

# ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ САМОБАЛАНИРУЮЩЕГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАКРАСНЫХ СЕНСОРОВ

Б. Аубакир, Ж. Каппасов, А. Саудабаев [b.aubakir@nu.edu.kz](mailto:b.aubakir@nu.edu.kz),  
[zh.kappassov@nu.edu.kz](mailto:zh.kappassov@nu.edu.kz), [asaudabayev@nu.edu.kz](mailto:asaudabayev@nu.edu.kz)

Назарбаев Университет

Руководитель проекта: ассистент-профессор А. Шинтемиров

*Abstract - The idea of a two wheel self-balancing robot has become very popular among control system researchers worldwide over the last decade. This paper presents a one variant of the implementation of the self-balancing robot using the VEX Robotics Kit.*

## Введение

В настоящее время самобалансирующие роботы являются очень динамичным направлением развития систем робототехники. Главной целью данных роботов является динамическая поддержка равновесия. Отличие этих роботов заключается в особенности конструкции, в которой отсутствует достаточное количество точек опор для поддержания статической устойчивости. На данный момент, одним из самых известных и узнаваемых примеров систем такого класса является самобалансирующий скутер Segway (Рис. 1), изобретённый Д. Кейменом, работающим в основанной им же компании "FIRST" [1].



Рис. 1 –  
мобильная  
платформа Segway

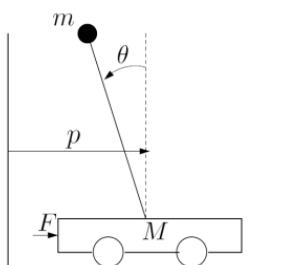


Рис. 2 – Схема  
перевернутого маятника

Положение равновесия платформы робота наглядно объясняется на примере динамики «перевернутого маятника» из курса физики [2]. На Рис. 2 представлена упрощенная схема самобалансирующей системы. Основание системы в виде тележки массой  $M$  балансирует объект массой  $m$ , закрепленный на одном конце безмассового стержня, другой конец которого упирается в основание. Таким образом, управляя движением тележки достигается балансирование стержня с объектом в вертикальном направлении.

Переменные  $p$  и  $\dot{p}$  используются для обозначения текущей позиции и скорости основания соответственно,  $\Theta$  и  $\Theta'$  обозначают угол наклона и

угловую скорость балансируемой части маятника.  $F$  – сила, приложенная к основанию системы в горизонтальном направлении. Используя вышеперечисленные переменные можно описать динамику системы уравнениями, полученными на основе законов механики Ньютона:

$$\begin{aligned}(M + m)\ddot{p} + ml \cos \theta \ddot{\theta} &= -b\dot{x} + ml \sin \theta \dot{\theta}^2 + F \\ (J + ml^2)\ddot{\theta} + ml \cos \theta \dot{p} &= -mgl \sin \theta,\end{aligned}$$

где  $M$  – масса основания,  $m$  и  $J$  – масса и момент балансируемого объекта,  $l$  – расстояние от основания до центра масс объекта,  $b$  – коэффициент силы трения между колесами основания и поверхностью, и  $g$  – ускорение свободного падения.

Динамические уравнения системы можно переписать в виде уравнений состояния, где  $x = (p, \theta, \dot{p}, \dot{\theta})'$ , входной сигнал  $u = F$  и результат  $y = (p, \theta)$ . Уравнения движения после данных преобразований примут вид:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p \\ \theta \\ \dot{p} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{m^2 g l^2}{J(M+m) + Mml^2} & \frac{-(J+ml^2)b}{J(M+m) + Mml^2} & 0 \\ 0 & \frac{mgl(M+m)}{J(M+m) + Mml^2} & \frac{-mlb}{J(M+m) + Mml^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ \theta \\ \dot{p} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{J+ml^2}{J(M+m) + Mml^2} \\ \frac{ml}{J(M+m) + Mml^2} \end{bmatrix} u \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x\end{aligned}$$

Данную модель балансирующей системы можно использовать для вычисления ответной реакции для стабилизации системы. Имея доступ ко всем переменным состояния, можно реализовать управление по обратной связи:

$$U = Kx = k_1 p + k_2 \theta + k_3 \dot{p} + k_4 \dot{\theta},$$

где  $K \in \mathbb{R}^n$  – вектор-строка с четырьмя входными параметрами, известных как коэффициенты усиления при каждом из возможных состояний. Вследствие такой обратной связи получим управляющую переменную  $U$ , которая зависит от конфигурации, баланса и скорости системы. Когда коэффициенты усиления правильно подобраны, система может сохранять себя в равновесии, и малое возмущение верхней части, будет возвращать робот к исходной позиции.

С целью изучения принципа действия подобной системы и ее дальнейшего применения в учебном процессе, был создан упрощенный вариант самобалансирующей платформы мобильного робота. В данной статье кратко описано конструкторская часть проекта, в частности рассмотрены аспекты сборки механической части и представлен алгоритм управления робота.

## Конструкторская часть

Для сборки робота использовался конструктор роботов Vex Robotics, предназначенный для учебного процесса и имеющий в составе все необходимые компоненты [3]. Необходимые детали для сборки самобалансирующего робота представлены на Рис. 3.

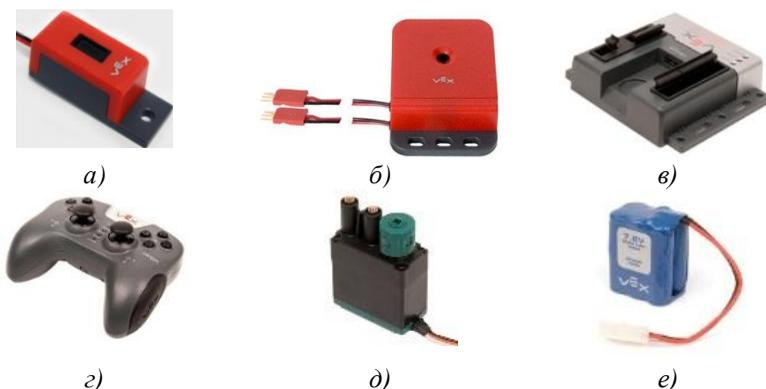


Рис. 3 – инфракрасный сенсор (а), оптический сенсор положения вала (б), микропроцессорный блок управления (в), джойстик управления (г), мотор постоянного тока (д), батарея питания (е).

После сборки металлической рамы корпуса робота, были установлены моторы постоянного тока для привода двух колес по сторонам робота. К осям вращения колес присоединяются оптические сенсоры положения вала, для получения информации об угле поворота и скорости вращения колес. В нижней части рамы устанавливаются инфракрасные сенсоры, для получения информации об угле наклона рамы робота. Следующим шагом является установка микропроцессорного блока и подключение всех сенсоров и моторов к нему. Стоит заметить, что устанавливать микропроцессорный блок необходимо ближе к центру, для равномерного распределения веса. Батарея питания, размещается в нижней части рамы робота, с целью смещения центра масс вниз. Инфракрасные сенсоры подключаются к аналоговым входам, в то время как Оптические сенсоры положения колёсного вала подключаются к цифровым входам микропроцессорного блока. Два электромотора также присоединяются через специальный

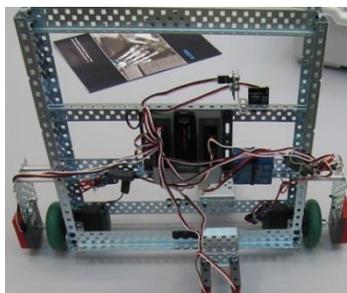
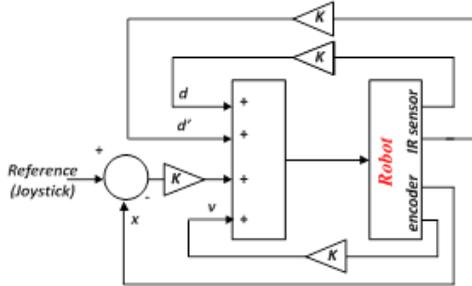


Рис. 4 – фото варианта самобалансирующего робота

контроллер к процессорному блоку. Последним действием является подключение аккумуляторной батареи к процессорному блоку.

### Управляющая часть

Схема управления робота (Рис. 5) достаточно проста и включает в себя только четыре сенсора инфракрасного излучения, два оптических сенсора положения вала и пульт, задающий положение робота и представляет собой пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор [4].



$d$  – угол наклона робота,  $d'$  – скорость изменения наклона,  $v$  – угловая скорость вращения колес,  $x$  – текущее положение робота относительно первоначального, Reference – установочное положение робота,  $K$  – коэффициенты усиления соответствующих переменных.

Рис. 5 – Структурная схема блока управления робота

Данные с инфракрасных сенсоров информируют о расстоянии сенсора до поверхности (Рис. 6). При предварительном калибровании и путем вычета первоначального смещения, с помощью простого алгоритма сочетания сенсоров возможно получить информацию о наклоне всего робота от положения равновесия:

$$d = d_{front} - d_{back}, \quad (1)$$

где  $d_{front}$  и  $d_{back}$  – соответственно расстояние переднего и заднего сенсоров до поверхности,  $d$  – отражает угол наклона робота от положения равновесия. Следует отметить, что  $d_{front}$  и  $d_{back}$  среднеарифметические показания с двух передних и двух задних сенсоров.

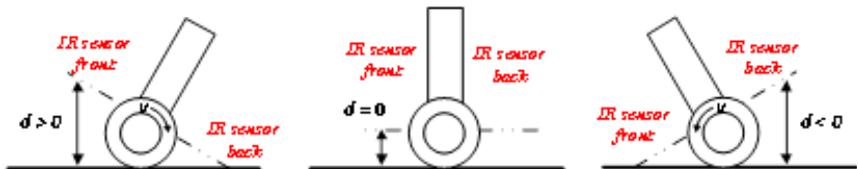


Рис. 6 – Положение робота и данные с инфракрасных сенсоров.

Данные с оптического сенсора положения вала отображают угол поворота вала, к которому прикреплено колесо робота, от первоначального положения. При заданном диаметре колеса данные с

валового сенсора представляют собой пройденное расстояние, которое на рисунке 5 *угол наклона робота*,  $d'$  – *скорость изменения наклона*,  $v$  – *угловая скорость вращения колес*,  $x$  – *текущее положение робота относительно первоначального, Reference* – *установочное положение робота*,  $K$  – *коэффициенты усиления соответствующих переменных*.

Рис. 5 обозначено символом  $x$ .

Для получения скорости движения робота и скорости изменения угла наклона необходимо произвести операцию дифференцирования. В микропроцессорной технике это реализуется с помощью простейшего дифференциатора [4]:

$$y = \alpha * y - (1 - \alpha) * \frac{(x_i - x_{i-1})}{t_d}, \quad (2)$$

где  $y$  – производная величина,  $\alpha$  – константа, равная 0,99,  $t_d$  – время задержки, равная 1 мс,  $x_i$  – текущее и  $x_{i-1}$  – предыдущее значения дифференцируемой величины.

Таким образом, подставляя значения сенсоров положения вала вместо переменной  $x$  в формуле (2), можно получить скорость движения робота, а при подстановке переменной  $d$  – скорость изменения угла наклона.

Суть балансирования робота состоит в управлении моторами робота таким образом, что при отклонении робота от положения равновесия, необходимо вращать колеса в направлении отклонения (Рис. 6). Для того чтобы робот балансировал в заданной точке поверхности, по цепи обратной связи с отрицательным знаком в регулятор подается значение положения вала в то время как задающее значение положения задается с джойстика с положительным знаком. Ошибка с умножающим коэффициентом  $k$  подается на сумматор, как и данные об отклонении, скорости отклонения и скорости вращения колес с положительным знаком (Рис. 5).

### **Полученные результаты и планы**

Вышеописанный алгоритм управления был реализован в среде разработки RobotC с использованием C-подобного языка программирования для конструктора Vex Robotics. Коэффициенты регулирования подбирались опытным путем в ходе экспериментальных исследований прототипа робота. Работу прототипа робота можно увидеть по следующей ссылке <http://youtu.be/iJ1Ab-J1a8>.

В целом, робот демонстрирует устойчивость и управляемость. Однако, вследствие наличия значительного люфта моторов и использования инфракрасных сенсоров, наблюдается некоторая неточность и видимые осцилляции вокруг заданного положения. В дальнейшем запланировано улучшение функционирования робота с введением сенсоров гироскопа и акселерометра, что является сравнительно более сложной задачей. Также рассматриваются варианты использования фильтра Кальмана или

комплементарного фильтра в системе управления и проектирования более сложных регуляторов (LQR регуляторы) с использованием точной математической модели робота.

### **Заключение**

В рамках проекта был создан прототип самобалансируемого робота, который может быть использован в учебных и исследовательских целях. Описаны конструкторская и программная части робота, представлены детали алгоритмов самобалансирования и дистанционного управления роботом с помощью джойстика. Помимо применяемого в данной работе ПД регулятора, разработанный прототип робота позволяет реализовать ПИД, ПИ и другие более сложные регуляторы управления, а также сенсоры гироскопа и акселерометра, что будет применяться для практических занятий в рамках курсов теории систем управления линейными системами, сенсоры и обработка информации и т.д.

В перспективе практический опыт, полученный в рамках реализации данного проекта, будет использован в научно-исследовательской работе Департамента робототехники и мехатроники Назарбаев Университета для разработки и реализации систем управления более сложных робототехнических систем.

### *Литература*

1. Segway [Электронный ресурс]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Segway\\_Inc.](http://en.wikipedia.org/wiki/Segway_Inc.) , 10.04.2012 г.
2. Astrom K.J., Murray R.M. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press, 2008.
3. Vex Robotics. [Электронный ресурс]. <http://vexrobotics.com/> 20.04.2012 г.
4. Thomas Braunl: *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Application with Embedded Systems*, Springer, 2008. – 541 p.