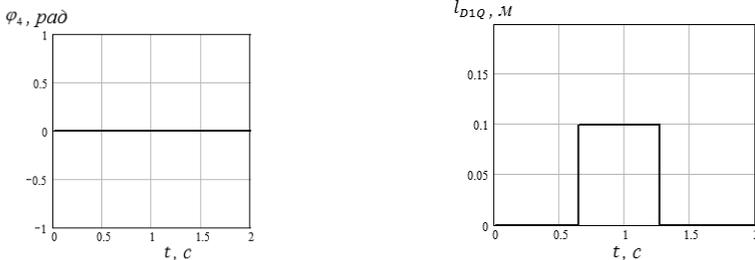


Рис. 4. Графики зависимостей: а – $\varphi_4(t)$, б – $l_{D1Q}(t)$

На рис. 5 представлены графики траекторий движения робота при наличии крыльев (кривая 2) и без них (кривая 1), по которым видно, что дальность прыжка робота с крыльями возрастает примерно на 8%.

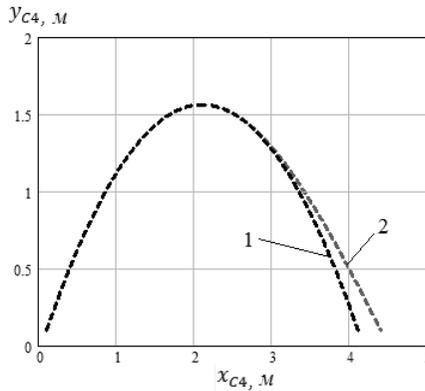


Рис. 5. Траектория движения устройства: 1 – без крыльев; 2 – при наличии крыльев

На рис. 6 показано влияние площади крыльев S_5 на траекторию движения устройства.

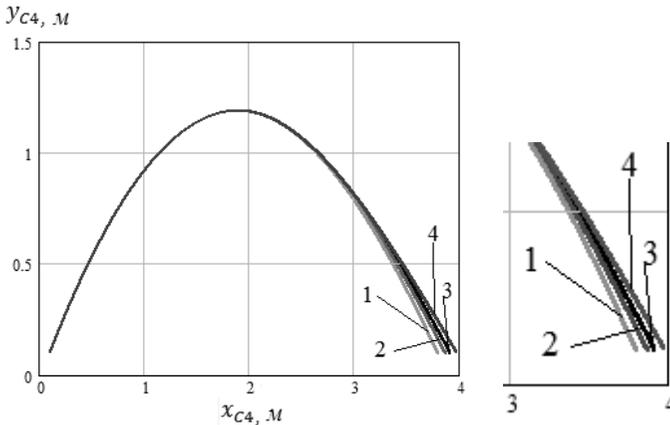


Рис. 6. Траектории движения устройства при: 1 - $S_5=0.1 \text{ м}^2$, 2 - $S_5=0.16 \text{ м}^2$, 3 - $S_5=0.2 \text{ м}^2$, 4 - $S_5=0.25 \text{ м}^2$

Из полученного графика видно, что чем больше площадь крыльев, тем больше длина прыжка. При прыжке с нулевой высоты влияние площади крыльев на дальность прыжка сравнительно незначительное, это обусловлено тем, что аппарат не успевает набрать достаточную вертикальную скорость, чтобы значение подъемной аэродинамической силы позволило существенно увеличить длину прыжка. Так увеличение площади крыла в 2,5 раза позволяет добиться возрастания дальности полета на 0,25 м, что составляет 6% от первоначальной длины прыжка. Из

этого можно сделать вывод, что при прыжке с нулевой высоты использование крыльев нецелесообразно.

Для исследования влияния угла φ_{45} наклона крыла относительно корпуса на траекторию движения устройства было проведено моделирование прыжка для различных углов φ_{45} с трех разных начальных высот (рис. 7).

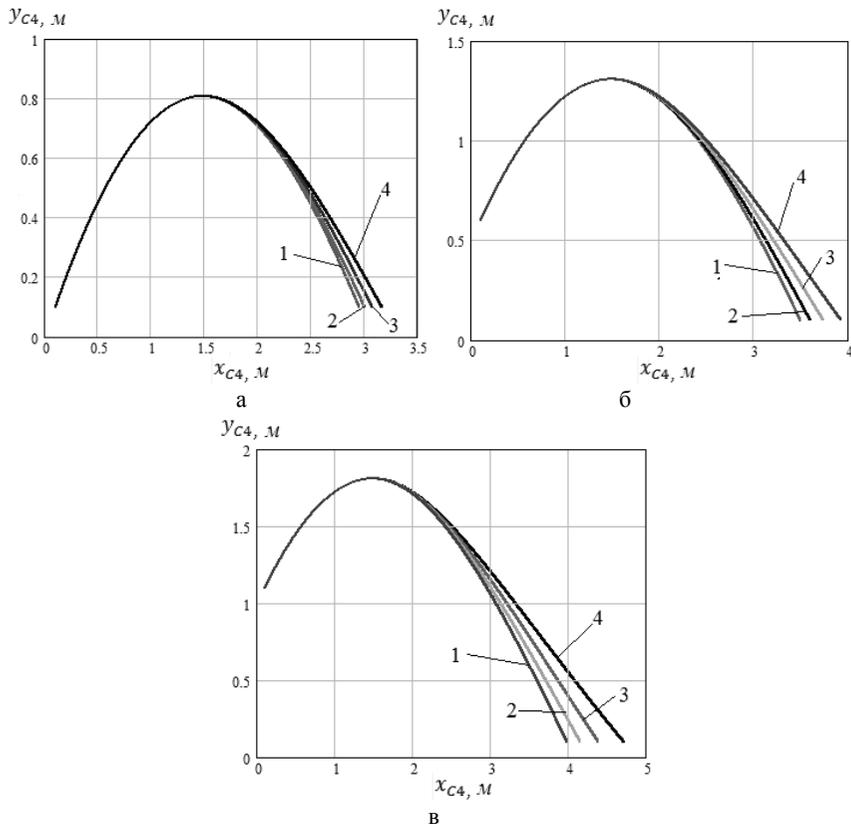


Рис. 7. Траектории движения устройства при прыжке с высоты: а - $h=0$ м, б - $h=0.5$ м, в - $h=1$ м, при угле наклона крыла относительно корпуса φ_{45} :
 1 - $\varphi_{45}=0^\circ$, 2 - $\varphi_{45}=5^\circ$, 3 - $\varphi_{45}=10^\circ$, 4 - $\varphi_{45}=15^\circ$

На основании анализа полученных траекторий установлено, что с увеличением угла наклона крыла относительно корпуса длина прыжка возрастает. Причем эта зависимость наиболее хорошо просматривается при прыжках не с нулевой высоты. Так, при прыжке с нулевой высоты приращение длины прыжка при $\varphi_{45}=15^\circ$ по сравнению с $\varphi_{45}=0^\circ$ равно 0,3 м,

что составляет 10% от исходной дальности прыжка, с высоты $h=0,5$ м длина прыжка увеличивается на 0,5 м (15%), с высоты $h=1$ м – на 0,8 м (20%).

Заключение

В работе рассмотрен прыгающе-летающий робот, разработана его математическая модель. Особое внимание уделено аэродинамическому взаимодействию робота с окружающей средой во время этапа полета. Проведено исследование влияния крыльев на траекторию движения устройства и дальность полета, а именно их площади и угла наклона к корпусу при прыжке с различных высот. Установлено, что наиболее эффективно крылья могут использоваться для прыжков робота с высоты, существенно превышающей его габаритные размеры при ненулевом относительном угле между крыльями и корпусом.

Список литературы

- [Волкова и др., 2013] 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.
- [Яцун и др., 2013а] Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю. Моделирование движения многозвенного прыгающего робота и исследование его характеристик // Известия РАН. Теория и системы управления. 2013. - № 4. - С. 137–149.
- [Яцун и др., 2013б] Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Исследование режимов разгона четырехзвенного прыгающего аппарата // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. - № 24 (127). - С. 86-92.
- [Armour и др., 2007] 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. No. 2. P. 65–82.
- [Burdick и др., 2003] Burdick J., Fiorini P. Minimalist jumping robot for celestial exploration // The International Journal of Robotics Research, 2003, Vol. 22(7), p.653–674.
- [Hyon и др., 2002] Hyon S., Mita T. Development of a biologically inspired hopping robot—Kenken // Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Stanford. 2002. P. 3984–3991.
- [Roberts и др., 2008] Roberts J. F., Zufferey J.-C., Floreano D. Energy management for indoor hovering robots // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008, p. 1242–1247.
- [Stoeter и др., 2002] Stoeter S. A., Rybski P. E., Papanikolopoulos N. Autonomous stair-hopping with scout robots // IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. 2002. Vol. 1. p. 721–726.
- [Weiss, 2001] Weiss P. Hop . . . hop . . . hopbots!: designers of small, mobile robots take cues from grasshoppers and frogs // Science News. 2001. N. 159. 88 p.