

МИГУЩЕНКО Р.П., КРОПАЧЕК О.Ю., БАЛЄВ В.М., МИГУЩЕНКО К.Р., ФІНОГЕНОВ О.М.**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕХАНІЧНОГО РОБОТА НА ПРИКЛАДІ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА**

В статті досліджені властивості механічного робота та надані рекомендації щодо змін в його конструкції. Актуальність використання роботів у світі не викликає сумніву, подібні роботи використовуються в місцях, які несуть небезпеку людині, або недоступні для людини. У кожному разі, точність позиціонування, точність дій робота безпосередньо впливають на ефективність виконання поставлених перед роботом завдань. Відпрацювання рухів робота традиційно відбувається на змаганнях з робототехніки, які широко проводяться у всьому світі. В останніх змаганнях з робототехніки однією з вправ на змаганнях була вправа, коли робот повинен повиснути на перекладині за допомогою своїх механічних важелів. Досліджуваний робот здійснює коливання у повітрі при висі на перекладині на механічних важелях. У дослідженнях ставилось завдання подолати ці негативні явища – механічні коливання, за рахунок вивчення проблеми та проведення фізичних досліджень. Для проведення фізичних досліджень та вивчення питання було прийняте рішення замінити реальний об'єкт – робот, відповідною конструкцією заміщення. Для такої конструкції заміщення прийнято фізичний маятник (класичний та оборотний). У фізичних

маятників основним параметром є момент інерції I , який визначається з формули: $I = \frac{mgd}{4\pi} T^2$, де m – маса маятника, g – прискорення

вільного падіння, d – відстань від вісі підвісу до центра маси маятника, T – період коливань маятника. Прийнята гіпотеза – збільшення моменту інерції I реального об'єкту призведе до необхідності збільшення сили, що змушує, розгойдати цей об'єкт. При лабораторних дослідженнях були сформовані дослідні установки; аналізувались вимірювані змінні – I , незалежні змінні – g , T , залежні змінні – m , d ; здійснювались експерименти на предмет оцінки вивчення впливу на момент інерції I відстані від осі підвісу до центру маси маятника d та впливу на момент інерції I маси маятника m . Отримані результати фізичних досліджень дозволяють надати рекомендації щодо зміни конструкції реального об'єкта – робота. Рекомендації дозволяють усунути негативне явище – розгойдування робота на перекладині, що дозволить якісніше виконати відповідне завдання. До таких рекомендацій належить: 1. Максимально обтяжити конструкцію збільшенням маси m . 2. Максимально подовжити важелі робота збільшенням відстані d . 3. Максимально опустити вниз центр ваги робота. Після здійснення конструктивних змін в будові робота, планується побудова його математичної моделі для подальших досліджень.

Ключові слова: механічний робот, фізичний маятник, момент інерції, похибка вимірювання, девіація

MYGUSHCHENKO R.P., KROPACHEK O.Yu., BALEV V.M., MYGUSHCHENKO K.R., FINOHENOV O.M.**RESEARCH OF THE PROPERTIES OF A MECHANICAL ROBOT USING THE EXAMPLE OF A PHYSICAL PENDULUM**

The article examines the properties of a mechanical robot and provides recommendations for changes in its design. The relevance of the use of robots in the world is beyond doubt, such robots are used in places that pose a danger to humans or are inaccessible to humans. In each case, the accuracy of positioning and the accuracy of the robot's actions directly affect the efficiency of the tasks assigned to the robot. Practicing robot movements traditionally takes place at robotics competitions, which are widely held around the world. In recent robotics competitions, one of the exercises in the competition was an exercise where the robot had to hang from a beam using its mechanical levers. The researched robot oscillates in the air while hanging on a crossbar on mechanical levers. In the studies, the task was to overcome these negative phenomena - mechanical oscillations, by studying the problem and conducting physical research. In order to conduct physical research and study the issue, a decision was made to replace the real object – the robot – with an appropriate replacement structure. For such a replacement design, a physical pendulum (classical and

reversible) is adopted. In physical pendulums, the main parameter is the moment of inertia I , which is determined from the formula: $I = \frac{mgd}{4\pi} T^2$,

where m is the mass of the pendulum, g is the acceleration of free fall, d is the distance from the axis of the suspension to the center of mass of the pendulum, T is the oscillation period of the pendulum. The accepted hypothesis is that an increase in the moment of inertia of a real object will lead to the need to increase the force that forces this object to swing. Experimental installations were formed during laboratory research; measured variables – I , independent variables – g , T , dependent variables – m , d were analyzed; experiments were carried out to assess the impact on the moment of inertia I of the distance from the suspension axis to the center of mass of the pendulum d and the influence on the moment of inertia I of the mass of the pendulum m . The obtained results of physical research allow us to provide recommendations on changing the design of a real object - a robot. The recommendations make it possible to eliminate the negative phenomenon – rocking the robot on the crossbar, which will allow to perform the corresponding task better. These recommendations include the following: 1. Load the structure as much as possible by increasing the mass m . 2. Extend the robot levers as much as possible by increasing the distance d . 3. Lower the center of gravity of the robot as much as possible. After making constructive changes in the structure of the robot, it is planned to build its mathematical model for further research.

Key words: mechanical robot, physical pendulum, moment of inertia, measurement error, deviation

Вступ. Актуальність використання механічних роботів у сучасному світі не викликає сумнівів. Подібні роботи використовуються в місцях, які або несуть загрозу людині, або недоступні для людини. Особливої ваги набрали механічні роботи у військовій справі. У будь-якому разі, точність позиціонування, точність дій механічного робота безпосередньо впливає на ефективність виконання поставлених перед роботом задач [1].

В якості об'єкта дослідження прийнятий робот, виконаний учасниками наукового гуртка робототехніки школи Лінкольн Парк (Чикаго, США). Безпосередньо робот школи Лінкольн Парк представлений на рис. 1.

В комплектацію приводу робота входить:

- чотири двигуни приводу коліс (по одному двигуну на кожне колесо);
- два двигуни на важелі робота;
- один двигун для запуску дрона (літального апарату);
- система редукторів;
- електронний блок керування.

Відпрацювання рухів механічного робота, традиційно, відбувається на змаганнях з робототехніки, які широко проводяться в США та інших країнах світу. В останніх змаганнях з робототехніки, в яких приймала участь команда школи Лінкольн Парк, приймало участь десяток команд. Однією з вправ на змаганнях була

вправа, коли робот повинен повиснути на перекладині за допомогою своїх механічних важелів. Цей процес показаний на рис. 2.

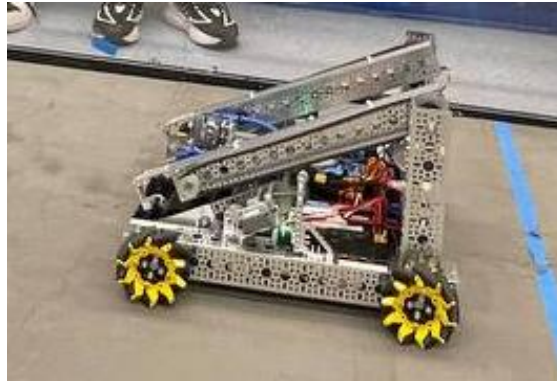


Рис. 1 – Робот школи Лінкольн Парк

У відмінності від роботів інших учасників змагань, робот школи Лінкольн Парк здійснює коливання у повітрі відносно перекладини при висі на механічних важелях. Це незадовільно відображається на точності рухів робота та йде втрата часу на виконання завдання.

В даній статті, поставлена задача побороти ці негативні явища – механічні коливання, за рахунок вивчення проблеми і проведення фізичних досліджень [2].

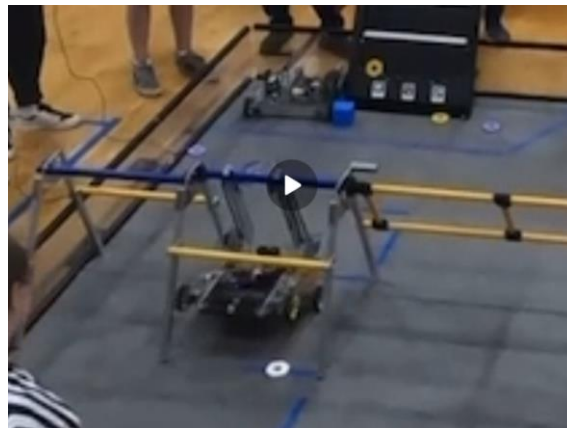


Рис. 2 – Вис робота на перекладині

Для проведення фізичних досліджень та вивчення питання доцільно замінити реальний об'єкт – робот, відповідною конструкцією заміщення [3]. В якості такої конструкції заміщення прийнятий маятник.

Із всього набору відомих маятників, для реалізації експериментів, доцільно розглянути [4]:

- математичний маятник;
- фізичний маятник.

Математичний маятник, в найпростішому випадку, являє собою металічну кулю, яка підвішена на невагомій і нерозтяжній нитці. Математичний маятник являє собою, практично, ідеальний пристрій, пристрій з ідеальними характеристиками, і не може бути використаним в якості конструкції заміщення реального об'єкту.

Фізичний маятник – це пристрій, який складається з твердого матеріалу, що підвішений на вісі підвісу, у якого центр коливання не співпадає з центром маси [5]. Пропонується, при дослідженні, використовувати фізичні маятники, які представлені на рис. 3 і рис. 4.

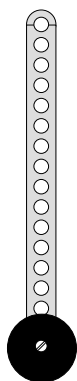


Рис. 3 – Конструкція класичного фізичного маятника

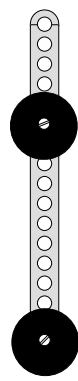


Рис. 4 – Конструкція фізичного маятника зі зміщенням центра маси

Фізичні маятники на рис. 3 і рис. 4 виконані однотипно та складаються з перфорованої планки довжиною 50 см і прилаштованого, за допомогою гвинтів, масивного вантажу.

У даних фізичних маятників, одним з параметрів, є параметр – момент інерції I , який визначається з формули [6]:

$$I = \frac{mgd}{4\pi} T^2, \quad (1)$$

де I – момент інерції;

m – маса маятника;

g – прискорення вільного падіння;

d – відстань від вісі підвісу до центру маси маятника;

T – період коливання маятника.

Момент інерції I – це скалярна величина, фізичним навантаженням якої є протидія силі, яка змушує змінити швидкість руху об'єкту, зупинити рух об'єкту, вивести об'єкт зі стану спокою [7].

Фізичний маятник на рис. 3, дозволяє визначити вплив параметрів m та d на момент інерції I , відповідно до (1). Що стосується фізичного маятника на рис. 4, то він дозволяє оцінити вплив розташування центра маси маятника на момент інерції I [8].

Абсолютно точне твердження, що збільшення моменту інерції реального об'єкту призведе до необхідності збільшення величини зовнішньої сили, щоб розгойдати цей об'єкт. Якщо зовнішня сила є постійною, то об'єкт з підвищеним моментом інерції така сила не виведе зі стану спокою. А це є рішенням проблеми для робота школи Лінкольн Парк.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою досліджень в статті є підтвердження гіпотези:

Підвищення порогу чутливості фізичного маятника до зовнішньої сили виникає при збільшенні параметрів m – маси маятника, d – відстані від вісі підвісу до центру маси маятника і зміні місця розташування центру маси маятника.

Для досягнення мети необхідно:

- провести натурні експерименти з фізичним маятником;
- розробити і дослідити фізичну модель фізичного маятника;
- надати рекомендації для оптимізації конструкції механічного робота;
- поставити задачі для подальших досліджень.

При дослідженнях розглядаються змінні:

Вимірні змінні:

I – момент інерції.

Незалежні змінні:

g – прискорення вільного падіння;

T – період коливань маятника;

Залежні змінні:

m – маса маятника;

d – відстань від вісі підвісу до центру маси маятника.

Обладнання і матеріали. Для проведення серій експериментів використовується:

- штатив;
- класичний фізичний маятник;
- фізичний маятник зі зміщенням центра маси;
- набір вантажів;
- ваги;
- лінійка;
- секундомір.

Проведення досліджень. Установка для проведення експериментів представлена на рис. 5.

Установка на рис. 5, а дозволяє визначити характер впливу змінних m і d на значення моменту інерції I . Установка на рис. 5, а виконана з умовою, що відстань від вісі підвісу до центру маси маятника d практично співпадає з відстанню від вісі підвісу до центру коливання маятника d' :

$$d \approx d'$$

Установка на рис. 5, б дозволяє визначити характер впливу радикальної зміни місця розташування центру маси маятника на значення моменту інерції I . Установка на рис. 5, б виконана з умовою, що відстань від вісі підвісу до центру маси маятника d радикально не співпадає з відстанню від вісі підвісу до центру коливання маятника d' .

У ході фізичних досліджень пропонується виконати три експерименти:

- експеримент 1 – вивчення впливу на момент інерції I відстані від вісі підвісу до центру маси маятника d , у випадку класичного фізичного маятника;
- експеримент 2 – вивчення впливу на момент інерції I маси маятника m , у випадку класичного фізичного маятника;
- експеримент 3 – вивчення впливу на момент інерції I відстані від вісі підвісу до центру маси маятника d , у випадку фізичного маятника зі зміщеним центром маси.

Кожний експеримент проводиться методом багатократних спостережень.

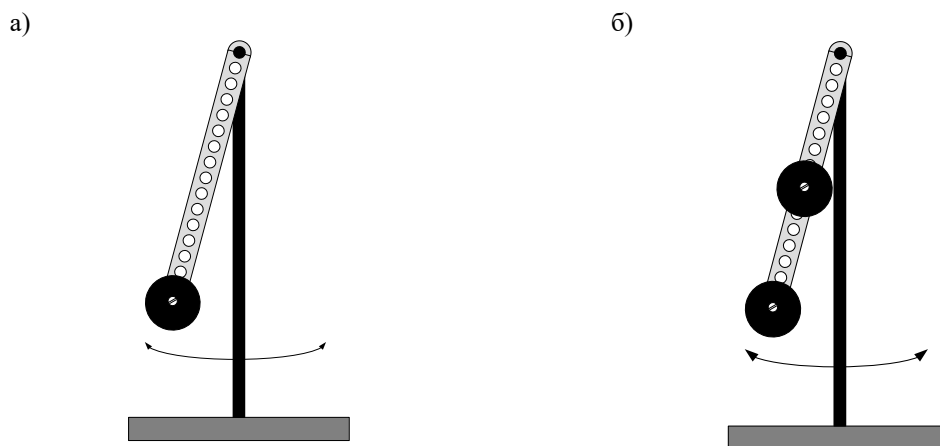


Рис. 5 – Зовнішній вигляд установки:

- а) використання класичного маятника;
- б) використання маятника зі зміщенням центру маси

Фактичне виконання установки представлено на рис. 6.

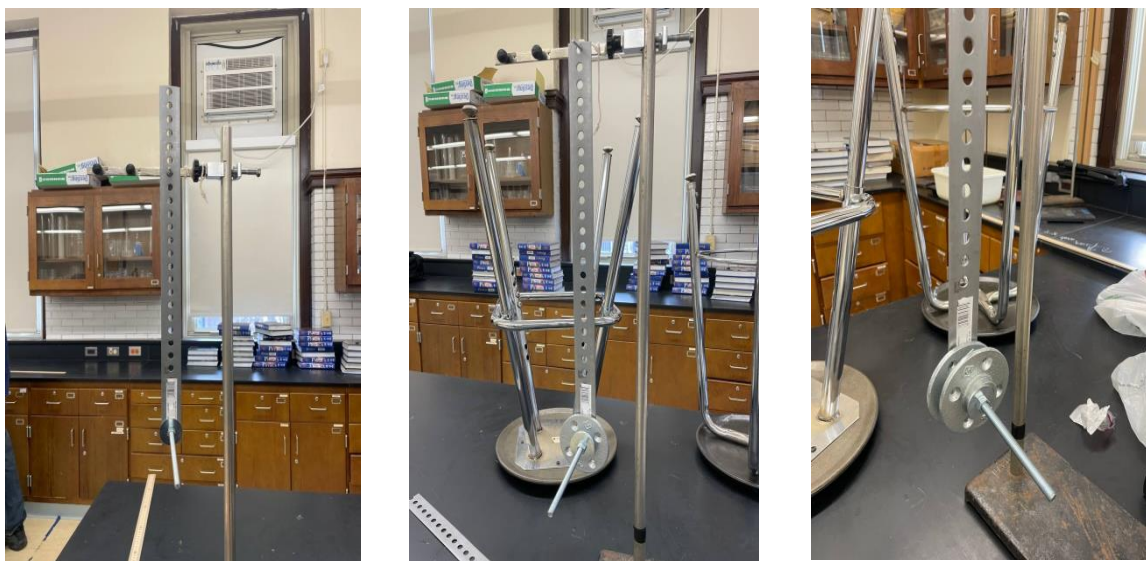


Рис. 6 – Установка

У результаті проведених експериментів отримані результати, які зведені в табл. 1. Показання моменту інерції I для всіх трьох експериментів розраховані на основі (1) і внесені в табл. 2 – 4. На рис. 7 – 9 представлені відповідні графічні представлення.

Таблиця 1 – Осереднені дані експериментів

d , м	t , с	m , кг	t , с	d' , м	t , с
0.523	41.47	0.225	40.46	0.44	40.01
0.415	37.60	0.447	41.64	0.37	37.38
0.326	33.65	0.667	42.03	0.30	34.79
0.224	30.62	0.882	42.21	0.23	32.52
0.123	27.95	1.103	42.41	0.16	31.32

Таблиця 2 – Момент інерції (експеримент 1; $m=0.494$ кг)

d , м	T , с	I , кг·м ²
0.523	1.382	0.122
0.415	1.253	0.080
0.326	1.122	0.050
0.224	1.021	0.029
0.123	0.932	0.013

Таблиця 3 – Момент інерції (експеримент 2; $d=0.523$ м)

m , кг	T , с	I , кг·м ²
0.225	1.349	0.056
0.447	1.388	0.091
0.667	1.401	0.109
0.882	1.407	0.119
1.103	1.414	0.124

Таблиця 4 – Момент інерції (експеримент 3; $m=0.776$ кг)

d' , м	T , с	I , кг·м ²
0.44	1.33	0.471
0.37	1.25	0.350
0.30	1.16	0.244
0.23	1.08	0.162
0.16	1.04	0.105

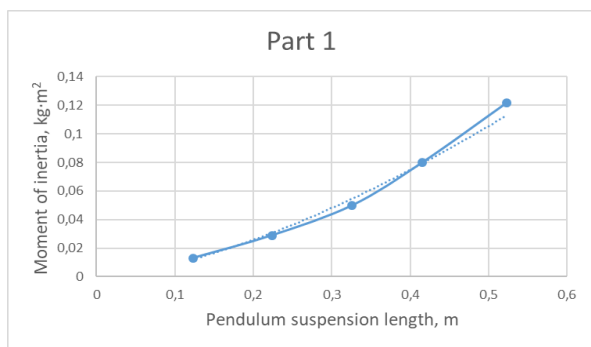


Рис. 7 – Залежність $I=f(d)$ (експеримент 1; $m=0.494$ кг)

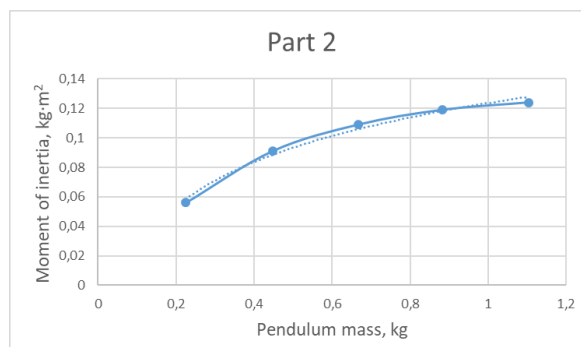


Рис. 8 – Залежність $I=f(m)$ (експеримент 2; $d=0.523$ м)

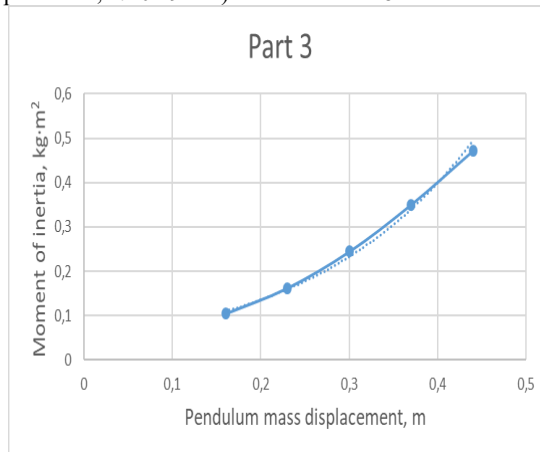


Рис. 9 – Залежність $I=f(d)$ (експеримент 3; $m=0.776$ кг)

Відповідно до представлених рисунків (рис. 7 – 9) видно, що характер зміни моменту інерції має вигляд близький до логарифмічної, степенної чи експоненційної функцій, але зі зневажливо малими похибками може бути апроксимований лінійною залежністю [9].

Запис результатів проведених експериментів здійснюється за формою [10]:

$$x = x_0 \pm \Delta x, \tag{2}$$

де x – результат вимірювання;
 x_0 – середнє значення;
 Δx – абсолютна похибка.

Тобто, для того, щоб сформува ти результат у вигляді (2), необхідно визначити значення x_0 і похибки Δx .

В даних фізичних дослідженнях проводились вимірювання параметрів m , d , T . Середні значення параметрів m , d , T отримані для всіх трьох експериментів і представлені в табл.1. По цим даним, використовуючи (1), визначені значення I (табл. 2 – 4).

Для параметрів m , d абсолютна похибка визначається похибкою інструменту при вимірюванні. Інструментальні похибки параметрів m , d :

$$\Delta m = 0.5 \text{ грам} = 0.0005 \text{ кг};$$

$$\Delta d = 0.5 \text{ мм} = 0.0005 \text{ м}.$$

Абсолютну похибку ΔT можна отримати на основі методу визначення випадкових похибок [10]. Для цього необхідно виконати ряд дій:

1. Розрахувати середнє значення T_0 :

$$T_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i,$$

де n – кількість спостережень.

2. Визначити абсолютні похибки ΔT для кожного вимірювального спостереження:

$$\Delta T = |T_0 - T_i|.$$

3. Визначити середньоквадратичну похибку серії вимірювань S_T :

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i)^2}$$

4. Визначити абсолютну похибку ΔT серії вимірювань:

$$\Delta T = t_\alpha \cdot S_T,$$

де t_α – коефіцієнт Стюдента, який для п'яти вимірювальних спостережень та довірчої ймовірності 0.95 дорівнює 2.8 [11].

Використовуючи представлений алгоритм дій отримані значення ΔT для трьох експериментів. Дані зведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Дані абсолютних похибок ΔT для кожного вимірювання

№	Експеримент 1		Експеримент 2		Експеримент 3	
	T , с	ΔT , с	T , с	ΔT , с	T , с	ΔT , с
1	1.382	0.002	1.349	0.022	1.33	0,003
2	1.253	0.003	1.388	0.006	1.25	0,014
3	1.122	0.016	1.401	0.007	1.16	0,010
4	1.021	0.013	1.407	0.006	1.08	0,015
5	0.932	0.007	1.414	0.005	1.04	0,009

На основі табл. 5, отримуємо значення ΔI :

$$\Delta I = I \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2}. \tag{3}$$

Вираз (3) справедливий для знаходження абсолютної похибки при непрямих вимірюваннях. В представленому виразі (3) не враховуються вагові коефіцієнти. Результати вимірювань I , у вигляді $I \pm \Delta I$ (2), зведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Результати непрямих вимірювань I

№	Експеримент 1		Експеримент 2		Експеримент 3	
	I , кг·м ²	$\pm \Delta I$, кг·м ²	I , кг·м ²	$\pm \Delta I$, кг·м ²	I , кг·м ²	$\pm \Delta I$, кг·м ²
1	0.122	± 0.00024	0.056	± 0.00092	0.471	± 0.011
2	0.080	± 0.00023	0.091	± 0.00042	0.350	± 0.010
3	0.050	± 0.00072	0.109	± 0.00056	0.244	± 0.008
4	0.029	± 0.00038	0.119	± 0.00052	0.162	± 0.007
5	0.013	± 0.00011	0.124	± 0.00046	0.105	± 0.007

Згідно табл. 6 видно, що похибка визначення моменту інерції I не перевищує $\pm 0.001 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Для оцінки процентного вмісту похибки визначення I , необхідно розрахувати відносні похибки. Розрахунок здійснюється за формулою [12]:

$$\delta_I = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Використовуючи формулу (4) і дані табл. 6, визначаємо процентний вміст похибок. Дані зведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Процентний вміст похибок

№	Експеримент 1		Експеримент 2		Експеримент 3	
	$I, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$\pm\delta_I, \%$	$I, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$\pm\delta_I, \%$	$I, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$\delta_I, \%$
1	0.122	± 0.20	0.056	± 1.64	0.471	± 2.335
2	0.080	± 0.29	0.091	± 0.46	0.350	± 2.857
3	0.050	± 1.44	0.109	± 0.51	0.244	± 3.279
4	0.029	± 1.31	0.119	± 0.44	0.162	± 4.321
5	0.013	± 0.85	0.124	± 0.37	0.105	± 6.667

Згідно отриманих даних видно, що відносна похибка δ_I змінюється в діапазоні від 0.20 % до 1.64 %. Це свідчить про високу точність вимірювального інструменту при визначенні m і d , акуратності проведення експериментів і зниження похибок за рахунок використання методів теорії ймовірності та математичної статистики при обробці похибок випадкових величин – періоду коливань T .

Для розрахунку величини девіації [13] коливань реального фізичного маятника δ (рис. 6), доцільно порівняти параметри коливань досліджуваного фізичного маятника з коливаннями математичного маятника, який є маятником з, практично, ідеальними параметрами.

Період коливань математичного маятника розраховується за формулою [5]:

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{d}{g}}$$

і залежить лише від довжини підвісу d .

На основі цієї формули легко визначити значення T_m , в залежності від довжини підвісу d . Дані представлені в табл. 8.

Таблиця 8 – Показники T_m математичного маятника

$d, \text{м}$	$T_m, \text{с}$
0.523	1.451
0.415	1.292
0.326	1.145
0.224	0.949
0.123	0.704

При підстановці отриманих даних T_m в формулу (1), визначимо момент інерції I_m для експериментів 1 і 2. Дані зведені до табл. 9.

Таблиця 9 – Показники I_m математичного маятника

Експеримент 1		Експеримент 2	
$d, \text{м}$	$I_m, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$m, \text{кг}$	$I_m, \text{кг}\cdot\text{м}^2$
0.523	0.135	0.225	0.062
0.415	0.085	0.447	0.122
0.326	0.053	0.667	0.182
0.224	0.025	0.882	0.241
0.123	0.007	1.103	0.302

Величину девіації моменту інерції досліджуваного фізичного маятника відносно параметрів коливань ідеального математичного маятника визначається за формулою:

$$\delta = \frac{I - I_m}{I_m} \cdot 100\%.$$

Величина девіації δ зведена в табл. 10.

Таблиця 10 – Величина девіації δ

Експеримент 1	Експеримент 2
$\delta, \%$	$\delta, \%$
-9.71	-9.01
-5.97	-6.20
-4.76	-4.15
17.00	15.17
73.94	74.76

З даних табл. 10 очевидно, що величина девіації δ суттєво перевищує відносну похибку δ_r , що свідчить про те, що порівнювати параметри фізичного і математичного маятників не коректно, особливо при малих значеннях параметру d і великих значеннях параметру m . Фізичний маятник, володіючи реальною масою, зміщеним центром маси вздовж вісі підвісу, зміщеним центром маси відносно вісі підвісу, підвищеним впливом дестабілізуючих факторів на коливання маятника (розкручування маятника, підвищене затухання коливаний, парусність і т.д.) містить шукані параметри, які досить сильно відрізняються від ідеальних.

Висновок. Проведені дослідження дозволяють оцінити вплив параметрів зміни маси маятника m , довжини підвісу маятника d і розташування центру маси на момент інерції I фізичного маятника. Момент інерції I безпосередньо впливає на спроможність зміни швидкості руху об'єкту, зупинки руху об'єкту, виведення об'єкту зі стану спокою.

Отримані результати фізичних натурних досліджень дозволяють надати рекомендації щодо зміни конструкції реального об'єкту – робота школи Лінкольн Парк. Рекомендації дозволяють прибрати негативне явище – розгойдування робота на перекладині, що дозволить більш якісно виконувати відповідне завдання на практиці.

До таких рекомендацій відноситься наступне [2]:

1. Максимально обтяжити конструкцію для збільшення маси m .
2. Максимально подовжити механічні важелі робота для збільшення відстані d .
3. Максимально опустити вниз центр ваги робота.

Надані рекомендації для покращення параметрів реального об'єкту – робота, з одного боку, можуть бути не виконувани через конструктивні обмеження розмірів робота, а також через можливі протиріччя з виконанням інших завдань робота, коли рекомендації входять в протиріччя по максимальному збільшенню параметрів m і d . З іншого боку, при даних дослідженнях, було внесене обмеження, коли вісь підвісу, центр маси і центр коливаний знаходяться на одній лінії. Це, безумовно, в реальності не так.

В реальному об'єкті центр маси, якщо розглядати в загальному випадку, не знаходиться на одній прямій з віссю підвісу і центром коливаний. Тому необхідно додатково вивчити питання впливу кількісного зміщення точки центру маси відносно прямої:

вісь підвісу - центр коливаний маятника.

Для цього доцільно розглянути формулу Штейнера [5]:

$$I = I_0 + md^2,$$

де I_0 – момент інерції відносно вісі, яка проходить через центр маси об'єкту.

Додаткові дослідження в цій частині, скоріше всього, покажуть, що центр маси об'єкта необхідно максимально наблизити до лінії:

вісь підвісу - центр коливаний маятника.

Подальші дослідження повинні бути направлені на визначення кількісного значення моменту сили M , яка виводить зі стану спокою фізичний маятник.

В даних дослідженнях, за замовченням, приймався вираз:

$$M = kI,$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що дорівнює кутовому прискоренню ε .

В широких межах ε не є величиною постійною, але в даних дослідженнях ε був прийнятий як константа. Тому момент інерції I був прийнятий прямопропорційним моменту сили M , і задача розглядалась як крайова – чим більше, тим краще (чим менше, тим гірше).

Однак, за визначенням, момент сили розраховується за формулою [14]:

$$M = Fl, \tag{5}$$

де F – сила, яка прикладена до центру коливаний, направлена по дотичній відносно вісі підвісу;
 l – плече, яке відображає відстань від вісі підвісу до центру коливаний d' .

Спиралючись на формулу (5), стає очевидним, що для зменшення моменту сили M , яка спроможна вивести маятник зі стану спокою, необхідно зменшувати l , а значить зменшувати d .

Однозначно формується екстремум, вивчення якого надасть можливість визначити оптимальне співвідношення між l та d для вирішення оптимізаційної задачі. Вирішення вказаної оптимізаційної задачі буде сприяти наближенню аналітичних досліджень, прийнятих для конструкції заміщення, до реального об'єкту.

Список літератури:

1. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: підруч. для студентів вищ. техн. навч. закл., які навчаються за спец. 015 «Проф. освіта. Машинобудування»: присвяч. 100-річчю Ветрова Ю. О., ректора Київ. інж.-буд. ін-ту, зав. каф. буд. машин / Л.Є. Пелевін, К.І. Почка, О.М. Гаркавенко та ін.; М-во освіти і науки України, Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ: ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2016. – 258 с.
2. Мигущенко Р.П. Дослідження параметрів коливального об'єкту / Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, К.Д. Коцкало, О.М. Фіногенов // Матеріали Міжнародної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків, 2024.
3. Мигущенко Р.П. Анализ вопросов построения математических моделей дизельных агрегатов и компенсирования перекрестных связей / Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, Д.О. Коваленко // Вісник НТУ «ХП». – 2004. – № 47. С. 87 – 91.
4. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: у 3-х т. / Т.І. Механіка, молекулярна фізика і термодинаміка. – І. М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик. – Київ : Техніка, 2006, 536 с.
5. Фізика. Лабораторний практикум: навч. посіб.: / Т.М. Шелест, ОМ. Андреев, Т.І. Храмова та ін. – Дніпро: Середняк Т.К., 2023. – 304 с.
6. Загальна фізика. Лабораторний практикум: навч. посіб.: у 3 ч. Ч. 1: Класична механіка. Термодинаміка і статистична фізика. Електрика та магнетизм / А.О. Мамалуй, О.П. Сук, М.В. Лебедева, Т.І. Храмова, та ін.; за заг. ред. А.О. Мамалуй. – Харків: Підручник НТУ «ХП», 2012. – 352 с.
7. Загальна фізика. Лабораторний практикум: навч. посіб.: у 3 ч. Ч. 2: Коливання та хвилі. Оптика / А.О. Мамалуй, В.В. Пилипенко, К.Т. Лемешевська, та ін.; за заг. ред. А.О. Мамалуй. – Харків: Підручник НТУ «ХП», 2012. с. – 216 с.
8. Гапченко С.Д. Механіка. Навчально-методичний посібник для самостійної роботи з дисципліни «Фізика» / Гапченко С.Д. – Харків : ТОВ «В СПРАВИ», 2021. – 116 с.
9. Мигущенко Р.П. Елементи контролю та діагностики стану вібраційних об'єктів: монографія / Р.П. Мигущенко. – Х.: Вид-во «Підручник НТУ «ХП», 2014. – 224 с.
10. Чинков В. М. Основи метрології та вимірювальної техніки: навч. посібн., 2-е вид., перероб. і доп. / В. М. Чинков. – Х.: НТУ «ХП», 2005. – 524 с.
11. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для ВУЗов / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
12. Мигущенко Р. П. Исследование точностных характеристик измерительного преобразователя диагностической установки дизельных агрегатов / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2003. – № 5. – С. 84 – 85.
13. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В.С. Білецького. – Д.: Донбас, 2004. – Т. 1: – 640 с.
14. Цасюк В.В. Теоретична механіка: Навчальний посібник. – К.: ЦУЛ, 2004. – 402 с.

Bibliography (transliterated):

1. Syntez robototekhnichnykh system v mashynobuduvanni: pidruch. dlia studentiv vyshch. tekhn. navch. zakl., yaki navchaiutsia za spets. 015 «Prof. osvita. Mashynobuduvannia»: prysviach. 100-richchiu Vietrova Yu. O., rektora Kyiv. inzh.-bud. in-tu, zav. kaf. bud. mashyn / L.Ie. Pelevin, K.I. Pochka, O.M. Harkavenko ta in.; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Kyiv. nats. un-t bud-va i arkhitektury. – Kyiv: TOV NVP «Interservis», 2016. – 258 s.
2. Myhushchenko R.P. Doslidzhennia parametriv kolyvalnoho obiekту / R.P. Myhushchenko, O.Iu. Kropachek, K.D. Kotskalo, O.M. Finohenov // Materialy Mizhnarodnoi konferentsii «Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia». – Kharkiv, 2024.
3. Myhushchenko R.P. Analiz voprosov postroeniya matematycheskykh modelei dyzelnykh ahrehatov y kompensyrovaniya perekrestnykh svyazei / R.P. Myhushchenko, O.Iu. Kropachek, D.O. Kovalenko // Visnyk NTU «KhPI». – 2004. – № 47. S. 87 – 91.
4. Kucheruk I.M. Zahalnyi kurs fizyky: u 3-kh t. / T.I. Mekhanika, molekuliarna fizyka i termodynamika. – I.M. Kucheruk, I.T. Horbachuk, P.P. Lutsyk. – Kyiv: Tekhnika, 2006, 536 c.
5. Fizyka. Laboratornyi praktykum: navch. posib.: / T.M. Shelest, O.M. Andreiev, T.I. Khramova ta in. – Dnipro: Seredniak T.K., 2023. – 304 s.
6. Zahalna fizyka. Laboratornyi praktykum: navch. posib.: u 3 ch. Ch. 1: Klyasychna mekhanika. Termodynamika i statystychna fizyka. Elektryka ta mahnyetizm / A.O. Mamalui, O.P. Suk, M.V. Lebedieva, T.I. Khramova, ta in.; za zah. red. A.O. Mamalui. – Kharkiv: Pidruchnyk NTU «KhPI», 2012. – 352 s.
7. Zahalna fizyka. Laboratornyi praktykum: navch. posib.: u 3 ch. Ch. 2: Kolyvannia ta khvyli. Optyka / A.O. Mamalui, V.V. Pylypenko, K.T. Lemeshevska, ta in.; za zah. red. A.O. Mamalui. – Kharkiv: Pidruchnyk NTU «KhPI», 2012. s. – 216 s.
8. Napochenko S.D. Mekhanika. Navchalno-metodychnyi posibnyk dlia samostiinoi roboty z dystsypliny «Fizyka» / Napochenko S.D. □ Kharkiv: TOV «V SPRAVI», 2021. – 116 s.
9. Myhushchenko R.P. Elementy kontroliu ta diahnostryky stanu vibratsiinykh obiektyv: monohrafiia / R.P. Myhushchenko. – Kh.: Vyd-vo «Pidruchnyk NTU «KhPI», 2014. – 224 s.
10. Chynkov V.M. Osnovy metrolohii ta vymiriuvalnoi tekhniky: navch. posibn., 2-e vyd., pererob. i dop. / V.M. Chynkov. – Kh.: NTU «KhPI», 2005. – 524 s.

11. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics: Textbook. manual for universities / V.E. Gmurman. – M.: Higher School, 2003. – 479 s.
12. Myhushchenko R.P. Yssledovanye tochnostnykh kharakterystyk yzmyrytelnoho preobrazovatelia dyahnostycheskoi ustanovky dyzelnykh ahrehatov / R.P. Myhushchenko, O.Yu. Kropachek // Skhidno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii. – Kharkiv. – 2003. – № 5. – S. 84 – 85.
13. Mala hirnycha entsyklopediia: u 3 t. / za red. V.S. Biletskoho. – D.: Donbas, 2004. – Т. 1: – 640 s.
14. Tsasiuk V.V. Teoretychna mekhanika: Navchalnyi posibnyk. – K.: TsUL, 2004. – 402 s.

Поступила (received) 05.08.2024

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мигущенко Руслан Павлович (Mygushchenko Ruslan) – доктор технічних наук, професор, проректор НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-099-40-22-885; e-mail: mrp1@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3287-9772.

Кропачек Ольга Юрївна (Kropachek Olga) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-067-79-5678-0; e-mail: kropachek@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5899-0252.

Балєв Володимир Миколайович (Balev Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-050-402-69-97; e-mail: bvnbvn@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6803-4739.

Мигущенко Катерина Русланівна (Mygushchenko Kateryna) – учениця Lincoln Park High School, м. Чикаго; тел.: +38-099-484-32-88; e-mail: katyamig06@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5928-6975.

Фіногенов Олексій Михайлович (Finohenov Oleksii) – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-066-821-60-21; e-mail: alexey.finohenov@gmail.com, ORCID: 0009-0008-6707-8511.