

12, декабрь 2015

УДК 681.532

Лабораторная установка системы стабилизации управляемого объекта на подвесе на основе ПД-регулятора

Величко П.Е., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Аэрокосмический факультет, кафедра «Системы
автоматического управления»*

Титков И.П., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Аэрокосмический факультет, кафедра «Системы
автоматического управления»*

*Научный руководитель: Карпунин А. А., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы автоматического управления»*

karpunin@bmstu.ru

Математическое моделирование является одним из основных и наиболее значимых процессов в проектировании любых систем, в частности и систем автоматического управления. Этот процесс позволяет заменить объект исследования его математической моделью на основе физических законов, гипотез и упрощений и теоретически или практически исследовать систему, находящуюся в некотором соответствии с текущим объектом. По окончании исследования собирается информация о моделируемом объекте, которая впоследствии анализируется различными методами. Обзор методов синтеза структурно сложных систем управления представлен, например, в [1].

В данной статье рассматриваются этапы разработки системы стабилизации управляемого объекта и синтез дискретного ПД-регулятора (настройка его коэффициентов), формирующего сигнал управления; а также сборка лабораторной установки, наглядно демонстрирующая применение технических средств САУ и получающая экспериментальные данные.

Исследование отечественной и зарубежной литературы, а также мониторинг интернет-ресурсов показал, что на данный момент существует небольшое количество аналогов лабораторной установки. Но они выполнены из дорогостоящих сборочных

единиц с использованием крупногабаритных технических средств САУ, и не имеют визуализации данных, получаемых в экспериментах в режиме реального времени. Это приводит к существенным финансовым затратам при сборке установки и к определённым трудностям при демонстрации её работы.

Настоящая лабораторная установка, схема которой показана на рисунке 1, собирается из недорогих и широкодоступных составляющих. Важно отметить, что основное отличие от зарубежных аналогов заключается в том, что все результаты получаются в режиме реального времени.

Принцип работы заключается в следующем. Внешне установка представляет собой трубу ПВХ, в которой движется управляемый объект – мяч для настольного тенниса. Его положение регулируется сервоприводом, получающим информацию о текущем положении от ультразвукового датчика. Обработка информации осуществляется с помощью запрограммированного микроконтроллера Arduino. А её передача на персональный компьютер осуществляется по последовательному порту USB. Внешний вид датчика показан на рисунке 2. В качестве объекта управления выступает мячик для настольного тенниса диаметром 40 мм (рис.3).

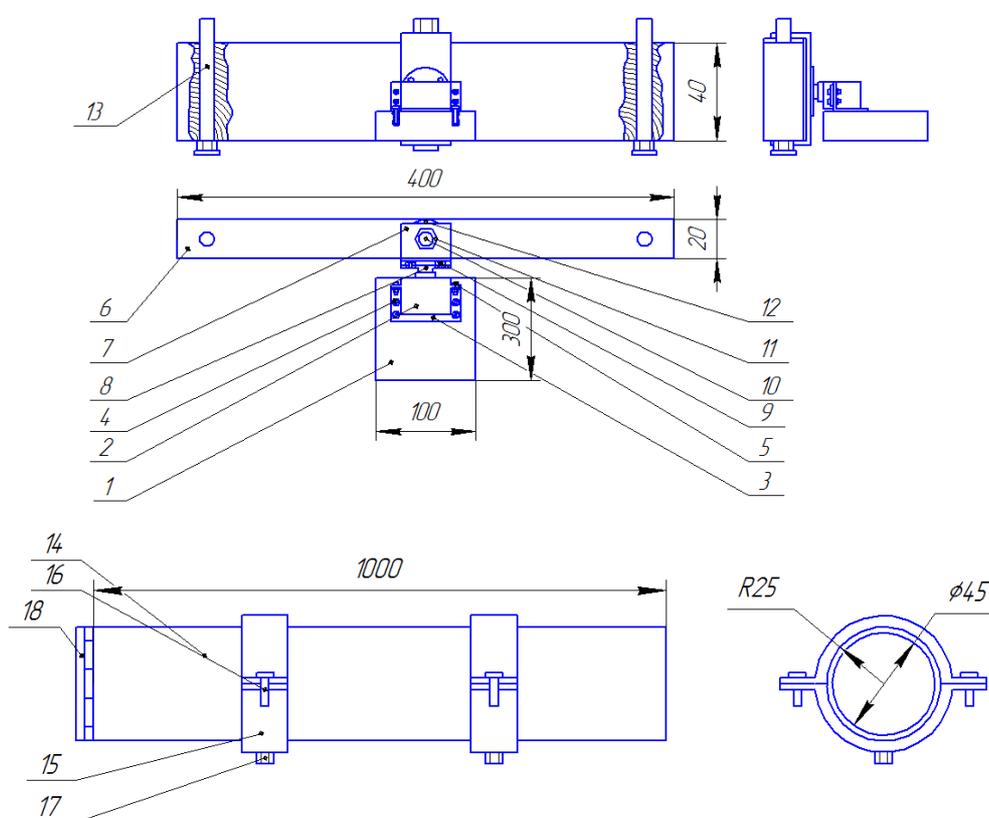


Рис. 1. Схема сборки лабораторной установки системы стабилизации управляемого объекта

На рисунке 1 изображён сервопривод (2), который крепится к деревянной основе (1) с помощью крепежного элемента №1 (3), винтов (4),(5). На вал привода надевается колесо (8), которое соединено с крепежным элементом №2 (7) с помощью винтов (9). Крепёжный элемент №2 крепится к деревянному бруску (6) винтовым соединением (10). С помощью болтов (13) и гаек (17) к деревянному бруску крепятся хомуты (15). Труба ПВХ (14) охватывается хомутами и прижимается винтами (16). Ультразвуковой датчик (18) крепится к трубе ПВХ с одного конца с помощью клейкой ленты.



Рис. 2. Ультразвуковой датчик



Рис. 3. Мяч для настольного тенниса

Для получения математической модели движения необходимо формализовать задачу в виде задачи скатывания тела с наклонной плоскости под углом α .

Постановка задачи. Скатывающееся тело – пустотелая сфера, которая обладает симметрией вращения относительно геометрической оси O (рис 4). Предполагается, что при движении не возникает скольжения. Это означает, что скорость тела в точке касания A с плоскостью равна нулю. Отсутствие скольжения обеспечивается действием сил со стороны наклонной плоскости на скатывающееся тело. Эти силы сводятся к силе нормального давления F_n и к касательной силе трения F_τ . При отсутствии скольжения сила F_τ - есть сила трения покоя или сила трения сцепления.

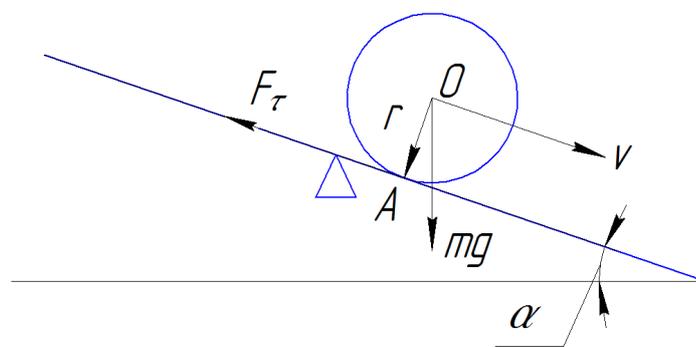


Рис. 4. Схема скатывания тела с наклонной плоскости

Величина силы трения может принимать любое значение от 0 до kF_n , где k – коэффициент трения. При качении она устанавливается такой, чтобы не было скольжения. Если касательная сила, требующаяся для этого, превышает kF_n , то чистое качение невозможно – оно будет сопровождаться скольжением.

Решение задачи. Применим уравнение моментов относительно мгновенной оси вращения. При отсутствии скольжения мгновенная ось проходит через точку касания A . Так как мгновенная ось и ось, проходящая через центр масс O , движутся параллельно друг другу, то уравнение моментов имеет форму:

$$I_A \frac{d\omega}{dt} = M_A,$$

где I_A – момент инерции скатывающегося тела относительно мгновенной оси, ω – угловая скорость вращения тела, а M_A – момент внешних сил относительно той же оси. Внешними силами являются сила тяжести mg и реакция опоры, действующая со стороны наклонной плоскости на скатывающееся тело. Сила реакции опоры выпадает из уравнения моментов, так как она проходит через ось OA , и её момент относительно этой оси равен нулю. Таким образом,

$$I_A \frac{d\omega}{dt} = mgr \cdot \sin(\alpha),$$

где r – радиус тела.

Обозначим V линейную скорость точки O . Она связана со скоростью V_A точки A тела соотношением

$$V = V_A + \omega r.$$

При отсутствии скольжения $V_A = 0$, а потому $V = \omega r$. Для линейного ускорения точки O получаем:

$$a = \frac{dV}{dt} = r \frac{d\omega}{dt}$$

Поэтому предыдущее уравнение даёт

$$a = \frac{mgr^2}{I_A} \sin(\alpha).$$

По теореме Гюйгенса – Штейнера $I_A = I_O + mr^2$, где I_O – момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс O . Следовательно,

$$a = \frac{g \cdot \sin(\alpha)}{1 + \frac{I_O}{mr^2}}.$$

Момент инерции пустотелой сферы описывается уравнением:

$$I_o = \frac{2}{3}mr^2,$$

а ускорение можно представить в виде второй производной перемещения по времени:

$$\ddot{x} = a.$$

Тогда, уравнение, описывающее движение шарика, в конечном итоге принимает вид:

$$\ddot{x} = \frac{3}{5}g \cdot \sin(\alpha).$$

Используя пакет программ MATLABсреду разработки Simulink,промоделируем полученное дифференциальное уравнение второго порядка (рис. 5).

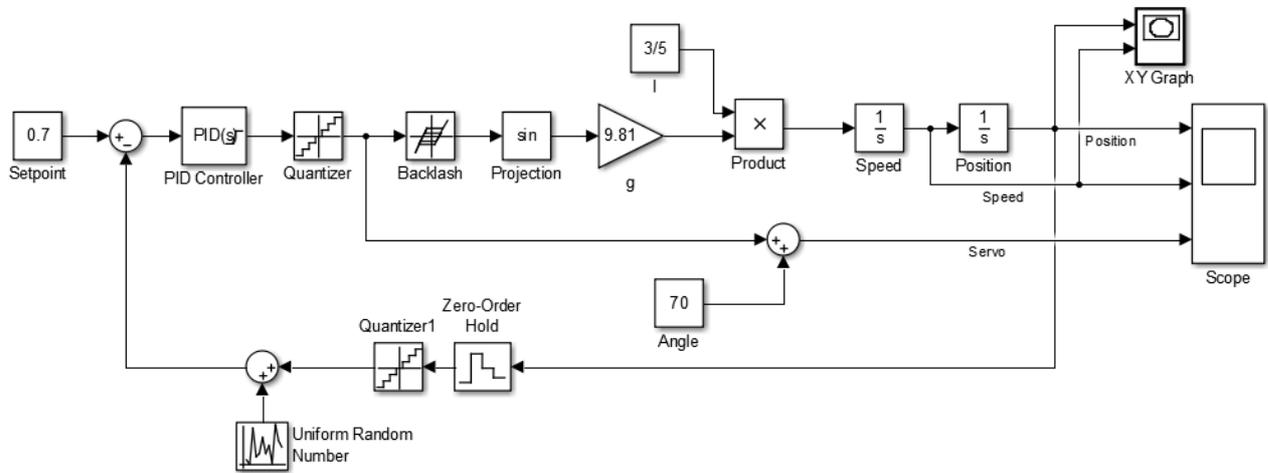


Рис. 5. Структурная схема математической модели системы стабилизации

ПД-регулятор представляет собой устройство в управляющем контуре с обратной связью. Используется для формирования управляющего сигнала $u(t)$ с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса [2],[3]. ПД-регулятор формирует сигнал, являющийся суммой двух слагаемых (рис. 6). Первое из них пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования или сигнал ошибки регулируемой величины $e(t)$), второе является производной сигнала рассогласования. В данной работе регулируемой величиной является перемещение мяча в трубе. Формула управляющего сигнала имеет вид:

$$u(t) = P + D = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

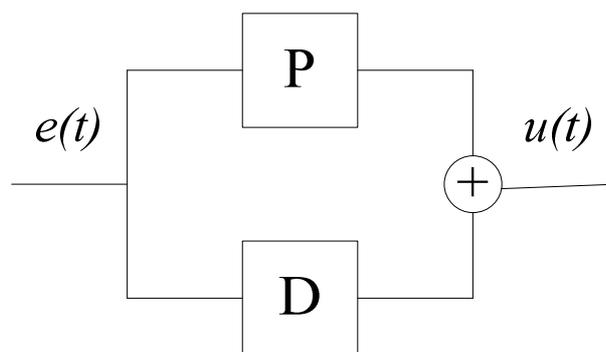


Рис. 6. Структурная схема ПД-регулятора

Пропорциональная составляющая (P) вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения, наблюдаемому в данный момент времени. Он тем больше, чем больше его отклонение. Если входной сигнал равен заданному значению, то выходной сигнал равен нулю.

Дифференциальная составляющая (D) пропорциональна темпу изменения отклонения регулируемой величины и предназначена для противодействия отклонениям от целевого значения, которые прогнозируются в будущем. Отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему.

Синтез ПД-регулятора (настройка его коэффициентов) проводится по методу Зиглера-Никольса. Метод простой и годится для базовой настройки контроллера. Суть заключается в следующем [4].

1. Обнуляются все коэффициенты ($k_p = 0, k_d = 0$).
2. Постепенное увеличение пропорционального коэффициента до определённого значения k , при котором в системе начинают возникать незатухающие колебания регулируемой величины. Фиксация периода колебаний T при коэффициенте k .
3. Расчёт по формулам пропорционального и дифференциального коэффициента.

$$k_p = 0,6k,$$

$$k_d = k_p \cdot \frac{k}{T}.$$

Результаты математического моделирования – графики переходных процессов перемещения и скорости управляемого объекта, а также углового перемещения вала сервопривода изображены на рисунке 7.

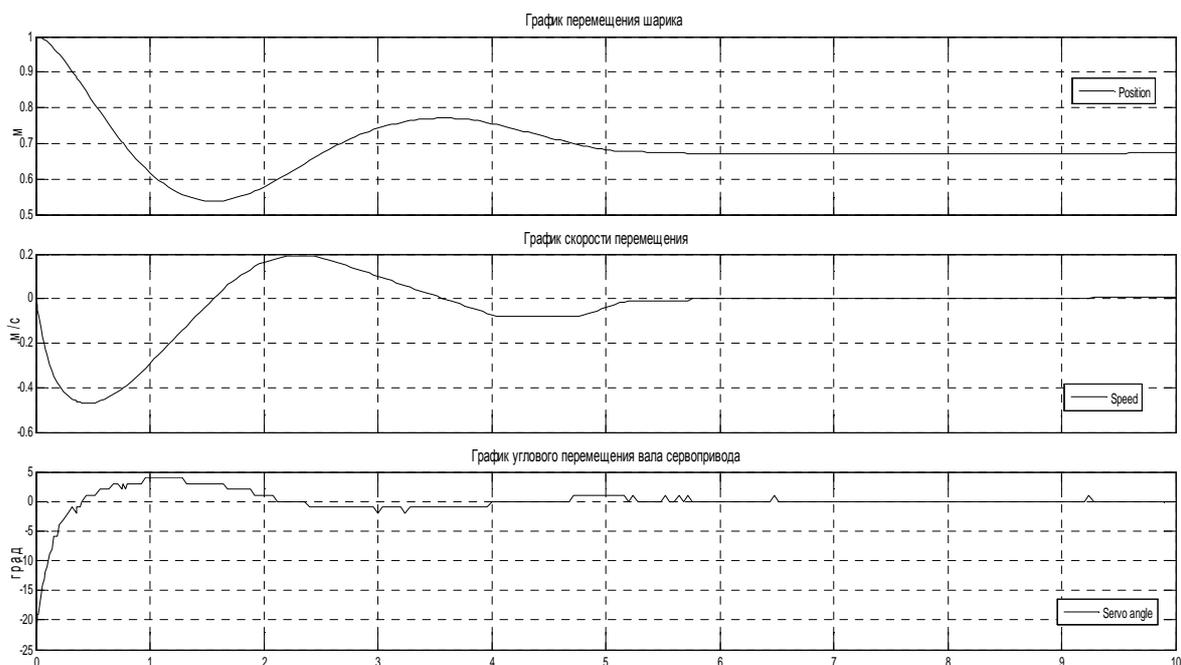


Рис. 7. Результаты математического моделирования

Схема подключения технических средств к плате Arduino показана на рисунке 8. Подключение осуществляется с помощью проводов типа М-Ми F-F. В данной работе использовалась платформа Arduino Nano, внешний вид, а также обозначения входов и выходов которой представлены на рисунке 9.

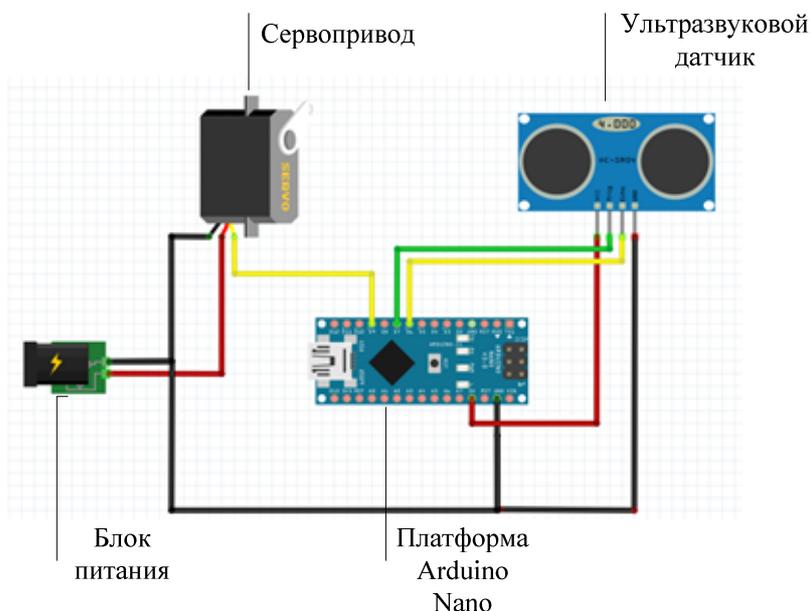


Рис. 8. Схема подключения технических средств к плате Arduino

Каждый из 14 цифровых выводов Nano, используя функции `pinMode()`, `digitalWrite()`, и `digitalRead()`, может настраиваться как вход или выход. Выводы работают при напряжении 5 В. Каждый вывод имеет нагрузочный резистор (стандартно отключен) 20-50 кОм и может пропускать до 40 мА. Некоторые выводы имеют особые функции:

- *последовательная шина: 0 (RX) и 1 (TX)*. Выводы используются для получения (RX) и передачи (TX) данных TTL. Данные выводы подключены к соответствующим выводам микросхемы последовательной шины FTDI USB-to-TTL.

- *внешнее прерывание: 2 и 3*. Данные выводы могут быть сконфигурированы на вызов прерывания либо на младшем значении, либо на переднем или заднем фронте, или при изменении значения. Подробная информация находится в описании функции `attachInterrupt()`.

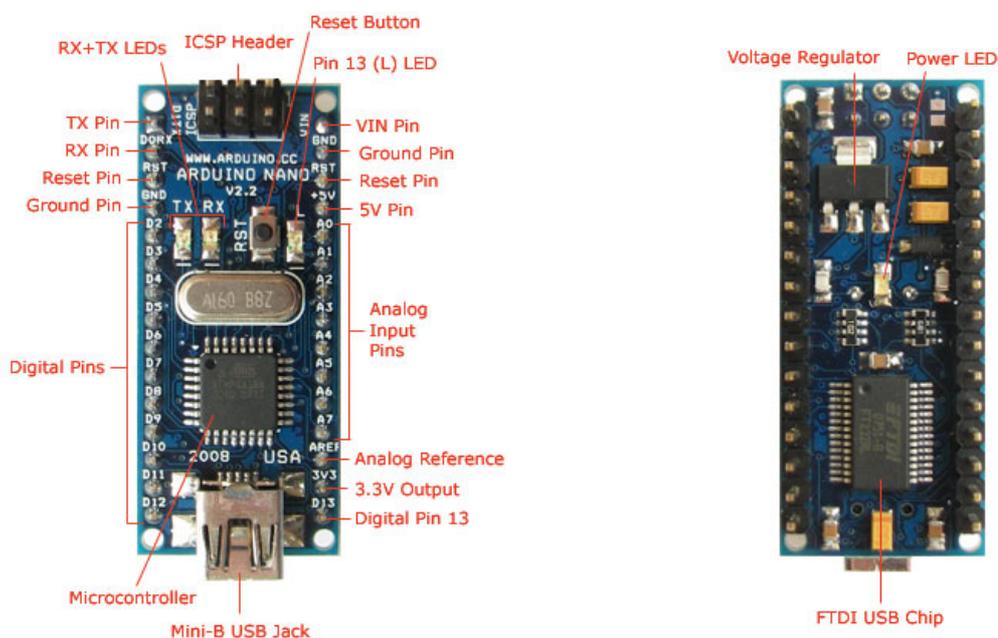


Рис. 9. Внешний вид и обозначение входов и выходов платформы ArduinoNano

- *ШИМ: 3, 5, 6, 9, 10, и 11*. Любой из выводов обеспечивает ШИМ с разрешением 8 бит при помощи функции `analogWrite()`.

- *SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK)*. Посредством данных выводов осуществляется связь SPI, которая, хотя и поддерживается аппаратной частью, не включена в язык Arduino.

- *LED: 13*. Встроенный светодиод, подключенный к цифровому выводу 13. Если значение на выводе имеет высокий потенциал, то светодиод горит.

Краткие характеристики платформы представлены в таблице 1.

Микроконтроллер	Atmel ATmega168 или ATmega328
Рабочее напряжение (логический уровень)	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые Входы/Выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	8
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Флеш-память	16 Кб (ATmega168) или 32 Кб (ATmega328) при этом 2 Кб используются для загрузчика
ОЗУ	1 Кб (ATmega168) или 2 Кб (ATmega328)
EEPROM	512 байт (ATmega168) или 1 Кб (ATmega328)
Тактовая частота	16 МГц
Размеры	1.85 см x 4.2 см

На платформе ArduinoNano установлено несколько устройств для осуществления связи с компьютером, другими устройствами Arduino или микроконтроллерами. ATmega168 и ATmega328 поддерживают последовательный интерфейс UART TTL (5 В), осуществляемый выводами 0 (RX) и 1 (TX). Установленная на плате микросхема FTDI FT232RL направляет данный интерфейс через USB, а драйверы FTDI (включены в программу Arduino) предоставляют виртуальный COM порт программе на компьютере. Мониторинг последовательной шины (SerialMonitor) программы Arduino позволяет посылать и получать текстовые данные при подключении к платформе. Светодиоды RX и TX на платформе будут мигать при передаче данных через микросхему FTDI или USB подключение (но не при использовании последовательной передачи через выводы 0 и 1).

Платформа программируется посредством программного обеспечения ArduinoIDE. Из меню Tools>Board выбирается «ArduinoDiecimila, Duemilanove или Nano w/ ATmega168» или «ArduinoDuemilanove или Nano w/ ATmega328» (согласно установленному микроконтроллеру). Подробная информация находится в справочнике и инструкциях.

Микроконтроллеры ATmega168 и ATmega328 поставляются с записанным загрузчиком, облегчающим запись новых программ без использования внешних программаторов. Связь осуществляется оригинальным протоколом STK500.

Имеется возможность не использовать загрузчик и запрограммировать микроконтроллер через выводы блока ICSP (внутрисхемное программирование). Подробная информация находится в данной инструкции.

Nano разработана таким образом, чтобы перед записью нового кода перезагрузка осуществлялась самой программой, а не нажатием кнопки на платформе. Одна из линий FT232RL, управляющих потоком данных (DTR), подключена к выводу перезагрузки микроконтроллеров ATmega168 или ATmega328 через конденсатор 100 нФ. Активация данной линии, т.е. подача сигнала низкого уровня, перезагружает микроконтроллер. Программа Arduino, используя данную функцию, загружает код одним нажатием кнопки Upload в самой среде программирования. подача сигнала низкого уровня по линии DTR скоординирована с началом записи кода, что сокращает таймаут загрузчика [5].

Лабораторная установка в собранном виде показана на рисунке 10. Основа крепится к столу с помощью струбины от настольной лампы.



Рис. 10. Лабораторная установка системы стабилизации в собранном виде

В результате проведения экспериментов снимаются данные. Результирующие переходные процессы показаны на рисунке 11.

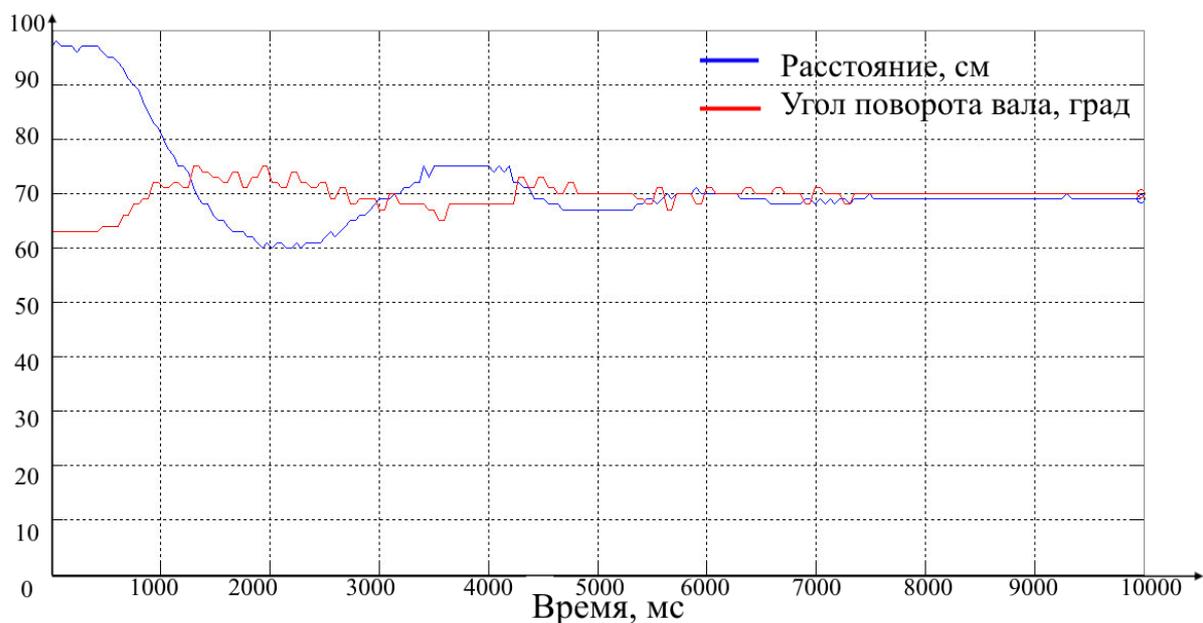


Рис. 11. Графики переходных процессов

Характер переходных процессов подтверждает результаты математического моделирования, показанные на рис. 7., с учетом погрешности измерений и не идеальности исполнительных органов.

На основе проделанной работы формируется вывод об актуальности практического применения лабораторной установки – наглядной демонстрации использования технических средств САУ, а также рекомендации внедрения её в образовательный процесс в качестве наглядного средства для обучения программированию микроконтроллеров при реализации цифровых систем управления.

В дальнейшем планируется модернизация установки: осуществляются конструктивные изменения, проводится настройка коэффициентов ПД-регулятора наиболее точным методом, например, методом CHR, который позволяет получить большой запас устойчивости [7]. Также в перспективе планируется рассмотрение поставленной задачи как двухуровневой задачи управления регулированием на основе использования процедуры иерархической оптимизации [6].

Список литературы

1. Воронов Е.М., Карпунин А.А., Ванин А.В. Оптимизация управления структурно сложными системами // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 10 (22). Режим доступа: <http://engjournal.ru/articles/1080/1080.pdf> (дата обращения 19.04.2015)
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М.: Профессия, 2007. 752 с.

3. Солодовников В.В. Основы автоматического регулирования. М.: МАШГИЗ, 1954. 1118 с.
4. Microstar Laboratories: Data Acquisition (DAQ). Available at: <http://www.mstarlabs.com/control/znrule.html>, accessed 02.04.2015.
5. ArduinoNano| Аппаратная платформа Arduino. Available at: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardNano>, accessed 02.04.2015.
6. Воронов Е.М., Карпунин А.А. Алгоритмы иерархической оптимизации в двухуровневой многоканальной задаче «управление-регулирование» // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2009. № 4. С. 55–67.
7. Расчет параметров ПИД-регулятора. Режим доступа: http://www.bookasutp.ru/Chapter5_5.aspx (дата обращения: 02.04.2015).