

УДК 681.5.629.7

13

С. С. КОМАРОВ, Н. И. МИСКАКТИН

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ПРЫГАЮЩИХ ПНЕВМОУПРУГИХ РОБОТОВ

Рассматриваются динамика пространственного движения новых видов спускаемых автоматических станций. Рассматривается пространственное, автоколебательное движение пневмоупругой системы, содержащей нелинейный источник энергии. Исследуется система управления движением пневмоупругого робота, позволяющая изменять шаг прыжка в широком диапазоне. *Пневмоупругость; пространственное движение; нелинейный источник энергии; автоколебания; ударное взаимодействие с экраном; пневмоконтструкция; управляющий момент; робот*

Дальнейшее развитие непилотируемой, автоматической космонавтики привело к исследованию различных способов движения роботов автоматических станций с колесными, гусеничными и прыгающими движителями.

Все роботы, которые в предыдущие годы исследовали планеты Солнечной системы, могли изучить довольно ограниченные площади вблизи места своего приземления. Даже советские луноходы и американские марсоходы, преодолевшие в общей сложности расстояние в несколько десятков километров, смогли детально исследовать лишь незначительные площади Луны и Марса. NASA решило изменить существующее положение вещей и профинансировало разработку так называемого «прыгающего» робота для Марса. Робот получил название «Frogbots» и его разработку ведет Калифорнийский технологический институт. За счет довольно сложной и оригинальной системы пружин, робот сможет подпрыгивать вверх и в сторону (под углом 45 градусов). Приземлившись, в течение нескольких минут устройство восстанавливает свое первоначальное положение и вновь приводится в готовность к новому прыжку. В условиях земной гравитации высота «прыжка» составит 2,4 м, а на Марсе, где сила притяжения в три раза меньше, — до 7,2 м.

Институт передовых идей НАСА (NASA Institute for Advanced Concepts, NAIC) занимается разработкой «скачущих роботов», которые смогут с успехом проводить исследования пересеченной местности и зон повышенной опасности. Такие роботы могут работать практически полностью в автономном режи-

ме и способны без проблем проникать в любые укромные уголки местности — щели, пещеры, впадины и т. п.

Доктор Р. Робенет из центра по созданию роботов Sandia National Laboratories, США, разработал уникальный прыгающий робот. При помощи ракетного двигателя робот может прыгнуть на высоту свыше 1,5 метра и расстояние до 2-х метров. Заряда топлива достаточно для передвижения робота на расстояние до 6 километров. Каждый прыжок длится пять секунд. Максимальная высота прыжка — 6 метров.

Нового робота выпустила компания Toyota. Он представляет собой ногу длиной в один метр и квадратный корпус, смонтированный на эту ногу. Особенность машины заключается в способе передвижения: робот перемещается прыжками (высотой, правда, всего 4 см). Как заявляют представители компании Toyota, «технология может быть применена и для двуногих роботов гуманоидного типа. Благодаря сей роботы смогут быстро и в то же время аккуратно перемещаться». Как оказалось, робота создать удалось не сразу, до него было много неудачных опытных образцов.

Вертикальное автоколебательное движение пневмоупругой системы рассмотрено в работах [3, 4]. В данной работе рассматривается пространственное движение двухмассовых прыгающих роботов, содержащих нелинейные источники энергии и пневмоопоры. Задача циклического, ударного нагружения прыгающих сферообразных пневмокаркасных мягких оболочек рассматривалась в работе [2]. Динамическое взаимодействие

свободно падающих сферообразных пневмоконструкций с экраном достаточно подробно исследовано в работе [3]. Исследования показали, что подобные системы при определенных условиях входят в режим автоколебаний. В данной работе проведены исследования динамического взаимодействия автоколебательной двухмассовой системы с пелисыйным источником энергии вблизи экрана.

Исследования, проведенные авторами [1], показали возможность создания систем, позволяющих существенно расширить возможности автоматических устройств, которые используют для перемещения по поверхности исследуемых планет принцип прыгающего движения. В данной статье рассматривается пространственное движение двухмассового прыгающего робота.

Движение прыгающего пневмоупругого робота описывается в системе координат связанной с поверхностью планеты  $Oxy$ .

Опишем полную энергию (функцию Гамильтона) двухмассовой системы с пневмоопорами в переменных обобщенных координат и импульсов (фазовое пространство). Обобщенные координаты и импульсы двухмассовой системы определяются следующим образом [1]:

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

Изменение полной энергии системы с учетом работы источника энергии, работы сил трения и других диссипативных сил в виде функции Релея можно выразить так:

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

При учете, что в полной энергии учтены только потенциальные силы  $\delta H(\bar{q}, \bar{p}) = 0$ , изменение полной энергии системы зависит только от подвода энергии к системе источниками энергии и от работы диссипативных сил

$$\delta E(\bar{q}, \bar{p}, \dot{\bar{q}}, t) = A_E(P, \bar{q}) + A_\mu(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) + D(\dot{\bar{q}}). \quad (3)$$

Это позволяет построить уравнения движения исследуемой системы в виде системы уравнений первого порядка, которая представляет собой каноническую систему уравне-

ний движения Гамильтона с учетом непотенциальных и диссипативных сил:

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

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

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

Кинетическая энергия плоского движения системы записывается как квадратичная форма от обобщенных импульсов

$$T = \frac{\bar{P}_1^2}{2M_1} + \frac{\bar{L}_1^2}{2J_1} + \frac{\bar{P}_2^2}{2M_2}. \quad (6)$$

Потенциальная энергия тел системы в гравитационном поле планеты записываются так:

$$U(\bar{q}) = \sum_{k=1}^s M_k \bar{g} \bar{q}_k = M_1 \bar{g} \bar{q}_1 + M_2 \bar{g} \bar{q}_2. \quad (7)$$

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

$$A_E(P, q) = \begin{cases} \int_{V_n}^V P(\bar{q}) dV(\bar{q}) & \dot{u} \geq 0 \\ - \int_{V_m}^V P(\bar{q}) dV(\bar{q}) & \dot{u} < 0 \end{cases} = \begin{cases} \int_{q_n}^q P(\bar{q}) \bar{S} d\bar{q} & \dot{u} \geq 0 \\ - \int_{q_m}^q P(\bar{q}) \bar{S} d\bar{q} & \dot{u} < 0, \end{cases} \quad (8)$$

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.

Изменение давления в рабочей камере на рабочем ходе [5] можно вычислить по кусочно-гладкой аппроксимации следующего вида:

$$P_{dvs} = \begin{cases} 1,1293 - 6,724u + 22,2245u^2 - \\ - 39,245u^3 + 33,89u^4 - 11,22u^5, & u > 0,025 \\ 0,5 + 45,9231u - 1076,92u^2, & u < 0,025, \end{cases} \quad (9)$$

где  $u_{\min} < u \leq 1$  — относительные перемещения поршня относительно максимальной длины.

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

$$A_A = \int_{t_1}^t \int_{\Omega} \int P \bar{r} \bar{n} dS dt + \\ + \int_{t_1}^t \int_{\Omega} \int -\mu P \bar{r} \bar{\tau} dS dt, \quad (10)$$

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

Система уравнений движения элементов пневмооболочки записывается так [1]:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_{ij} &= \frac{\bar{p}_{ij}}{m_{ij}}, \\ \dot{\bar{p}}_{ij} &= \bar{T}_{ij}(u, v) + \bar{P}_{ij}(u, v) + \\ &+ \bar{F}_{ij}(u, v) - C_a(\dot{q}_{ij} + \dot{r}) - C_r(2\dot{q}_{ij} - \dot{q}_{i-1j} - \dot{q}_{i+1j}). \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$\dot{P}_i = \frac{\gamma P_i}{\rho_i W_i} \left( \sum_k Q_{ik} - \rho_i \dot{W}_i \right), \quad (12)$$

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

В случае отработки динамики движения робота и системы управления им, для быстроты счета, пневмопоры большой жесткости можно задать в виде произведения контактной площади  $S_K$  и переменного давления в

пневмопоре  $F_{am} = SP_{am}$ , где давление в рабочей камере задается в виде аппроксимации результатов испытаний численной конечно-элементной модели пневмопоры [4],  $P_{am} = P_C(118,54 - 303,19\bar{h} + 277,62\bar{h}^2 - 93,63\bar{h}^3)$ , переменная  $0 < \bar{h} \leq 1$  — относительный зазор между нижним телом и поверхностью планшты, отнесенные к высоте амортизатора.

Реальные пневмоупругие системы чаще всего являются неконсервативными, и, следовательно, необходимо учитывать диссипацию энергии, которая в общем случае является функцией обобщенных скоростей и представляется из себя положительно определенной квадратичную форму:

$$D = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I b_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j, \quad (13)$$

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 момент  $M_Z(\bar{q}, \dot{\bar{q}})$ , который производит сдвиг верхнего тела относительно нижнего, которое опирается посредством пневмопоры о поверхность планеты.

Управляющий момент должен удовлетворять некоторым условиям. Принимать максимальное значение при прохождении системой нижней точки  $y_1 \rightarrow \min$  и возвращать нижнее тело на свое место в момент прыжка на восходящей ветви свободного полета.

Положение тел относительно друг друга определяется положением точки равновесия  $M_Z = 0$ , определяемым через скорость верхнего тела  $\chi(\dot{y}_1)$  (рис. 1).

$$M_Z = \frac{M_0 L_{shl}}{y_1^3} (x_1 - x_2 + \chi) \Delta y. \quad (14)$$

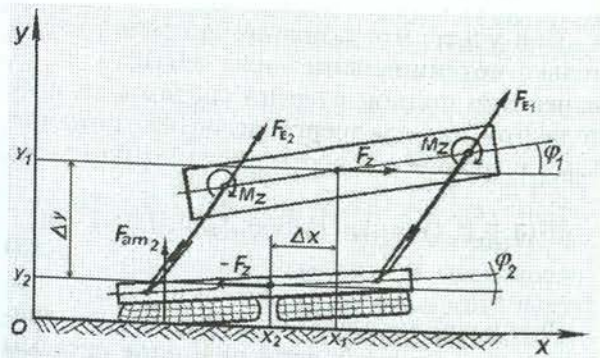


Рис. 1. Кинематическая схема прыгающего робота

Управляющий момент (14) можно представить в виде пары сил  $F_Z$ , действующих на оба тела с плечом  $\Delta y$ :

$$F_Z = F_0 L_{shl}^2 \frac{1}{y_1^3} (\Delta x - \chi). \quad (15)$$

Параметр  $\chi$  определяет величину сдвига  $\Delta x$ , при котором стяжка находится в равновесном состоянии, поэтому в случае изменения параметра  $\chi$  на стяжку действует момент  $M_Z$ , который поворачивает стяжку в новое положение равновесия. Это позволяет создавать необходимый сдвиг  $\Delta x$ , который обеспечивает как необходимую траекторию движения центра масс обоих тел, так и центра масс всей системы. Сдвиг  $\Delta x$  в положении равновесия  $F_Z = 0$ , когда  $\Delta x = \chi$ , и зависит от вертикальной скорости верхнего тела следующим образом:

$$\chi = -K_M \frac{2}{\pi} \arctg [k_V (\dot{y}_1 - 1)], \quad (16)$$

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.

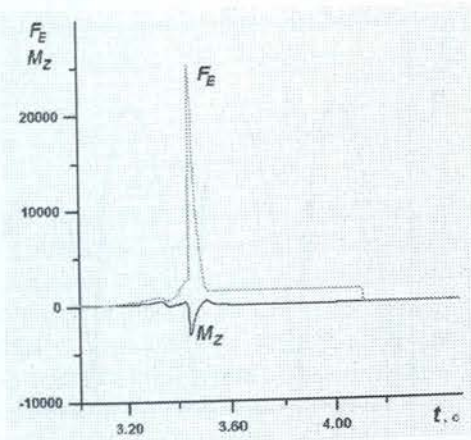


Рис. 2. Сила, развиваемая нелинейным источником энергии и управляющий момент, регулирующий длину прыжка

Каноническая система уравнений движения прыгающего робота включает двенадцать обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \dot{r}_1 &= \frac{\bar{P}_1}{M_1}, & \dot{\varphi}_{1z} &= \frac{L_{1z}}{J_{1z}}, \\ \dot{r}_2 &= \frac{\bar{P}_2}{M_2}, & \dot{\varphi}_{2z} &= \frac{L_{2z}}{J_{2z}}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_1 &= \bar{F}_{E1} + \bar{F}_{E2} + \bar{F}_N + \bar{F}_W + \bar{F}_{D1} + \bar{F}_Z; \\ \dot{L}_{1z} &= M_E + M_N + M_W + M_{D1}; \\ \dot{P}_2 &= \bar{F}_{am1} + \bar{F}_{am2} - \bar{F}_{E1} - \\ &\quad - \bar{F}_{E2} - \bar{F}_N - \bar{F}_W + \bar{F}_{D2} - \bar{F}_Z; \\ \dot{L}_{2z} &= M_{am} - M_E - M_N - M_W + M_{D2}, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\bar{F}_N$ ,  $\bar{F}_W$  — сила взаимодействия между телами в нижнем и верхнем положении с ограничителями 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  $\bar{F}_{D1}$ ,  $\bar{F}_{D2}$ .

Численное интегрирование системы уравнений движения позволяет исследовать устойчивость движения системы и особенности динамики движения прыгающего робота, а также синтезировать систему управления прыгающим роботом.

Положение центра масс и его скорость определяется в зависимости от координат нижнего и верхнего тела  $Y_{t1}$ ,  $Y_{t2}$  и их скоростей  $V_1$ ,  $V_2$  по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} H_{cm} &= \frac{(m_1 Y_{t1} + m_2 Y_{t2})}{(m_1 + m_2)}; \\ V_{cm} &= \frac{(m_1 V_1 + m_2 V_2)}{(m_1 + m_2)}. \end{aligned} \quad (19)$$

При прохождении центром масс нижней точки, необходимо контролировать минимальное расстояние между телами  $Y_{dt} = Y_{t1} - Y_{t2}$ , для поджига смеси при ее максимальной степени сжатия.

Направление движения системы определяется однобитовым индикатором, 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 верхней точки положения центра масс с  $k_t = 1$  на  $k_t = 0$  и при прохождении нижней точки с  $k_t = 0$  на  $k_t = 1$ . При изменении индикатора в нижней точке с 0 на 1 происходит поджиг топливной смеси и начинается рабочий ход нелинейного источника энергии.

Изменение характеристики  $\chi = f(K_M, V_{1y})$  происходит за счет изменения параметра  $K_M$ , а  $\chi$  как функция  $V_{1y}$  и

создает максимальное значение момента  $M_Z$  в нижней точке при  $k_t = 1$  в момент поджига воздушно-топливной смеси. Зависимость сил, развиваемых нелинейными источниками энергии и управляющий момент сил от времени приведены на рис. 2. Из графика видно, что управляющий момент достигает максимума во время срабатывания пелисйных источников энергии и определяющих угол наклона вектора скорости прыжка к горизонту и, следовательно, определяющий длину прыжка.

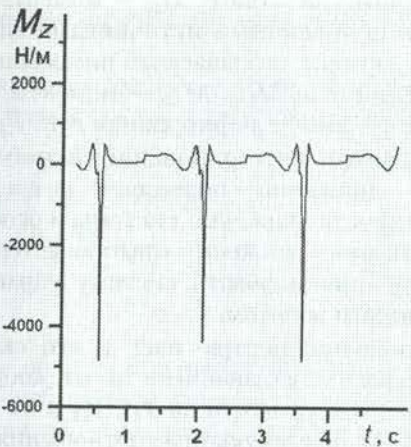


Рис. 3. Изменение управляющего момента от времени при установившемся движении робота

Разница в максимальной величине момента  $M_Z$  связана с угловыми колебаниями нижнего и верхнего тела при обжати и срабатыванием источника энергии.

Рассмотрим динамику движения робота, и исследуем некоторые принципиальные вопросы

На высоту и длину прыжка влияет и рабочий объем источника энергии. Зависимость длины прыжка  $S$  и высоты  $H$  от объема рабочей камеры  $V$  приведены на рис. 4.

Видно, что изменение параметра управления от  $K_M = 0,1$  (рис. 5, а) до  $K_M = 0,45$  (рис. 5, б) меняет длину прыжка от  $S = 1,32$  м до  $S = 5,1$  м. При дальнейшем увеличении параметра управления до  $K_M = 0,48$  длина прыжка увеличивается мало, так как нижнее тело (опора) начинает проскальзывать против движения и при  $K_M > 0,50$  движение из-за большого проскальзывания теряет устойчивость.

Динамические характеристики движения прыгающего робота приведены на рис. 6, 7, 8, 9.

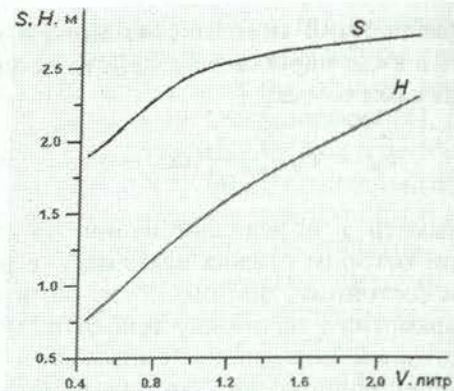
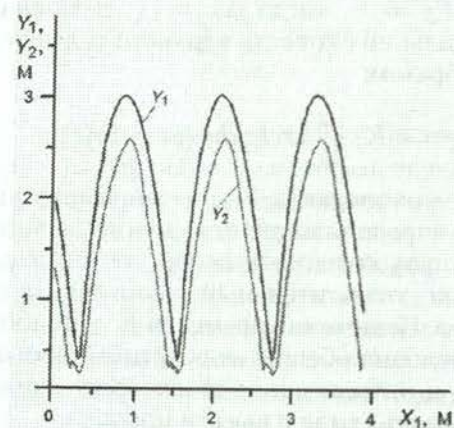
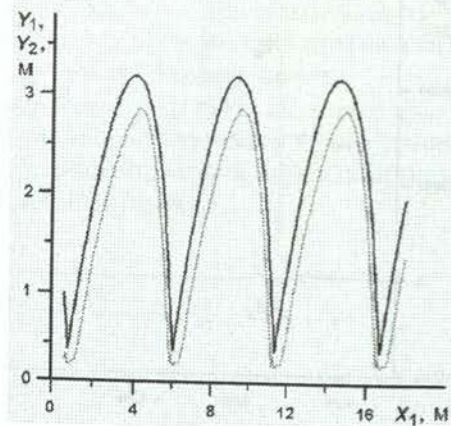


Рис. 4. Изменение управляющего момента от времени при установившемся движении робота



а

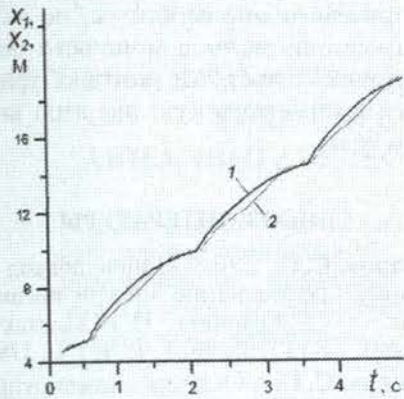


б

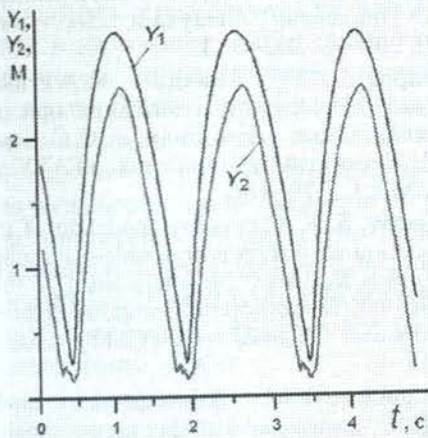
Рис. 5. Траектория движения верхнего и нижнего тел робота

Из графика рис. 6, а, б видно, что после отрыва системы от опорной поверхности нижнее тело отстает по горизонтали от верхнего, а при приближении к земле подтягивается под верхнее. Такое движение позволяет сжатие в рабочих объемах нелинейных источников энергии провести с максимальной степенью сжатия. После прохождения нижней точки

происходит поджиг топливозвоздушной смеси и одновременно происходит сдвиг верхнего тела относительно нижнего на заданную величину  $\Delta x$ .



а



б

Рис. 6. Зависимость перемещения  $X$  и  $Y$  от времени

При анализе динамики движения тел робота иногда удобно движение тел изобразить в виде фазовых траекторий в пространстве перемещение верхнего (1) и нижнего (2) твердых тел — скорость  $Y_1, V_{Y1}, Y_2, V_{Y2}$  (рис. 7).

При взаимодействии нижнего тела с поверхностью планеты, последнее входит в угловые колебания. Изменения углов наклона и угловых скоростей приведены на рис. 8, а, б.

Горизонтальные линии на рис. 8, а показывают, что после выхода нижнего тела с пневмоопорами из контакта с поверхностью под действием сил источников энергии, угол наклона нижнего тела выравнивается с углом наклона верхнего тела имеющего массу на порядок больше. За время контакта нижнего тела с опорной поверхностью оно совершает несколько десятков периодов колебаний, которые приводят к колебанию верхнего тела в противофазе.

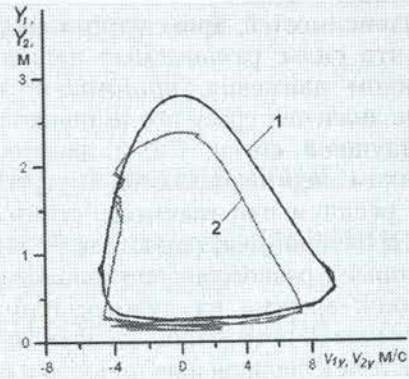
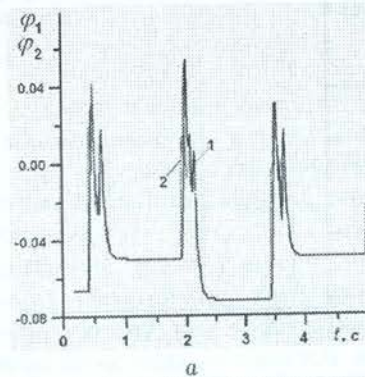
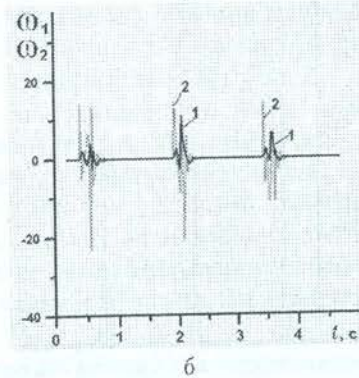


Рис. 7. Фазовая плоскость движения системы тел робота



а



б

Рис. 8. Характеристики угловых колебаний верхнего и нижнего тел

После отрыва нижнего тела от опорной поверхности, колебания прекращаются и пневматическая связь выравнивает нижнее тело с верхним по углу наклона к горизонту. Так как сочетание вертикальных и угловых колебаний происходит с небольшим отклонением, при высокой частоте угловых колебаний, поэтому отрыв системы от поверхности происходит каждый раз с различными углами  $\varphi_1$  равного  $\varphi_2$ .

Рассмотрим зависимость основных сил, действующих на тела робота в ходе его движения.

Из зависимостей, приведенных на рис. 9, видно, что силы, развиваемые нелинейным источником движения, принимают максимальные значения сразу после поджига топливозвоздушной смеси. Силы, развиваемые источником энергии, являются внутренними, а силы реакции при взаимодействии пневмоопор с опорной поверхностью — внешними, которые уравнивают давление сил источников энергии на нижнее тело. При  $K_M > 0$  силы от источников энергии действуют под углом к опорной поверхности и придают верхнему телу скорость под углом к горизонту.

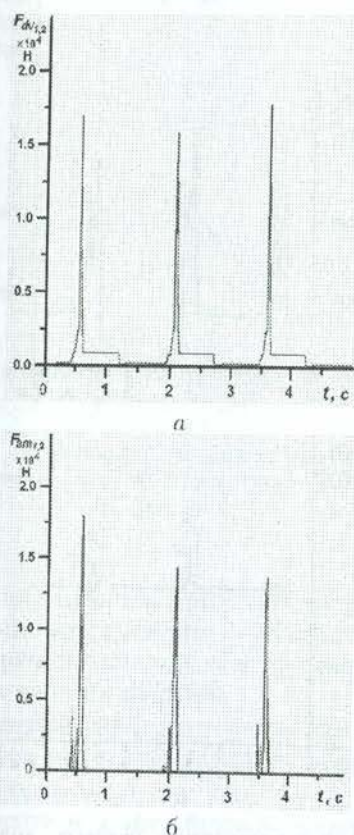


Рис. 9. Зависимость силы источников энергии и силы реакции пневмоопор при контактном взаимодействии с опорной поверхностью от времени

Проведенные исследования позволили выявить основные особенности динамического взаимодействия автоколебательных двухмассовых систем снабженных пневмоупругим основанием с нелинейным источником энергии вблизи экрана.

Исследования показали, что:

- двухмассовый робот с пневмоупругим основанием и общей массой 120 кг способен совершать прыжки по опорной поверхности от прыжков на месте до прыжков в длину около 5 метров;

- длина прыжков определяется изменением только одного параметра  $K_M$ , определяющим сдвиг  $\chi$  под действием момента силы  $M_Z$ ;

- величина прыжка двухмассового робота, содержащего шевмоопоры, по высоте и длине пропорциональна мощности пелинейного источника энергии, которая трансформируется в кинетическую энергию верхнего твердого тела.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комаров, С. С.** Гамильтонов подход к численному представлению модели шевмоупругости / С. С. Комаров, П. И. Мискактин // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7, № 1. С. 179–186.
2. **Комаров, С. С.** Основы пневмоупругости мягких средств спасения спускаемых объектов / 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 / S. S. Komarov, N. I. Miskaktin // Proc. of the 5th Int. Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT). Ufa, 2003. P. 115–117.
5. **Кондрашов, В. М.** Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания / В. М. Кондрашов, А. Т. Григорьев [и др.]. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.

#### ОБ АВТОРАХ



**Комаров Сергей Сергеевич**, ст. науч. сотр., рук. СКБ авиац. устройств. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УЛИ, 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 конструированию судов (Ленингр. кораблестр. ин-т, 1987). Иссл. в обл. теории оболочек и газовой динамики.