# Автоматизация лабораторной установки «Маятник Обербека»

Г. В. Семенов
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
georgii.v.semenov@gmail.com

С. В. Смирнов
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
mg1sergey@gmail.com

***Аннотация — Учебное лабораторное оборудование значительно отличается от реальных лабораторных приборов, на которых работают ученые по всему миру. Важным вопросом в модернизации учебного процесса является обеспечение творческого и осмысленного лабораторного практикума, в котором минимизировано влияние человеческого фактора. Настоящая работа посвящена вопросу автоматизации учебного лабораторного комплекса «Маятник Обербека», в которой студентам предлагается эмпирически проверить основные законы динамики вращательного движения твердого тела. В статье представлены обзор возможностей для автоматизации прямых измерений и обработки данных, а также описание разработанного технического и программного решения для автоматизации измерений с использованием микроконтроллера Arduino и ультразвуковых дальномеров. Результаты, представленные в работе, разработаны для реальной лабораторной работы в зале университета, а так для виртуальной среды, которая автоматически воспроизводит и обрабатывает прямые измерения, созданные на эмуляторе. Можно с уверенностью сказать, что после включения практических результатов работы в существующий лабораторный практикум, время для создания отчётов по работе уменьшиться, а также появится возможность обсуждения результатов с преподавателем в кратчайшие сроки после проведения измерений и даже возможно обсуждение в присутствии лабораторной установки, что может привить вкус студентов к лабораторным исследованиям.Ключевые слова — маятник Обербека, автоматизация, лабораторный практикум по физике, механика, вращательное движение, Arduino, Python.***

## I. Введение

Лабораторный практикум является необходимой частью современного процесса обучения специалистов инженерных направлений. На сегодняшний день существует насущная проблема модернизации образования для соответствия тенденции к обучению в процессе работы, а не постфактум – постаналитические решения занимают гораздо большую часть лабораторного практикума, чем непосредственное знакомство с приборами и проведение измерений, что зачастую уменьшает энтузиазм студентов к экспериментальным исследованиям. Кроме того, при выполнении учебных лабораторных работ по физике решающее значение в обработке результатов работы и анализе данных имеет точность прямых измерений и осознание подхода к экспериментальной работе. Поэтому стоит предположить, что влияние таких факторов, как рутинный характер измерений, их неточность и отсутствие возможности для обсуждения результатов лабораторной работы сразу после выполнения с преподавателем, может быть уменьшено за счёт автоматизации процессов измерений и анализа информации работы непосредственно в процессе её выполнения.

Маятник Обербека является классической физической лабораторной установкой, позволяющей проверить выполнение основного закона динамики вращения и теоремы Штейнера о зависимости момента инерции от положения масс относительно оси вращения. Для минимизации субъективных погрешностей при выполнении лабораторной работы предлагается автоматизировать процесс получения прямых измерений.

Целью проекта является создание автоматизированной установки для лабораторной работы о маятнике Обербека. Задачи, решаемые при выполнении проекта: анализ направлений автоматизации установки и создание технического и программного решения.

В разделе II представлено описание содержания рассматриваемой лабораторной работы, даны цели и требования к результатам. В разделе III содержится обзор возможных методов к автоматизации лабораторной установки. В разделе IV находится описание установочных экспериментов. В разделе V представлено описание выбранного решения для автоматизации установки. В разделе VI приведены заключения, представлены направления дальнейших исследований и проанализированы освоенные навыки.

## II. Описание проблемы

### A. Условие лабораторной работы

Приведём условие лабораторной работы, представленное в учебном пособии [1].

Цель работы:

- Проверка основного закона динамики вращательного движения
- Проверка теоремы Гюйгенса-Штейнера о зависимости момента инерции от положения масс относительно оси вращения

Для выполнения лабораторной работы в качестве оборудования необходимо использовать измерительный стенд и цифровой секундомер.

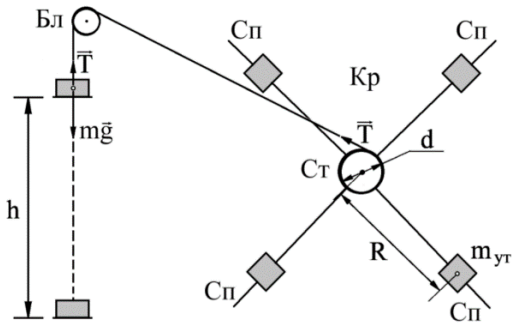



Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки (маятник Обербека)

Измерительный стенд (Рис. 1) состоит из груза массы $m$, подвешенного на нити через блок Бл. Нить намотана на ступицу Ст крестовины Кр. В ступице диаметра $d$

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

закреплены четыре спицы Сп, на каждой из которых размещен груз-утяжелитель массы $m_{ут}$ на одинаковом расстоянии $R$ от ступицы. В процессе выполнения прямых измерений студент фиксирует время падения $t$ груза $m$ с высоты $h$, изменяя параметры $m$ и $R$. В данной модели пренебрегают сопротивлением воздуха, нить считается нерастяжимой и не проскальзывает по ступице.

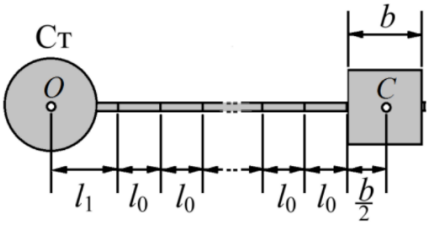



Рис. 2. Схема расположения груза $m_{ут}$ на спице Сп

Груз $m$ состоит из каретки массы $m_0$ и $n_1$ шайб массы $m_ш$. Расстояние $R$ определяется номером градуированной риски $n_2$, а также расстоянием от ступицы до первой риски $l_1$, шагом риски $l_0$ и шириной груза $b$ (Рис. 2).

Таким образом, студенту требуется провести серию измерений $\{t_1, t_2, t_3\}$ для каждой конфигурации $(n_1, n_2)$, где $n_1 \in [1,4]$, $n_2 \in [1,6]$. Параметры лабораторной установки представлены в Таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

| **Константы лабораторной установки** | |
|---|---|
| ***Наименование величины*** | ***Значение*** |
| Ускорение свободного падения | $g = 9{,}81$ м/с$^2$ |
| Высота, с которой падает каретка | $h = 70{,}0$ см |
| Масса каретки | $m_0 = 47{,}0 \pm 0{,}5$ г |
| Масса шайбы на каретке | $m_ш = 220{,}0 \pm 0{,}5$ г |
| Масса груза на крестовине | $m_{ут} = 408{,}0 \pm 0{,}5$ г |
| Диаметр ступицы | $d = 46{,}0 \pm 0{,}5$ мм |
| Расстояние первой риски от оси | $l_1 = 57{,}0 \pm 0{,}5$ мм |
| Расстояние между рисками | $l_0 = 25{,}0 \pm 0{,}2$ мм |
| Высота груза на крестовине | $b = 40{,}0 \pm 0{,}5$ мм |
| **Параметры лабораторной установки** | |
| ***Наименование величины*** | ***Значение*** |
| Масса падающей каретки с грузами | $m(n_1) = m_0 + m_ш \cdot n_1$ |
| Расстояние грузов от ступицы | $R(n_2) = l_1 + (n_2 - 1) \cdot l_0 + \frac{b}{2}$ |

### *B. Физическая модель*

Прямые измерения времени падения $t$ для различных конфигураций лабораторной установки позволяют продемонстрировать выполнение требуемых законов в контексте данной физической модели [2]:

- Основной закон динамики вращательного движения: $I\,\varepsilon = M - M_{тр}$,
- Теорема Штейнера: $I = I_0 + 4m_{ут}R^2$.

На груз $m$, падающий с постоянным ускорением $\vec{a}$ с высоты $h$ за время $t$, действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити $\vec{T}$.

$$m\vec{a} + m\vec{g} + \vec{T} = 0$$

$$a = \frac{2h}{t^2}$$

На ступицу с моментом инерции I, раскручивающуюся с постоянным угловым ускорением $\varepsilon$, действуют сила натяжения нити $\vec{T}$ с моментом M и сила сухого трения с моментом $M_{тр}$.

$$M = T \cdot \frac{d}{2} \qquad \varepsilon = \frac{2a}{d}$$

Тогда возможно проверить основной закон динамики вращательного движения, если установить линейный характер зависимости $M(\varepsilon)$ и рассчитать её коэффициенты I и $M_{тр}$ с помощью метода наименьших квадратов для каждого $n_2$.

Таким образом, возможно проверить и теорему Штейнера, если установить линейный характер зависимости $I(R^2)$ и рассчитать её коэффициенты $I_0$ и $m_{ут}$.

Для каждой серии измерений следует вычислить абсолютную и относительную погрешности величин $a, \varepsilon, M$ согласно методическим рекомендациям [3].

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n} = \frac{t_1+t_2+t_3}{3}, \Delta_{\bar{t}} = t_{\alpha,n} \cdot S_{\bar{t}} = t_{\alpha=0{,}95,\ n=3} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i-\bar{t})}{n(n-1)}}$$

$$\Delta_a = \sqrt{(\frac{\partial a}{\partial t}\,\Delta_t)^2 + (\frac{\partial a}{\partial h}\,\Delta_h)^2} = \sqrt{(\frac{-4h}{t^3}\,\Delta_t)^2 + (\frac{2}{t^2}\,\Delta_h)^2}, \quad \varepsilon_a = \frac{\Delta_a}{a},$$

$$\Delta_\varepsilon = \sqrt{(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}\,\Delta_t)^2 + (\frac{\partial \varepsilon}{\partial h}\,\Delta_h)^2 + (\frac{\partial \varepsilon}{\partial d}\,\Delta_d)^2} =$$

$$\sqrt{(\frac{-8h}{dt^3}\,\Delta_t)^2 + (\frac{4}{dt^2}\,\Delta_h)^2 + (\frac{-4h}{d^2t^2}\,\Delta_d)^2}, \quad \varepsilon_\varepsilon = \frac{\Delta_\varepsilon}{\varepsilon},$$

$$\Delta_M = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial m_0}\Delta_{m_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial m_ш}\Delta_{m_ш}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial t}\Delta_t\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial h}\Delta_h\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial d}\Delta_d\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{d}{2}m_0(m_0 + m_ш \cdot n_1)\left(g - \frac{2h}{t^2}\right)\Delta_{m_0}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}m_ш(m_0 + m_ш \cdot n_1)\left(g - \frac{2h}{t^2}\right)\Delta_{m_ш}\right)^2 +}$$

$$\sqrt{+\left(\frac{2dh(m_0 + m_ш \cdot n_1)}{t^3}\Delta_t\right)^2 + \left(\frac{-d(m_0 + m_ш \cdot n_1)}{t^2}\Delta_h\right)^2 +}$$

$$\sqrt{+\left(\frac{1}{2}(m_0 + m_ш \cdot n_1)\left(g - \frac{2h}{t^2}\right)\Delta_d\right)^2}, \quad \varepsilon_M = \frac{\Delta_M}{M}.$$

Для вычисления коэффициентов линейных зависимостей $M(\varepsilon)$ и $I(R^2)$ и их погрешностей используется метод наименьших квадратов [4]. Формулы, по которым вычисляются коэффициенты и их погрешности для зависимости $y(x) = ax + b$:

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum y_i, \quad \bar{x} = \frac{1}{n}\sum x_i$$

$$d_i = y_i - (a + bx_i), \quad D = \sum (x_i - \bar{x})^2$$

$$\sigma_a^2 = \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{D}\right)\frac{\sum d_i^2}{n-2}, \quad \sigma_b^2 = \frac{1}{D}\frac{\sum d_i^2}{n-2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, \quad b = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2}$$

С точностью $\alpha = 0{,}95$: $\Delta_a = 2\sigma_a$, $\Delta_b = 2\sigma_b$

### *C. Выполнение лабораторной работы*

Приведём последовательность действий для выполнения лабораторной работы:

1. Для каждой конфигурации $(n_1, n_2)$:
   a. Снять измерения $\{t_1, t_2, t_3\}$, найти $\bar{t}$ и $\Delta_{\bar{t}}$
   b. Вычислить измерения $a$, $\varepsilon$, $M$ от $\bar{t}$
   c. Вычислить погрешности $\Delta_a, \Delta_\varepsilon, \Delta_M$
2. Построить таблицу прямых измерений $\{t_1, t_2, t_3\}$ и $\bar{t}$ для каждой конфигурации (Таблица 2)
3. Построить таблицу $a$, $\varepsilon$, $M$ для каждой конфигурации $(n_1, n_2)$ (Таблица 3)
4. Построить график $M(\varepsilon)$, провести линию через измерения каждого $n_2$ (Рис. 3)
5. Построить график $I(R^2)$ для одного $n_2$, провести линейную аппроксимацию (Рис. 4)
6. Записать коэффициенты зависимости $I(R^2)$ и их погрешности: $I_0$, $m_{\text{ут}}$, $\Delta I_0$, $\Delta m_{\text{ут}}$
7. Построить таблицу $\Delta_{\bar{t}}, \Delta_a, \Delta_\varepsilon, \Delta_M$ для каждой конфигурации $(n_1, n_2)$ (Таблица 4)

ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

| $t_1, t_2, t_3, \bar{t}, c$ | $n_2 = 1$ | $n_2 = 2$ | $n_2 = 3$ | $n_2 = 4$ | $n_2 = 5$ | $n_2 = 6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $n_1 = 1$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| $n_1 = 2$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| $n_1 = 3$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| $n_1 = 4$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

| $a, \varepsilon, M$ | $n_2 = 1$ | $n_2 = 2$ | $n_2 = 3$ | $n_2 = 4$ | $n_2 = 5$ | $n_2 = 6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $n_1 = 1$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| $n_1 = 2$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| $n_1 = 3$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| $n_1 = 4$ | | | | | | |

| $a, \varepsilon, M$ | $n_2 = 1$ | $n_2 = 2$ | $n_2 = 3$ | $n_2 = 4$ | $n_2 = 5$ | $n_2 = 6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |
| | | | | | | |

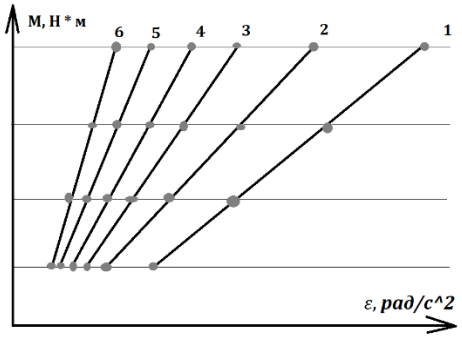



Рис. 3. Примерный вид графика зависимости $M(\varepsilon)$,

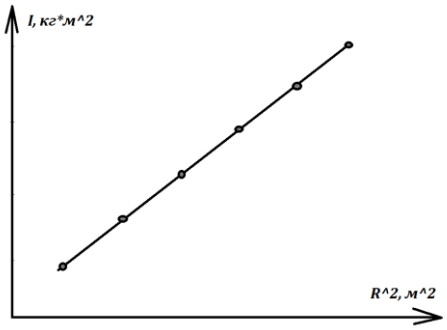



Рис. 4. Примерный вид графика зависимости $I(R^2)$

ТАБЛИЦА 4. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

| $\Delta_{\bar{t}}, \Delta_a, \Delta_\varepsilon, \Delta_M$ | $n_2 = 1$ | $n_2 = 2$ | $n_2 = 3$ | $n_2 = 4$ | $n_2 = 5$ | $n_2 = 6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $n_1 = 1$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| $n_1 = 2$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| $n_1 = 3$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| $n_1 = 4$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

## III. НАПРАВЛЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ

На иллюстрации (Рис. 5) представлена схема исходной лабораторной установки. Требованиями к автоматизирующим решениям являются отсутствие необходимости необратимо изменять исходную установку, простота использования и релевантность исходной лабораторной работе.

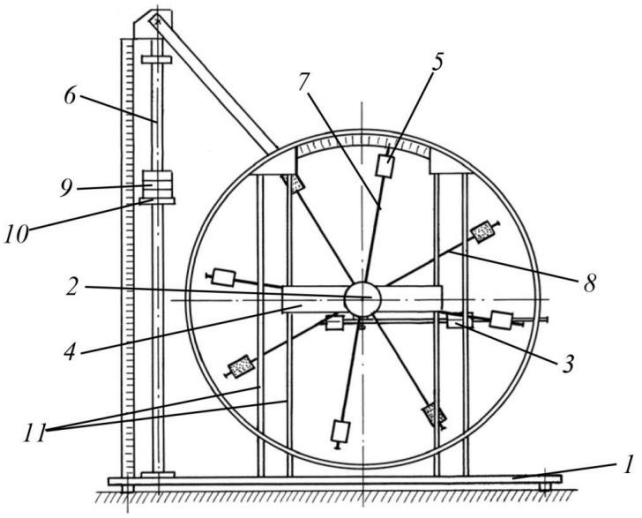



Рис. 5. Схема исходной установки [1]: 1 — основание, 2 — рукоятка сцепления крестовин, 3 — устройство принудительного трения, 4 — поперечина, 5 — груз крестовины, 6 — трубчатая направляющая, 7 — передняя крестовина, 8 — задняя крестовина, 9 — шайбы каретки, 10 — каретка, 11 — система передних стоек.

### A. *Автоматическое засечение времени*

Для повышения точности прямых измерений могут быть применены следующие методы автоматической фиксации времени падения груза:

**Метод активации секундомера событием изменения координаты.** Отслеживая текущую координату, возможно однозначно определить событие падения, автоматически засечь секундомер и выключить его при событии достижения метки 0. Для отслеживания координаты устанавливаются лазерные, ультразвуковые или инфракрасные дальномеры, с одного или с двух концов, и с тактовой частотой собирается текущая координата груза.

**Метод активации секундомера наблюдением за вращением маятника.** Отслеживая текущую угловую скорость маятника, а также характер её изменения, возможно определить, падает ли груз или поднимается. Для отслеживания угловой скорости на спицу маятника устанавливается магнит, а на трубчатую направляющую крепится геркон. Зная текущий период вращения маятника, можно восстановить его угловую скорость. Иногда период вращения маятника слишком мал, чтобы точно зафиксировать событие начала падения груза, поэтому сомнительной является точность измерений на конфигурациях с медленным раскручиванием маятника.

**Метод активации секундомера с помощью фоторамок.** Установив фоторамки на уровне меток h и 0, становится возможным явно получить события начала и завершения падения при прохождении грузом соответствующих фоторамок.

### B. *Автоматическая идентификация конфигурации*

Актуальной возможностью к автоматизации является автоматическое распознавание текущей конфигурации лабораторной установки.

**Метод распознавания конфигурации на основе времени падения.** При наличии базы точных измерений существует возможность сравнивать её с текущим пользовательским измерением и устанавливать ближайшую допустимую конфигурацию согласно уже совершённым измерениям.

**Метод распознавания конфигурации на основе внешнего дальномера.** При закреплении дальномера на рамке установки и должной калибровке пробное прокручивание маятника позволяет определить удалённость грузов на крестовине от дальномера, т. е. позволяет определить текущее положение на спице.

**Метод распознавания конфигурации на основе дальномеров на ступице.** При закреплении дальномеров в основании спиц и должной калибровке в каждый момент времени существует возможность определить положение грузов на спице. Дальномеры на вращающейся крестовине должны быть подключены к микроконтроллеру проводами, поэтому данный метод требует сложных технических решений.

### C. *Итоги обзора подходов к автоматизации*

Лабораторная установка обладает широким спектром возможностей к автоматизации, однако чрезмерная автоматизация негативно влияет на наглядность результатов и отвлекает от процесса измерений. Поскольку одной из задач лабораторного практикума является знакомство с оборудованием и освоение навыка проведения экспериментальных исследований, целесообразно оставить часть задач на выполнение вручную и предоставить студенту время и возможность ручного управления положением утяжелителей на рисках. Целесообразно также заменить суету при выполнении измерений наблюдением за процессом, предполагая, что любопытство и творчество при проведении эксперимента подстегнёт энтузиазм студента к выполнению лабораторного практикума.

На основе предложенных критериев было принято решение автоматизировать установку с использованием метода активации секундомера событием изменения координаты. Среди остальных предложенных методов, данный метод более прост, нагляден и релевантен исходной лабораторной работе, а также не требует необратимых изменений в конструкции установки.

## IV. Установочные эксперименты

Для отслеживания события изменения координаты была разработана градуированная рейка с закрепленными на её концах дальномерами. Лазерные и инфракрасные дальномеры дорогие, и их использование избыточно, поэтому для рейки были выбраны ультразвуковые дальномеры, которые обладают достаточными характеристиками для лабораторных исследований.

С помощью рейки был проведён ряд установочных экспериментов, в результате которых получены интервалы достоверных значений расстояний до каждого из датчиков (Рис. 6).

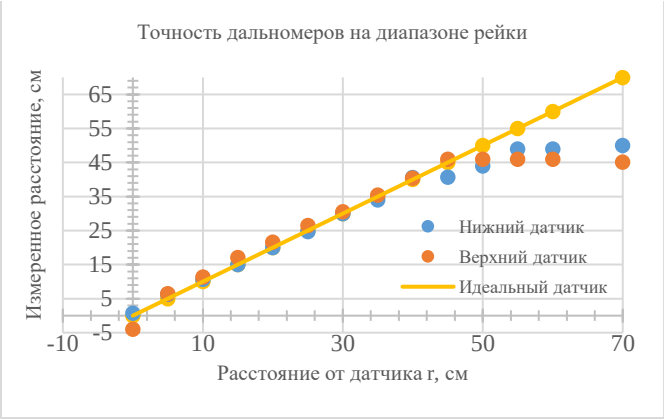



Рис. 6. График реальных расстояний и расстояний, обнаруживаемых дальномерами HC-SR04

По результатам данного эксперимента было принято решение использовать одновременно два дальномера, и была выработана следующая метрическая эвристика:

$$x(t) = \begin{cases} x_1(t), \ \mathrm{x} \in [0, h - \Delta_h) \\ \dfrac{x_1(t) + x_2(t)}{2}, \ \mathrm{x} \in [h - \Delta_h, \Delta_h], \quad \Delta_h = 40 \text{ см} \\ x_2(t), \ \mathrm{x} \in (\Delta_h, h] \end{cases}$$

Если правильно откалибровать данную систему дальномеров на рейке, можно добиться погрешности $\Delta_x = 7$ мм для определения координаты, которой достаточно для точной фиксации времени.

В силу форс-мажорных обстоятельств печать деревянной выносящей пластины и сбор финальной лабораторной установки не состоялись, поэтому в работе проведены только установочные эксперименты с рейкой, и для представления результатов был найден выход в создании виртуального эмулятора лабораторной установки.

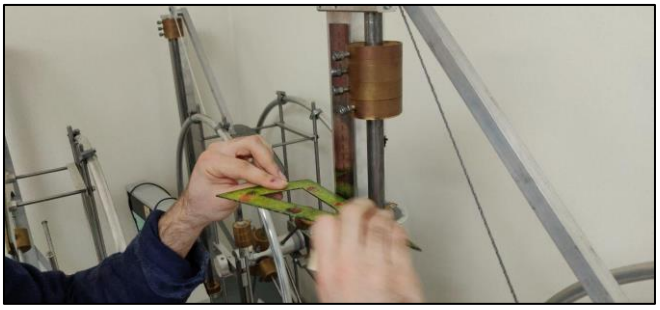


Рис. 7. Снятие параметров с лабораторной установки

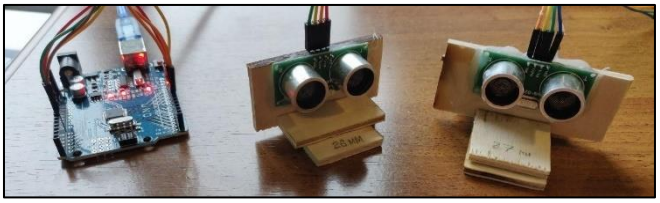


Рис. 8. Микроконтроллер и дальномеры на подставках

## V. Выбранное решение для автоматизации

### A. *Усовершенствование лабораторной установки*

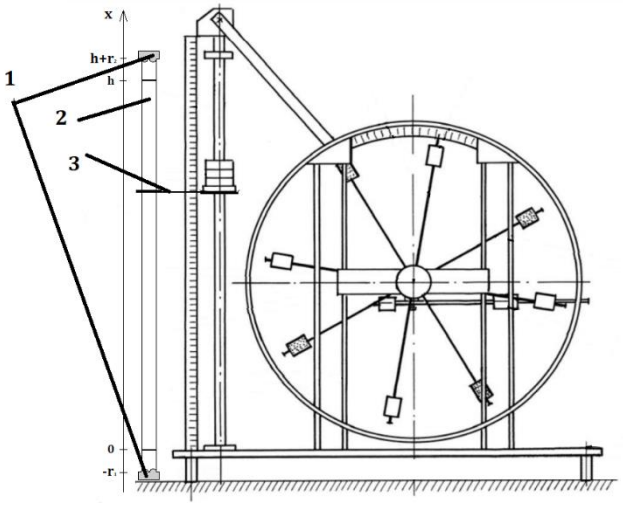



Рис. 9. Схема усовершенствованной установки: 1 — ультразвуковые дальномеры, 2 — деревянная метрическая рейка, 3 — горизонтальная выносящая пластина.

Параллельно трубчатой направляющей установлена вертикальная деревянная рейка, на концах которой закреплены два ультразвуковых дальномера HC-SR04. Метка 0 на рейке совпадает с нулевым уровнем на градуированной шкале, метка $h$ на рейке совпадает с уровнем, с которого производится сброс грузов. Нижний и верхний дальномеры отстоят от меток 0 и $h$ на расстояниях $r_1$ и $r_2$ соответственно (Рис. 10).

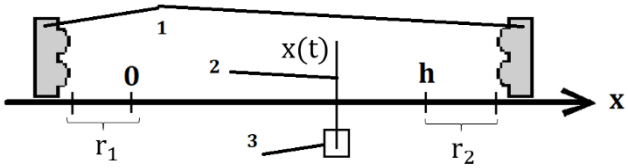



Рис. 10. Схема расположения ультразвуковых дальномеров: 1 — ультразвуковые дальномеры, 2 — деревянная выносящая пластина, 3 — падающий груз m

К каретке прикреплена горизонтальная выносящая пластина, конец которой находится между двумя дальномерами. Таким образом, в любой момент времени становится возможным получить координату каретки $x(t)$. В дальнейшем, координата, получаемая нижним датчиком, обозначается как $x_1(t)$, а координата, получаемая верхним датчиком, — как $x_2(t)$.

Техническое решение универсально, и данная рейка потенциально имеет широкие возможности для применения , в т. ч. в других лабораторных работах.

### B. *Подключение к микроконтроллеру*

Для обеспечения измерений были выбраны микроконтроллер Arduino Uno R3 [5] и ультразвуковые дальномеры HC-SR04, т.к. они поддерживаются сообществом и хорошо документированы, обладают невысокой стоимостью и удобны в учебных проектах.

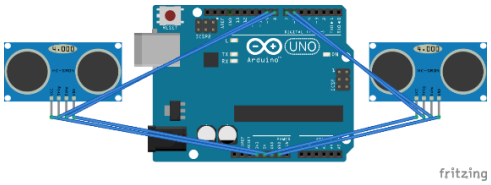



Рис. 11. Схема подключения датчиков к микроконтроллеру [6] (иллюстрация создана в программе Fritzing)

Ультразвуковые дальномеры HC-SR04 принимают электрический импульс на входной порт Trig и через выходной порт Echo передают время, за которое волна дошла до объекта и отразилась от него.

### *C. Лабораторное программное решение*

Для платы Arduino была написана программа, в основе которой лежат параметры, представленные в Таблице 5.

ТАБЛИЦА 5. ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММЫ

| **Экспериментальные параметры** | | |
|---|---|---|
| ***Параметр*** | ***Константа в коде*** | ***Описание*** |
| $r_1$, см | betweenSensorAndStart | Расстояние от нижнего дальномера до отметки 0 |
| $r_2$, см | betweenSensorAndFinish | Расстояние от отметки $h$ до верхнего дальномера |
| $h$, см | distanceInOperation | Высота, с которой падает груз |
| $\nu_t$, Гц | dataFrequency | Тактовая частота передачи координаты |
| $\Delta_h$, см | sensorThreshold | Пороговое достоверное значения для дальномера |
| $\tau$, ед. | measurementsPerTact | Количество измерений, проводимых за один такт |

Программа проводит серию измерений и передаёт их по COM-порту с частотой $\nu_t$. В процессе измерений модель учитывает промежуточные интервалы, необходимые для предупреждения интерференции волн противоположно направленных датчиков, температуру окружающей среды, но пренебрегает эффектом Доплера.

### *D. Эмулятор лабораторной установки*

Для утилитарных и демонстрационных целей также был написан эмулятор для лабораторного программного решения, для которого не требуется подключения к маятнику Обербека.

Эмулятор неотличим от лабораторной установки за исключением того, что, используя COM-порт, эмулятор принимает команды вида “throw $n_1, n_2$” и моделирует падение груза в данной конфигурации лабораторной установки.

### *E. Программа для обработки измерений*

Для проведения измерений и обработки данных была написана программа с графическим интерфейсом на языке Python [7].

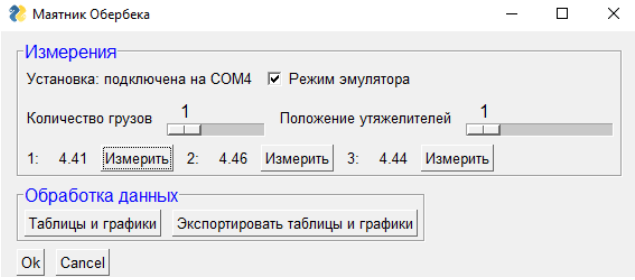
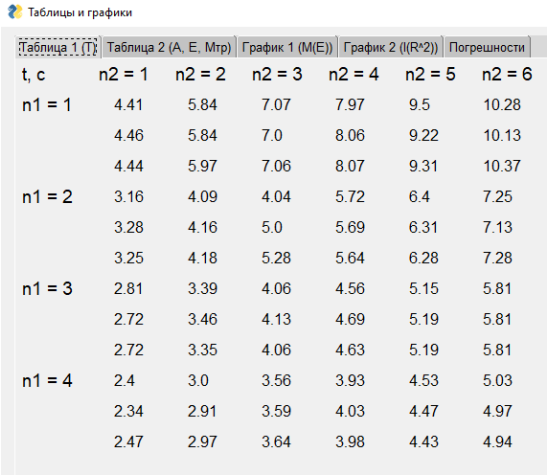



Рис. 12. Скриншот графического интерфейса

Программа работает в двух режимах: режим лаборатории и режим эмулятора. К компьютеру подключается плата Arduino, на которой установлена одна из двух программ: лабораторная или эмулирующая. Пользователь выбирает конфигурацию, для которой проводятся измерения. Программа автоматически определяет падение каретки с грузами и измеряет время падения $t(n_1, n_2, i)$, занося его во внутреннее табличное представление. Прямые измерения могут быть считаны из файла и записаны в файл.

Программа строит таблицы и графики согласно условию лабораторной работы.




| t, c | n2 = 1 | n2 = 2 | n2 = 3 | n2 = 4 | n2 = 5 | n2 = 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| n1 = 1 | 4.41 | 5.84 | 7.07 | 7.97 | 9.5 | 10.28 |
| | 4.46 | 5.84 | 7.0 | 8.06 | 9.22 | 10.13 |
| | 4.44 | 5.97 | 7.06 | 8.07 | 9.31 | 10.37 |
| n1 = 2 | 3.16 | 4.09 | 4.04 | 5.72 | 6.4 | 7.25 |
| | 3.28 | 4.16 | 5.0 | 5.69 | 6.31 | 7.13 |
| | 3.25 | 4.18 | 5.28 | 5.64 | 6.28 | 7.28 |
| n1 = 3 | 2.81 | 3.39 | 4.06 | 4.56 | 5.15 | 5.81 |
| | 2.72 | 3.46 | 4.13 | 4.69 | 5.19 | 5.81 |
| | 2.72 | 3.35 | 4.06 | 4.63 | 5.19 | 5.81 |
| n1 = 4 | 2.4 | 3.0 | 3.56 | 3.93 | 4.53 | 5.03 |
| | 2.34 | 2.91 | 3.59 | 4.03 | 4.47 | 4.97 |
| | 2.47 | 2.97 | 3.64 | 3.98 | 4.43 | 4.94 |

Рис. 13. Скриншот таблицы 1

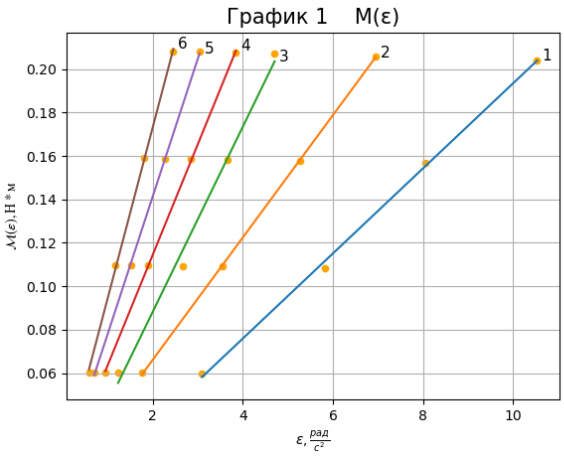



Рис. 14. Скриншот графика 1 зависимости $M(\varepsilon)$ с прямыми, соответствующими различным положениям грузов на крестовине

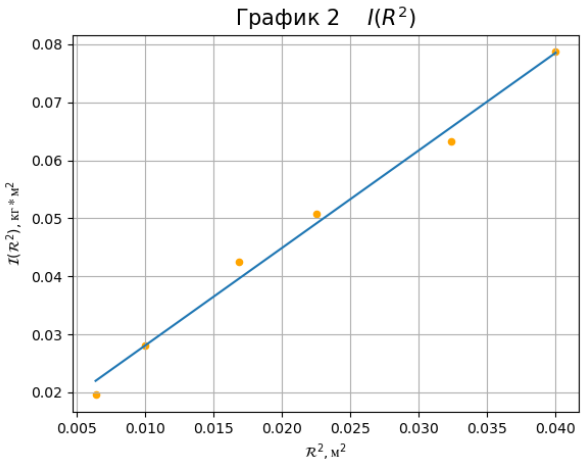



Рис. 15. Скриншот графика 2 зависимости $I(R^2)$ с отмеченными точками и линейной аппроксимацией

Программа позволяет экспортировать таблицы и графики в файлы форматов HTML и PNG соответственно.

### *F. Инструкция по использованию программы*

1. Подключить микроконтроллер Arduino к персональному компьютеру:
   a. Если измерения проводятся в лабораторных условиях, убедиться, что галочка “Эмулятор” не установлена;
   b. Если измерения эмулируются, убедиться, что галочка “Эмулятор” установлена.
2. Провести серии измерений:
   a. С помощью ползунков установить текущую конфигурацию лабораторной установки $(n_1, n_2)$;
   b. Если измерения проводятся в лабораторных условиях, нажать кнопку “Измерить” для выбранного измерения и отпустить падающий груз;
   c. Если измерения эмулируются, нажать кнопку “Измерить” для любого измерения и дождаться появления результата в каждом из полей.
3. Ознакомиться с таблицами и графиками, нажав кнопку “Таблицы и графики”.
4. Экспортировать результаты лабораторной работы, нажав кнопку “Экспортировать таблицы и графики”.

## VI. Заключения

В данной работе выполнены поставленные задачи автоматизации лабораторной установки с созданием технического и программного решения по автоматизации лабораторной установки “Маятник Обербека” с учётом требований к проведению лабораторного практикума. Несмотря на то, что форс-мажорные обстоятельства изменили первоначальные задачи проекта, удалось создать полноценное решение для автоматизации установки и достичь поставленной цели. Кроме этого, удалось сформировать представление об организации проектной и командной работы, а также о методах научного исследования и анализа результатов. В процессе работы каждый из участников освоил значительный объем навыков работы с лабораторным оборудованием, работы с микроконтроллерами, а также такие важные навыки, как структурированный анализ проблемы и организованное представление результатов работы в формате научных результатов. Важно, что результаты проекта уже сейчас могут быть использованы для автоматизации лабораторной установки и могут оказать существенное влияние на организацию учебного процесса. Кроме того, возможно продолжение исследований проблемы автоматизации лабораторных установок и усовершенствование существующего решения для созданной рейки как независимого измерительного инструмента.

## Благодарность

Проектная работа выполнена в рамках курса "Специальные разделы физики” в весеннем семестре 2020 г. Выражаем благодарность научному руководителю Тимофеевой Эльвире Олеговне, преподавателю физики Музыченко Яне Борисовне и ФабЛабу Технопарка Университета ИТМО за помощь в работе с микроконтроллерами и деревообрабатывающими станками.

## Литература

[1] Курепин В.В. Механика: Методические указания к лабораторному практикуму и самостоятельной работе для студентов всех специальностей, направлений и форм обучения - Спб.: СПбГУНиПТ, 2008. - 95 с.

[2] Сквайрс Д. Практическая физика. – Рипол Классик, 2013.

[3] И.В.Савельев. Курс общей физики, том I. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1970 г.

[4] Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2003.–57 с.

[5] Программное решение Arduino. https://www.arduino.cc/reference/

[6] Программное обеспечение Fritzing. https://fritzing.org/learning/

[7] Программное решение. https://github.com/MrGeorgeous/OberbeckPendulum