

# РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА ДЛЯ ОТРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ В УСЛОВИЯХ НЕУДЕЖИВАЮЩИХ СВЯЗЕЙ

Я.О. Кургинов, А.Ю. Зарницын  
Томский политехнический университет  
E-mail: yok9@tpu.ru

## Введение

Работа ряда робототехнических устройств происходит в условиях неударяющих связей, к такому можно отнести все типы шагающих роботов – квадро- и гексаподы, антропоморфные роботы, роботы, предназначенные для манипуляции и переноса объектов, например, коробок на складе, человека [1], [2]. Влияние неударяющих связей на алгоритмы управления роботами необходимо учитывать, так как потеря связи может привести к потере роботом устойчивости в первом случае и выпадению объекта манипуляции во втором.

В работах исследователей [3], [4], занимающихся этой проблемой, зачастую отсутствует практическая реализация представленных ими алгоритмов, в связи с чем возникает необходимость в разработке стенда, на котором в дальнейшем будет возможна апробация теоретически полученных законов управления.

## Описание стенда

Стенд представляет собой шарик на горизонтальной прямоугольной плоскости, соединенной двухступенным шарниром и вертикальной стойкой с неподвижным основанием. С двух сторон плоскость соединена с двигателями, являющимися исполнительными механизмами, что позволяет изменять ее наклон. Общий вид стенда представлен на рисунке 1. Для получения обратной связи о положении шарика используется видекамера и система технического зрения.

## Математическая модель

При получении математической модели были сделаны следующие допущения:

- 1) Шарик катится на плоскости без проскальзывания;
- 2) Трение между шариком и плоскостью пренебрежимо мало;
- 3) Во время движения шарик не теряет контакт с плоскостью;
- 4) Люфт в кинематических парах пренебрежимо мал;
- 5) Шарик однородный.

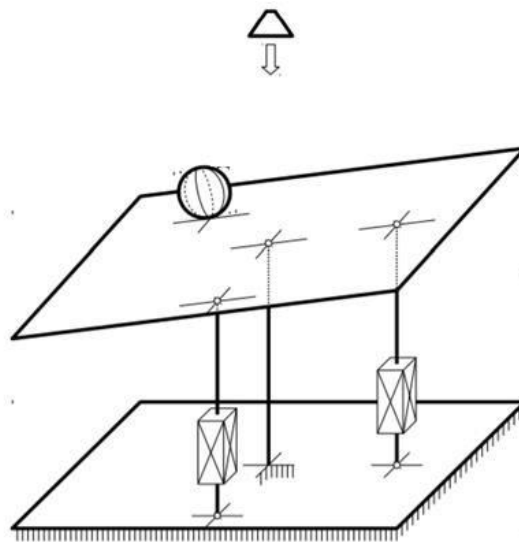


Рис. 1. Общий вид стенда

Независимых координат объекта – 4 –  $x$ ,  $y$  и углы ориентации плоскости  $\alpha$ ,  $\beta$  (координата  $z$  зависит от них, при условии, что шарик не теряет контакта с поверхностью).

Кинетическая энергия складывается из энергии поступательного и энергии вращательного движения шарика и энергии вращательного движения плоскости:

$$T = \frac{m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)}{2} + \frac{I(\omega_x^2 + \omega_y^2)}{2} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 \\ 0 & I_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha}^2 \\ \dot{\beta}^2 \end{pmatrix}$$

, где  $m$  – масса шарика,  $I$  – момент инерции шарика,  $\omega_x$  и  $\omega_y$  – угловые скорости шарика,  $I_{xx}$  и  $I_{yy}$  – моменты инерции плоскости относительно осей  $Ox$  и  $Oy$ .

С учетом того, что шарик катится без проскальзывания, и шарик однородный, путем простых преобразований получим следующее:

$$T = 0.7m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 \\ 0 & I_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha}^2 \\ \dot{\beta}^2 \end{pmatrix}$$

Центр масс плоскости находится в точке ее крепления со стойкой и неподвижен, следовательно, его потенциальная энергия равна нулю. Тогда потенциальная энергия системы равна потенциальной энергии шарика:

$$U = mg(-\sin\beta \cdot \cos\alpha \cdot x - \sin\alpha \cdot y)$$

, где  $g$  – ускорение свободного падения.

Вектор обобщенных сил запишется следующим образом:

$$Q = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ M_x \\ M_y \end{pmatrix}$$

, где  $M_x$  и  $M_y$  – вращающие моменты, приложенные к плоскости.

Записав функцию Лагранжа, как разность кинетической и потенциальной энергий, и подставив ее, а также вектор обобщенных сил, в уравнения Лагранжа второго рода получим уравнения движения системы.

### Структура системы управления

Для стабилизации нулевого положения шарика предлагается использовать алгоритм подчиненного ПИД регулирования по координатам, проекциям скоростей шарика и угловому положению плоскости. Структура предлагаемой системы управления представлена на рисунке 2.

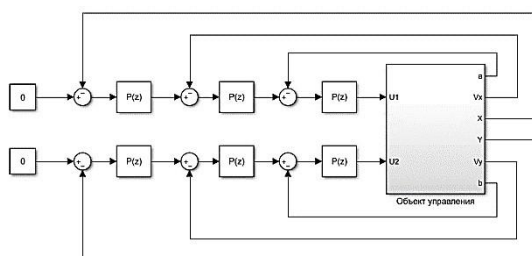


Рис.2. Структура системы управления

Так как система подвержена импульсным помехам с видеокamеры, от использования дифференциальных составляющих регулятора решено отказаться. По угловому положению плоскости, проекциям скоростей шарика, а также его положению на плоскости объект управления имеет астатизмы не ниже первого порядка, в связи с чем нецелесообразно применение интегральных составляющих регуляторов. Таким образом, структурно, регуляторы представляют собой пропорциональный регулятор. Полученные переходные процессы по положению шарика представлены на рисунке 3.

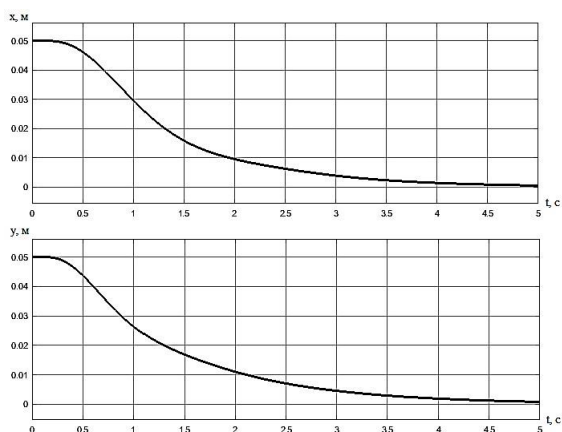


Рис.3. Переходные процессы по координатам x и y

### Перспективы исследования

В качестве дальнейших исследований предполагается валидация математической модели стенда и реализация полученного закона управления на реальном объекте.

Предполагается синтез линейных и нелинейных законов управления с учетом возможности потери шариком контакта с плоскостью. Исследование следящего режима работы системы управления и его точностных характеристик для линейных и нелинейных законов управления, полученных с учетом неудерживающих ограничений.

### Список использованных источников

1. Friedrich Pfeiffer, Robots with unilateral constraints // Annual Reviews in Control. - 1998. - №22. - С.121-132.
2. P. Sánchez-Sánchez, J. Pliego-Jiménez and M. Arteaga-Pérez, "A centralized hybrid position/force controller for cooperative robots with bounded torque inputs," 2017 13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA), Ohrid, 2017, pp. 839-844.
3. R. Rascón, J. Alvarez and L. T. Aguilar, "Feedback stabilization and force control using sliding modes in a mechanical system subject to unilateral constraints," 2010 11th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS), Mexico City, 2010, pp. 341-345.
4. Елисеев С.В., Большаков Р.С., Николаев А.В. Неудерживающие связи во взаимодействиях элементов систем: оценка динамических реакций связей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. №2 (58).