

Исследовательский стенд с интеллектуальным управлением стабилизации шара в желобе

М. М. Копычев, А. А. Кузнецов, А. Р. Музалевский, Т. Л. Русяева
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
mmkopychev@etu.ru

Аннотация. Системы управления положением неустойчивых объектов имеют большое значение равно как для технической, так и для исследовательской областей. Цель данной работы состоит в проектировании демонстрационного исследовательского стенда и микроконтроллерной системы управления с применением компьютерного зрения для изучения проблемы стабилизации положения шарика на подвижной направляющей (шар в желобе). Задача микроконтроллерной системы управления состоит в приведении шарика в заданную точку на направляющей, и удержание его в положении равновесия при воздействии внешних возмущений. Положение динамического объекта на направляющей отслеживается с помощью инфракрасной камеры, угол наклона направляющей изменяется с помощью сервопривода, система управления написана на микроконтроллере семейства AVR.

Ключевые слова: система стабилизации; положение равновесия; шар на направляющей; шар в желобе; микроконтроллерная система управления; компьютерное зрение; исследовательский демонстрационный стенд

I. ВВЕДЕНИЕ

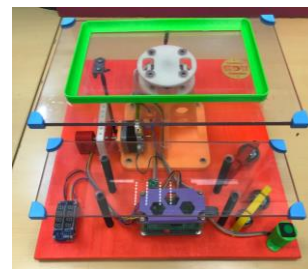
Одной из важных задач построения систем автоматического управления подвижными объектами является задача поддержания состояния неустойчивого равновесия в динамических системах. Поскольку при построении систем управления не всегда удаётся провести испытания и выяснить эффективность работы построенного регулятора на реальном объекте, удобно использовать для этих целей исследовательские стенды.

Одним из таких исследовательских стендов выступает система шара на подвижной направляющей (или – шара в желобе), фотография которого приведена на рис. 1 а. Типовая конструкция стенда с одной степенью свободы состоит из направляющей, один конец которой жёстко закреплён, а другой свободно перемещается за счёт приводного двигателя по сигналу системы управления с обратной связью по положению шарика на направляющей. Подобная конструкция позволяет продемонстрировать работу системы автоматического управления и также является элементарной составляющей других стендов изучения проблемы стабилизации [1–7].

Более сложный исследовательский стенд представлен на рис. 1 б. Он представляет собой объект управления с двумя степенями свободы. Типовая конструкция стенда включает в себя стол, конструкция которого допускает наклон, как в продольном, так и в поперечном направлении. Система управления собирает информацию о текущем положении шара на плоскости и формирует задание на обе оси стола, чтобы выдерживать заданное положение шара [8].



а



б



в



г

Рис. 1. Исследовательские стенды для изучения задачи стабилизации

Объект управления, приведенный на рис. 1 в, называется «дельта-робот». Подобная механическая конструкция может быть применена на производстве на линии сортировки или в конструкции 3D принтера [9]. Применение дельта роботов также распространяется на упаковку товаров, медицинскую и фармацевтическую промышленность, а также на работу с электронными компонентами.

На рис. 1 г приведена платформа Гью-Стьюарта. Механизм имеет шесть независимых опор на

шарнирных соединениях. За счёт изменения длин ног, можно изменять положение платформы в пространстве. Подобная конструкция применяется в станкостроении, подводных исследованиях, авиационных спасательных операциях, летательных тренажёрах, позиционировании спутниковых антенн и в ортопедической хирургии [10], [11].

В работе описывается процесс проектирования исследовательского стенда типа шар на направляющей с использованием инфракрасной камеры для отслеживания положения шара и микроконтроллерной системой сбора и обработки данных о текущем положении шара и выработки управляющего воздействия на сервопривод, регулирующий угол наклона направляющей.

II. ВЫБОР ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

Для решения задачи стабилизации неустойчивого объекта на первом этапе необходимо решить проблему отслеживания положения этого объекта. Для этой цели применяются различные средства, например, такие как аналоговый делитель напряжения [1]. В таком случае к одной из металлических составляющих направляющей, по которой движется шар, прикладывается постоянное напряжение, а металлический шар, при движении, осуществляет короткое замыкание напряжения на вторую составляющую направляющей. Напряжение, наведенное на второй составляющей направляющей, детектируется датчиком и далее по формуле перерасчета рассчитывается текущее положение шара на направляющей. Такая система требует подведения питания к направляющей, а значит – перегружает исследовательский стенд.

Другой способ, позволяющий отслеживать положение шара, заключается в использовании инфракрасных и ультразвуковых датчиков расстояния [3]. Для повышения точности срабатывания ставят два датчика на оба конца направляющей, таким образом получая информацию с обоих датчиков можно добиться получения информации о положении шара с точностью до одного сантиметра, при условии, что длина направляющей не слишком велика, а объект, напротив, достаточно большого диаметра.

Также используется RGB камера с фильтром или без него [2]. Однако частоты обновления кадров не всегда бывает достаточно и поэтому необходимо либо использовать систему из нескольких камер, либо использовать камеру с большой частотой развертки. Кроме того, часто для обработки изображения с камеры используется стационарный компьютер или ноутбук, что сильно ограничивает мобильность стенда и требует дополнительных затрат времени на написание программы обработки изображения под соответствующую операционную систему.

В данной работе описывается способ определения положения шара на направляющей с помощью камеры Sony Effio-E с OSD меню для настройки частоты срабатывания затвора. Также камера оснащается нештатным инфракрасным фильтром и инфракрасным прожектором для уменьшения количества света в кадре и лучшей помехозащищенности. Для настройки затвора камеры используется небольшой экран. Сигнал с камеры

передается по коаксиальному кабелю и обрабатывается на микроконтроллере AVR Atmega8a. Камера устанавливается таким образом, что инфракрасное световое пятно, отраженное от полированной поверхности шара (белая точка на черном изображении), при его перемещении, движется по строкам кадра (положением светового пятна по горизонтальной линии кадра пренебрегаем), что позволяет произвести поиск светового пятна ресурсами микроконтроллера и электрической схемы с двумя аналоговыми компараторами.

На втором этапе работы над исследовательским стендом необходимо решить проблему исполнительного механизма, который будет изменять угол наклона направляющей с шариком. Для этой цели подходит электродвигатель или сервомашинка. При использовании электродвигателя, требуется использование редуктора и системы рычагов, которые будут приводить в движение направляющую с шариком. Сервомашинка с пластмассовым редуктором имеет менее надежную структуру, чем электродвигатель, однако, при некоторой доработки качалки, позволит добиться поставленной решения поставленной задачи.

Поскольку в данном исследовательском стенде требуется не столько управлять скоростью поворота направляющей, сколько выставлять необходимый угол наклона, в данной работе будет использована сервомашинка с самодельной качалкой. Угол наклона направляющей составит $\pm 4^\circ$.

В качестве центрального устройства для сбора и анализа данных часто выбирается стационарный компьютер [1], [2]. Такой выбор обусловлен тем, что обработка информации с камеры требует больших мощностей, чем может предложить, например, микроконтроллер. Однако в данной работе применён несколько иной подход, а именно – с помощью схемы из двух аналоговых компараторов можно различить белую точку отраженного от полированной поверхности шара инфракрасного света на черном фоне.

На рис. 2 приведена диаграмма элементной базы разрабатываемого стенда.

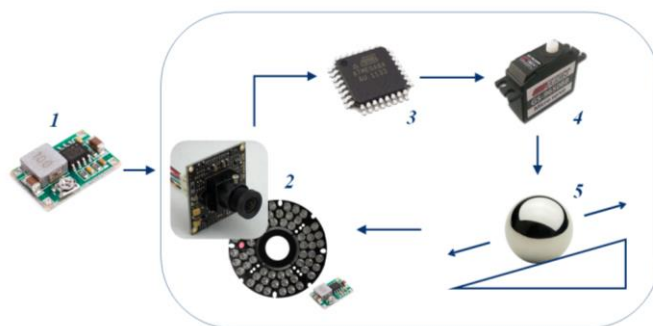


Рис. 2. Элементная база исследовательского стенда

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 – настраиваемый регулятор входного напряжения (вход 12 В); 2 – камера с инфракрасным фильтром, инфракрасная засветка для увеличения помехозащищенности

изображения камеры и настраиваемый регулятор напряжения для настройки яркости инфракрасного сигнала; 3 – микроконтроллер семейства AVR с системой управления; 4 – исполнительный механизм (сервомашинка); 5 – металлический пустотелый шарик на направляющей.

III. МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Вторая производная угла наклона направляющей α оказывает фактическое влияние на вторую производную положения шара r . Однако, пренебрежём этим влиянием. Уравнения Лагранжа движения шара по направляющей задаются следующим уравнением:

$$0 = \left(\frac{J}{R^2} + m\right)\ddot{r} + mg \sin \alpha - mr\dot{\alpha}^2,$$

где J – момент инерции шара, R – радиус шара, m – масса шара, g – гравитационная постоянная.

Линеаризация этого уравнения относительно угла наклона $\alpha = 0$:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right)\ddot{r} = -mg\alpha.$$

Уравнение, соотносящее между собой угол наклона направляющей и угол поворота качалки сервомашинки, может быть записано в виде:

$$\alpha = \frac{d}{L}\theta,$$

где d – плечо (длина отрезка между валом сервомашинки и креплением рычага направляющей), L – длина направляющей, θ – угол поворота качалки сервомашинки.

Подставляя последнее уравнение в линеаризованную запись, получаем:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right)\ddot{r} = -mg\frac{d}{L}\theta.$$

Преобразуя по Лапласу последнее выражение, получаем следующее равенство:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right)R(p)p^2 = -mg\frac{d}{L}\theta(p).$$

Преобразуя последнее равенство, получим передаточную функцию поворота вала сервомашинки $\theta(p)$ к положению шара на направляющей $R(p)$:

$$T(p) = \frac{R(p)}{\theta(p)} = -\frac{mgd}{L\left(\frac{J}{R^2} + m\right)p^2}.$$

Следует заметить, что передаточная функция выше является двойным интегратором.

Перейдем к рассмотрению механической конструкции исследовательского стенда. Компьютерная модель разрабатываемого исследовательского стенда типа шар на направляющей приведена на рис. 3.

Исследовательский стенд состоит из деревянного основания и стенки, на которую с помощью подшипникового

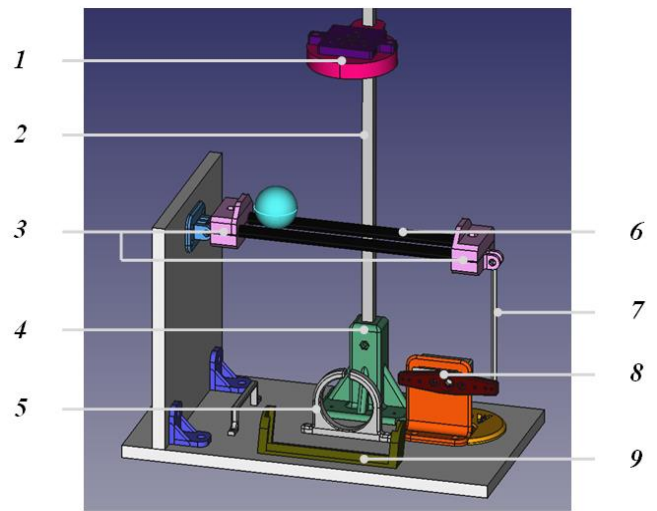


Рис. 3. Модель исследовательского стенда типа шар на направляющей

сочленения крепятся две направляющие (поз. 6 на рис. 3), которые служат рельсами для металлического шара. Направляющие закрепляются в зажимах из пластика (поз. 3 на рис. 3). Одним концом направляющие закреплены на деревянной стенке, а второй конец с помощью рычага (поз. 7 на рис. 3) крепится к качалке сервомашинки (поз. 8 на рис. 3). Сервомашинка крепится в специальном зажиме на деревянном основании. Также на деревянной стене крепится печатная плата с микроконтроллером. Для целей отслеживания положения шарика на направляющей в системе предусмотрена камера с инфракрасным фильтром (поз. 1 на рис. 3). Камера крепится на алюминиевой трубке квадратного сечения (поз. 2 на рис. 3) для регулировки высоты обзора камеры. Основание трубки крепится в держателе (поз. 4 на рис. 3). На деревянном основании располагаются крепления для шара (поз. 5 на рис. 3) и небольшого дисплея (поз. 9 на рис. 3) для отладки работы затвора камеры. Большая часть компонентов стенда были напечатаны на 3D принтере из ABS пластика.

На рис. 4 а,б приведены фотографии стенда в сборе.

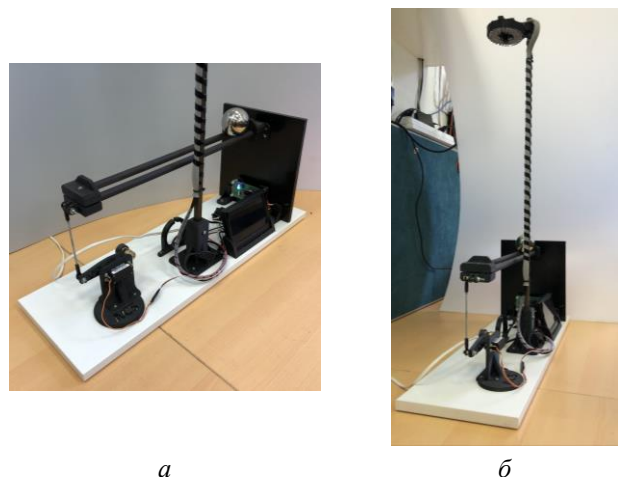


Рис. 4. Стенд в сборе

Габариты стенда без учета алюминиевой трубки с камерой 240×600×200 мм, высота трубки 720 мм, расстояние от линзы камеры до направляющей составляет 500 мм, микроконтроллерный стенд питается от источника 12 В и потребляет 400 мА.

IV. ОТСЛЕЖИВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ШАРА

Положение шара определяется с помощью камеры с инфракрасным фильтром и инфракрасной засветкой. Сигнал с камеры поступает на микроконтроллер по коаксиальному кабелю.

Данные о черно-белом изображении с камеры представляют собой последовательность интенсивностей света на строках кадра (т.н. scanlines). На рис. 5 приведена временная диаграмма чтения кадра. Сначала микроконтроллер читает горизонтальный синхронизирующий импульс (поз. 1 на рис. 5) длительность 4,7 мкс, означающий начало новой строки изображения. Далее идет начальная невидимая глазом область (т.н. back porch) длительностью 5,9 мкс. После – область видимого изображения длительностью 51,5 мкс

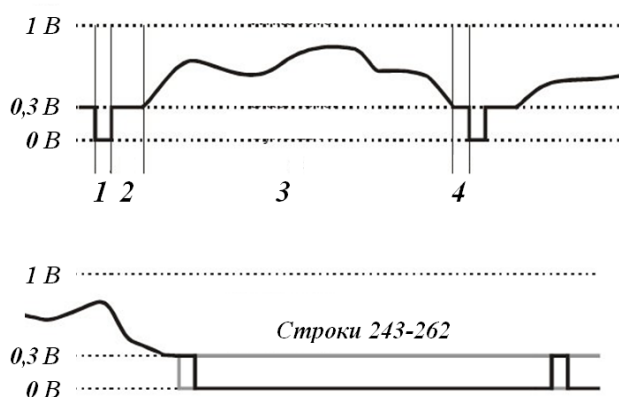


Рис. 5. Временные диаграммы считывания кадра с камеры

(в данной области белый цвет на изображении означает 1 В на выходе камеры, черный цвет означает 0,3 В на выходе камеры, между этими двумя значениями – оттенки серого цвета). Строка завершается конечной невидимой глазом областью (т.н. front porch) длительностью 1,4 мкс. После обработки всех горизонтальных линий (строки 243–262) посылается вертикальный синхронизирующий импульс (0 В), означающий начало нового кадра изображения.

Аналоговый сигнал с камеры поступает на вход двух аналоговых компараторов, опорные напряжения которых настроены на 0,71 В и 0,29 В. Такое опорное напряжение выбирается исходя из особенностей считывания кадра изображения, описанных в ранее. Выход обоих аналоговых компараторов подключается к ножкам внешних прерываний микроконтроллера ATmega.

Далее программным способом осуществляется сканирование строк изображения. В случае нахождения в одной из них белого пятна отраженного от полированной

поверхности шара инфракрасного света, формируется соответствующее управляющее воздействие на сервомашинку.

V. МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

В качестве микроконтроллера был выбран микроконтроллер семейства AVR ATmega8, работающий на частоте 16 МГц. Частота исполнения основного программного цикла составляет 10 Гц, частота сканирования кадра с камеры составляет 2 кГц. Камера закреплена над направляющими таким образом, что шар движется сверху вниз по кадру, таким образом, программным способом достаточно осуществить поиск строки, в которой расположена белая точка отраженного света, и номер этой строки будет текущей координатой шара.

В качестве системы управления исследовательским лабораторным стендом был выбран ПД-регулятор. Схема системы управления приведена на рис. 6.

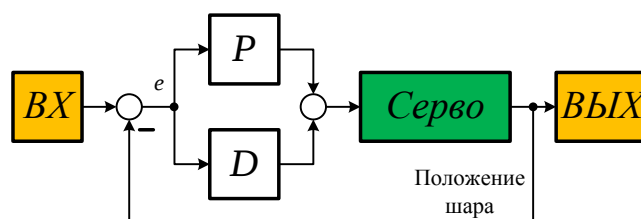


Рис. 6. Система управления исследовательским стендом

На рис. 7 приведена зависимость положения шара от времени при включении системы управления. Задачей системы управления было приведение шара в точку равновесия на направляющей. Эксперимент проводился с использованием тонкостенного металлического шара с полированной поверхностью массой 30 г и радиусом 25 мм.

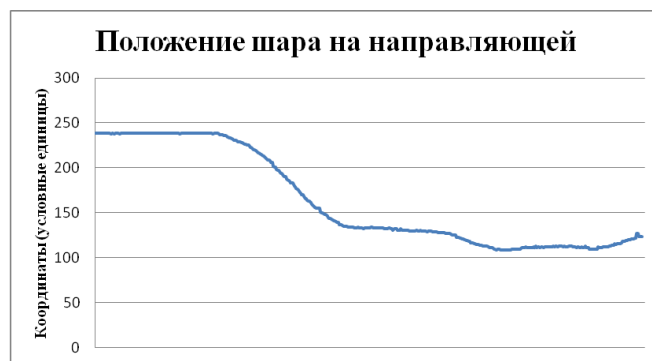


Рис. 7. Результаты работы системы управления

Значения о текущем положении шара передавались на компьютер по протоколу UART, время установления переходного процесса составляет 3,2 секунды.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена разработка исследовательского стенда типа шар на направляющей. Микроконтроллерная система

управления осуществляет обработку аналогового сигнала изображения с инфракрасной камеры. Сервомашинка выступает в роли исполнительного механизма для изменения угла наклона направляющей и коррекции положения шара. Одноконтурная система управления с ПД-регулятором позволяет поддерживать шарик в центральной точке направляющей. В дальнейшем планируется улучшить фильтрацию сигнала обратной связи по положению шара для увеличения быстродействия и качества системы автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Keshmiri M., Jahromi A. F., Mohebbi A., Amoozgar M. H. and Xie W.-F., "Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches," *International journal on smart sensing and intelligent systems*, vol. 5, pp. 14-35, 2012.
- [2] Gutiérrez A.I.B., Galarza J.A.S. and Martinez S., "Camera as Position Sensor for a Ball and Beam Control System," *Computación y Sistemas*, vol. 19, pp 273-282, 2015.
- [3] Gunawan D., Susilo D. and Ditya A., "Development of Microcontroller-Based Ball and Beam Trainer Kit," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, vol.3, pp. 45-54, 2015.
- [4] Gao Z., Wijesinghe S., Pathinathanpillai T., Dyer E. and Singh I., "Design and implementation a ball balancing system for control theory course," *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, vol. 5 (17), pp. 2363-2374, 2015.
- [5] Awadalla A., Osama T., Naseraldeen A. and Taifour A., "Design and Implementation of Ball and Beam System Using PID Controller," *Automatic control and information sciences*, vol. 3, pp.1-4, 2017.
- [6] Abdulbasid I., Mukhtar H., Aminu Z. and Jamilu A., "Modelling and Fuzzy Control of Ball and Beam System," *Proc. of 2018 IEEE 7th international conference on adaptive science and technology (ICAST)*, Ghana, Legon, Accra, 22-24 August 2018.
- [7] Ding M., Liu B. and Wang L., "Position control for ball and beam system based on active disturbance rejection control", *Systems Science & Control Engineering*, vol.7, pp. 97-108, 2019.
- [8] Kopichev M.M., Putov A.V. and Pashenko, A.N., "Ball on the plate balancing control system," *Proc. of 2019 2nd international conference on aeronautical, aerospace and mechanical engineering (AAME)*, Prague, Czech Republic, 26-28 July 2019.
- [9] Hsieh C.-T. "Investigation of delta robot 3d printer for a good quality of printing," *Applied mechanics and materials*, vol 870, pp. 164-169, 2017.
- [10] Koszewnik A., Troc K. and Słowik M., "PID controllers design applied to positioning of ball on the Stewart platform," *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 8(4), pp. 214-218, 2015.
- [11] Ding B., Cazzolato B., Stanley R., Grainger S., Costi J., "Stiffness Analysis and Control of a Stewart Platform-Based Manipulator With Decoupled Sensor-Actuator Locations for Ultrahigh Accuracy Positioning Under Large External Loads," *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, vol. 136, 2014.