

УДК 531:629.7

С. С. КОМАРОВ, Н. И. МИСКАКТИН

СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ПРЫГАЮЩИХ ПНЕВМОУПРУГИХ РОБОТОВ

Рассматриваются пути стабилизации движения прыгающих автоматических роботов. Исследуется пространственное, автоколебательное движение пневмоупругого робота, содержащего нелинейный источник энергии и системы управления и стабилизации движения. Предлагаются системы, обеспечивающие идентичность условий приземления пневмоупругого робота и управление его движением. *Пневмоупругость; пространственное движение; нелинейный источник энергии; автоколебания; система стабилизации; управляющий момент; робот*

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в практической космонавтике интенсивно разрабатываются космические аппараты с различными типами движителей, как ползающих, так и прыгающих. Исследования, проведенные авторами [1], доказали возможность создания автоматических систем (роботов), использующих для перемещения по поверхности исследуемых планет принцип прыгающего движения, который позволяет существенно расширить возможности автоматических устройств. Задача циклического ударного нагружения прыгающих сферообразных пневмокаркасных мягких оболочек рассматривалась в работе [2]. Вертикальное автоколебательное движение пневмоупругой системы рассмотрено в работах [3, 4].

Прыгающие роботы вследствие высокого расположения центра масс имеют низкую устойчивость при совершении прыжков. Проблему усугубляет и наличие непредсказуемых неровностей опорной поверхности, и воздействие внешних случайных, произвольно ориентированных возмущающих сил.

В данной работе рассматривается пространственное движение двухмассовых прыгающих роботов, содержащих нелинейные источники энергии и пневмоопоры. Динамическое взаимодействие свободнопадающих сферообразных пневмоконструкций с экраном достаточно подробно исследовано в работе [3].

Исследования показали, что подобные системы при определенных условиях входят в

режим автоколебаний. Отмечено, что угловая ориентация двухмассовой системы в свободном полете меняется от прыжка к прыжку и зависит от различных факторов, таких как угол приземления, соотношение частот колебаний нижнего и верхнего тела и их положения во время толчка, создаваемого нелинейным источником энергии (рис. 1).

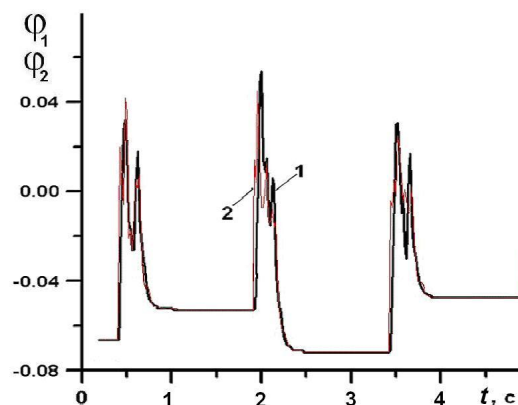


Рис. 1. Характеристики угловых колебаний верхнего и нижнего тел при отсутствии системы стабилизации движения робота

При отсутствии системы стабилизации, для обеспечения устойчивости движения требуется большой момент демпфирования по угловым движениям верхнего и нижнего тела, что сложно обеспечить внешними силами. В предлагаемой системе стабилизации управляющий момент является внутренним и поэтому не зависит от внешних условий.

В данной статье рассматривается пространственное движение двухмассового пры-

гающего робота, содержащего в своем составе систему стабилизации движения.

Предлагаемая система стабилизации использует внутренние моменты сил верхнего тела относительно управляющего маховика, что позволяет выводить верхнее тело (корпус) робота, а следовательно, и нижнее (опору) на заданный угол ориентации, обеспечивая идентичность условий посадки и прыжков робота.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА

Движение прыгающего пневмоупругого робота описывается в системе координат, связанной с поверхностью планеты Оху (рис. 2).

Опишем полную энергию (функцию Гамильтона) двухмассовой системы с учетом работы нелинейного источника энергии и работы внешних сил над газом в пневмоопорах в переменных обобщенных координат и импульсов (фазовое пространство).

Изменение полной энергии системы должно учитывать работу каждого компонента системы, а именно, источника энергии A_E , рабочего тела (газа) над оболочками пневмоамортизаторов A_A , систем стабилизации A_φ и управления прыжком A_Z , сил трения A_μ и других диссипативных сил, представленных функцией Релея $D(\dot{q})$.

Таким образом, изменение энергии можно выразить так:

$$\delta E(\bar{q}, \bar{p}, \dot{q}, t) = \delta H(\bar{q}, \bar{p}) + A_E(P, \bar{q}) + A_A(P, \bar{q}) + A_\mu(\bar{q}, \dot{q}) + A_Z(\bar{q}, \dot{q}) + A_\varphi(\bar{q}, \dot{q}) + D(\dot{q}). \quad (1)$$

Полная энергия системы содержит только потенциальные силы $\delta H(\bar{q}, \bar{p}) = 0$, поэтому изменение полной энергии системы зависит только от величины подвода энергии к системе нелинейными источниками энергии, работы исполнительных механизмов систем управления и стабилизации движения, а также от работы диссипативных сил.

$$\delta E(\bar{q}, \bar{p}, \dot{q}, t) = A_E(P, \bar{q}, \dot{q}) + A_\mu(\bar{q}, \dot{q}) + A_A(P, \bar{q}, \dot{q}) + A_Z(\bar{q}, \dot{q}) + A_\varphi(\bar{q}, \dot{q}) + D(\dot{q}). \quad (2)$$

Фазовое пространство представляет собой совокупность обобщенных координат и импульсов двухмассовой системы совместно с движением элементов пневмооболочки, опре-

деляется следующим образом [1]:

$$\begin{aligned} \bar{q} &= (\bar{r}_1, \bar{r}_2, \bar{\varphi}_{1z}, \bar{\varphi}_{2z}, \bar{\varphi}_{Yz}, \bar{r}_{11}, \bar{r}_{12}, \dots, \bar{r}_{1N}, \\ &\quad \bar{r}_{21}, \dots, \bar{r}_{2N}, \dots, \bar{r}_{MN}), \\ \bar{p} &= (\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{L}_1, \bar{L}_2, \bar{p}_{11}, \bar{p}_{12}, \dots, \bar{p}_{21}, \bar{p}_{22}, \dots, \bar{p}_{MN}). \end{aligned} \quad (3)$$

Это позволяет построить уравнения движения исследуемой системы в виде системы уравнений первого порядка, которые представляют собой каноническую систему уравнений движения Гамильтона с учетом непотенциальных и диссипативных сил:

$$\begin{cases} \dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \\ \dot{p}_i = - \left(\frac{\partial H}{\partial q_i} + \frac{\partial A_E}{\partial q_i} + \frac{\partial A_\mu}{\partial q_i} + \frac{\partial A_A}{\partial q_i} + \right. \\ \left. + \frac{\partial A_Z}{\partial q_i} + \frac{\partial A_\varphi}{\partial q_i} + \frac{\partial A_\varphi}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} \right). \end{cases} \quad (4)$$

Гамильтониан системы представляет собой сумму кинетической и потенциальной энергии системы, выраженную через переменные фазового пространства:

$$H = T(\bar{p}) + U(\bar{q}). \quad (5)$$

Работа нелинейного источника энергии зависит от направления движения тел и определяется термодинамическим циклом источника энергии.

$$A_E(P, q) = \begin{cases} \int_{V_n}^V P(\bar{q}) dV(\bar{q}) \dot{u} \geq 0 \\ - \int_{V_m}^V P(\bar{q}) dV(\bar{q}) \dot{u} < 0 \\ \int_{q_n}^q P(\bar{q}) \bar{S} d\bar{q} \dot{u} \geq 0 \\ - \int_{q_m}^q P(\bar{q}) \bar{S} d\bar{q} \dot{u} < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где u — относительное перемещение верхнего тела относительно нижнего, $P(q)$ — давление в рабочей и $V(q)$ — объем рабочей камеры нелинейного источника энергии как функции обобщенных координат.

Работа газа, заключенного в пневмооболочке над элементами этой оболочки, равна:

$$A_A = \int_{t_1}^t \iint_{\Omega} P \bar{r} \bar{n} dS dt + \int_{t_1}^t \iint_{\Omega} -\mu P \bar{r} \bar{\tau} dS dt, \quad (7)$$

где Ω — область поверхности пневмооболочки, P — избыточное давление внутри пневмооболочки, dS — элемент поверхности, \bar{n} , $\bar{\tau}$ — нормальный и тангенциальный вектора к элементу поверхности, μ — коэффициент трения движения элемента оболочки по поверхности других тел.

Система уравнений движения элементов пневмооболочки записывается так [1]:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{q}}_{ij} &= \frac{\bar{p}_{ij}}{m_{ij}}; \\ \dot{\bar{p}}_{ij} &= \bar{T}_{ij}(u, v) + \bar{P}_{ij}(u, v) + \bar{F}_{ij}(u, v) - \\ &- C_a(\dot{\bar{q}}_{ij} + \dot{r}) - C_r(2\dot{\bar{q}}_{ij} - \dot{\bar{q}}_{i-1j} - \dot{\bar{q}}_{i+1j}). \end{aligned} \quad (8)$$

В ходе деформации замкнутой пневмооболочки давление в ней меняется по следующему закону:

$$\dot{P}_i = \frac{\gamma P_i}{\rho_i W_i} \left(\sum_k Q_{ik} - \rho_i \dot{W}_i \right), \quad (9)$$

где P_i — давление в i -м отсеке оболочки с учетом перетеканий рабочего тела, Q_{ik} — между i -м и k -м отсеками [1].

Реальные пневмоупругие системы чаще всего являются неконсервативными и, следовательно, необходимо учитывать диссипацию энергии, которая в общем случае является функцией обобщенных скоростей и представляет собой положительно определенную квадратичную форму:

$$D = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I b_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j, \quad (10)$$

где D — диссипативная функция Релея [1].

Прыгающий робот должен иметь возможность в зависимости от своих задач и рельефа местности менять расстояние и высоту прыжка. С этой целью введем управляющий момент $M_Z(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \frac{\partial A_Z}{\partial \dot{q}_j}$, который производит сдвиг верхнего тела относительно нижнего, опирающегося посредством пневмоопоры об экран. Управляющий момент должен удовлетворять следующим условиям: принимать максимальное значение при прохождении системой нижней точки $y_1 \rightarrow \min$ и возвращать нижнее тело в исходное положение в момент

прыжка на восходящей ветви свободного полета.

Положение тел относительно друг друга определяется положением точки равновесия $M_Z = 0$, определяемой через скорость верхнего тела $\chi(\dot{y}_1)$ (рис. 2).

$$M_Z = \frac{M_0 L_{sht}}{y_1^3} (x_1 - x_2 + \chi) \Delta y. \quad (11)$$

Управляющий момент (12) можно представить в виде пары сил F_Z , действующих на оба тела с плечом Δy :

$$F_Z = F_0 L_{sht}^2 \frac{1}{y_1^3} (\Delta x - \chi). \quad (12)$$

Параметр χ определяет величину сдвига Δx , при котором стяжка находится в новом равновесном состоянии, поэтому в случае изменения параметра χ на тела действует пара сил F_Z и $-F_Z$. Это позволяет создавать сдвиг Δx , который обеспечивает заданную траекторию движения как центра масс обоих тел, так и центра масс всей системы.

Параметр χ в положении равновесия, когда $\Delta x = \chi$, зависит от вертикальной скорости верхнего тела следующим образом:

$$\chi = -K_M \frac{2}{\pi} \text{Arctg} [k_V (\dot{y}_1 - 1)], \quad (13)$$

где k_V — константа, K_M — параметр управления, определяющий положение равновесия после прохождения нижней точки, а следовательно, относительный сдвиг тел и длину прыжка.

Величина параметра K_M подбирается из условия обеспечения устойчивости движения и оптимизации траектории движения системы по длине и высоте прыжка.

Кроме системы управления прыжком, вводится система стабилизации, обеспечивающая управление угла верхнего тела, а через стяжки, соответственно, угла нижнего тела. При этом верхнее тело снабжается независимо вращающимся маховиком (рис. 2), ось вращения которого совмещена с его центром масс. При вращении маховика создается противоположно направленный управляющий момент, который выводит верхнее тело на требуемый угол к горизонту.

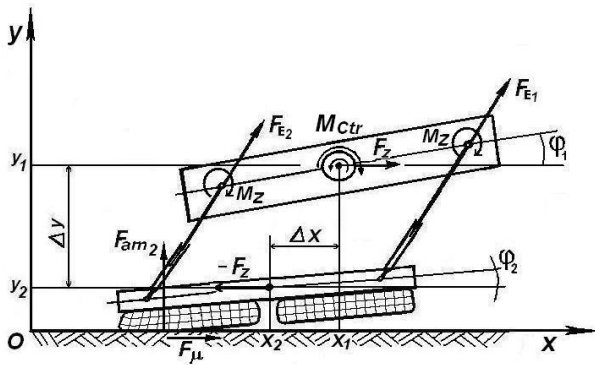


Рис. 2. Кинематическая схема прыгающего робота

Динамические параметры прыжка, такие как высота и длина, зависят от ориентации нижнего тела при посадке и, прежде всего, от угла наклона нижнего тела к горизонту φ_2 . Во время полета угол φ_2 выставляется по углу наклона верхнего тела φ_1 , который, в свою очередь, зависит от условий предыдущей посадки и толчка.

Исследования показали, что оптимальным условием прыжка является обеспечение одинаковых условий посадки по углам $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_{opt}$, соответствующее $\varphi_{opt} = -1^\circ \dots -4^\circ$. В расчетах принят угол $\varphi_{opt} = -2,2^\circ$.

Таким образом, управляющий момент поворачивает верхнее тело относительно маховика и выводит его после каждого прыжка на оптимальный угол посадки, и подготавливает робот к следующему прыжку с идентичными начальными параметрами движения.

Работу системы стабилизации движения робота по углу к горизонту запишем как квадратичную форму по углу тангажа φ_1 и угловой скорости верхнего тела:

$$A_\varphi = \frac{K_\varphi(\varphi_1 - \varphi_{opt})^2}{2} + \frac{K_\omega\omega_1^2}{2}. \quad (14)$$

Тогда момент, ориентирующий верхнее тело φ_1 , а через стяжки и положение нижнего тела φ_2 , равен:

$$M_{ctr} = \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi_1} + \frac{\partial A_\varphi}{\partial \omega_1} = K_\varphi(\varphi_1 - \varphi_{opt}) + K_\omega\omega_1, \quad (15)$$

где $\vec{K} = (K_\varphi, K_\omega)$ – вектор коэффициентов усиления в системе стабилизации движения робота.

Каноническая система уравнений движения прыгающего робота включает четырнадцать обыкновенных дифференциальных

уравнений первого порядка с учетом движения управляющего маховика и плюс $2(m \times n)$ уравнений, описывающих движение мягкой оболочки (8):

$$\begin{aligned} \dot{r}_1 &= \frac{\bar{P}_1}{M_1}; & \dot{\varphi}_{1z} &= \frac{L_{1z}}{J_{1z}}; \\ \dot{r}_2 &= \frac{\bar{P}_2}{M_2}; & \dot{\varphi}_{2z} &= \frac{L_{2z}}{J_{2z}}; \\ \dot{\varphi}_y &= \frac{L_{ctr}}{J_{ctr}}; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{\bar{P}}_1 &= \bar{F}_{E1} + \bar{F}_{E2} + \bar{F}_N + \bar{F}_W + \bar{F}_{D1} + \bar{F}_Z; \\ \dot{L}_{1z} &= M_E + M_N + M_W - M_{ctr} + M_{D1}; \\ \dot{\bar{P}}_2 &= \bar{F}_{am1} + \bar{F}_{am2} - \bar{F}_{E1} - \bar{F}_{E2} - \\ &\quad - \bar{F}_N - \bar{F}_W + \bar{F}_{D2} - \bar{F}_Z; \\ \dot{L}_{2z} &= M_{am} - M_E - M_N - M_W + M_{D2}; \\ \dot{L}_{yz} &= M_{ctr} - k_\omega\omega_y, \end{aligned} \quad (17)$$

где \bar{F}_N, \bar{F}_W – силы взаимодействия тел с ограничителями их нижнего и верхнего положения на штанге, M_E – момент, создаваемый нелинейными источниками энергии, M_{am} – момент, создаваемый пневмоопорами на нижнем теле, M_{D1}, M_{D2} – моменты, создаваемые силами демпфирования $\bar{F}_{D1}, \bar{F}_{D2}$.

При этом поступательное движение верхнего тела считается совместным с маховиком, а моменты инерции маховика и верхнего тела по отдельности J_{1z}, J_{ctr} . Последнее добавляет в систему уравнений еще два уравнения движения. Обозначим вектором $\vec{J} = (J_{1z}, J_{2z}, J_{ctr})$ соотношения моментов инерции верхнего, нижнего тела и управляющего маховика.

При прохождении центром масс нижней точки необходимо контролировать минимальное расстояние между телами $Y_{dt} = Y_{t1} - Y_{t2}$, для поджога смеси при её максимальной степени сжатия. Одновременно система управления прыжком подготавливается к сдвигу верхнего и нижнего тела и запускает систему стабилизации движения робота.

Направление движения системы определяет значение однобитового индикатора, который принимает значение $k_t = 0$ при падении системы с высоты и значение $k_t = 1$ при движении системы вверх. Смена значения индикатора происходит в момент прохождения центром масс верхней точки с $k_t = 1$ на $k_t = 0$, а при прохождении центра масс нижней точки с $k_t = 0$ на $k_t = 1$.

При изменении индикатора в нижней точке с 0 на 1 происходит поджог топливной смеси и начинается рабочий ход нелинейного источника энергии.

Изменение характеристики χ как функции V_{1y} , т.е. $\chi = f(K_M, V_{1y})$ происходит за счет изменения параметра K_M , это позволяет изменять направление и высоту прыжка, который может зависеть от размеров неровностей местности.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА

Численное интегрирование системы уравнений (16)–(17) движения позволяет исследовать устойчивость прыгающего робота и особенности его динамики движения, а также синтезировать систему его управления. В качестве исследуемых параметров примем два вектора $\vec{K} = (K_\varphi; K_\omega)$, $\vec{J} = (J_{1z}; J_{2z}; J_{Ctr})$, каждый из которых содержит по пять параметров. Исследования проводились при значениях компонент вектора $K_i = -500.. -400$; $i = 1,2$ и $J_k = 1..8$; $k = 1, 2, 3$.

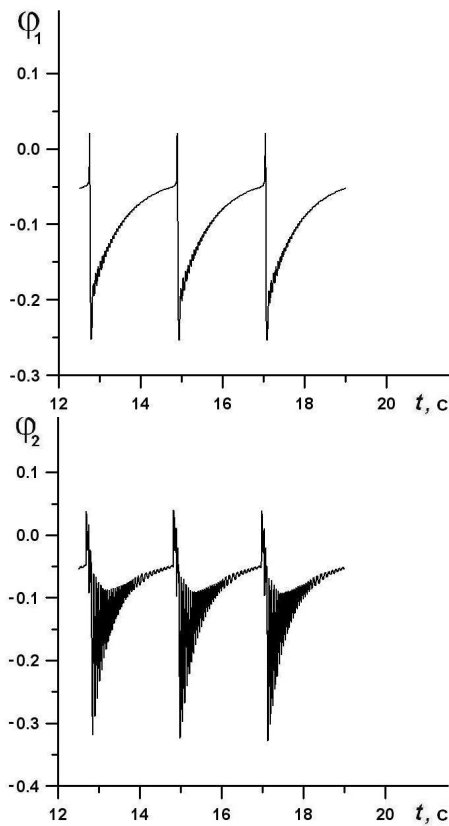


Рис. 3. Изменение угла к горизонту верхнего и нижнего тел $K=(-500, -400)$, $J = (8; 1; 1)$

Зависимости углов поворота верхнего φ_1 и нижнего тел φ_2 , при коэффициентах уси-

ния $K_\varphi = -500$; $K_\omega = -400$ и моментах инерции $J = (8; 1; 1)$ показаны на рис. 3.

Изменения момента сил M_{Ctr} и угловой скорости вращения маховика ω_y в зависимости от времени показаны на рис. 4. Видно, что за время полета стабилизация угла происходит приблизительно за 1 секунду, что составляет половину времени полета между прыжками.

Зависимости углов поворота верхнего φ_1 и нижнего тел φ_2 при коэффициентах усиления $K_\varphi = -500$; $K_\omega = -400$ и моментах инерции $J_{1z} = 4,5$; $J_{2z} = 1$; $J_{Ctr} = 4,5$ показаны на рис. 5–6, а при моментах инерции $J = (1; 1; 8)$ – на рис. 7–8.

Работа сил стабилизации вычисляется как интеграл по времени от мощности стабилизирующей системы. Период интегрирования (t_1, t_2) берется в интервале времени между моментами срабатывания нелинейного источника энергии:

$$A_\varphi = \int_{t_1}^{t_2} M_{Ctr}(t)\omega(t) dt. \quad (18)$$

Продолжительность этого интеграла замедляется после установления параметров прыжка робота, что обычно происходит после десятого прыжка.

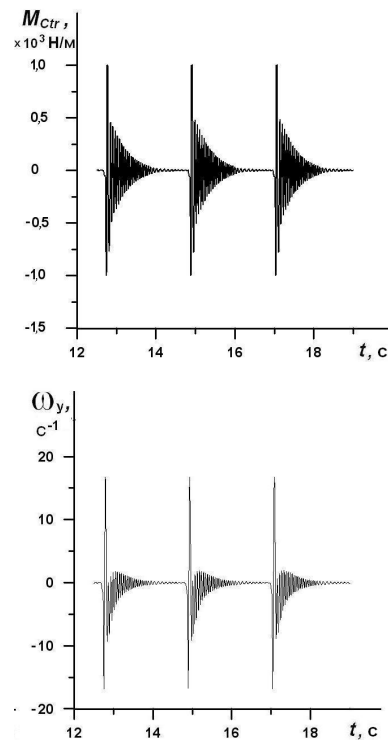


Рис. 4. Зависимости момента силы, развиваемого системой стабилизации и угловой скорости вращения маховика от времени при $K=(-500, -400)$, $J=(8; 1; 1)$

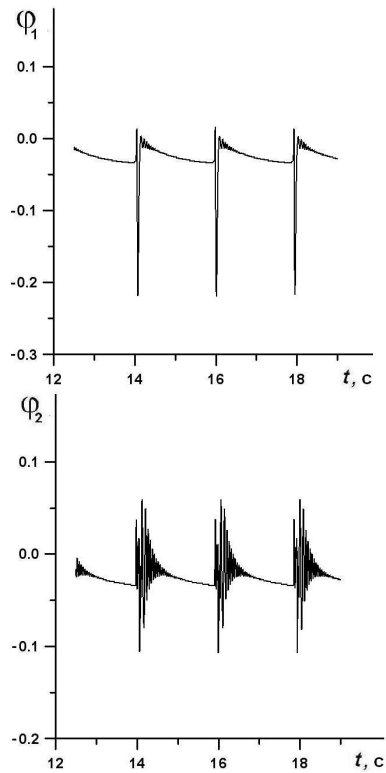


Рис. 5. Изменение угла к горизонту верхнего и нижнего тел $K = (-500, -400)$ $J = (4,5; 1; 4,5)$

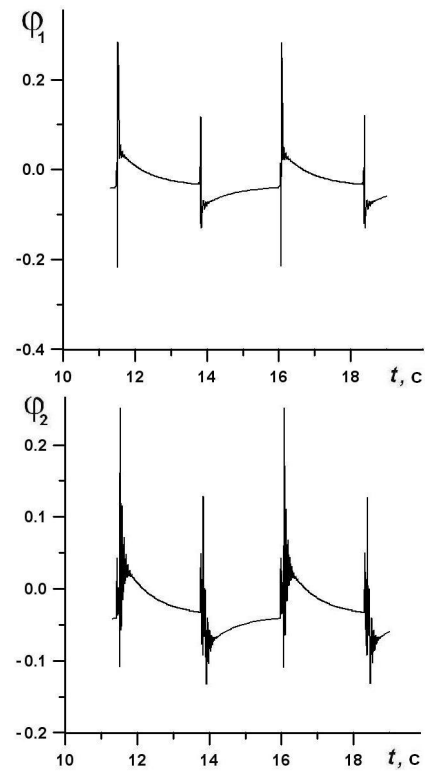


Рис. 7. Изменение угла наклона к горизонту верхнего и нижнего тел при $K = (-500, -400)$, $J = (1; 1; 8)$

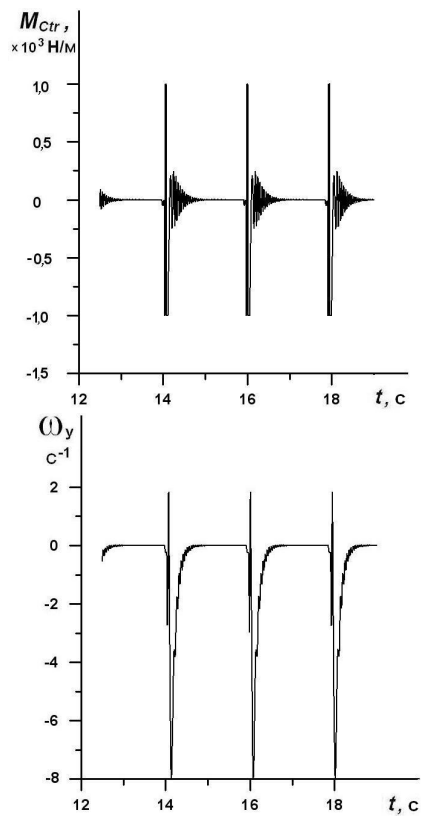


Рис. 6. Зависимости момента силы, развиваемого системой стабилизации, и угловой скорости вращения маховика от времени, при $K = (-500, -400)$, $J = (4,5; 1; 4,5)$

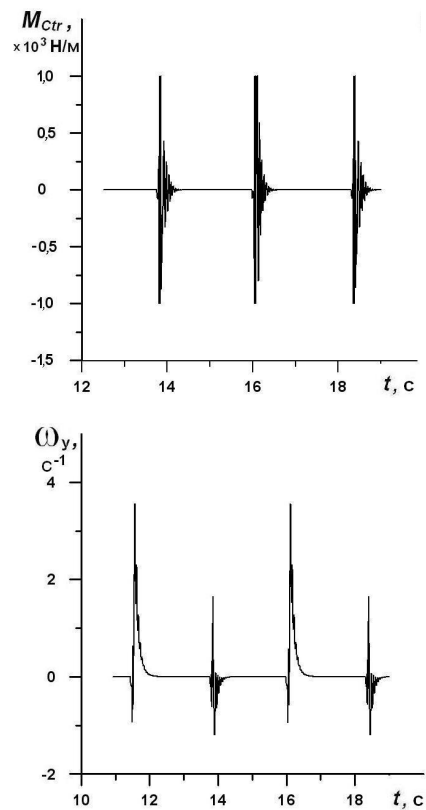
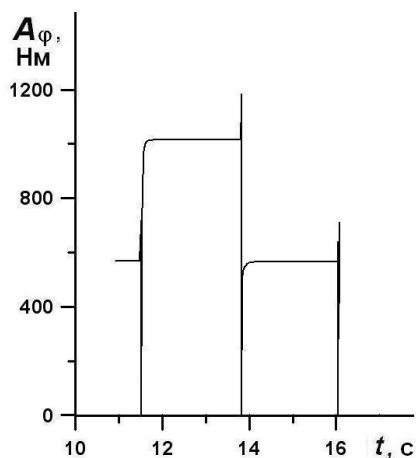
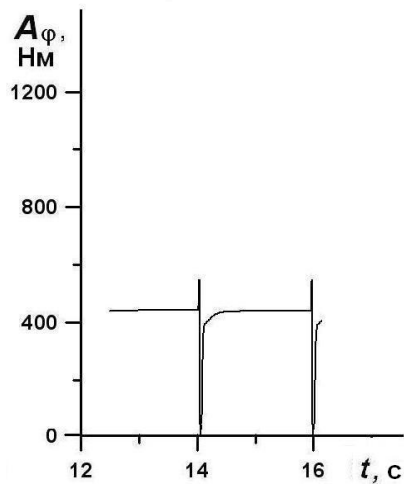


Рис. 8. Зависимость от времени момента силы, развиваемого системой управления углом $K = (-500, -400)$, $J = (1; 1; 8)$

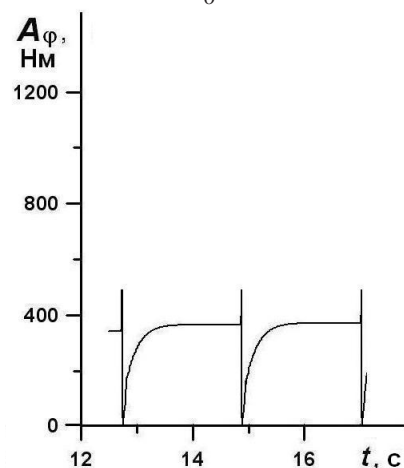
Работу сил стабилизации можно рассматривать как интегральную оценку качества управления переходным процессом движения робота.



a



б



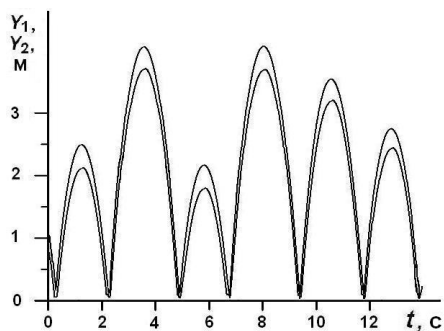
в

Рис. 9. Работа исполнительного механизма, направленная на стабилизацию углов φ_1, φ_2 при моментах инерции: а – $\bar{J}_1 = (1; 1; 8)$, б – $\bar{J}_2 = (4,5; 1; 4,5)$, в – $\bar{J}_3 = (8, 1, 1)$

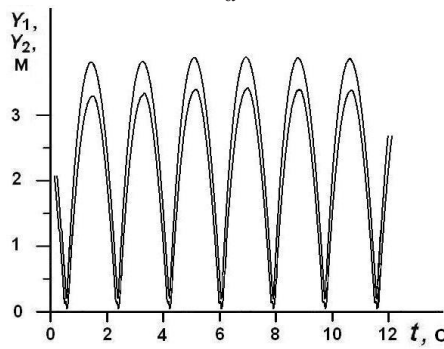
Из рис. 9 видно, что работа исполнительного механизма A_φ стабилизатора движения

зависит от соотношения моментов инерции J_{1z} и J_{Ctr} в среднем от 800 Нм, при $\bar{J}_1 = (1; 1; 8)$ до 450 Нм, при $\bar{J}_2 = (4,5; 1; 4,5)$ и 380 Нм, при $\bar{J}_3 = (8, 1, 1)$.

В качестве иллюстрации действия предложенной системы стабилизации прыгающего робота на рис. 10, а, б показаны траектории движения по вертикали верхнего и нижнего тел для различных схем стабилизации, в зависимости от времени. В первом случае (рис. 10, а) видно, что даже при сильном демпфировании, но при отсутствии системы стабилизации скачки, которые совершает робот, меняют свои параметры случайным образом. Введение предлагаемой системы стабилизации (рис. 10, б) обеспечивает полную идентичность параметров приземления.



a



б

Рис. 10. Вертикальное движение прыгающего робота в случае отсутствия и наличия системы стабилизации движения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования показали, что предлагаемая система стабилизации движения робота позволяет обеспечить одинаковые условия посадки, а следовательно, и одинаковые параметры последующего прыжка.

Посадка и прыжок рассматриваемого робота стабильны в диапазоне углов $\varphi_{opt} = -1^\circ \dots -4^\circ$, после перехода к установившемуся движению.

При соотношении моментов инерции верхнего тела и управляющего маховика, равных $J_{1z} = 1$, $J_y = 8$, т. е. когда момент инерции управляющего маховика намного выше верхнего тела, движение робота становится неустойчивым с периодом в два прыжка. При этом прыжки с меньшей высотой и длиной чередуются с прыжками с большей высотой и длиной. Процесс стабилизации требует относительно больших затрат работы стабилизирующего момента $A_\varphi = 600$ Нм и $A_\varphi = 1000$ Нм.

В случае обратного соотношения моментов инерции верхнего тела и управляющего маховика, равных $J_{1z} = 8$, $J_y = 1$, имеет место устойчивое движение, или при равенстве моментов инерции обоих тел $J_{1z} = 4,5$, $J_y = 4,5$. Однако в первом случае, при более длительном процессе стабилизации, работа равна $A_\varphi = 380$ Нм вместо $A_\varphi = 450$ Нм во втором случае.

2. Дальнейшее совершенствование конструкции и подбор параметров системы управления должны осуществляться по пути уменьшения затраты энергии на стабилизацию движения робота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комаров, С. С.** Гамильтонов подход к численному представлению модели пневмоупругости / С. С. Комаров, Н. И. Мискактин // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7, № 1. С. 179–186.
2. **Комаров, С. С.** Основы пневмоупругости мягких средств спасения спускаемых объ-

ектов / С. С. Комаров, Н. И. Мискактин, Н. Ю. Цвиленева // Наука и технологии. М. : РАН, 2005. С. 302–313.

3. **Комаров, С. С.** Анализ эффективности пневмоупругих систем спасения при посадке спускаемых объектов / С. С. Комаров, Н. И. Мискактин // Вестник УГАТУ. 2002. Т. 2, № 2. С. 179–186.
4. **Komarov, S. S.** Computer modeling of impact interaction with screen of double-mass solid system / С. С. Komarov, N. I. Miskaktin // Proc. of the 5th Intern. workshop on computer science and information technologies. 2003. P. 115–117.

ОБ АВТОРАХ

Комаров Сергей Сергеевич, ст. науч. сотр., рук. СКБ авиац. устройств. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по динамике, прочности машин, приборов и аппаратуры (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. пневмоупругости транспортных систем.



Мискактин Николай Иванович, ст. науч. сотр. того же СКБ. Дипл. физик-теоретик (БГУ, 1976). Канд. техн. наук по проектированию и конструкциям судов (Ленингр. кораблестр. ин-т, 1987). Иссл. в обл. теории оболочек и газовой динамики.

