3-ASIS FIZIKOS TURNYRAS
Užduotis Nr. FT3-3 / 2009 08 17 – 2009 09 14

***Sąlyga / FT3-3* ▼**

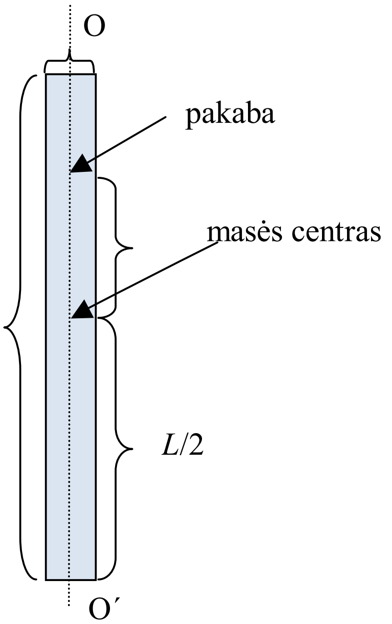
Svyruojančios lentelės eksperimentinis tyrimas

Tikslas: eksperimentinis svyruoklės svyravimų tyrimas ir gautų rezultatų palyginimas su skaičiavimais pagal teorinį modelį.

Reikmenys: plona medinė liniuotė (ilgis L apie 50–80 cm, plotis a apie 3 cm, storis h mažas, apie 2 mm, t. y. $\ll a, L$); smeigtukai; ploni siūlai; sekundometras (pageidautina kuo tikslesnis); sunki medinė lenta ar stalas, kurio kraštą subadyti smeigtuku negaila; kiti pagalbiniai reikmenys.

Klausimai:
1. Gerai apgalvokite ir sukurkite Jūsų manymu geriausią įrangą eksperimentams atlikti. Nubraižykite, tiksliai surašykite visus naudotus reikmenis, aprašykite ir detaliai paaiškinkite įrangos konstrukcijos pagrįstumą, bandymų eigą ir jų technologiją, užtikrinančią geriausius rezultatus ir mažiausias paklaidas.

2. Ištirkite fizikinės svyruoklės, kurią sudaro pakabinta ant smeigtuko liniuotė, mažų (kuo mažesnės amplitudės) svyravimų periodą kaip atstumo x tarp pakabos ir liniuotės masės centro funkciją (1 pav., a).



b)

1 pav. Fizikinės svyruoklės schema (a) ir viena iš galimų eksperimento įrangų namų sąlygomis (b).

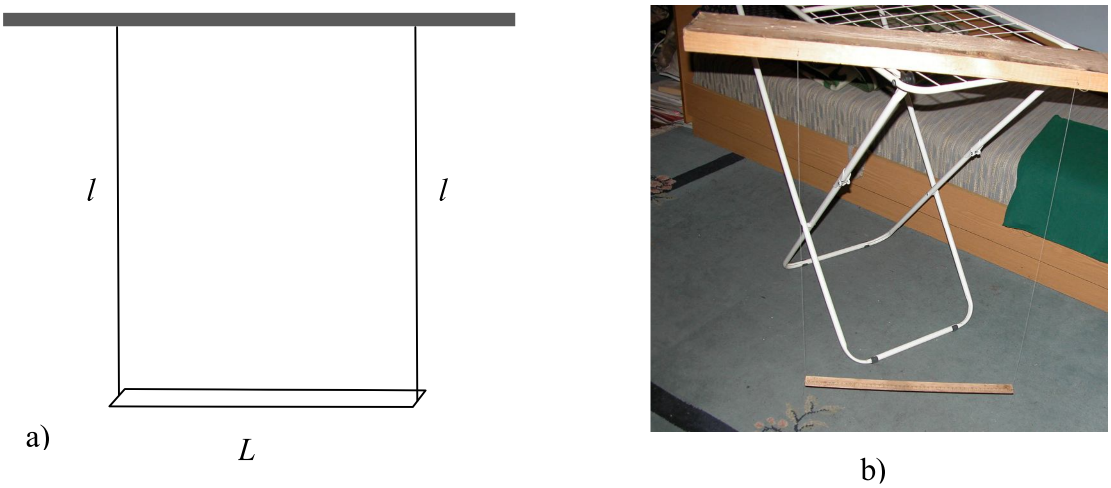
2.1. Išilgai liniuotės simetrijos ašies OO´ (1 pav., a) kas 1 cm reikia padaryti skylučių (jų skersmuo turi būti nežymiai didesnis už smeigtuko strypelio skersmenį). Pastaba: skylutes galima gręžti, arba pradurti plona yla, bet reikėtų tai daryti ylą intensyviai sukiojant ir pamažu spaudžiant, kad medinė liniuotė neskiltų, arba, laikantis saugumo ir atsargumo pradeginti įkaitintu plonu metaliniu strypeliu (vinute).

Nustačius kiekvienos skylutės atstumą x iki liniuotės masės centro ir pakabinus ją ant smeigtuko, perverto iš eilės per kiekvieną skylutę ir įsmeigto į masyvią lentą (1 pav., b), reikia išmatuoti mažų svyravimų periodo priklausomybę $T(x)$ ($0 < x < L/2$). Nubrėžti grafiką ir nustatyti ekstremumo tašką. Koks tai ekstremumas?

2.2. Pasinaudojant plono strypelio modeliu, reikia rasti teorinę mažų svyravimų periodo išraišką $T(x)$. Tame pačiame brėžinyje su eksperimentine $T(x)$ priklausomybe nubrėžkite ir teorinę kreivę. Palyginkite eksperimento ir teorinio modelio kreives.

2.3. Apskaičiuokite santykinę svyravimų periodo paklaidą, atsirandančią dėl to, kad yra taikomas plono strypelio modelis vietoje baigtinio pločio a, bet plonos ($h << a$, L) liniuotės modelio.

3. Pagaminkite svyruoklę, kurią sudarytų liniuotė, dviem vienodo ilgio vertikaliais siūlais pakabinta už jos galų. Kiekvieno siūlo ilgis l apie 80 cm (2 pav., a). Ištirkite tris galimas mažų svyravimų rūšis.



a) b)

2 pav. Pakabinamos svyruoklės schema (a) ir jos įranga namų sąlygomis (b).

3.1. Išmatuokite šių svyravimų periodus.

3.2. Išveskite visų trijų svyravimų rūšių periodų formules, pasinaudodami plono strypelio modeliu (a, $h << L$), apskaičiuokite svyravimų periodus pagal tas formules. Palyginkite gautas vertes su išmatuotomis tiesiogiai eksperimente.

3.3. Apskaičiuokite visais atvejais svyravimų periodų tiesioginių jų matavimų santykinę paklaidą, atsižvelgdami į sisteminę ir atsitiktinę paklaidas*. Įvertinkite santykinę paklaidą periodams, apskaičiuotiems netiesiogiai (punktas 2.2).

4. Nufotografuokite tyrimų įrangą ir kartu su sprendimu atsiųskite dvi jos nuotraukas: vienoje – vien tik įrangą, kitoje – įrangą kartu su eksperimentuotoju, t. y. su savimi.

5. Atvykdami į artimiausią mokymo sesiją, „Fizikos olimpo“ moksleiviai turi būtinai atsivežti savo naudotus užduoties reikmenis: užduoties aptarimo metu kiekvienas moksleivis turės pakartoti namuose atliktus užduoties bandymus, parodyti ir pagrįsti kaip juos atliko. **Tai turės įtakos galutiniam eksperimentinės užduoties sprendimų įvertinimui**.

*Apie paklaidų skaičiavimus galima perskaityti daugelyje šaltinių, pvz.:

1. A. Medeišis. Mechanika. Molekulinė fizika. Elektra ir magnetizmas. *Fizikos praktikumas*. Vilnius:Vilniaus universiteto leidykla, 2000.

2. M. Neuilly. Modelling and estimation of measurement errors. – Paris, Lavoiser Publishing Inc., 1999.

3. Įvairios interneto svetainės.

Užduotį parengė Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto Puslaidininkių fizikos katedros profesorius habil. dr. Edmundas Kuokštis.

▲ *Šis tekstas svetainėje www.olimpas.lt nuolat skelbiamas nuo 2009 08 17.*

Aiškinamasis sprendimas / FT3-3 ▼

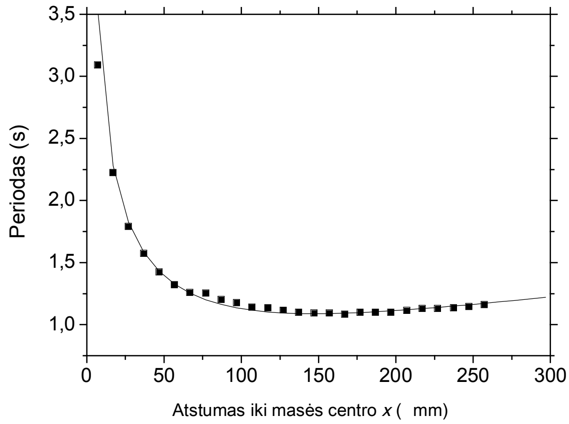
1. Ištirti fizikinės svyruoklės, kurią sudaro pakabinta ant smeigtuko liniuotė, nedidelių svyravimų periodą kaip atstumo tarp svyravimo ašies ir masės centro funkciją (žr. 1 pav.).

1.1. Išilgai liniuotės ašies OO′ (žr. 1 pav., a) kas 1 cm išgręžiame seriją skylučių. Masių centras – sutampa (gana dideliu tikslumu) su geometriniu liniuotės centru, bet jį galime nustatyti ir eksperimentiškai, radę liniuotės pusiausvyrą, pvz., ant smeigtuko. Nustatę kiekvienos skylutės atstumą x iki masės centro ir pakabinę liniuotę ant smeigtuko, perverto iš eilės per kiekvieną skylutę ir įsmeigto į masyvią lentą (1 pav., b), išmatuojame nedidelių svyravimų periodo priklausomybę $T(x)$ ($0 < x < L/2$). Periodą surandame iš 10-ies (galimas ir kitas skaičius) svyravimų laiko. Duomenis surašome į 1 lentelę.

1 lentelė.

x (mm)	T (s)
7	3,094
17	2,224
27	1,791
37	1,575
47	1,425
57	1,322
67	1,262
77	1,256
87	1,203
97	1,178
107	1,144
117	1,134
127	1,119
137	1,1
147	1,094
157	1,097
167	1,087
177	1,1
187	1,1
197	1,103
207	1,116
217	1,131
227	1,132
237	1,134
247	1,147
257	1,163

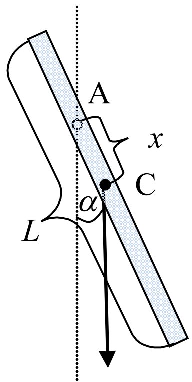
Nubrėžiame eksperimentinių duomenų grafiką (juodi kvadratėliai 3 pav.).



3 pav. Periodo priklausomybė nuo atstumo iki masės centro. Juodi kvadratai – eksperimentiniai rezultatai, ištisinė kreivė – teorinė priklausomybė.

Iš 3 pav. matyti, kad minimalaus periodo ekstremumas pasiekiamas apytikriai ties 150 mm.

1.2. Pasinaudodami plono strypelio modeliu, randame teorinę nedidelių svyravimų periodo išraišką $T(x)$.



4 pav.

Pagal 4 pav. galime surasti, kad išvedus svyruoklę iš pusiausvyros nedideliu kampu α, ją į pusiausvyrą grąžina jėgos momentas

$$M = -mgx\sin\alpha \approx -mgx\alpha\,,$$

čia m – liniuotės masė, o minuso ženklas „-“ reiškia, kad $\boldsymbol{\alpha}$ ir $\boldsymbol{M}$ yra priešingų krypčių vektoriai.

Taigi, judėjimo lygtis svyruoklei

$$M = I\ddot{\alpha}\text{, arba } \ddot{\alpha} + \frac{mgx}{I}\alpha = 0\,,$$

čia $I = m\left(\frac{L^2}{12} + x^2\right)$ - svyruoklės inercijos momentas pakabinimo taško A atžvilgiu (jį apskaičiuojant buvo pritaikyta Šteinerio teorema ir pasinaudota plono vienalyčio masės m ir ilgio L strypelio inercijos momento masių centro atžvilgiu išraiška $I_0 = \frac{mL^2}{12}$).

Tada svyravimų periodas

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgx}} = 2\pi\sqrt{\frac{\frac{L^2}{12} + x^2}{gx}}\,.$$

x atžvilgiu – tai funkcija, turinti ekstremumą – minimumą. Jis atitiks pošaknio minimumą, kurio sąlygą surandame, prilygindami pošaknio išvestinę x atžvilgiu nuliui:

$$\left(\frac{\frac{L^2}{12}+x^2}{x}\right)' = \frac{2x\cdot x-\left(\frac{L^2}{12}+x^2\right)}{x^2}=0,\ \text{kai}\ x=\frac{L}{2\sqrt{3}}\approx 0{,}29L\,.$$

Imdami $L = 510$ mm, minimumo sąlygai randame $x_{\min} = 148\ \text{mm}$. Matome, kad vertė artima nustatyta eksperimentiškai.

Teorinė priklausomybė $T(x) = 2\pi\sqrt{\frac{\frac{L^2}{12}+x^2}{gx}}$ pavaizduota 3 pav. ištisine linija. Kaip matyti, pasiekiamas neblogas eksperimento ir teorijos atitikimas.

1.3. Pradžioje apskaičiuojame baigtinio pločio (a = 3 cm), bet plonos (h << a, L) liniuotės inercijos momentą.

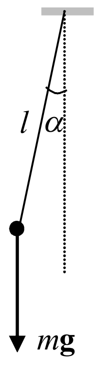
$$I = 2\int_0^{a/2}\frac{m}{aL}L\mathrm{d}x\left(\frac{L^2}{12}+x^2\right)=\frac{2m}{a}\left(\frac{L^2}{12}\cdot\frac{a}{2}+\frac{1}{3}\cdot\frac{a^3}{8}\right)=\frac{mL^2}{12}\left(1+\frac{a^2}{L^2}\right)=I_0\left(1+\frac{a^2}{L^2}\right).$$

Čia pažymėjome $I_0 = \frac{mL^2}{12}$. Tai, kaip minėta anksčiau, plono masės m ir ilgio L strypelio inercijos momentas jo masės centro atžvilgiu. Taigi, santykinė inercijos momento paklaida, atsirandanti dėl to, kad taikomas plono strypelio modelis vietoje baigtinio pločio (a = 3 cm), bet plonos (h << a, L) liniuotės modelio, lygi $\frac{\Delta I}{I_0}=\frac{a^2}{L^2}$. Tada periodo santykinė paklaida $\frac{\Delta T}{T}=\frac{1}{2}\frac{\Delta I}{I_0}\approx 0{,}17\%$.

2. Pagaminame svyruoklę, sudarytą iš liniuotės, pakabintos dviem vienodo ilgio vertikaliais siūlais už jos galų. Kiekvieno siūlo ilgis $l \approx 80$ cm (žr. 2 pav.).
Šiuo atveju galimos trys svyravimų rūšys.

2.1. Ištiriame šiuos trijų rūšių svyravimus eksperimentiškai.

1) Kabančią liniuotę (ploną strypelį) patraukiame iš pusiausvyros taip, kad liniuotė atsilenktų statmena jai kryptimi, o abu siūlai atsilenktų nedideliu kampu α, išlikdami lygiagretūs. Tokios svyruoklės vaizdas, žiūrint iš liniuotės (strypelio) galo, parodytas 5 pav. Pasirenkame 5 matavimus (galimas ir kitas skaičius). Eksperimento rezultatai pateikti 2 lentelėje, kurioje stulpeliuose pateikta: n – matavimo numeris, T_i(s) – kiekvieno matavimo periodo vertė sekundėmis ir ΔT_i^2 (s^2) – kiekvieno matavimo vidutinis kvadratinis nuokrypis (sekundėmis kvadratu). Pastarieji rezultatai bus reikalingi vertinant atsitiktines matavimų paklaidas.



5 pav.

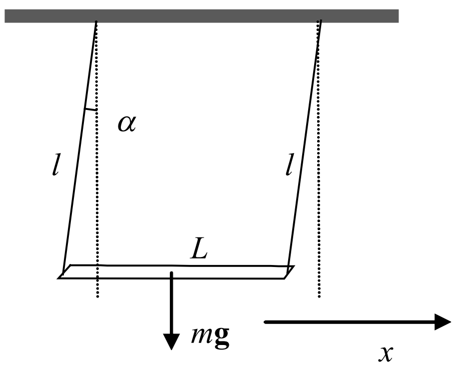
2 lentelė.

n	T_i (s)	ΔT_i^2 (s^2)
1	1,788	$1{,}69\cdot 10^{-4}$
2	1,809	$6{,}40\cdot 10^{-5}$
3	1,809	$6{,}40\cdot 10^{-5}$
4	1,800	$1{,}00\cdot 10^{-6}$
5	1,797	$1{,}60\cdot 10^{-6}$

Apskaičiuojame vidutinę periodo vertę:

$$\overline{T} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} T_i = 1{,}801\ \text{s}.$$

2) Kabančią liniuotę (ploną strypelį) patraukiame iš pusiausvyros taip, kad liniuotė judėtų išilgai jos ašies, o abu siūlai atsilenktų nedideliu kampu α, išlikdami lygiagretūs. Tokios svyruoklės vaizdas, žiūrint iš liniuotės (strypelio) šono, parodytas 6 pav. Pasirenkame 5 matavimus (galimas ir kitas skaičius). Eksperimento rezultatai pateikti 3 lentelėje, kurioje stulpeliuose surašyti analogiški 2 lentelei dydžiai.



6 pav.

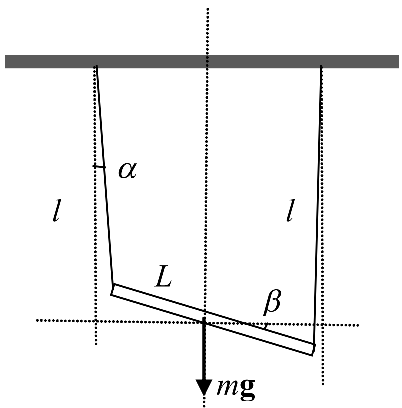
3 lentelė.

n	T_i (s)	ΔT_i^2 (s^2)
1	1,786	$2{,}25 \cdot 10^{-4}$
2	1,812	$1{,}21 \cdot 10^{-4}$
3	1,810	$8{,}10 \cdot 10^{-5}$
4	1,799	$4{,}00 \cdot 10^{-6}$
5	1,796	$2{,}55 \cdot 10^{-5}$

Apskaičiuojame vidutinę periodo vertę:

$$\overline{T} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} T_i = 1{,}801\ \text{s}.$$

3) Kabančią liniuotę (ploną strypelį) patraukiame iš pusiausvyros taip, kad ją paleidus liniuotė atliktų sukamuosius svyravimus apie vertikalią ašį, einančią per jos masės centrą, abu siūlai atsilenktų nedideliu kampu α į priešingas puses, o pati liniuotė pasisuktų nedideliu kampu β horizontalioje plokštumoje. Tokia svyruoklė pavaizduota 7 pav. Pasirenkame 5 matavimus (galimas ir kitas skaičius). Eksperimento rezultatai pateikti 4 lentelėje, kurioje stulpeliuose surašyti analogiški 2 lentelei dydžiai.



7 pav.

4 lentelė.

n	T_i (s)	ΔT_i^2 (s^2)
1	1,069	$1{,}69 \cdot 10^{-4}$
2	1,047	$8{,}10 \cdot 10^{-5}$
3	1,037	$3{,}61 \cdot 10^{-4}$
4	1,072	$2{,}56 \cdot 10^{-4}$
5	1,053	$9{,}00 \cdot 10^{-6}$

Apskaičiuojame vidutinę periodo vertę:

$$\overline{T} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} T_i = 1{,}056\ \text{s}.$$

2.2. Išvedame visų trijų svyravimų rūšių periodų formules, pasinaudodami plono strypelio modeliu (a, h << L).

1) Svyruoklės judėjimą nusako lygtis

$$mgl\sin\alpha = -ml^2\ddot{\alpha} \text{ arba } \ddot{\alpha} + \frac{g}{l}\alpha = 0.$$

Tai matematinės svyruoklės lygtis. Tokiu atveju $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}$.

Apskaičiuojame pagal šią formulę teorinį periodo dydį, imdami fiksuotą laisvojo kritimo pagreičio vertę g = 9,810 m/s^2.

$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}} = 2\pi\sqrt{\dfrac{0{,}800}{9{,}810}} \approx 1{,}794$ s. Tai ~0,4% tikslumu sutampa su verte 1,801 s, gauta eksperimente.

2) Šiuo atveju užrašome liniuotės judėjimo lygtį išilgai x-ašies.

$F = m\ddot{x}$ arba $-mg\mathrm{tg}\alpha = m\dfrac{\mathrm{d}^2(\alpha l)}{\mathrm{d}t^2}$. Kampas α nedidelis, todėl lygtis tampa $\ddot{\alpha} + \dfrac{g}{l}\alpha = 0$. Ši lygtis yra identiška matematinės svyruoklės lygčiai. Taigi ir šiuo atveju $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}$.

Kadangi formulė tokia pati, kaip ir 1) atveju, skaitiniai įvertinimai yra irgi identiški 1) atvejui.

3) Šiuo atveju liniuotę veikia grąžinantis į pusiausvyros padėtį jėgos momentas (žr. 7 pav.) $M = 2\dfrac{mg}{2}\alpha\dfrac{L}{2}$ (čia naudojamės sąlyga α << 1) , kuris suteikia liniuotei, judančiai apie vertikalią ašį ir einančią per jos masės centrą (liniuotės inercijos momentas $\dfrac{mL^2}{12}$), kampinį pagreitį $-\ddot{\beta}$ (čia irgi yra „-“ ženklas, nes $\boldsymbol{\beta}$ ir $\boldsymbol{M}$ vektoriai priešingų ženklų). Taigi, liniuotės judėjimą nusako lygtis $\dfrac{mgL\alpha}{2} = -\dfrac{mL^2}{12}\ddot{\beta}$. Ryšį tarp α ir β surandame iš to, kad liniuotės galo poslinkis gali būti išreikštas per šiuos kampus ir ilgius L ir l, t. y. $\dfrac{L}{2}\beta = l\alpha$. Taigi, $\ddot{\beta} = \dfrac{2l}{L}\ddot{\alpha}$. Tuo būdu galiausiai gauname tokią liniuotės judėjimo lygtį:

$$\ddot{\alpha} + \frac{3g}{l}\alpha = 0.$$

Iš čia svyruoklės svyravimų periodas $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{3g}}$.

Imdami l = 80 cm, gauname T = 1,036 s. Palyginę su išmatuota eksperimentine verte 1,056 s, matome, kad jos ~2% tikslumu sutampa.

2.3. Apskaičiuojame tiesioginių periodo matavimų paklaidas.

Sisteminę paklaidą sudaro sekundometro paklaida. Naudotas skaitmeninis laikrodis turi 0,01 s sisteminę paklaidą, o kadangi matavome 10 pilnutinių svyravimų laiką, vieno periodo paklaida ΔT_s = 10^{-3} s. Pirmųjų dviejų svyravimų rūšių atveju (T = 1,801 s) santykinė paklaida $K_{1S} = K_{2S} = \dfrac{\Delta T_s}{T} \approx 0{,}06\%$. 3-iosios rūšies svyravimams $K_{3S} = \dfrac{\Delta T_s}{T} \approx 0{,}1\%$.

Atsitiktinę paklaidą skaičiuojame pasinaudodami statistinėje analizėje taikoma formule

$$\Delta T_a = t_{n;P}S_n,$$

čia $t_{n;P}$ – Sjudento koeficientas, mūsų atveju matavimų skaičius n = 5, o tipinis patikimumas (dar vadinamas patikimumo koeficientu, pasikliautinąja tikimybe) P = 0,95, t. y. $t_{5;0,95}$ = 2,8 žr. literatūrą); S_n – vidurkio vidutinė kvadratinė paklaida, kurią apskaičiuojame kaip

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(T_i - \bar{T})^2}{n(n-1)}}.$$

Eksperimentinių tyrimų 2-4 lentelėse 3-ojoje kolonoje pateiktos vertės atskiriems matavimams $(T_i - \bar{T})^2$. Taigi, atskiroms svyravimų rūšims, pasinaudodami jau apskaičiuotomis periodų vidutinėmis vertėmis ir lentelių duomenimis, gauname tokias atsitiktinių santykinių paklaidų vertes:

1) $$K_{1A} = \frac{t_{5;0,95}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5}(T_i - \bar{T})^2}{5(5-1)}}}{\bar{T}} = 0{,}60\%.$$

2) $$K_{2A} = \frac{t_{5;0,95}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5}(T_i - \bar{T})^2}{5(5-1)}}}{\bar{T}} = 0{,}74\%.$$

3) $$K_{3A} = \frac{t_{5;0,95}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5}(T_i - \bar{T})^2}{5(5-1)}}}{\bar{T}} = 0{,}70\%.$$

Visa paklaida skaičiuojama tokiu būdu:

$$K_\Sigma = \sqrt{K_S^2 + K_A^2}.$$

Mūsų eksperimentams tiesioginio periodų matavimų atveju sisteminė paklaida žymiai mažesnė už atsitiktinę, todėl visą paklaidą iš esmės lemia atsitiktinė paklaida, t. y.

1) $K_{1\Sigma} \approx K_{1A} = 0{,}6\%$.

2) $K_{2\Sigma} \approx K_{2A} = 0{,}74\%$.

3) $K_{3\Sigma} \approx K_{3A} = 0{,}70\%$.

Netiesioginių periodo matavimų (tai periodai, suskaičiuoti pagal teorines formules, matuojant siūlų ilgius) paklaidas lemia siūlų ilgio matavimų paklaida, t.y. santykinė periodų paklaida visiems atvejams lygi

$$K_{\mathrm{NM}} = \frac{1}{T}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}l}\Delta l = \frac{\Delta l}{2l} = \frac{1\mathrm{mm}}{2 \cdot 800\mathrm{mm}} \approx 0{,}63\%.$$

Čia siūlo ilgio matavimo paklaidą lemia matavimo liniuotės sisteminė paklaida, kuri paimta 1 mm.

Užduoties aiškinamąjį sprendimą pateikė užduoties autorius prof. habil. dr. Edmundas Kuokštis.

Sprendimų aptarimas / FT3-3 ▼

Buvo patikrinta ir įvertinta 16 atsiųstų užduoties sprendimų. Ši turnyro užduotis yra pusiau eksperimentinė, pusiau teorinė. Maksimalų balų skaičių (10) surinko 3 turnyro dalyviai. Kiti balai išsisklaidę maždaug tolygiai nuo 0,5 iki 9 balų.

Galima išskirti tokias tipines klaidas:

1. Klaidos ir netikslumai, atliekant patį eksperimentą.

- Pagrindinė klaida, atliekant eksperimentą, buvo nepakankamas matavimo tikslumas, kurį lėmė arba per mažas skylučių skaičius, arba nelabai kruopščiai išmatuotas periodas. Tai susiję su nelabai išreikštu periodo minimumu, todėl šiame eksperimente buvo reikalingas itin didelis kruopštumas. Tačiau dauguma dalyvių su šia užduoties dalimi susitvarkė sėkmingai.
- Kai kurie dalyviai iš viso nevertino paklaidų, nors tokia užduotis buvo suformuluota. Ne visi dalyviai aiškiai suvokė, kas yra sisteminė, o kas atsitiktinė paklaida, nors buvo nurodyti literatūros šaltiniai.

2. Klaidos vertinant teorinę užduoties dalį.

- Mažiausiai surinkę taškų dalyviai neišvedė teorinės fizikinės svyruoklės periodo formulės, nors dauguma tai atliko. Apskritai visiems dalyviams (net ir surinkusiems daugiausiai taškų) būdinga, kad ne visos teorinės formulės pagrįstos (pvz., pateikta formulė baigtinio pločio liniuotės inercijos momentui, bet nepaaiškinta, iš kur – matyt, pasinaudota šaltiniais). Tačiau jei formulės buvo teisingos ir vietoje panaudotos, tai buvo vertinama visais taškais.
- Ne visi dalyviai analizavo liniuotės, pakabintos už galų, skirtingų svyravimų lygtis.

Užduoties sprendimo aptarimą parengė užduoties autorius ir jos sprendimų vertintojas prof. habil. dr. Edmundas Kuokštis.

***Sprendimų vertinimo kriterijų ir jų verčių lentelė / FT3-3* ▼**

Nr.	Sprendimų vertinimo kriterijus	Vertė balais
1.	Teisingai atlikta svyruoklės gamyba ir periodo matavimai.	1
2.	Rezultatai pavaizduoti grafiškai ir rastas ekstremumas.	1
3.	Sudaryta fizikinės svyruoklės judėjimo lygtis.	0,5
4.	Užrašyta teisinga periodo išraiška.	0,5
5.	Surasta ekstremumo teorinė vertė.	0,5
6.	Užrašyta inercijos momento išraiška ir dėl to atsirandanti paklaida, atsižvelgus į baigtinį liniuotės plotį.	1
7.	Santykinės paklaidos įvertinimas.	0,5
8.	Nustatyti visi trys galimi svyravimų tipai.	0,5
9.	Tiksliai išmatuoti periodai (du svyravimų tipai turi duoti vienodus periodus, o sukamieji svyravimai – mažesnį periodą).	0,5
10.	Užrašyta dviejų svyravimų tipų, kai abu siūlai išlieka lygiagretūs, lygtis ir išvesta periodo formulė.	po 0,5
11.	Užrašyta sukamųjų svyravimų lygtis ir išvesta periodo formulė.	1
12.	Įvertintos tiesioginių periodo matavimų paklaidos.	1
13.	Išvesta netiesioginių periodo matavimų formulė ir įvertinta paklaida.	1
14.	Surašyta ir pateikta ne pagal reikalavimus	-1
15.	Kiti netikslumai (p. 1-13)	po –0,5
Maksimalus sprendimo įvertinimas		10

Sprendimų vertinimo kriterijų ir jų verčių lentelę parengė užduoties autorius ir jos sprendimų vertintojas prof. habil. dr. Edmundas Kuokštis.