

УДК 681.2-5:531.23

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ  
ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ПРИБОРОВ**

А.Н. Гормаков, Выонг Суан Чьен

Томский политехнический университет

E-mail: gormakov@tpu.ru

**Гормаков Анатолий Николаевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры точного приборостроения института неразрушающего контроля ТПУ. E-mail: gormakov@tpu.ru  
Область научных интересов: методы и средства испытаний и поверки систем ориентации.

**Выонг Суан Чьен**, студент Института неразрушающего контроля ТПУ. E-mail: chientomsk@gmail.com  
Область научных интересов: автоматизация производственных и технологических процессов.

Для управления движением и обеспечения устойчивости тел необходимо знать их моменты инерции. При определении моментов инерции тел существуют два принципиально различных пути – аналитический и экспериментальный. Часто на практике требуется быстро определить момент инерции имеющегося в распоряжении изделия. В этом случае используют экспериментальный путь, который обладает высокой точностью даже для сложных деталей и сборочных единиц. Рассматриваются результаты разработки и испытаний автоматизированной установки для определения моментов инерции деталей и узлов приборов массой до 5 кг и размерами, вписывающимися в цилиндр диаметром 180 мм и высотой 270 мм. В качестве датчика колебаний платформы установки используется датчик KTI0311s. Для сопряжения датчика колебаний установки с персональным компьютером применено устройство Card Hocdelam USB 9090.

Погрешность измерения не превышает 0,2 %.

**Ключевые слова:**

Момент инерции, автоматизированная установка, приборостроение.

**Актуальность экспериментального определения моментов инерции**

Исследование движения тел необходимо проводить как в учебном процессе, так и в различных сферах жизнедеятельности человечества. Для управления движением тел и их устойчивости необходимо знать момент инерции деталей и узлов приборов. При определении моментов инерции тел существуют два принципиально различных пути – аналитический и экспериментальный.

Если детали выполнены из однородного материала и имеют правильные геометрические формы, то можно использовать аналитический способ. Существует ряд специальных программ, которые позволяют с высокой степенью точности рассчитать момент инерции деталей: T-PLEX CAD, Solid Works, «Компас» и др. Для вычисления моментов инерции изделий необходимо построить его 3D-модель. Это требует значительных затрат времени. В реальности детали редко имеют простую форму.

Часто на практике требуется быстро определить момент инерции имеющегося в распоряжении изделия. В этом случае используют экспериментальный путь, который обладает высокой точностью даже для сложных деталей и сборочных единиц.

**Выбор метода экспериментального определения моментов инерции**

Для экспериментального определения момента инерции тел разработан ряд методов и создано большое количество специальных приборов и установок. Наиболее точным из всех методов является метод крутильных колебаний, предложенный в начале XIX в. Пуассоном и широко применяемый в настоящее время в прикладной механике. Исследуемое изделие подвешивается на упругом стержне, выводится из состояния равновесия и далее изделию предоставля-

ется возможность совершать крутильные колебания вокруг оси стержня. Период колебаний изделия зависит от величины его момента инерции  $J$  [1]:

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum J_i}{c}}, \quad (1)$$

где  $\sum J_i$  – сумма моментов инерции систем относительно вращательной оси;  $c$  – крутильная жесткость упругого стержня;  $T$  – период крутильных колебаний.

Из выражения (1) получаем выражение (2) момента инерции колеблющейся системы:

$$\sum J_i = \frac{c}{4 \cdot \pi^2} \cdot T^2 \quad (2)$$

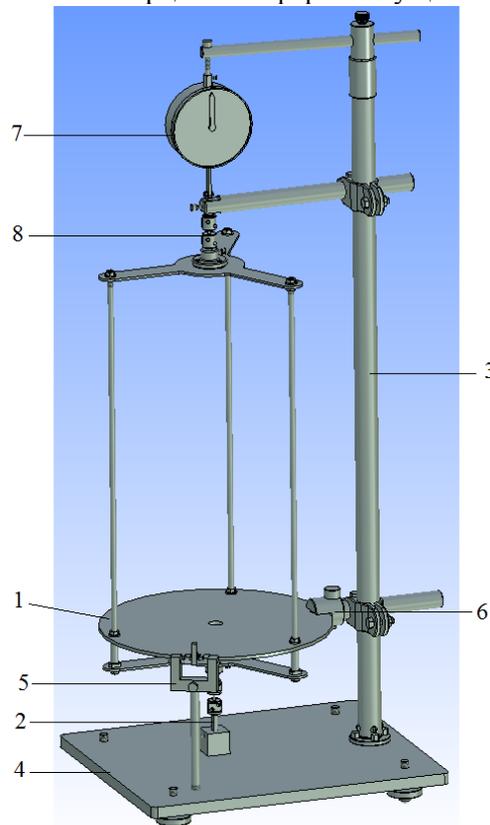
### Конструкция установки

Установка для автоматизированного экспериментального определения моментов инерции подвижных узлов приборов [2] по методу крутильных колебаний содержит платформу 1, подвешенную на растяжках 2 и 8 на основании 4. На основании 4 размещена стойка 3, на которой смонтирован измерительный преобразователь 6 колебаний платформы 1. В состав установки входит динамометр 7. Для приведения платформы 1 в колебательное движение на основании 4 размещен спусковой механизм 5 (рис. 1).

Момент инерции изделия определяется методом крутильных колебаний. Выражение (2) показывает зависимость момента инерции изделия от периода колебаний.

Моменты инерции эталонов и платформы определяются заранее и вводятся в программу расчета момента инерции изделия.

Тогда определение момента инерции платформы осуществляется по формуле (3):



**Рис. 1.** Установка для автоматизированного экспериментального определения моментов инерции подвижных узлов приборов

$$J_{\Pi} = J_{\text{Э+П}} \frac{T_{\Pi}^2}{T_{\text{Э+П}}^2} \Leftrightarrow J_{\Pi} = (J_{\Pi} + J_{\text{Э}}) \cdot \frac{T_{\Pi}^2}{T_{\text{Э+П}}^2} \Leftrightarrow J_{\Pi} \cdot \left(1 - \frac{T_{\Pi}^2}{T_{\text{Э+П}}^2}\right) = J_{\text{Э}} \cdot \frac{T_{\Pi}^2}{T_{\text{Э+П}}^2} \Leftrightarrow$$

$$J_{\Pi} = J_{\text{Э}} \cdot \frac{\frac{T_{\Pi}^2}{T_{\text{Э+П}}^2}}{1 - \frac{T_{\Pi}^2}{T_{\text{Э+П}}^2}} = J_{\text{Э}} \cdot \frac{T_{\Pi}^2}{T_{\text{Э+П}}^2 - T_{\Pi}^2} \quad (3)$$

и определение момента инерции детали по формуле (4):

$$J_{\text{Э}} + J_{\Pi} = J_{\Pi+\text{Э}}$$

$$J_{\Pi+Д} = J_{\Pi+\text{Э}} \frac{T_{\Pi+Д}^2}{T_{\Pi+\text{Э}}^2} \Leftrightarrow J_{Д} + J_{\Pi} = J_{\Pi+\text{Э}} \cdot \frac{T_{\Pi+Д}^2}{T_{\Pi+\text{Э}}^2} \Leftrightarrow$$

$$J_{Д} = J_{\Pi+Д} - J_{\Pi} \quad (4)$$

где  $J_{\Pi}$  – момент инерции платформы;  $J_{\Pi+\text{Э}}$  – момент инерции платформы с эталоном;  $J_{\Pi+Д}$  – момент инерции платформы с деталью.

В состав комплекса установки (рис. 2) входит: установка (рис. 1), интерфейс и персональный компьютер.

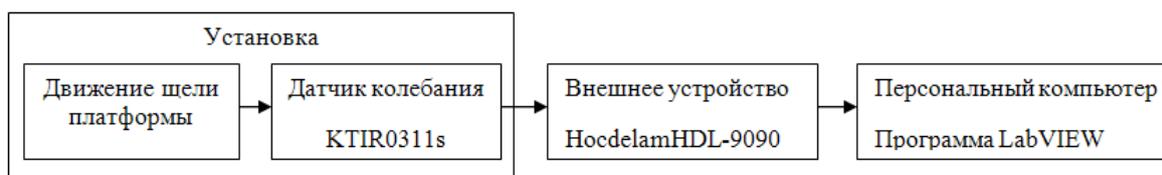


Рис. 2. Принципиальная схема установки

### Датчик колебаний

В качестве датчика колебаний платформы (рис. 3,а) используется датчик КТIR0311s [3].

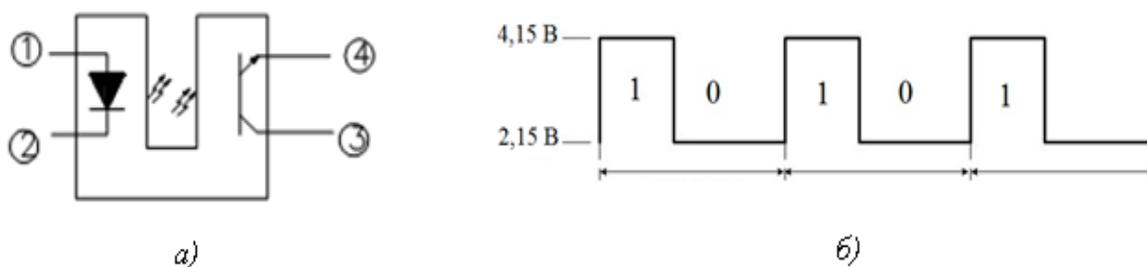


Рис. 3. Датчик колебаний платформы: а – электрическая схема; б – диаграмма напряжений на выходе датчика

### Внешнее устройство

В качестве внешнего устройства используется устройство Card Hocdelam USB 9090 [3].

Устройство Card Hocdelam USB 9090 предназначено для сопряжения датчика колебаний установки с персональным компьютером для решения задачи измерения.

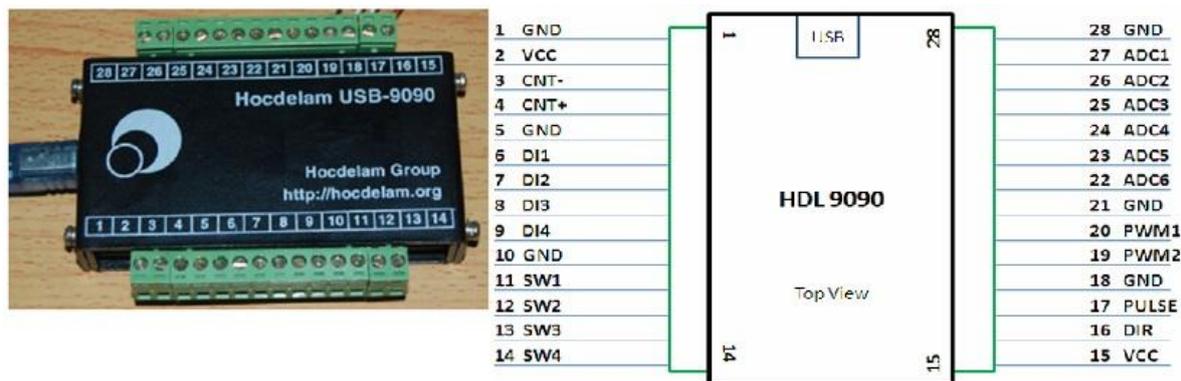


Рис. 4. Устройство Card Hocdelam USB 9090

При совершении колебаний платформы 1 (рис. 1) установки с изделием щель платформы проходит в щели корпуса датчика 6, формируя на выходе датчика импульсы. Импульс передается на внешнее устройство (рис. 5), которое подключено к компьютеру.

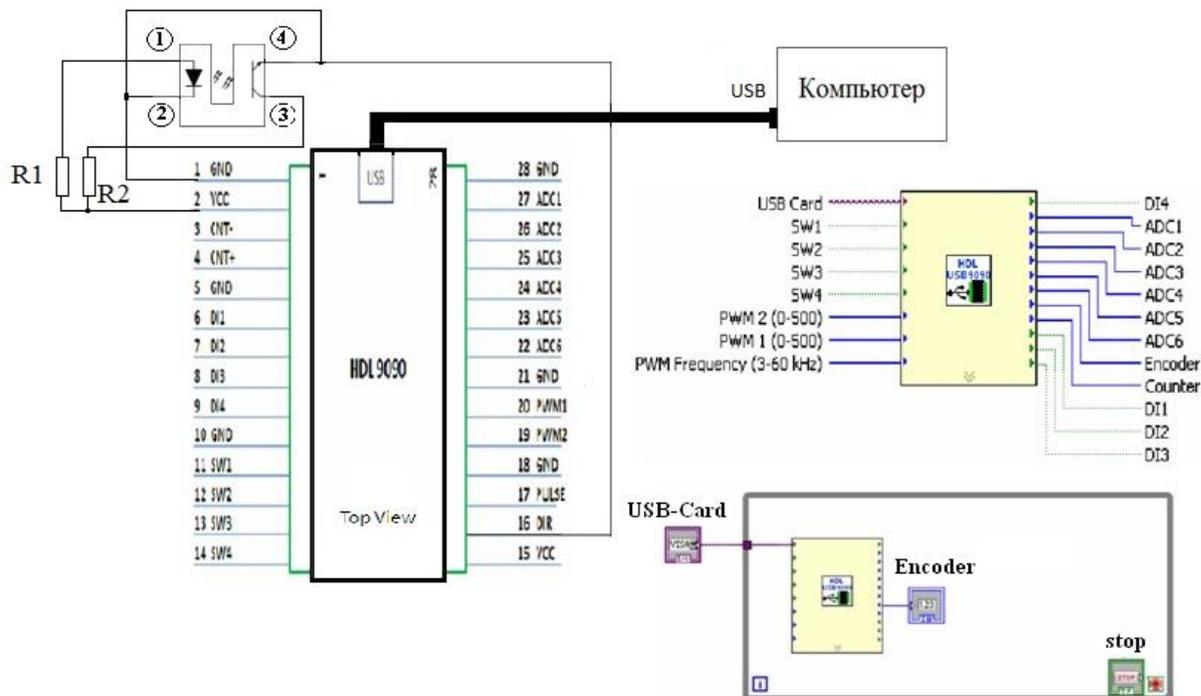


Рис. 5. Принципиальная схема подключения датчика колебаний к внешнему устройству

Выводы 1 и 3 датчика колебаний подключают к входу 2 (VCC) внешнего устройства через резисторы  $R_1$ ,  $R_2$ . Выводы 2 и 4 датчика колебаний связаны с выводами 1 (GND) и 16 внешнего устройства, которое подключено к компьютеру с помощью кабеля.

### Система сбора и обработки результатов измерения

В компьютере программа LabVIEW преобразует цифровую информацию о числе колебаний платформы с изделием (эталоном) в численное значение момента инерции изделия (эталоны).

Блок-схема алгоритма определения момента инерции приведена на рис. 6.

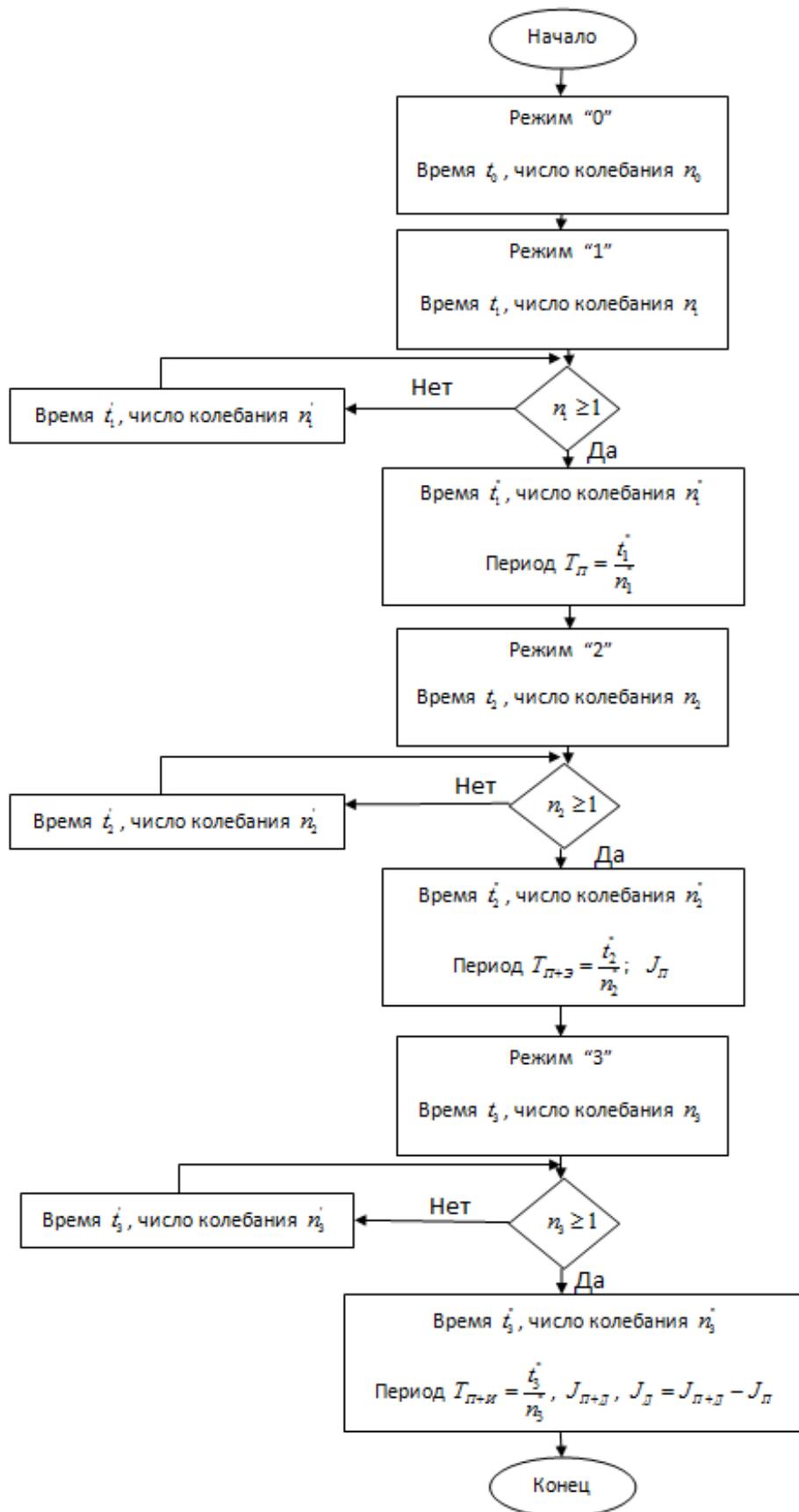


Рис. 6. Блок-схема алгоритма определения момента инерции

В окне программы на экране монитора (рис. 7) отображаются все результаты измерений.

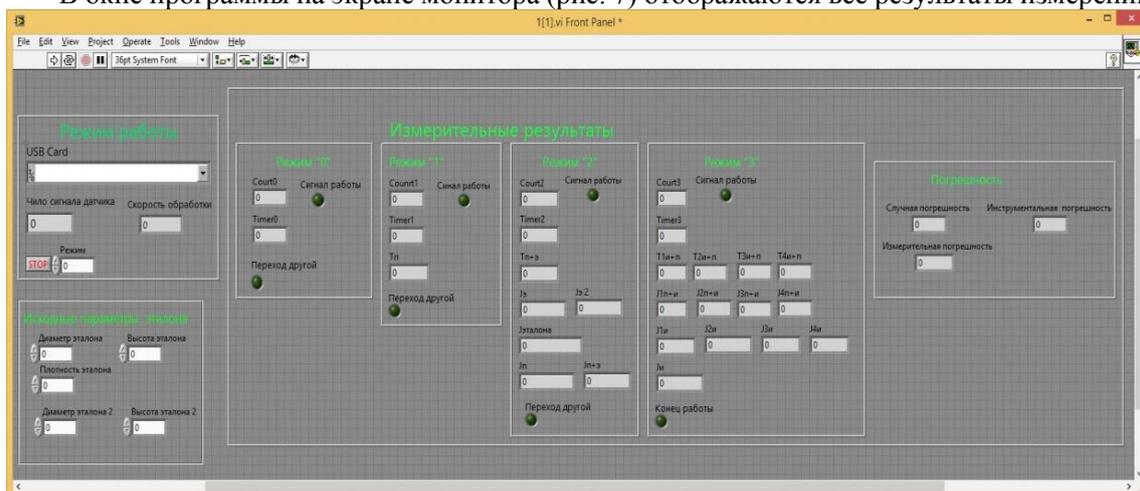


Рис. 7. Экран с результатами измерений

### Методика измерений

#### А. Подготовка установки к работе

1. Подключить питание компьютера 220 В, 50 Гц, включить компьютер.
2. Соединить устройство Card Hocdelam USB 9090 с компьютером.
3. Открыть программу LabVIEW. В экране программы выбрать библиотеку USB 9090.
4. Подключить датчик к устройству 9090.
5. Выставить платформу установки в плоскость горизонта с помощью регулируемых винтов (опор).
6. Проверить визуально положение щели платформы и датчика. Обеспечить соосность щели и общей оси излучателя и приемника датчика.

#### Б. Выполнить работу

7. Задать параметры эталона в программу LabVIEW (диаметр, высота и плотность).
8. Программа определяет моменты инерции эталона  $J_{\text{э}}$ .
9. Режим «0»: повернуть платформу на малый угол вокруг оси подвеса и зафиксировать платформу спусковым механизмом. Привести в действие спусковой механизм, предоставив платформе свободные колебания.
10. Режим «1»: нажать режим «1», после 30 колебаний программа сигнализирует о переходе на следующий этап и определяет период крутильных колебаний  $T_{\text{п}}$ .
11. Режим «2»: установить эталон на платформу, повернуть платформу с эталоном на заданный угол и предоставить ей свободные колебания. Нажать на экране программы кнопку режим «2». После 30 колебаний программа определяет период крутильных колебаний  $T_{\text{п+э}}$  и моменты инерции платформы,  $J_{\text{п}}$  и  $J_{\text{п+э}}$ . Программа сигнализирует о переходе на следующий этап.
12. Режим «3»: изделие устанавливают на платформу, закручивают упругие стержни поворотом платформы с изделием. Нажать кнопку режим «3». Программа определяет период крутильных колебаний  $T_{\text{д+п}}$ , момент инерции изделия  $J_{\text{и}}$  и его погрешность  $\Delta J_{\text{и}}$  после 30 колебаний. Программа завершена.

#### О погрешности определения моментов инерции на данной установке

Погрешность состоит из инструментальной погрешности (погрешность измерения размеров эталона, погрешность совмещения главной центральной оси инерции эталона (центра

масс эталона) с осью подвеса платформы, погрешность совмещения оси детали с осью платформы) и случайной погрешности измерений. Суммарная погрешность измерения на данной установке не превышает 0,2 %.

Результаты измерения моментов инерции некоторых изделий приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты измерений

Название детали	Внешний вид детали	Момент инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \times 10^{-4}$
Эталон		0,391
Цилиндр		1,940
Рамка		4,180
Ротор гироскопа ГМА-4000		1,940

### Заключение

Разработана, изготовлена и испытана автоматизированная установка для определения моментов инерции деталей и узлов приборов массой до 5 кг и размерами, вписывающимися в цилиндр диаметром 180 мм и высотой 270 мм. Погрешность измерения не превышает 0,2 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гернет М.М., Ратобильский В.Ф. Определение моментов инерции. – М.: Машиностроение, 1969. – 249 с.
2. А.С. 1657992 А2 СССР, МКИ 5 G 01M 1/10. Устройство для определения моментов инерции изделия / Гормаков А.Н. – №4720761/28; заявл. 19.07.89, опубл. 23.06.1991; Бюл. № 23.
3. Sản Phẩm HOCDELAM / Card Hocdelam USB 9090. – URL: <http://sanpham.hocdelam.org/sample-page/thiet-bi-le/card-hocdelam-usb-9090> (дата обращения: 07.05.2014 г.).

Поступила 26.05.2014 г.