

## 2. Slenkamojo judėjimo dėsnų tikrinimas Atvudo metodu

### Užduotis

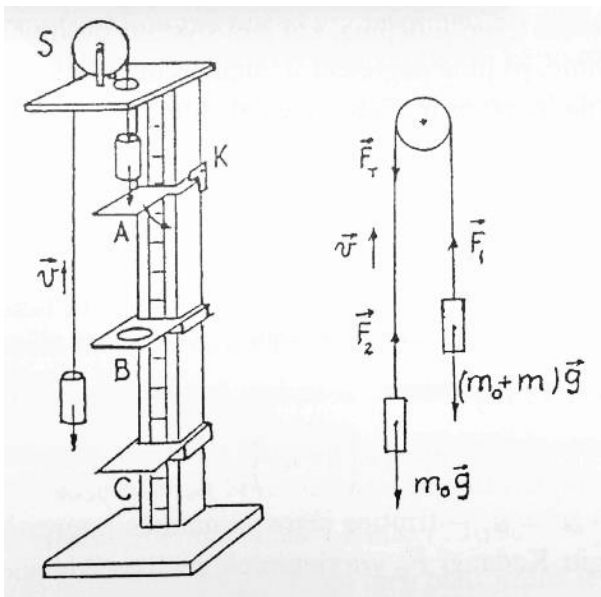
1. Patikrinti kokių tikslumu sistemos judėjimą galime laikyti tolygiai greitėjančiu.
2. Patikrinti antrąjį Niutono dėsnį.

### Pagrindiniai teoriniai klausimai

1. Tolygiai kintamo judėjimo kelio ir greičio lygtys.
2. Niutono dėsniai.
3. Neinercinės atskaitos sistemos.

### Tyrimo metodika

Tyrimus atliekame Atvudo mašina, kurios principinė schema pateikta 1 pav. Ją sudaro vertikalus stovas, kurio viršuje pritvirtintas skridinys S, galintis laisvai sukis ant ašies. Per skridinį permestas plonas siūlas su abiejuose galuose pritvirtintais pasvarais. Taip pat, prie stovo pritvirtintos trys lentynėlės. Lentynėlė A prie stovo pritvirtinta lankstu ir gali sukis nuo vertikalios iki horizontalios padėties, kurioje fiksuojama specialiu kabliuku K. Vidurinėje lentynėlėje yra kiaurymė, šiek tiek didesnė už pasvaro skersmenį. Vidurinė B ir apatinė C lentynėlės gali būti tvirtinamos įvairiuose aukščiuose.



1 pav. Principinė Atvudo mašinos schema.

Pridėjus prie vieno, pavyzdžiui, dešiniojo, pasvaro  $m$  masės svarelį, sistema ims judėti su pagreičiu. Tarkime, atskaitos sistemą susiejome su stovu. Visos jėgos veikia išilgai kabinimo siūlo, todėl, užrašydami judėjimo lygtį, jėgą laikysime teigiama, jei jos kryptis sutaps su siūlo judėjimo kryptimi. Visų veikiančių jėgų

algebrinė suma turi būti sistemos masės ir jos pagreičio sandaugai:

$$-F_T - m_0g + F_2 + (m_0 + m)g - F_1 = (2m_0 + m)a; \quad (1)$$

čia  $F_T$  – trinties jėga,  $F_1$ ,  $F_2$  – siūlo įtempimo jėgos,  $m_0$  – pasvaro masė.

Siūlo įtempimo jėgų skirtumas  $F_1 - F_2$  priklauso nuo skridinio S inercinių savybių. Veikiamas šių jėgų skridinys sukasi tam tikru kampiniu pagreičiu. Su siūlu besiliečiančių jo taškų pagreitis  $a$  proporcingas įtempimo jėgų skirtumui:  $F_1 - F_2 = c_I a$ ; čia  $c_I$  – proporcingumo koeficientas. Įrašę (1) lygtį šių įtempimo jėgų skirtumo išraišką, gausime, kad sistemos pagreitis

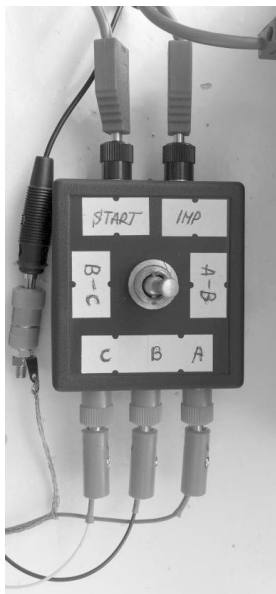
$$a = \frac{mg - F_T}{2m_0 + m + c_I} \quad (2)$$

Trinties jėga kompensuojama pritvirtinant prie dešinio pasvaro  $m_T = \frac{F_T}{g}$  masės svarelį. Kai

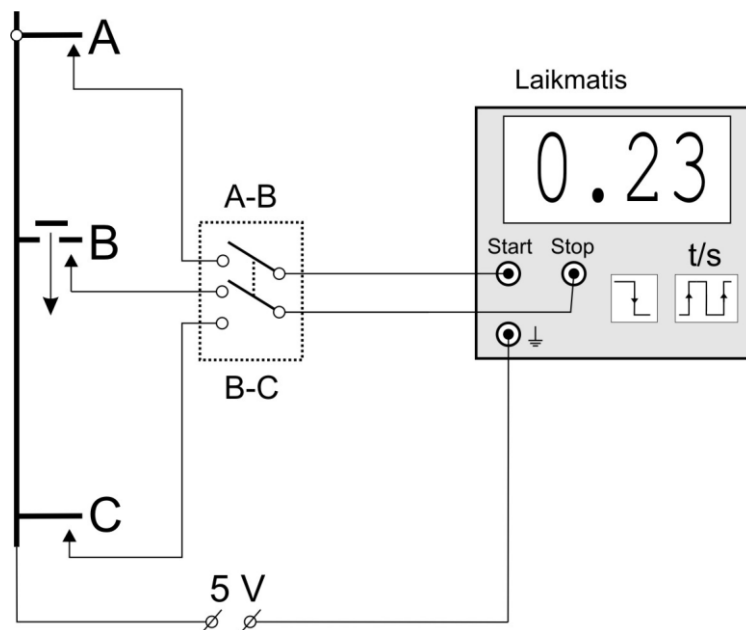
ši sąlyga tenkinama, lengvai pastūmus žemyn dešinįjį pasvarą, sistema judės pastoviu greičiu. Skridinys S pasirenkamas toks, kad būtų tenkinama sąlyga  $2m_0 + m + \dots \gg c_1$ . Paprastai jis gaminamas iš diuraliuminio. Galiojant šioms sąlygoms, sistemos pagreitis

$$a = \frac{mg}{2m_0 + m}. \quad (3)$$

Pasvarų judėjimo trukmė matuojama elektroniniu laikmačiu su automatinė paleidimo ir stabdymo funkcija. Priklausomai nuo atkarpos, kurioje matuojama pasvarų judėjimo trukmė, komutatoriumi (2 pav.) pasirenkamos laikmačio paleidimo ir stabdymo lentynėlės. Visos trys stovo lentynėlės tarpusavyje elektriškai sujungtos. Komutatoriaus jungikliui esant padėtyje A–B, laikmatis paleidžiamas lentynėlei A atsilenkus į vertikalią padėtį ir sujungus relės kontaktus, o sustabdomas, kai svarelis uždėtas ant pasvaro sujungia lentynėlės B kontaktus. Komutatoriaus jungikliui esant padėtyje B–C, laikmatis paleidžiamas, kai svarelis uždėtas ant pasvaro sujungia lentynėlės B kontaktus, o sustabdomas, kai pasvaras nuspaudžia lentynėlėje C esantį jungiklį.



2 pav. Komutatorius.



3 pav. Pasvaro judėjimo trukmės matavimo schema.

**Patikrinkite** ar sistemos judėjimas pakankamai tiksliai aprašomas lygtimis

$$v = at \quad (4)$$

ir

$$s = \frac{at^2}{2}. \quad (4a)$$

Tam pagal greičio lygtį įvertinkite sistemos pagreitį  $a_v$  ir palyginkite su gautu pagal kelio lygtį.

1. Įjunkite laikmatį ir 5 V įtampos šaltinį į elektros tinklą.

2. Nustatykite komutatorių į padėtį A-B.

3. Įtvirtinkite apatinę ir vidurinę lentynėles pasirinktose padėtyse. Išmatuokite atstumą  $l_1$  nuo viršutinės A iki vidurinės B lentynėlės ir atstumą  $l_2$  nuo vidurinės B iki apatinės C lentynėlės. Būtina turėti galvoje, kad, mažinant atstumą  $l_2$  tarp vidurinės ir apatinės lentynėlių, trinties jėgos lemiamą santykinę paklaidą mažėja, o laiko matavimo santykinė paklaida didėja.

4. Atlenkite lentynėlę A į horizontalią padėtį ir fiksuokite kabliuku K. Uždėkite papildomą svarelį ant dešiniojo pasvaro ir pastatykite pasvarą ant lentynėlės A.

5. Paspauskite laikmačio mygtuką „Reset“. Ekrane užsidegę trys taškai signalizuoja, kad laikmatis paruoštas matavimui. Patraukite už virvutės pritvirtintos prie kabliuko K ir leiskite sistemai judėti.

6. Kai lentynėlė A atsilenkia, užsidega laikmačio indikatorius „Gate“ reiškiantis, kad laikmatis matuoja trukmę  $t_1$  iki kol pasvaras pasiekia vidurinę lentynėlę B. Pasvarui pasiekus vidurinę lentynėlę užsirašykite laikmačio parodymus.

7. Mažiausiai 5 kartus kartokite 4–6 punktus.

8. Nustatykite komutatorių į padėtį B-C.

9. Atlenkite lentynėlę A į horizontalią padėtį ir fiksuokite kabliuku K. Uždėkite papildomą svarelį ant dešiniojo pasvaro ir pastatykite pasvarą ant lentynėlės A.

10. Paspauskite laikmačio mygtuką „Reset“. Ekrane užsidegę trys taškai signalizuoja, kad laikmatis paruoštas matavimui. Patraukite už virvutės pritvirtintos prie kabliuko K ir leiskite sistemai judėti.

11. Pasvarui pasiekus vidurinę lentynėlę B ir papildomam svareliui sujungus lentynėlės kontaktus, užsidega laikmačio indikatorius „Gate“ reiškiantis, kad laikmatis matuoja trukmę  $t_2$  iki kol pasvaras pasiekia apatinę lentynėlę C. Pasvarui pasiekus apatinę lentynėlę užsirašykite laikmačio parodymus.

12. Mažiausiai 5 kartus kartokite 9–11 punktus.

Matavimus kartokite pakeitę vidurinės ir apatinės lentynėlių padėtis (mažiausiai 3 skirtingos vertės). Matavimų duomenis ir skaičiavimų rezultatus surašykite į lentelę.

Nr.	$t_1$	$t_2$	$v$	$a_v$	$a_s$

Pasvaro greitis pasiekus vidurinę lentynėlę

$$v = \frac{l_2 - h}{t_2}, \quad (5)$$

kur  $h$  – pasvaro aukštis.

Netolyginio judėjimo nuo viršutinės iki vidurinės lentynėlės pagreitis

$$a = \frac{v}{t_1}. \quad (6)$$

Iš (5) ir (6) lygčių išplaukia, kad sistemos pagreitis

$$a_v = \frac{l_2 - h}{t_1 t_2}. \quad (7)$$

Išreiškę sistemos pagreitį iš kelio lygties (4a), gausime

$$a_s = \frac{2(l_1 + h)}{t_1^2}. \quad (8)$$

Jeigu sistemos judėjimas tolygiai greitėjantis ir trinties jėgos įtaka greičio  $v$  matavimo rezultatui nedidelė, tai  $a_v$  ir  $a_s$  vertės matavimo paklaidų ribose turi sutapti.

**Patikrinkite** antrąjį Niutono dėsnį.

1. Įtvirtinkite vidurinę lentynėlę pasirinktoje padėtyje.
2. Atlenkite lentynėlę A į horizontalią padėtį ir fiksuokite kabliuku K.
3. Ant dešiniojo pasvaro uždėkite  $m_1$ , o ant kairiojo –  $m_2$  masės svarelį ( $m_1 > m_2$ ). Dešinįjį pasvarą pastatykite ant viršutinės lentynėlės.
4. Paspauskite laikmačio mygtuką „Reset“. Ekrane užsidegę trys taškai signalizuoja, kad laikmatis paruoštas matavimui. Patraukite už virvutės pritvirtintos prie kabliuko K ir leiskite sistemai judėti.
5. Kai lentynėlė A atsilenkia, užsidega laikmačio indikatorius „Gate“ reiškiantis, kad laikmatis matuoja trukmę  $t_1$  iki kol pasvaras pasiekis vidurinę lentynėlę B. Pasvarui pasiekus vidurinę lentynėlę užsirašykite laikmačio parodymus.
6. Mažiausiai 5 kartus kartokite 2–5 punktus.
7. Atlenkite lentynėlę A į horizontalią padėtį ir fiksuokite kabliuku K.
8. Uždėkite abu svarelius ant dešiniojo pasvaro ir pastatykite jį ant lentynėlės A.
9. Paspauskite laikmačio mygtuką „Reset“. Ekrane užsidegę trys taškai signalizuoja, kad laikmatis paruoštas matavimui. Patraukite už virvutės pritvirtintos prie kabliuko K ir leiskite sistemai judėti.
10. Kai lentynėlė A atsilenkia, užsidega laikmačio indikatorius „Gate“ reiškiantis, kad laikmatis matuoja trukmę  $t_2$  iki kol pasvaras pasiekis vidurinę lentynėlę B. Pasvarui pasiekus vidurinę lentynėlę užsirašykite laikmačio parodymus.
11. Mažiausiai 5 kartus kartokite 7–10 punktus.

Matavimus kartokite pakeitę atstumą tarp viršutinės ir vidurinės lentynėlių (mažiausiai 3 vertės). Matavimų duomenis ir skaičiavimų rezultatus surašykite į lentelę.

Nr.	$l$	$t_1$	$t_2$				

Kadangi trukmių  $t_1$  ir  $t_2$  matavimo metu atstumas  $l$  tarp lentynėlių nekito, tai  $a_1 t_1^2 = a_2 t_2^2$ , arba

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{t_1^2}{t_2^2}. \quad (9)$$

Pagal antrąjį Niutono dėsnį,  $\frac{a_2}{a_1} = \frac{F_2}{F_1}$ . Nagrinėjamu atveju  $F_1 = (m_1 - m_2)g$ , o

$F_2 = (m_1 + m_2)g$ . Vadinasi,

$$\frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}. \quad (10)$$

**Matavimo paklaidų skaičiavimas.** Atsitiktines trukmių  $t_1$  ir  $t_2$  paklaidas įvertiname pagal pakartotų matavimų rezultatus. Jas apskaičiuojame pagal formulę

$$(\Delta t_{1,2})_\alpha = \bar{s}_n t_{p,n}; \quad (11)$$

čia  $\bar{s}_n - t_{1,2}$  aritmetinio vidurkio vidutinis kvadratinis nuokrypis, o  $t_{p,n}$  – Stjudento koeficientas.

Žinodami sisteminę paklaidą  $(\Delta t_{1,2})_s$ , apskaičiuojame suminę paklaidą:

$$\Delta \bar{t} = \sqrt{(\Delta t_{1,2})_\alpha^2 + (\Delta t_{1,2})_s^2}. \quad (12)$$

Matuojant kitus dydžius pasireiškia tik sisteminės paklaidos. Pagreičio išraiškos (7) ir (8) atitinka laipsninių funkcijų sandaugos pavidalą, todėl galime užrašyti, kad

$$\Delta a_v = a_v \sqrt{\frac{(\Delta l_2)^2 + (\Delta h)^2}{(l_2 - h)^2} + \left(\frac{\Delta t_1}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_2}{t_2}\right)^2} \quad (13)$$

ir

$$\Delta a_s = a_s \sqrt{\frac{(\Delta l_1)^2 + (\Delta h)^2}{(l_1 + h)^2} + \left(2 \frac{\Delta t_1}{t_1}\right)^2}. \quad (14)$$

Matavimo tikslumui tam tikrą įtaką daro trinties jėgos priklausomybė nuo sistemos judėjimo greičio; į šią priklausomybę neatsižvelgta.

Pažymėkime (10) lygties dešiniąją pusę  $K_1$ , o kairiąją –  $K_2$ . Kairiąją lygties dalį atitinkanti paklaida

$$\Delta K_1 = \sqrt{\left(\frac{\partial K_1}{\partial m_1} \Delta m_1\right)^2 + \left(\frac{\partial K_1}{\partial m_2} \Delta m_2\right)^2}. \quad (15)$$

Atlikę diferencijavimą ir algebrinius veiksmus, užrašysime

$$\Delta K_1 = 2 \frac{\sqrt{(m_2 \Delta m_1)^2 + (m_1 \Delta m_2)^2}}{(m_1 - m_2)^2}. \quad (16)$$

Paklaidą  $\Delta K_2$  patogiau išreikšti trukmių  $t_1$  ir  $t_2$  santykinėmis paklaidomis:

$$\Delta K_2 = 2 \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \sqrt{\left(\frac{\Delta t_1}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_2}{t_2}\right)^2} \quad (17)$$

## Literatūra

1. A. Medeišis „Mechanika, molekulinė fizika, elektra ir magnetizmas. Fizikos praktikumas.“, Vilnius, *Vilniaus universiteto leidykla*, 2000, 353 p.
2. A. Matvejevas, „Mechanika ir reliatyvumo teorija“, Vilnius, *Mokslas*, 1982, 334 p.