

1. KIIRENDUSEGA KULGLIIKUMISE KINEMAATIKA JA DÜNAAMIKA SEADUSTE KONTROLLIMINE ATWOODI MASINAGA

1.1. Tööülesanne

Ühtlaselt kiireneval liikumisel läbitud tee pikkuse ja kiiruse seaduste ning Newtoni II seaduse kontrollimine. Ploki teljele mõjuva hõõrdejõu momendi määramine.

1.2. Töövahendid

Atwoodi masin põhi- ja lisakoormistega. Mäluga elektronkell. Abiseadised koormiste liikumise juhtimiseks ja aja mõõtmiseks (koormiste algasendi fiksaator koos elektromagneti ja fotovärvaga; rõngasplatvorm fotovärvaga; fotovärv koos amortisaatoriga; alaldi; lüliti).

1.3. Atwoodi masina konstruktsioon ja teooria

Masina põhiosadeks on seina külge kinnitatud vertikaalne metallvarras A (joon. 1), millele on kantud sentimeeterjaotistega skaala ja tema ülemisse otsa kinnitatud kerge alumiiniumplokk B . Hõõrdumine ploki pöörlemisel on viidud minimaalseks laagrite spetsiaalse ehitusega. Üle ploki on pandud peenike niit, mille mõlemas otsas on võrdse massiga koormised C ja C' .

Lisaks plokile on vardale A kolme muhvi abil kinnitatud veel koormiste liikumise juhtimiseks ja aja mõõtmiseks vajalikud lisaseadised. Põhikoormiste C ja C' massi võib suurendada lisakoormiste D ja E abil.

Kui koormisele C asetada lisakoormis D või E , siis hakkab kogu süsteem ühtlaselt kiirenevalt liikuma. Süsteemi kiirenduse võib arvutada. Kasutades Newtoni II seadust ja skalaarset momentide võrrandit, kirjutame liikumisvõrrandid koormiste C ja C' ning ploki jaoks projektsioonides allasuunatud vertikaalteljele, lugedes niidi kaalutuks ja venimatuks:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_l)a &= (m + m_l)g - T_2, \\ -ma &= mg - T_1, \\ I \frac{a}{r} &= (T_2 - T_1)r - M_h. \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

Siin m on põhikoormise (C või C') mass, m_l on lisakoormise (D või E) mass, T_1 ja T_2 on niidi pinged jõud vastavalt koormiste C' ja C pool ploki, I ja r on vastavalt ploki inertsimoment pöörlemistelje suhtes ja ploki raadius, a ja g on süsteemi liikumise kiirenduse ja raskuskiirenduse moodulid, M_h on hõõrdejõudude moment ploki pöörlemistelje suhtes. Suhe $\frac{a}{r} = \varepsilon$ on ploki nurkkiirendus eeldusel, et niit ploki pinnal ei libise. Kõigi vektorite projektsioonid on absoluutväärtuselt võrdsed nende moodulitega. Süsteemi (1.1) lahendamisel saame:

$$a = \frac{m_1 g - \frac{M_h}{r}}{2m + m_1 + \frac{I}{r^2}}. \quad (1.2)$$

Viimases valemis võib põhikoormiste summarse massi $2m$ hulka lugeda ka niidi massi. Katseseadme konstandina ongi $2m$ antud koormiste C ja C' ning niidi summaarne mass.

Seega hakkab Atwoodi masina koormiste süsteem liikuma konstantse kiirendusega $a < g$. Kui liikumise ajal kõrvaldada lisakoormis, siis hakkab süsteem edasi liikuma ühtlaselt kiirusega, mis tal oli lisakoormise kõrvaldamise momendil, kui jätta arvestamata hõõrdejõududest tingitud hästi väike aeglustumine. Lisakoormise E saab liikumise ajal kõrvaldada rõngasplatvormi abil.

Eeltoodust lähtudes saab Atwoodi masinaga kontrollida ühtlaselt kiireneva liikumise kinemaatika valemite (tööülesandes nimetatud seaduste) kehtivust. Dünaamika põhiseaduse kehtivuse kontrollimine on võimalik esimeses lähenduses – eelnevalt määratud hõõrdejõu momenti arvestades. Kõige selleks tuleb mõõta teepikkusi s_{12} , s_{13} ja s_{23} (joon. 1) vardal A oleva skaala abil. Koormise C poolt nende teepikkuste läbimiseks kulutatud ajavahemikke t_{12} ja t_{13} mõõdame elektronkellaga, mida juhitakse fotovärvavalt* saadud signaalide abil.

Koormise C' hoidmiseks algasendis on muhvile H monteeritud mehhaaniline fiksaator koos elektromagnetiga C' vabastamiseks ja fotovärv V_1 , mis samaaegselt C' vabanemisega annab signaali kella käivitamiseks. Muhvile F on kinnitatud rõngasplatvorm ja fotovärv V_2 . Rõngasplatvorm võtab maha E tüüpi lisakoormise samal hetkel kui koormis C katkestab V_2 fotodiodile langeva valguse. Voolu muutumisel fotodiodis tekkinud signaali toimel fikseeritakse kella näit, mis salvestatakse mälli. Nende kahe sündmuse samaaegsuse täpsus sõltub sellest, kui täpselt on kaugus rõngasplatvormi pinnast kuni fotodiodi rakendamise punktini võrdne põhikoormise C pikkusega. Antud konstruktsioonis võib selle suuruse määramiseks lugeda ± 0.5 mm. Siit järeldub, et põhikoormise C pikkust muuta ei tohi. Muhvi G külge on kinnitatud fotovärv V_3 ja koormise hoogu pidurdav amortisaator. Valguse katkestamisel koormise C poolt fotovärvavas V_3 tekkinud signaal seiskab kella. Pärast kella seiskumist tablool olev helenduvate segmentide kombinatsioon $\text{L}12$ viitab sellele, et kell on valmis väljastama aega t_{12} . Vajutades nupule „AEG“ ilmub tabloole t_{12} väärtus. Uuesti nupule „AEG“ vajutades ilmub tabloole $\text{L}13$ ja veelkordsel vajutamisel t_{13} väärtus. Enne järjekordset mõõtmist tuleb kell viia nullseisu, selleks vajutame nupule „NULL“. Nullseisu tähistab tablool kombinatsioon 5L .

Elektronkellal on konstantne absoluutne põhiviga (0.01 s). Seetõttu pole mõõtmistäpsuse huvides kasulik mõõta väga väikesi ajavahemikke.

Vardal A oleva skaala kriipsude vahelise kauguse riistaviga kogu varda ulatuses ei ületa 1 mm. Pikkuste määramisel võib aga määravaks osutada subjektiivne parallaktiline viga. Põhikoormiste mass $2m$, ploki inertsimoment I ja raadius r on antud seadise konstantidena. Antud on ka lisakoormiste masside väärtused.

1.4. Töö käik

1.4.1. Tutvume Atwoodi masina ja abiseadiste ehitusega.

Lülitame elektronkella ja alaldi vooluvõrku. Kontrollime mõõtesüsteemi tööd, imiteerides koormiste liikumist ülekoormuse korral koormisel C . Vajutades laual asetsevale surunupplülitile peab rakenduma koormist C' vabastav elektromagnet ja käivituma kell. Seejärel katkestame sõrmega hetkeks valguse fotovärvavates V_2 ja V_3 , mispeale kell seiskub. Väljastame ajad t_{12} ja t_{13} ning hindame nende vastavust tegelikkusele. Vajutades nupule „NULL“ viime kella nullseisu.

* Fotovärvavaks nimetatud andur koosneb valgusallikast (koos fokuseeriva optilise süsteemiga või ilma) ja fotodiodist. Fotodiodi vastuvool sõltub tugevasti p-n siirde valgustatusest, olles seejuures võimeline järgima selle väga kiireid muutusi. Seega kaasneb läbipaistmatu objekti sattumisega fotodiodile langevate valguskiirte teele järsk voolu langus, mida on lihtne kasutada elektronkella juhtimpulsside formeerimiseks.

1.4.2. Elektronkella suure täpsuse ja fotodiodi tühiselt väikese reaktsiooniaja tõttu võivad konstantsete teepikkuste s_{12} ja s_{13} läbimiseks kulunud aja korduval mõõtmisel tekkinud juhuslikud erinevused üle 0.01 s olla tingitud vaid võimalikest kuivhõõrdumise muutustest ketastel ja laagrites. Et mitte teha korduskatseid iga mõõtmisoperatsiooni juures, määrame algul t_{12} ja t_{13} ühekordsel mõõtmisel tekkiva statistilise määramatuse. Selleks teeme muhvide F ja G suvalises asendis (muhvi H asendi jätame samaks kogu töö vältel) ja suvalise ülekoormuse korral põhikoormisel C vähemalt 10 kuni 15 korduskatset. Iga katse seisneb järgnevas: avades eelnevalt käsitsi fiksaatori asetame C' algasendisse, vajutades nupule „NULL“ seiskame kella, summutame koormise C (koos lisakoormisega) võnkumised, vajutades ca 1 sekundiks surunupplülitile avame elektromagneti abil fiksaatori. Pärast koormiste seiskumist registreerime t_{12} ja t_{13} . Kummagi valimi jaoks arvutame standardhälbed σ_{12} ja σ_{13} . Eeldades, et fluktuatsioonide jaotus on lähedane normaaljaotusele, võib ajavahemike t_{12} ja t_{13} ühekordse mõõtmise tulemuse statistilise määramatuse leidmiseks kasutada standardiseeritud normaaljaotuse kvantiilide tabelit [1, tabel 34.6.1]. Näiteks tuleb 98%-lisel usaldusnivool korrutada σ_{12} ja σ_{13} 2.33-ga.

1.4.3. Läbitud tee seaduse

$$s = \frac{1}{2}at^2 \quad (1.3)$$

kontroll. Kinnitame muhvi G kõige alumisse võimalikku asendisse. Registreerime koormise C alumise pinna ja fotovärava V_3 asendid skaalal. Valime lisakoormiste D hulgast sobiva, asetame põhikoormisele C ja mõõdame ajavahemiku t_{13} . Kordame katset vähemalt 7 ... 10 korda, nihutades iga kord muhvi G umbes 20 cm võrra ülespoole.

Kanname mõõtmistulemused koos määramatuse vahemikega graafikule teljestikus $t^2 - 2s$. Kui läbi kõigi ristide saab tõmmata sirge, on läbitud tee seaduse kehtivus valitud usaldusnivool kinnitust leidnud. Arvutame saadud sirge tõusu, mis annab kiirenduse väärtuse kasutatud ühikutes. Arvutame kiirenduse määramatuse, kasutades üht kirjanduses [2, p. 9] kirjeldatud meetoditest.

1.4.4. Kiiruse seaduse

$$v = at \quad (1.4)$$

kontroll. Koormise C hetkkiirust lisakoormise E äravõtmise momendil saab määrata, kui lugeda liikumine pärast lisakoormise äravõtmist ühtlaseks. Selleks tuleb mõõta teepikkuse s_{23} läbimiseks kulunud aeg t_{23} . Antud juhul ei paranda t_{23} suurendamine kiiruse määramise täpsust, sest hõõrde olemasolu tõttu kiirus tegelikult väheneb ja meetoodiline viga hetkkiiruse määramisel kasvab s_{23} ja t_{23} suurenedes. Sellepärast tuleb siin minna kompromissile, valida s_{23} mitte eriti suur ega ka mitte eriti väike. Soovitav on kahe platvormi vahemaa s_{23} valida umbes 60 ... 80 cm.

Kinnitame muhvi G võimalikult alumises asendis, rõngasplatvormiga muhvi F temast 60 ... 80 cm kõrgemal. Fotovärava V_2 asukoht on märgitud tema korpusel punase joonega. Asetame koormisele C sobiva ülekoormise E . Mõõdame t_{12} ja t_{13} . Kordame katset 7 ... 10 korda, nihutades iga kord muhve 10 ... 15 cm võrra ülespoole, säilitades aga nende vahemaa konstantsena. Arvutame iga kord hetkkiiruse $v = \frac{s_{23}}{t_{23}}$. Andmed (s_{12} , t_{12} , t_{13} , s_{23} , t_{23} , v) kanname tabelisse ja koostame graafiku teljestikus $t_{12} - v$ (koos määramatuse vahemikega). Kui ristidest saab sirge läbi tõmmata, on kiiruse seadus leidnud kinnitust. Arvutame kiirenduse koos määramatusega p. 1.4.3 toodud juhiste järgi.

1.4.5. Newtoni II seaduse $F = ma$ kontroll. Asetame lisaraskusi D mõlemale poole, kuid nii, et $m_{1C} > m_{1C'}$. Edasi jätame kogu süsteemi massi $M = 2m + m_{1C} + m_{1C'}$ muutumatuks, kuid muudame liikumapanevat jõudu F , tõstes osa lisakoormisi põhikoormiselt C' üle põhikoormisele C . Sealjuures muutub ka süsteemi liikumise kiirendus. Saame

$$F_1 = Ma_1, F_2 = Ma_2.$$

Jagades võrdused, saame:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2}.$$

Maa gravitatsiooniväljas asuvale kehale mõjuv jõud on võrdeline selle keha massiga, sellepärast võime liikumapanevate jõudude suhte avaldada ülekoormiste masside vahe kaudu:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{(m_{1C} - m_{1C'})_1}{(m_{1C} - m_{1C'})_2}.$$

Kuna sama teepikkuse korral on kiirenduste suhe võrdne aegade ruutude suhtega, saame:

$$\frac{(m_{1C} - m_{1C'})_1}{(m_{1C} - m_{1C'})_2} = \frac{t_2^2}{t_1^2}. \quad (1.5)$$

Viimase võrduse kehtivus katsevigade piires ongi Newtoni II seaduse kehtivuse tõestus esimeses lähenduses, hõõrdumise mittearvestamisel.

Valinud s võimalikult suurena, mõõdame ajad t_1 ja t_2 vähemalt 7 ... 10 korda, arvutame keskmised ja nende määramatused. Analüütilisel kaalul määrame vahed $m_{1C} - m_{1C'}$, mõlema juhu jaoks, asetades osa ülekoormisi ühele, teise osa teisele kaalukaasile. Kontrollime valemi (1.5) kehtivust katsevigade piires.

Kui valem (1.5) ei kehti, kaalume p. 1.4.3 kasutatud lisakoormise (analüütilisel kaalul) ja arvutame valemist (1.2) suhte $\frac{M_h}{r}$, kasutades seal leitud kiirenduse väärtust. Valemist (1.2) saame avaldada:

$$\frac{(m_{1C} - m_{1C'})_1 g - \frac{M_h}{r}}{(m_{1C} - m_{1C'})_2 g - \frac{M_h}{r}} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{t_2^2}{t_1^2}. \quad (1.6)$$

Viimase võrduse kehtivus katsevigade piires on Newtoni II seaduse ja tema abil tuletatud momentide võrrandi kehtivuse tõestus.

1.4.6. Uurime Atwoodi masina ploki laagrite ehitust, teeme visandjoonise plokist endast ja tugilaagritest.

1.5. Lisa ülesanded

1.5.1. Enne praktikumi

A. Esitada süsteemi (1.1) lahenduskäik, leides nii kiirenduse avaldise (1.2) kui ka niidi pinged T_1 ja T_2 .

B. Tuletada valemid (1.3) ja (1.4) konstantse jõu mõjul toimuva liikumise diferentsiaalvõrrandi $\ddot{x} = a = const$ integreerimisega.

C. Miks on soovitatud p. 1.4.3 ja 1.4.5 kasutada võimalikult suurt teepikkust s ?

D Millistes ühikutes tuleb mõõta löike katsetulemuste graafikute telgedel p. 1.4.3 ja 1.4.4?

1.5.2. Pärast praktikumi

E. Esitada idee meie Atwoodi masina ploki inertsimomendi katseliseks määramiseks selle pöörlemistelje suhtes.

F. Esitada idee hõõrdejõudude momendi M_h katseliseks määramiseks liikumise uurimise abil teepikkusel s' (platvormide vahel, pärast ülekoormuse mahavõtmist).

G. Summaarse liikumist takistava jõumomendi kujundamisel Atwoodi masinas mängivad olulist osa: veerhõõre ploki võlli veeremisel tugirataste pöidadel, veerehõõre ja viskoosne hõõre tugirataste võllide õlitatud kuullaagrites, liugehõõre ploki võlli kärnlaagrites. Kuidas teha katseliselt kindlaks, kas summaarne pidurdav jõumoment on kuiva hõõrde tüüpi (s.t. ei sõltu kiirusest) või viskoosse hõõrde tüüpi (s.t. võrdeline kiirusega)?

1.6. Kirjandus

1. Tammet, H. Füüsika praktikum: Metroloogia. – Tln.: Valgus, 1971. – 140 lk.
2. Voolaid, H. Mõõtevigade hindamine füüsika praktikumis. – Tartu: TRÜ, 1983. – 55 lk.
3. Saveljev, I. Füüsika üldkursus. – Tln.: Valgus, 1978. – I. – Lk. 13-29, 35-38, 51-53, 105-108.
4. Физический практикум: Механика и молекулярная физика / Под ред. В.И. Ивероновой. – М.: Наука, 1967. – С. 51-54.

