

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Т.Ю. Ким, Г.А. Прокопович (Минск, Беларусь)

### Введение

Робототехнические аппараты применяются в учебном процессе с момента начала широкого распространения роботов в промышленности. По мере развития технологий производства электронных комплектующих и аккумуляторов, а также средств разработки программного обеспечения и беспроводных сетей, всё большее распространение в учебном процессе стали получать малогабаритные роботы. Закономерным шагом стал переход от реального робота к его цифровому двойнику, сочетающему преимущества работы с физическими объектами и гибкость имитационной модели [1].

Существует развивающаяся парадигма управления жизненным циклом и сертификации называемый цифровыми двойниками (ЦД). Согласно парадигме ЦД существуют компьютерные модели состоящий из математического описания, экспериментальных данных включающих результаты испытаний и условий окружающей среды, а также связанной с конкретным транспортным средством, что позволяет моделировать отдельные транспортные средства с высокой точностью на протяжении всего срока их службы.

Использование технологий цифровизации позволило создать виртуальный продукт и планирование процесса. Реальный объект позволяет получить большие объемы данных, которые требуют верификации с помощью моделирования и инструментов оптимизации, чтобы сделать их доступными для планирования в реальном времени [2].

ЦД – это актуальная модель поведения объекта в процессе работы. Модель актуальна, так как она использует данные с реального объекта одновременно с которым она работает, чтобы уточнять свои собственные параметры используя обратную связь. В основе ЦД лежит имитационная модель (ИМ) и разработанная модель система управления (СУ), которая работает параллельно с реальным объектом, и она постоянно берет данные с этого объекта (входные и выходные). Важный элемент работы ЦД – это передача данных с реального объекта, используя различные датчики. Таким образом, мы получаем самоуточняющийся ЦД, который использует реальные данные и постоянно под них подстраивается, чтобы всегда быть актуальным. Общий подход для использования ЦД был разработан автором [3].

В данной работе представлена структура разработки ЦД, представленная программно-аппаратным комплексом [4] основанная на учебном мобильном роботе RoboCake.

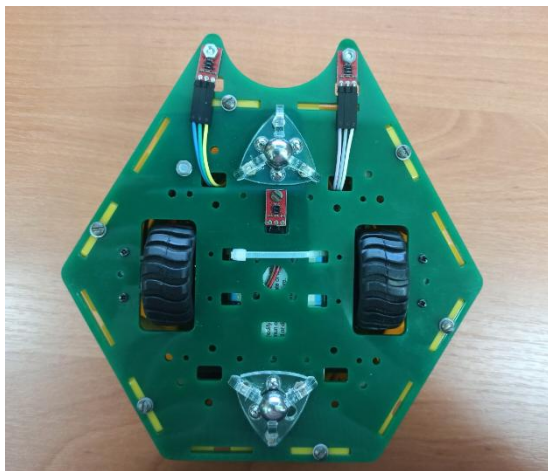
### Конструкции комплекса тестовых мобильных роботов RoboCake

В качестве объекта исследования рассматриваются два объекта:

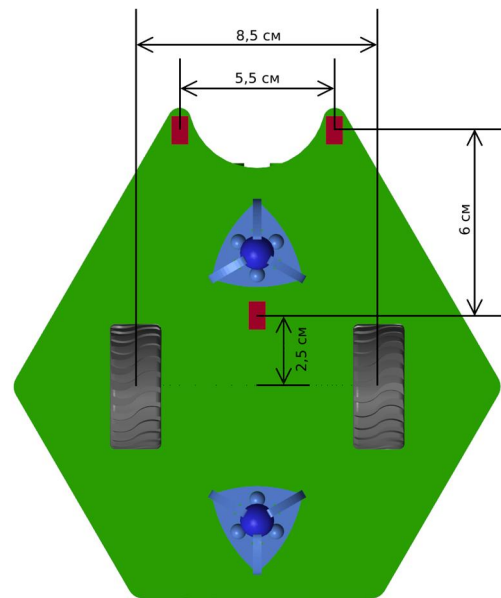
1. мобильный робот RoboCake Beginner (рис. 1.а), которому требуется за минимально возможное время двигаться по нелинейной цветоконтрастной линии;
2. учебный робот-манипулятор RoboCake (рис. 3) на базе механизма параллельной структуры с шестью степенями свободы [5].

Первым этапом для разработки ЦД рассмотрим первую ИМ, где указанная задача является типовой для мобильной робототехники, и ее можно переформулировать как движение по заранее известной траектории, которая задана в виде нанесенных на поверхность движения полосок (цветоконтрастных или

магнитных), либо в виде набора связанных пространственных точек на цифровых картах помещений. Указанный МР имеет двухколесную платформу с дифференциальным приводом, оснащенную инкрементными энкодерами, двумя шарнирными опорами для устойчивости. Под его корпусом установлены три датчика цветоконтрастной линии таким образом, что они образуют равнобедренный треугольник с основанием 5,5 см и высотой 6 см. Вершина указанного треугольника расположена на расстоянии 2,5 см от центра платформы в сторону движения. Центр робота находится между двумя колесами, которые равноудалены от него на 4,25 см (рис. 1.б).



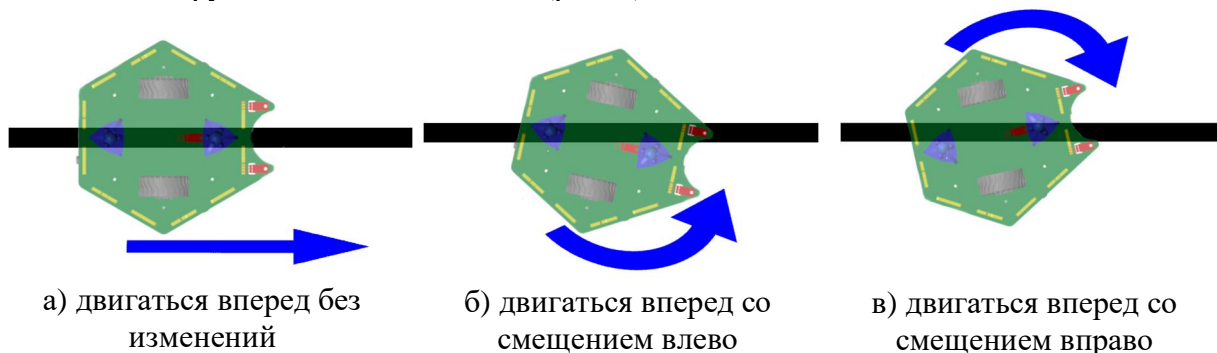
а. реальный робот



б. ИМ реального робота

Рис. 1. Расположение датчиков света на нижней поверхности робота

Перед авторами была поставлена задача разработать СУ движением МР, двигающегося по цветоконтрастной линии со скоростью 1 м/с. Предполагается, что движение робота должно быть таким образом, чтобы цветоконтрастная линия находилась между двумя передними датчиками линии, оптимальная ширина линии для данной конструкции составляет 2,4 см (рис. 2).



а) двигаться вперед без изменений

б) двигаться вперед со смещением влево

в) двигаться вперед со смещением вправо

Рис. 2. Процесс корректировки положения МР относительно центра линии в процессе движения

Изначально для контроля движения МР по линии был применен готовый ПИД-регулятор из библиотеки Control system Toolbox [6]. СУ движением МР вдоль линии была разработана на основе классического ПИД-контроллера [7] с двухконтурным управлением: с обратной связью по положению (центра сенсора над линией) и с обратной связью по заданной скорости вращения колёс, причём коэффициенты ПИД-

контроллера последней были вычислены отдельно и в данной работе не рассматриваются (табл. 1).

Таблица 1. Результаты ПИД-регулятора после ручной настройки

ПИД-контроллер	P (пропорциональный)	I (интегральный)	D (дифференциальный)	N (коэффициенты фильтрации)
1.	2,575	-7,207	-3,675	22,430
2.	3,676	-0,159	-4,665	13,250
3.	6,252	-4,969	1,045	20,610
4.	7,717	-6,031	2,245	18,850

Оптический сенсор линии был разработан на основе имеющихся в MP RoboCake Beginner трёх датчиков света QRE1113. Информационный выход сенсора кодируется сигналом  $Y$ , который однозначно описывает расположение его центра над линией:

$$Y = 0.5L + F - 0.5R \quad (1)$$

где  $Y$  – расстояние от центра сенсора до центра линии в условных единицах;  $L$ ,  $F$  и  $R$  – значения яркости отраженного света от поверхности, получаемые левым, центральным и правым датчиками света соответственно. Причем, если  $Y = 0$ , то центра сенсора находится на линии и корректировка не требуется, если  $Y < 0$ , то центр робота сместился вправо и MP необходимо повернуть налево, если  $Y > 0$ , то MP требуется повернуть соответственно направо, чтобы выровнять положение и уменьшить расстояние.

Следующим этапом было разработать параллельный манипулятор (ПМ) так же построенного на базе реального робота RoboCake. Нижняя составляющая робота разрабатывалась на основе вышеописанного робота с двумя дифференциальными двигателями. Верхняя подвижная шестигранная платформа (рис. 3г), которая имеет 6 степеней свободы. Целью данного ПМ является определить предельные значения его ключевых характеристик, такие как максимально допустимая полезная нагрузка, а также максимально допустимая линейная скорость передвижения платформы. Для создания ИМ были использованы следующие блоки:

- управляющие сигналы в виде синусоид со следующими амплитудами;
- данные о геометрии ПМ;
- программный модуль расчета ОЗК по предложенному выше способу, реализованный в виде m-функции;
- механический модуль, реализующий кинематику ПМ, подробно расписанный в виде Simulink-блоков на рис. 5;
- виртуальные осциллографы, на дисплеи которых выводятся значения скорости  $v$  и ускорения от центра подвижной платформы  $a$ , а также угловая скорость  $\omega$  и вращающий момент  $M$ , возникающие на валах соответствующих микросерводвигателей [5].

Основное внимание уделяется этапам разработки ИМ и СУ учебным роботом на основе использования технологии модельно-ориентированного проектирования [9].

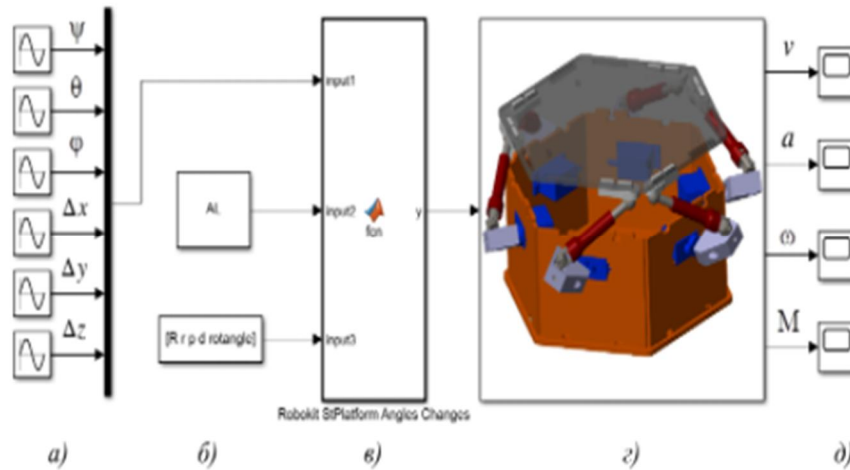


Рис. 3. Имитационная модель для проведения экспериментов с виртуальным ПМ в среде Simulink

Было решено реализовывать аппаратную часть СУ для движения МР и управления ПМ на основе микроконтроллерной платы Arduino Mega 2560, а программную часть с помощью библиотек пакета прикладных программ MATLAB/Simulink.

В частности, библиотека Support Package for Arduino Hardware позволяет на основе созданной в Simulink модели СУ генерировать управляющий код для любой из имеющихся в наборе микроконтроллерных плат. Данная библиотека позволяет студентам получить доступ к входным и выходным данным аналогового и цифрового сигнала в образовательном процессе при проведениях лабораторных испытаний.

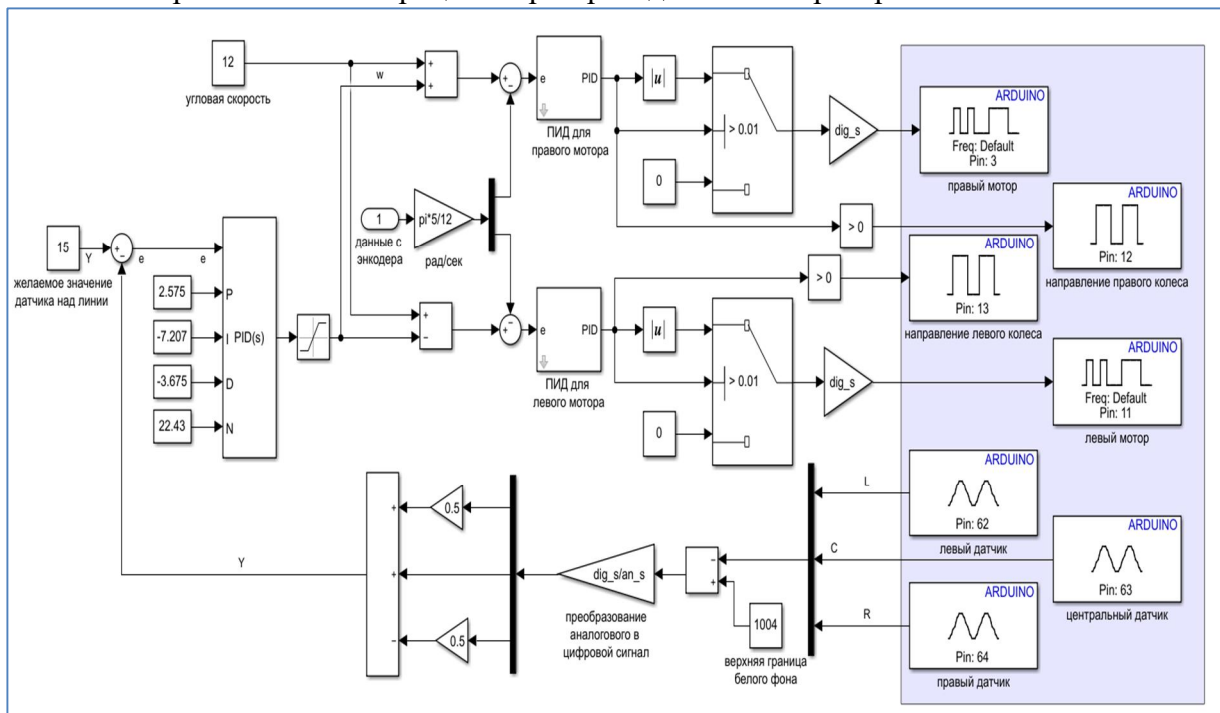


Рис. 4. Система управления с обратной связью

Объект управления (ОУ) RoboCak имеет два независимых ведущих колеса, соотношение скоростей вращения которых формирует требуемую угловую скорость (рис. 4).

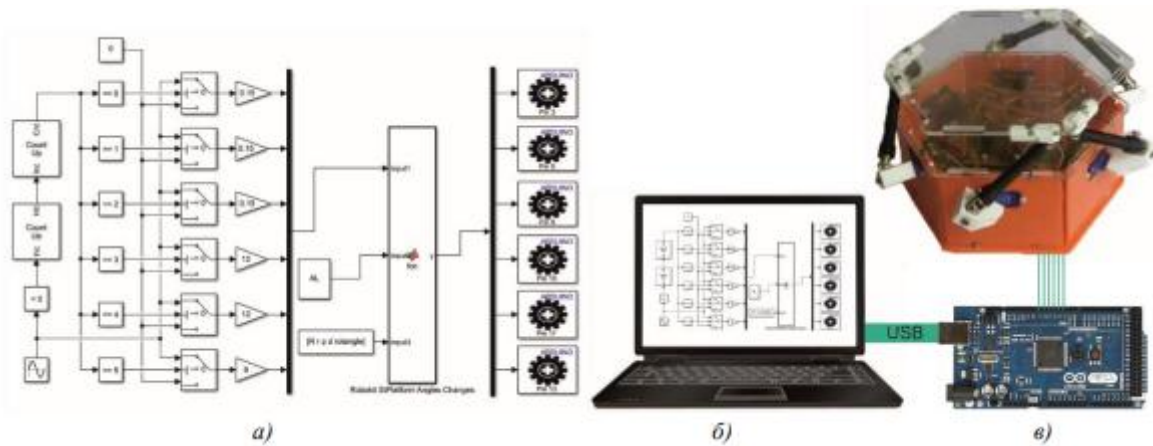


Рис. 5. Схема проведения эксперимента с реальным объектом управления

Разработанная ПМ перемещается по требуемой траектории, показывает синхронную работу всех шести опор которого позволила последовательно вращать и перемещать платформу вдоль заданных осей (рис. 5). После того, как в Simulink была реализована электронная модель микропроцессорной системы управления, можно констатировать факт появления уже настоящего цифрового двойника проектируемого ПМ [5].

### Заключение

С помощью среды разработки MATLAB/Simulink на основе реального объекта, авторы разработали ИМ и модель СУ, который полностью имитирует ЦД. Пакет Simulink позволяет создавать сложных моделей и уточнять их, он позволяет создавать независимые приложения, генерировать код для платы для запуска на физической модели в автономном режиме. Созданный ЦД позволяет изучить более подробно реальный объект, выявить узкие места и запускать моделирование значительно сокращая время и накладные расходы [11].

Разработанный программно-аппаратный комплекс поможет студентам, изучить пакеты Simulink работая с физическими моделями, разрабатывать встроенные СУ для реального робота, разработать алгоритм движения робота по линии, а также моделировать траекторию движения.

### Литература

1. **Сычоў У.А.** Распрацоўка адкрытага праграмнага забеспячэння модульнай платформы для канстрування і кіравання навучальна-даследчымі роботатэхнічнымі апаратамі // У.А. Сычоў і [інш.]. / XII Международная конференция «Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации» (РИНТИ-2013) : сборник трудов конференции (Минск, 20 ноября 2013 года) / редкол.: Тузиков А.В. и [др.]. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2013 г. С. 288-294.
2. *Mechatronic Futures* || Digital Twin—The Simulation Aspect (Chapter 5). / **P. Hehenberger, D. Bradley, S. Boschert, R. Rosen.** 2016. 259 p. doi:10.1007/978-3-319-32156-1\_5.
3. **Ким Т.Ю.** Разработка цифрового двойника для автоматической генерации траектории движения с применением глубокого обучения // Конференция «Ломоносов 2020».
4. **Герасюто С.Л.** Программно-аппаратное обеспечение учебно-методического комплекса по робототехнике / С.Л. Герасюто, Е.И. Печковский, Г.А. Прокопович, В.А. Сычѳв // *Электроника Инфо.* 2014. №6 (108). С. 26-29.
5. **Прокопович Г.А.** Разработка системы управления учебным роботом-манипулятором параллельной структуры с применением технологии модельно-

- ориентированного проектирования / Г. А. Прокопович // Информатика. 2019. Т. 16, № 4. С. 99-114
6. Control System Toolbox. Getting Started Guide 2021a // mathworks.com [Electronic resource]. 2021. Mode of access : [https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/control/control\\_gs.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/control/control_gs.pdf). – Date of access : 1 April 2021.
  7. **Кoo Y.C.** Motor speed controller for differential wheeled mobile robot / Y. C. Koo, E. A. Bakar // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10, no. 22. P. 10698-10702.
  8. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / A. O’Dwyer. London, U.K. : Imperial College Press, 2003. – 564 p.
  9. **Журавлев С.С., Рудометов С.В., Окольнішников В.В., Шакиров С.Р.** Применение модельно-ориентированного проектирования к созданию АСУ ТП опасных промышленных объектов. Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии, 2018, Т. 16, № 4. С. 56-67.
  10. **Прокопович Г.А.** Исследование прототипа системы управления малогабаритным мобильным интернет-роботом для решения задач мониторинга в системах «Умный дом» / Г.А. Прокопович, С.Л. Герасюто, В.А. Сычѳв // Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника (ЭР-2016)» : материалы конференции (24-25 ноября 2016 г., г. Санкт-Петербург, РФ) / ЦНИИ робототехники и технической кибернетики ; под рѳд. Е.И. Юревич. — Санкт-Петербург : ООО «АП4Принт», 2016. С. 324-329.
  11. <https://blog.westerndigital.com/digital-twins-optimize-robot-manufacturing-ops>