



## Разработка макета экспериментальной установки для определения коэффициента жесткости цилиндрических пружин и исследования свободных гармонических колебаний

Е. Н. Политов <sup>1</sup>, А. Н. Рукавицын <sup>1</sup>✉, В. П. Ломас Арсиниега <sup>2</sup>,  
Г. Р. Теран Акоста <sup>2</sup>, Ф. Э. Авалос Касканте <sup>2</sup>, Р. Э. Пуэбла Пуэбла <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>2</sup> Центральный университет Эквадора  
г. Кито, Республика Эквадор

✉ e-mail: [alruk75@mail.ru](mailto:alruk75@mail.ru)

### Резюме

**Целью исследования** является разработка макета экспериментальной установки, позволяющей проводить исследования с упругими элементами путем осуществления силового воздействия на них, а также автоматического сбора данных и их анализа, который позволяет определять коэффициент жесткости и исследовать простые гармонические колебания.

**Методы.** Разработанное устройство позволяет определять коэффициент упругости пружины двумя методами – статическим и динамическим. Динамический метод требует строгого соблюдения определенной методики экспериментальных исследований. При этом исследуемая система находится под действием восстанавливающей силы, прямо пропорциональной смещению, т.е. она представляет собой простой генератор гармонических колебаний. Создаваемый прототип экспериментальной установки включает в себя несущую конструкцию, систему управления, к которой подключен ультразвуковой датчик измерения расстояния, и специальное мобильное приложение, позволяющее визуализировать и записывать результаты проведенных измерений в удобной для пользователя форме.

**Результаты.** Разработанный прототип позволяет определить деформацию пружины статическим и динамическим методами, а наличие специального мобильного приложения для устройств с операционной системой "Android" позволяет пользователю управлять устройством со своего мобильного телефона. Экспериментальное устройство позволяет визуализировать графически полученные данные и осуществляет их экспорт в файл переменных значений. Экспортируемые показатели выводятся в табличной форме для последующей обработки с помощью статистических инструментов или приложений для численных вычислений.

**Заключение.** Повышение качества образовательного процесса студентов-физиков требует широкого внедрения в учебный процесс специального оборудования для проведения экспериментальных исследований. Специфика такого оборудования может охватывать различные разделы механики, в том числе кинематику, колебательное движение, удар, упругость и т. п.

**Ключевые слова:** упругость; свободные гармонические колебания; коэффициент жесткости.

© Политов Е. Н., Рукавицын А. Н., Ломас Арсиниега В. П., Теран Акоста Г. Р., Авалос Касканте Ф. Э., Пуэбла Пуэбла Р. Э., 2022

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Разработка макета экспериментальной установки для определения коэффициента жесткости цилиндрических пружин и исследования свободных гармонических колебаний / Е. Н. Политов, А. Н. Рукавицын, В. П. Ломас Арсиниега, Г. Р. Теран Акоста, Ф. Э. Авалос Касканте, Р. Э. Пуэбла Пуэбла // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 23-38. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-23-38>.

Поступила в редакцию 20.04.2022

Подписана в печать 02.06.2022

Опубликована 29.07.2022

## Development of the Layout of the Experimental Setup for Determining the Stiffness Coefficient of Cylindrical Springs and Studying Free Harmonic Oscillations

Evgeny N. Politov <sup>1</sup>, Alexander N. Rukavitsyn <sup>1</sup> ✉, Lomas Arciniega Washington Patricio <sup>2</sup>, Terán Acosta Guillermo Rubén <sup>2</sup>, Ávalos Cascante Fausto Eduardo <sup>2</sup>, Puebla Puebla Raúl Eduardo <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Central University of Ecuador  
Quito, Republic of Ecuador

✉ e-mail: alruk75@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** is to develop a layout of an experimental setup that allows conducting research with elastic elements by exercising a force impact on them as well as automatic data collection and analysis, which allows determining the stiffness coefficient and investigating simple harmonic oscillations.

**Methods.** The developed device makes it possible to determine elasticity coefficient of the spring applying two methods - static and dynamic. The dynamic method requires strict adherence to a certain procedure of experimental study. In this case, the system under study is under the action of a restoring force directly proportional to the displacement, i.e. it is a simple generator of harmonic oscillations. The prototype of the experimental setup being created includes a supporting structure, a control system to which an ultrasonic distance measurement sensor is connected, and a special mobile application that allows visualizing and recording the results of measurements in a user-friendly form.

**Results.** The developed prototype makes it possible to determine spring deformation by static and dynamic methods; the presence of a special mobile application for devices with the Android operating system allows the user to control the device from his mobile phone. The experimental device allows visualizing the obtained data graphically and export them to a file of variable values. Exported values are displayed in tabular form for further processing using statistical tools or numerical computing applications.

**Conclusion.** To improve the quality of the educational and training process of physics students it is necessary to introduce special equipment for experimental research into the educational process. Such equipment can be applied in the studies conducted in various sections of mechanics, including kinematics, oscillatory motion, impact, elasticity, etc.

**Keywords:** elasticity; free harmonic oscillations; stiffness coefficient.

**Conflict of interest.** *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

**For citation:** Politov E. N., Rukavitsyn A. N., Lomas Arciniega W. P., Terán Acosta G. R., Ávalos Cascante F. E., Puebla Puebla R. E. Development of the Layout of the Experimental Setup for Determining the Stiffness Coefficient of Cylindrical Springs and Studying Free Harmonic Oscillations. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 23-38 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-2-23-38](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-23-38).

Received 20.04.2022

Accepted 02.06.2022

Published 29.07.2022

\*\*\*

## Введение

Разрабатываемое устройство является прототипом одного из многочисленных измерительных стендов, которые были разработаны в рамках проекта по созданию и внедрению в образовательный процесс экспериментальных установок, необходимых при изучении научно-естественных дисциплин в Центре Физики UCE (г. Кито, Эквадор). Подобные измерительные стенды позволяют продемонстрировать физические законы и принципы на основе натуральных экспериментов. Такие устройства обязательно содержат технологический компонент, который позволяет с помощью специальных датчиков измерять необходимые величины с последующей их интерпретацией в удобном для пользователя виде с целью анализа и исследования интересующих законов и принципов [1-5].

Устройство позволяет наглядно продемонстрировать действие закона Гука, а также исследовать гармонические колебания и определить коэффициент жесткости пружины. Исследуемый объект под воздействием внешних сил может претерпевать изменения размеров и

формы, которые напрямую зависят от типа материала, из которого он изготовлен. Экспериментальное исследование пружин заключается в том, что их подвергают растяжению или сжатию при воздействии на них внешних силовых факторов [6]. Так при подвешивании груза к пружине, она растягивается, поскольку на нее оказывается силовое воздействие. При увеличении массы груза наблюдается пропорциональное увеличение растяжения пружины, из чего следует, что растяжение прямо пропорционально величине приложенной силы (закон Гука) [6]. Исследуемая пружина соответствует данному закону только в своем рабочем диапазоне.

При растяжении или сжатии вдоль оси симметрии (рис. 1), сила упругости направлена в сторону, противоположную действию сил, вызывающих ее деформацию, и может быть определена по формуле [7]:

$$\vec{F}_{el} = -k \cdot \Delta l \cdot \vec{\mu}_1, \quad (1)$$

где  $\Delta l$  – абсолютное удлинение пружины  $l_0$ , м;

$k$  – коэффициент упругости пружины, Н/м.

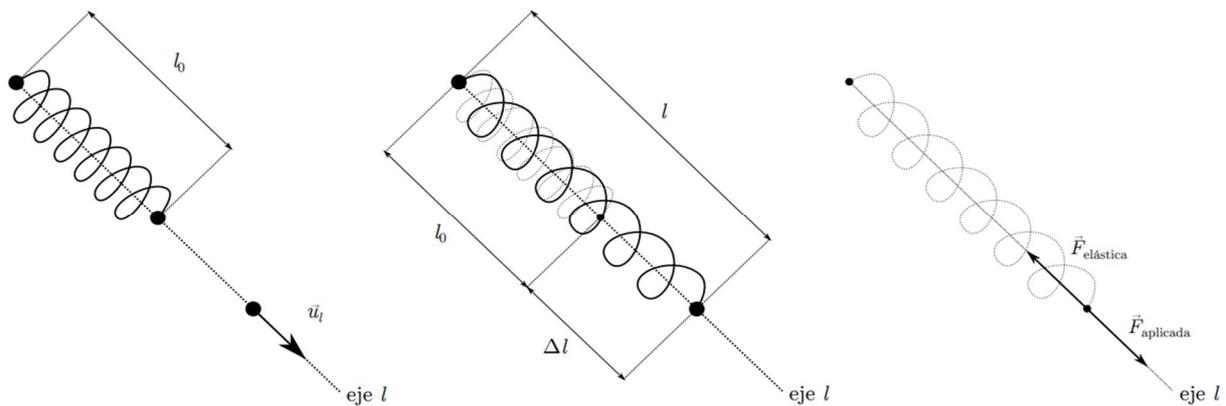


Рис. 1. Диаграмма изменения длины пружины в условиях действия закона Гука

Fig. 1. Diagram of the change in the spring length under the conditions of Hooke's law

## Материалы и методы

Разработанное устройство позволяет определять коэффициент упругости пружины двумя методами.

**Статический метод.** При использовании данного метода пружину подвешивают вертикально, а к ее свободному концу подвешивают груз известной массы, как показано на рис. 2. При этом величина приложенной нагрузки, которая является результатом действия веса подвешенного груза, определяется уравнением [8]:

$$P=mg, \quad (2)$$

где  $mg$  – сила тяжести, которая вызывает растяжение пружины на величину  $d$ .

После выполнения данной операции переходят к вычислению коэффициента жесткости пружины из уравнения для закона Гука [3].

**Динамический метод.** При использовании динамического метода, учитывая, что рассматриваемая система находится под действием восстанавли-

вающей силы, прямо пропорциональной смещению, то она рассматривается как генератор простых гармонических колебаний. Уравнение свободных гармонических колебаний имеет вид [8]:

$$x(t)=A \cos (\omega t+\varphi), \quad (3)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний, т.е. максимальное смещение относительно начального положения равновесия;

$\omega$  – угловая скорость;

$\varphi$  – сдвиг фаз.

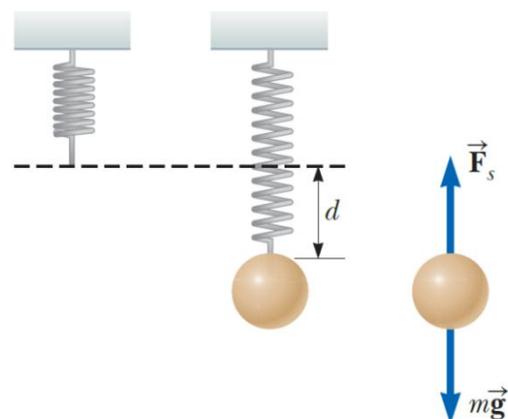
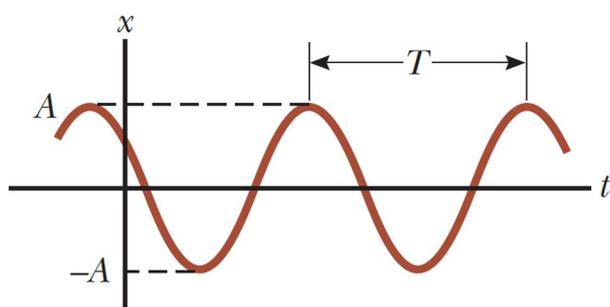


Рис. 2. Определение коэффициента жесткости пружины статическим методом

Fig. 2. Determination of the spring stiffness coefficient by the static method

График движения груза в зависимости от времени показан на рис. 3.



**Рис. 3.** График свободных гармонических колебаний

**Fig. 3.** The diagram of free harmonic oscillations

Период колебаний груза задается уравнением [8]:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (4)$$

где  $m$  – масса, приложенная к свободному концу пружины;

$k$  – коэффициент упругости пружины.

Использование динамического метода требует строгого соблюдения определенной методики экспериментальных исследований, а именно пружину устанавливают вертикально, а на ее свободный конец помещают груз известной массы. Пружину растягивают, прикладывая к ней дополнительное усилие руками, после чего отпускают. Важно убедиться, что движение груза происходит только вдоль вертикальной оси, полностью исключив колебания в горизонтальной плоскости [7,9-11]. Далее переходят к измерению периода колебаний рассматриваемой системы.

Разработанный прототип экспериментальной установки (рис. 4) включает в себя несущую конструкцию, систему

управления, к который подключен ультразвуковой датчик измерения расстояния, и специальное мобильное приложение, позволяющее визуализировать и записывать результаты проведенных измерений в удобной для пользователя форме.



**Рис. 4.** Прототип экспериментальной установки для измерения жесткости пружин и исследования простых гармонических колебаний

**Fig. 4.** The prototype of the experimental setup for measuring spring stiffness and studying simple harmonic oscillations

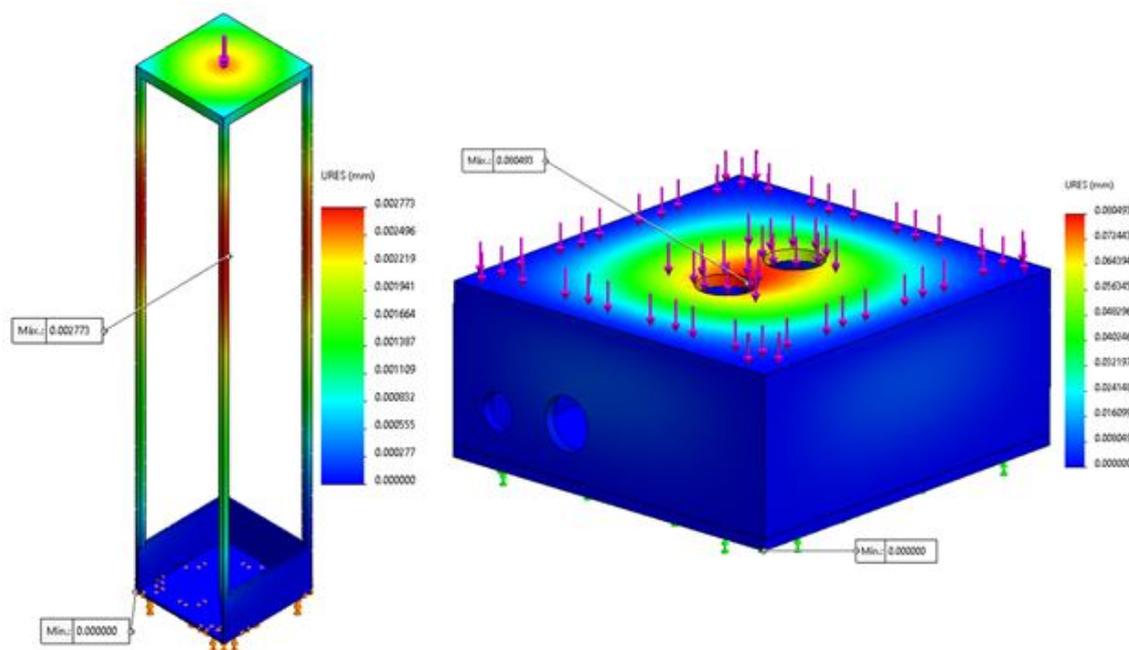
Несущая конструкция оснащена устройством для установки и закрепления пружин различной длины и жесткости, и механизмом для подвешивания грузов на свободном конце пружины, что позволяет проводить разнонаправленные исследования, в том числе и определять коэффициент жесткости пружины, используемой для анализа. Конструкция

прототипа изготовлена из достаточно прочного материала и способна выдерживать нагрузки, создаваемые исследуемой системой «пружина-груз». При этом при проведении эксперимента особенно важно, чтобы конструкция не подвергалась деформации при установке максимально допустимого веса груза. Размеры прототипа экспериментальной установки составляют (110×110×550) мм, а размер сечения вертикальных стержней – (6×6) мм. Выбранный материал – алюминиевый сплав 6063-T5 обладает легкостью, что позволяет легко транспортировать экспериментальную установку.

Чтобы убедиться, что разработанная конструкция соответствует предъявляемым к ней требованиям, с по-

мощью программы имитационного моделирования Solidworks Simulation был проведен анализ нагрузочной способности, а также возможных деформаций, наблюдаемых в конструкции прототипа. При моделировании нагрузка задавалась в виде сосредоточенной силы в 20 Н, которая была приложена к устройству для установки и закрепления пружины. Данное значение соответствует максимально допустимому.

Полученные результаты моделирования (рис. 5) позволяют утверждать, что величина максимальной деформации, которая наблюдается в вертикальных стержнях несущей конструкции, составляет 0.002773 мм, что дает возможность сделать вывод о правильности выбранного материала.



**Рис. 5.** Анализ деформации несущей конструкции и корпуса системы управления прототипа экспериментальной установки

**Fig. 5.** Analysis of the deformation of the supporting structure and the control system casing of the experimental installation prototype

Система управления и датчик измерения расстояния расположены внутри изготовленного из АБС-пластика корпуса, который крепится к нижней части несущей конструкции экспериментальной установки. Размеры корпуса составляют (104×107×45) мм. При определении нагрузочной способности корпуса считалось, что на его поверхность сверху действует равномерно распределенная нагрузка, являющаяся результатом воздействия учтенного ранее силового воздействия в 20Н. Величина максимальной деформации не превышает 0,080493 мм.

Для определения положения механизма для подвешивания грузов относительно нулевого уровня, который настраивается с помощью мобильного приложения, используется ультразвуковой датчик HC-SR04 (рис. 6), который позволяет измерять расстояние без непосредственного контакта с элементами экспериментальной системы. Данный датчик для определения расстояния использует ультразвуковой сигнал и имеет следующие характеристики [12]:

- диапазон измерений от 2 до 450 см;
- рабочее напряжение 5В постоянного тока;
- рабочий ток 15 мА;
- габаритные размеры (45×20×15) мм.

Система управления прототипом экспериментальной установки построена на плате Arduino Nano, которая характеризуется низким энергопотреблением, имеет относительно не большие размеры и напряжение питания 5В

постоянного тока. Плата имеет два вывода для сбора данных, поступающих с датчика обратной связи, и отправки их в мобильное приложение при наличии последовательной связи на основе использования соответствующих выводов [13]. Для передачи данных используется модуль Bluetooth HC06.



Рис. 6. Ультразвуковой датчик HC-SR04

Fig. 6. HC-SR04 ultrasonic sensor

Используемое специальное мобильное приложение, разработанное для устройств Android, имеет элементы управления, необходимые для подключения по каналу Bluetooth к прототипу экспериментальной установки. Приложение позволяет отображать данные о движении груза в режиме реального времени. Связь с пользовательским интерфейсом осуществляется через кнопку, которая позволяет изменять уровень исследуемого параметра, что дает возможность исследовать простые гармонические колебания, создаваемые системой «пружина-груз», как показано на рис. 7.

Функциональные возможности приложения включают в себя запись данных, которые могут быть экспортиро-

ваны в файл переменных, с точностью до  $10^{-6}$ , что дает возможность их дальнейшей обработки с помощью любого программного пакета выполнения вычислительных операций.

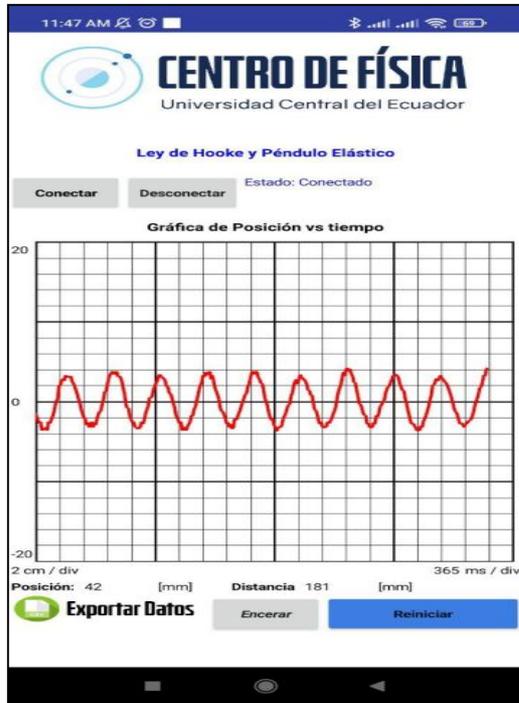


Рис. 7. Пользовательский интерфейс мобильного приложения прототипа исследовательской установки

Fig. 7. User interface of the mobile application of the experimental setup prototype

В данной работе использовался специализированный пакет программ Matlab.

### Результаты и их обсуждение

При проведении статических исследований использовалась методика, представленная выше. С помощью мобильного приложения измерялись конечные положения, которых достигает анализируемая система, что дает возможность количественно оценить изменения длины пружины как в свободном, так и в нагруженном состоянии [14-18]. При этом использовались грузы массой 50, 100 и 150 г. Для каждого эксперимента выполнялось несколько измерений и определялось среднее значение. Полученные данные представлены в табл. 1. За начало отсчета принята нижняя точка пружины, длина которой в свободном состоянии составляет 243.6 мм, а коэффициент жесткости 9 Н/м [19].

Таблица 1. Данные, полученные статическим методом

Table 1. Data obtained by the static method

$m$	$F$	$y_f$						$\bar{y}$	$\Delta y$	$-F/\Delta y$	$E(\%)$
		$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$				
(kg)	(N)	(mm)	(N/m)								
0.00	0.00	243.0	244.0	244.0	243.0	244.0	243.6	0.00	-	-	
0.05	0.49	197.0	193.0	198.0	199.0	197.0	196.8	-46.80	10.47	16.33	
0.10	0.98	141.0	137.0	142.0	141.0	141.0	140.4	-103.20	9.50	5.51	
0.15	1.47	81.0	81.0	80.0	80.0	78.0	80.0	-163.60	8.99	0.16	
0.15	1.47	81.0	79.0	80.0	81.0	78.0	79.8	-163.80	8.97	0.28	
0.10	0.98	137.0	139.0	142.0	137.0	142.0	139.4	-104.20	9.40	4.50	
0.05	0.49	196.0	193.0	196.0	197.0	197.0	195.8	-47.80	10.25	13.90	
0.00	0.00	243.0	243.0	244.0	243.0	247.0	244.0	0.40	-	-	

При проведении данного исследования, при использовании грузов массой 50 г, отклонения от заданного значения при определении коэффициента упругости превышало 10%, в то время, как при использовании груза массой 150 г величина ошибки не превышала 2% (см. табл. 1).

Для динамического анализа использовался груз массой 100 г, а с учетом массы механизма для подвешивания грузов (12 г), общая нагрузка составля-

ла 112 г. Анализ проводился для двух значений амплитуды гармонических колебаний (30 и 40 мм соответственно). Частотно-спектральный анализ данных проводился с помощью быстрого преобразования Фурье, что дало возможность получить графики простых гармонических колебаний и установить основные параметры колебательного процесса [1]. Полученные с помощью мобильного приложения результаты исследования представлены на рис. 8-11.

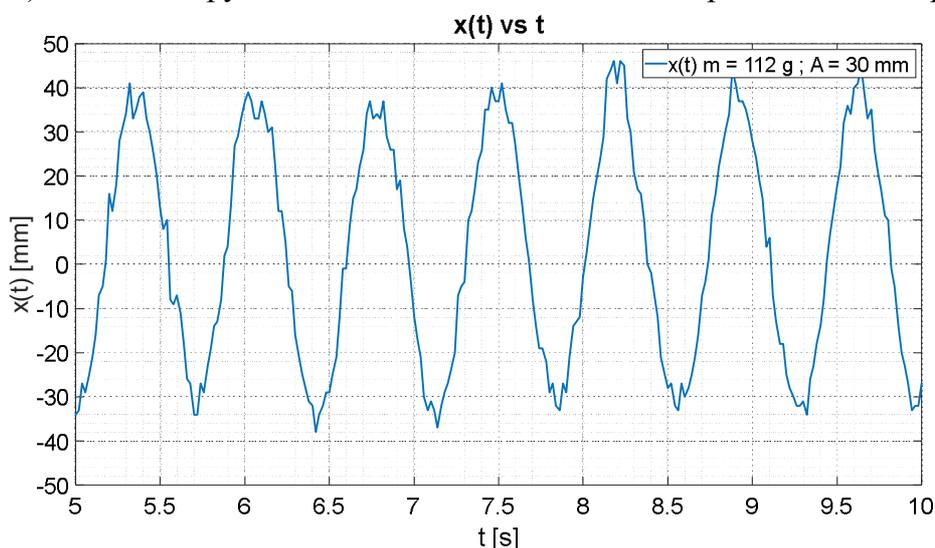


Рис. 8. График свободных гармонических колебаний (A=30 мм)

Fig. 8. The diagram of free harmonic oscillations (A = 30 mm)

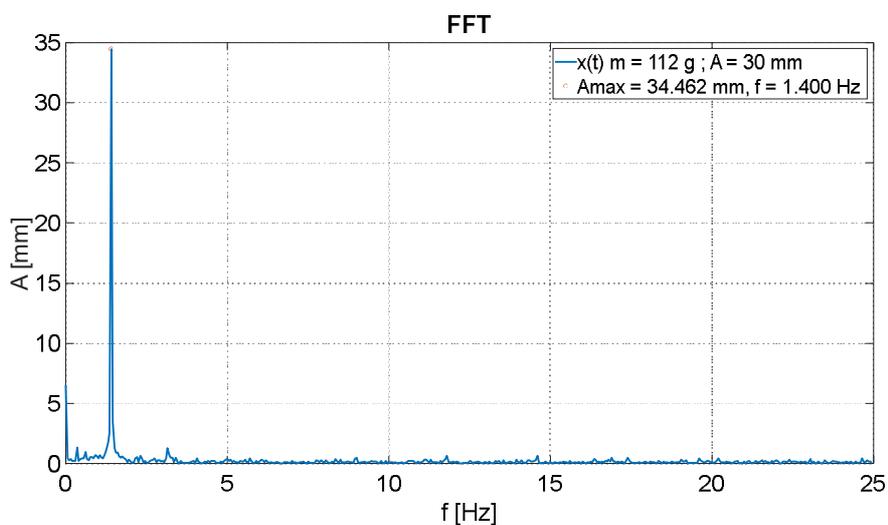


Рис. 9. АЧХ колебательного процесса (A=30 мм)

Fig. 9. Frequency response of the oscillatory process (A = 30 mm)

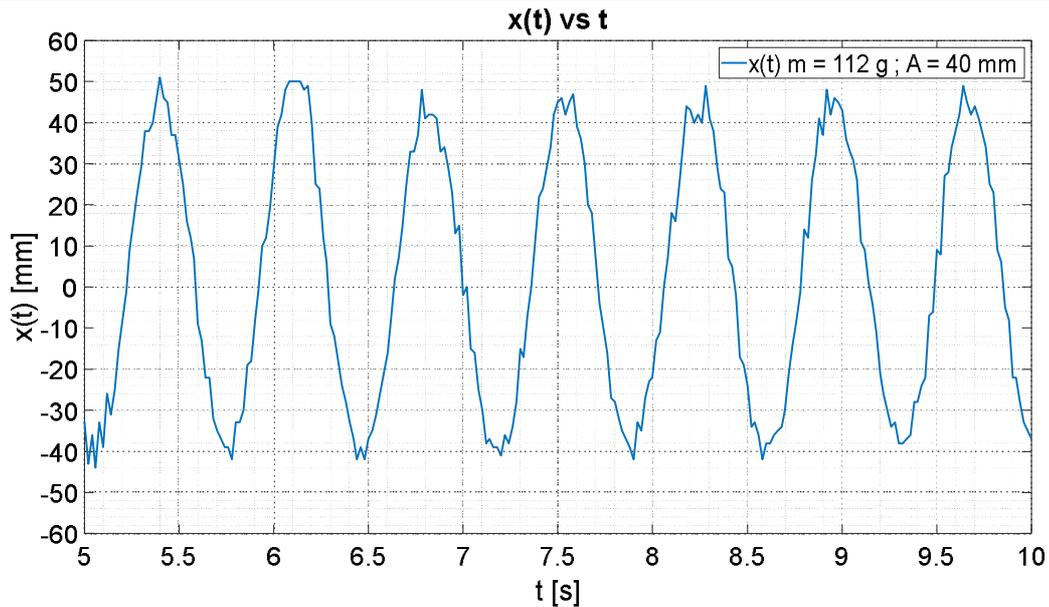


Рис. 10. График свободных гармонических колебаний ( $A=40$  мм)

Fig. 10. The diagram of free harmonic oscillations ( $A = 40$  mm)

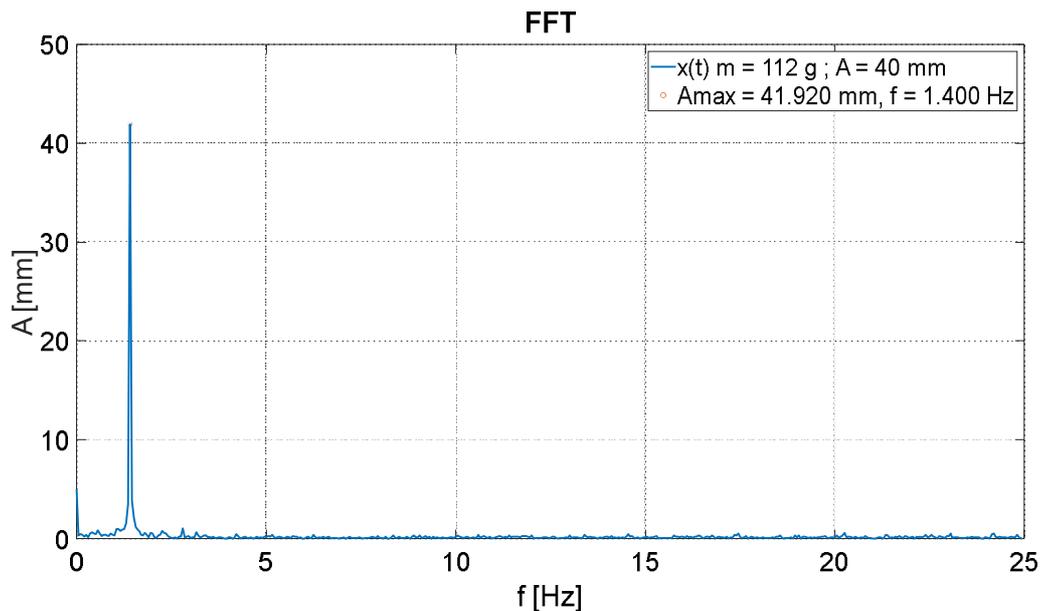


Рис. 11. АЧХ колебательного процесса ( $A=40$  мм)

Fig. 11. Frequency response of the oscillatory process ( $A = 40$  mm)

Анализ представленных результатов дает возможность определить собственную частоту ( $f=1,4$  Гц) для обоих значений амплитуд, а также период колебаний, который напрямую не зависит от массы установленного груза, и коэффициент жесткости пружины. Полученная при

спектральном анализе амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) колебательного процесса позволяет установить зависимость амплитуды установившихся колебаний от частоты [21,22]. Установлено, что при обоих значениях амплитуд собственная частота состав-

ляет 1,4 Гц, а период свободных гармонических колебаний 0.7143с. Определение на основе динамического метода исследований в соответствии с уравнением (4) коэффициента жесткости пружины, при массе подвешенного груза 112 г дает значение 8,67 Н/м, что дает ошибку в 3,6%. Это позволяет говорить о достаточно высокой точности данного метода.

### Выводы

Разработанный макет предназначен для проведения экспериментальных исследований и позволяет, используя закон Гука, определять коэффициент жесткости пружин [23] как на основе статического, так и динамического методов, а также исследовать свободные гармонические колебания.

Использование статического метода определения коэффициента жесткости

пружины при нагрузках менее 50 г дает существенные погрешности (более 10%), что требует проведения экспериментов при больших нагрузочных массах.

Применение динамического метода, с последующим выполнением частотно-спектрального анализа полученных данных, позволяет установить основные параметры свободных гармонических колебаний, в том числе и коэффициент жесткости с минимальной погрешностью (не более 3,6 %).

Представленное оборудование упрощает проведение экспериментальных исследований, автоматически обеспечивая регистрацию данных для последующей обработки с помощью специального программного обеспечения. Данное оборудование имеет низкую стоимость и легко воспроизводится.

### Список литературы

1. Палочкин С.В., Кошкин А.В. Экспериментальное определение коэффициентов поглощения тарельчатых пружин // Современные проблемы теории машин. 2017. № 5. С. 45-48.
2. Пат.170853 Российская Федерация МПК U1, Устройство для демонстрации и исследования свободных колебаний физического маятника / В.В. Дубинин, В.В. Витушкин, № 2016150472, заявл. 21.12.2016; опубл. 11.05.2017
3. Мижидон А.Д., Баргуев С.Г. О собственных колебаниях механической системы каскадного типа, установленной на упругом стержне // Вестник ВСГУТУ. 2010. № 1. С. 26-32.
4. Нелинейные колебания механических систем с одной и двумя степенями свободы / Д.А. Гришко, В.В. Лапшин, Е.С. Студенников, А.Н. Тарасенко, В.В. Леонов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 6 (78). С. 2.
5. Пирогов С.П., Чуба А.Ю. Экспериментальные исследования собственных частот колебаний трубчатых манометрических пружин // Проблемы эксплуатации си-

стем транспорта: сборник материалов всероссийской научно-практической конференции, посвященной 45-летию со дня основания Тюменского индустриального института им. Ленинского комсомола. Тюмень, 2008. С. 243-245.

6. Хьюитт П. Концептуальная Физика. Мексика: Из-во «Общественное образование в Мексике», 2016. 816 с.

7. Alonso V. Determinación de la constante elástica de un muelle por dos métodos: Estático y Dinámico : Repositorio Documental // Universidad de Valladolid. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/30838/ Practica%201%20-%20Constante%20Elastica?sequence=1>

8. Сервей Р. А., Джуэтт Дж. В. Физика для науки и техники. Т.1. Мексика: изд. CENGAGE, 2019.

9. Петров А.Г., Шундерюк М.М. О нелинейных колебаниях тяжелой материальной точки на пружине // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2010. № 2. С. 27-40.

10. Сайтов Ш.К.У. Анализ движения механической системы в обобщенных координатах // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XX Международной научно-практической конференции. Пенза, 2019. С. 68-71.

11. Полищук А.Д., Гаранкина Е.Н. Колебания цилиндрических пружин // Технические науки - от теории к практике. 2012. № 11. С. 56-62.

12. Сайт «SparkFun Electronics». URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/ Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>

13. Сайт «Arduino Hardware». URL: <https://www.arduino.cc/en/hardware>.

14. Васильев А.В., Федоров Н.Н. Результаты теоретического и экспериментального исследования колебаний витков клапанных пружин механизма газораспределения двигателя // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. 2010. Т. 3. № 10 (70). С. 144-146.

15. Полищук А.Д. Использование форм колебаний при исследовании колебаний винтовых цилиндрических пружин // Вестник Башкирского университета. 2020. Т. 25. № 2. С. 239-244.

16. Миронова Л.И., Кондратенко Л.А. Колебания в нелинейном подпружиненном механизме с одной степенью свободы // Нелинейная динамика машин - School-NDM 2017: сборник IV Международной Школы-конференции молодых ученых. М., 2017. С. 356-363.

17. Сорокин Ф.Д., Су Ч. Виток пружины как конечный элемент для исследования динамики "длинных" пружин // Механика и математическое моделирование в технике: сборник тезисов. М., 2016. С. 80-84.

18. Маркеев А.П. Об устойчивости нелинейных колебаний связанных маятников // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2013. № 4. С. 20-30.

19. Сайт «EiscoLabs» Resorte de movimiento armónico de acero inoxidable, 7 pulgadas de largo, resorte constante 9-9.5 N/m: Amazon.es: Oficina y papelería. URL: <https://www.amazon.es/Eisco-Labs-movimiento-inoxidable-constante/dp/B00PYRLNUK>

20. Баргуев С.Г., Миждон А.Д. Определение собственных частот простейшей механической системы на упругом основании // Вестник Бурятского государственного университета. 2009. № 9. С. 58-63.

21. Рыков С.П., Антонов И.В. Датчик колебаний: оценка конструктивных и эксплуатационных параметров // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 1. С. 212-219.

22. Ибрагимов М.А., Инсапов Д.М. Обзор конструкций винтовых цилиндрических пружин, обладающих демпфирующими свойствами // Современные проблемы железнодорожного транспорта: сборник трудов по результатам международной интернет-конференции. М., 2020. С. 372-379.

23. Попов И.П. Математическое моделирование мультиинертного колебательного механизма // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2020. Т. 20. № 1. С. 22-29.

## References

1. Palochkin S.V., Koshkin A.V. Eksperimental'noe opredelenie koeffitsientov pochloshcheniya tarel'chatykh pruzhi [Experimental determination of absorption coefficients of poppet springs]. *Sovremennye problemy teorii mashin = Modern Problems of Machine Theory*, 2017, no. 5, pp. 45-48.

2. Pat. 170853 Russian Federation IPC U1, *Ustroistvo dlya demonstratsii i issledovaniya svobodnykh kolebaniy fizicheskogo mayatnika* [A device for demonstrating and investigating free oscillations of a physical pendulum]. V.V. Dubinin, V.V. Vitushkin, No. 2016150472, announced on 21.12.2016; published on 11.05.2017.

3. Mizhidon A.D., Barguev S.G. O sobstvennykh kolebaniyakh mekhanicheskoi sistemy kaskadnogo tipa, ustanovlennoi na uprugom sterzhne [On natural oscillations of a cascade-type mechanical system mounted on an elastic rod]. *Vestnik VSGTU = Bulletin of VSSTU*, 2010, no. 1, pp. 26-32.

4. Grishko D.A., Lapshin V.V., Studennikov E.S., Tarasenko A.N., Leonov V.V. Nelineinyye kolebaniya mekhanicheskikh sistem s odnoi i dvumya stepenyami svobody [Nonlinear oscillations of mechanical systems with one and two degrees of freedom]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, no. 6 (78), p. 2.

5. Pirogov S.P., Chuba A.Yu. [Experimental studies of natural vibration frequencies of tubular gauge springs]. *Problemy ekspluatatsii sistem transporta: sbornik materialov vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Problems of operation of transport systems. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference]. Tyumen, 2008, pp. 243-245 (In Russ.).

6. Hewitt P. *Kontseptual'naya Fizika* [Conceptual Physics]. Mexico, Obshchestvennoe obrazovanie v Meksike Publ., 2016, 816 p.

7. Alonso V. Determinación de la constante elástica de un muelle por dos métodos: Estático y Dinámico: Repositorio Documental. Universidad de Valladolid. 2017. Available at: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/30838/Practica%201%20-%20Constante%20Elastica?sequence=1>

8. Servey R. A., Jewett J. V. *Fizika dlya nauki i tekhniki* [Physics for Science and technology]. Vol. 1. Mexico, CENGAGE Publ., 2019.

9. Petrov A.G., Shunderyuk M.M. O nelineinykh kolebaniyakh tyazheloi material'noi tochki na pruzhine [On nonlinear oscillations of a heavy material point on a spring]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid State Mechanics*, 2010, no. 2, pp. 27-40.

10. Saitov Sh.K.U. [Analysis of the motion of a mechanical system in generalized coordinates]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii. Sbornik statei XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Fundamental and applied scientific research: topical issues, achievements and innovations: collection of articles of the XX International Scientific and Practical Conference]. Penza, 2019, pp. 68-71 (In Russ.).

11. Polishchuk A.D., Garankina E.N. Kolebaniya tsilindricheskikh pruzhin [Vibrations of cylindrical springs]. *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike = Technical Sciences - from Theory to Practice*, 2012, no. 11, pp. 56-62.

12. SparkFun Electronics website. Available at: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>

13. The Arduino Hardware website. Available at: <https://www.arduino.cc/en/hardware> .

14. Vasiliev A.V., Fedorov N.N. Rezul'taty teoreticheskogo i eksperimental'nogo issledovaniya kolebanii vitkov klapannykh pruzhin mekhanizma gazoraspredeleniya dvigatelya [Results of theoretical and experimental study of the oscillations of the valve springs of the valve timing mechanism of the engine]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nazemnye transportnye sistemy = Proceedings of the Volgograd State Technical University. Series: Ground Transport Systems*, 2010, vol. 3, no. 10 (70), pp. 144-146.

15 Polishchuk A.D. Ispol'zovanie form kolebanii pri issledovanii kolebanii vintovykh tsilindricheskikh pruzhin [The use of vibration forms in the study of vibrations of helical cylindrical springs]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta = Bulletin of the Bashkir University*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 239-244.

16. Mironova L.I., Kondratenko L.A. [Oscillations in a nonlinear spring-loaded mechanism with one degree of freedom]. *Nelineinaya dinamika mashin - School-NDM 2017. Sbornik IV Mezhdunarodnoi Shkoly-konferentsii molodykh uchenykh* [Nonlinear dynamics of machines - School-NDM 2017. Collection of the IV International School-Conference of Young Scientists]. Moscow, 2017, pp. 356-363 (In Russ.).

17. Sorokin F.D., Su Ch. [A coil of a spring as a finite element for the study of the dynamics of "long" springs]. *Mekhanika i matematicheskoe modelirovanie v tekhnike. Sbornik tezisov* [Mechanics and mathematical modeling in engineering. Collection of theses]. Moscow, 2016, pp. 80-84 (In Russ.).

18. Markeev A.P. Ob ustoichivosti nelineinykh kolebanii svyazannykh mayatnikov [On the stability of nonlinear oscillations of coupled pendulums]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid state mechanics*, 2013, no. 4, pp. 20-30.

19. Website of "EiscoLabs" Resorte de movimiento armónico de acero inoxidable, 7 pulgadas de largo, resorte constante 9-9.5 N/m : Amazon.es : Oficina y papelería. Available at: <https://www.amazon.es/Eisco-Labs-movimiento-inoxidable-constante/dp/B00PYRLNUK>

20. Barguev S.G., Mizhidon A.D. Determination of natural frequencies of the simplest mechanical system on an elastic base. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki = Bulletin of the Buryat State University*, 2009, no. 9, pp. 58-63.

21. Rykov S.P., Antonov I.V. Datchik kolebanii: otsenka konstruktivnykh i ekspluatatsionnykh parametrov [Vibration sensor: evaluation of design and operational parameters]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki = Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*, 2019, vol. 1, pp. 212-219.

22. Ibragimov M.A., Insapov D.M. [Overview of the designs of helical cylindrical springs with damping properties]. *Sovremennye problemy zheleznodorozhnogo transporta. Sbornik trudov po rezul'tatam mezhdunarodnoi internet-konferentsii* [Modern problems of railway transport. Collection of works based on the results of an international Internet conference]. Moscow, 2020, pp. 372-379 (In Russ.).

23. Popov I.P. Matematicheskoe modelirovanie mul'tiinertnogo kolebatel'nogo mekhanizma [Mathematical modeling of a multi-inert oscillatory mechanism]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 22-29.

---

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Политов Евгений Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [politovyevgeny@rambler.ru](mailto:politovyevgeny@rambler.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0597-8505>, Researcher ID: 176177

**Рукавицын Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [alruk75@mail.ru](mailto:alruk75@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>, Researcher ID: 423663

**Ломас Арсиниега Вашингтон Патрисио**, лаборант Центра Физики UCE (EC-170521), Центральный университет Эквадора, г. Кито, Республика Эквадор, e-mail: [wplomas@uce.edu.ec](mailto:wplomas@uce.edu.ec)

**Теран Акоста Гильермо Рубен**, доцент факультета философии, литературы и педагогических наук, Центральный университет Эквадора, г. Кито, Республика Эквадор, e-mail: [grteran@uce.edu.ec](mailto:grteran@uce.edu.ec)

**Авалос Касканте Фаусто Эдуардо**, доцент факультета инженерии и прикладных наук, Центральный университет Эквадора, г. Кито, Республика Эквадор, e-mail: [feavalosc@uce.edu.ec](mailto:feavalosc@uce.edu.ec)

**Пуэбла Пуэбла Рауль Эдуардо**, доцент факультета инженерии и прикладных наук, Центральный университет Эквадора, г. Кито, Республика Эквадор, e-mail: [repuebla@uce.edu.ec](mailto:repuebla@uce.edu.ec)

**Evgeny N. Politov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [politovyevgeny@rambler.ru](mailto:politovyevgeny@rambler.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0597-8505>, Researcher ID: 176177

**Alexander N. Rukavitsyn**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [alruk75@mail.ru](mailto:alruk75@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>, Researcher ID: 423663

**Lomas Arsignega Washington Patricio**, Laboratory Assistant at the USER Physics Center (EC-170521), Central University of Ecuador, Quito, Republic of Ecuador, e-mail: [wplomas@uce.edu.ec](mailto:wplomas@uce.edu.ec)

**Tiran Acosta Guillermo Ruben**, Associate Professor of the Faculty of Philosophy, Literature and Pedagogical Sciences, Central University of Ecuador, Quito, Republic of Ecuador, e-mail: [grteran@uce.edu.ec](mailto:grteran@uce.edu.ec)

**Avalos Cascante Fausto Eduardo**, Associate Professor, Faculty of Engineering and Applied Sciences, Central University of Ecuador, Quito, Republic of Ecuador, e-mail: [feavalosc@uce.edu.ec](mailto:feavalosc@uce.edu.ec)

**Puebla Puebla Raul Eduardo**, Associate Professor, Faculty of Engineering and Applied Sciences, Central University of Ecuador, Quito, Republic of Ecuador, e-mail: [repuebla@uce.edu.ec](mailto:repuebla@uce.edu.ec)