Vizsgálatok az Eötvös-inga csillapítási ideje csökkentésének, megbízhatóságának és a torziós szálak preparálásának problémáiról

RYBÁR ISTVÁN

Az alábbi cikket, mely Eötvös kiváló tanítványának és munkássága folytatójának fenti tárgyú vizsgálatairól összefoglaló képet ad, még a szerző 85. születésnapja alkalmából magának a szerzőnek a közreműködésével szándékoztunk közölni, az Ő halála azonban a közlést megakadályozta. A cikket most a szerzőnek az MTA Műszaki Tudományok Osztályának Közleményeiben megjelent tanulmányai alapján állítottuk össze.

Настоящую статью, дающую обзор исследований, проведенных выдающимся учеником Этвеша и продолжателем его деятельности, предполагалось публиковать по случаю 85-летия со дня рождения автора, при его личном содействии. Однако, наступившая между тем смерть автора препятствовала выполнению этого плана и данная статья была составлена по работам автора, опубликованным в Бюллетене Отдела технических наук АН ВНР.

Die Redaktion beabsichtigte – aus der Gelegenheit des 85.-sten Geburtstages des illustren Forschers, Schülers und Nachfolgers von Eötvös – den folgenden Absatz, welcher die im Titel berührten Untersuchungen des Verfassers zusammenfassend darstellt, noch in Zusammenarbeit mit ihm zu veröffentlichen, dies wurde aber durch den Tod von Rybár verhindert. Die hier folgende Darstellung folgt seinen in den Veröffentlichungen der Abteilung für Technische Wissenschaften der Ungarischen Akademie der Wissenschaften erschienenen Mitteilungen.

I. Az Eötvös-inga csillapodási idejének csökkentése

A ma használatos Eötvös-inga csillapodási ideje *40* perc. Rendkívül kívánatos, hogy ez az idő jelentékenyen kisebbíttessék.

A csillapodási idő csökkentése régi törekvés. Ez irányban történt is már valamelyes haladás, amennyiben az Eötvös idejében használatban volt ingák egyórás csillapodási idejét a mai ingáknál 40 percre sikerült csökkenteni.

A lengőrendszer csillapodási ideje és lengésideje közötti összefüggés

Mindenekelőtt vizsgáljuk meg, hogy a lengőrendszer (pl. az Eötvös-inga) csillapodási ideje mily tényezőktől függ

Csillapodási idő alatt azt az időtartamot értjük, amely az inga mozgásba hozatala után eltelik addig, amíg az inga nyugalomba jön, szabatosan kifejezve, amíg az ingának a nyugalmi állásától való kitérése kisebb és kisebb marad, mint a leolvasással mérhető legkisebb kitérés, ami az Eötvös-ingánál egy tized skálarész.

A csillapodási idő két részből tevődik össze. Ha az ingát mozgásba hozzuk, pl. ha az ingát az egyik azimutból a következőbe állítjuk, akkor az inga lengőrendszere az ütközők között azokhoz ütközve és állandóan csillapodva ide-oda mozog, majd az utolsó ütközés után kizárólag a lengőrendszerre működő irányító erők és csillapító erők hatása alatt végzi mozgását. Az első részt előfázisnak nevezem. Ezalatt azt az időt értem, amely az inga mozgásba hozatalától az inga lengőjének az ütközőkkel történő utolsó ütközéséig eltelik. A második rész a főperiódus, amely az utolsó ütközéstől a nyugalmi állapot beálltáig tart.

Az előfázis egyes ingáknál 10 percig is eltart. Ez az idő csökkenthető alkalmas alakú és rugalmas tulajdonságú (papiros, parafa) ütközőkkel. Az előfázis ideje lényegesen csökkenthető a lengőrendszerek csillapítását elősegítő 117,783 számú magyar és a *2,209,140* számú amerikai szabadalmaimban ismertetett szerkezettel, amely könnyen elmozdítható ütköző, akként megszerkesztve és jellemezve, hogy a lengőrendszer ahhoz ütközve mozgási energiáját, vagy annak jelentékeny részét az ütközőnek átadja. E csillapítót alkalmazva az inga *1–2* ütközés után annyira lecsillapodik, hogy az előfázis alig egy percre zsugorodik össze.

A főperiódusban a lengőrendszer csillapított rezgő, vagy aperiodikus mozgást végez a csillapító erőknek megfelelőleg.

Lássuk mitől függ a főperiódus időtartama?

Ha a lengőrendszernek (az ingának) a nyugalmi helyzetétől mért kitérésével arányos skálaosztályzatot x-szel jelöljük, akkor az inga mozgásegyenlete:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2a\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \tag{1}$$

ahol

$$\omega_0 = \frac{\pi}{T_0},$$

amelyben T_0 az inga csillapodás nélküli lengésidejét (fél rezgésidejét) jelenti, azaz akkor, ha csillapodása nem lenne, vagyis ha $a = 0$ lenne.

E másodrendű homogén lineáris differenciálegyenlet általános megoldása:

$$x = e^{-at}\left(C_1 e^{t\sqrt{a^2-\omega_0^2}} + C_2 e^{-t\sqrt{a^2-\omega_0^2}}\right).$$

Három eset lehetséges: *1.* ha $a < \omega_0$, ha $a > \omega_0$ és *3.* ha $a = \omega_0$. Az *1.* esetben az inga csillapított rezgő, a *2.*-ban aperiodikus mozgást végez, a *3.* az aperiodikus határállapot.

1. $a < \omega_0$. Legyen:

$$\sqrt{\omega^2 - a^2} = \alpha,$$

akkor könnyen kimutatható, hogy

$$\left.\begin{aligned} x &= C\cdot e^{-at}\sin(\alpha t+\varepsilon) \\ \alpha &= \frac{\pi}{T}, \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

ahol T az inga lengésidejét, C és ε a két integrációs állandót jelenti. A (2)-ből a mozgás sebessége:

$$v = \frac{dx}{dt} = C\,e^{-at}[\alpha\cos(\alpha t+\varepsilon) - a\sin(\alpha t+\varepsilon)]. \tag{3}$$

Most tegyük fel, hogy x_0 az a kitérés, amelynél a mozgásban levő ingarúd az utolsó ütközés után először ütközés nélkül megfordul, tehát x_0 a kitérés a főperiodikus kezdetén. Ettől a pillanattól az ingára a (2) mozgásegyenlet érvényes. Ezt az időpontot időszámításunk kezdetéül válasszuk:

Tehát

$$t = 0-kor \quad x = x_0 \quad \text{és} \quad v = 0.$$

E kezdeti feltételeket (2) és (3) egyenletekbe írva kapjuk, hogy

$$x_0 = C \sin \varepsilon,$$

$$0 = C[\alpha \cos \varepsilon - a \sin \varepsilon] = \alpha C \cos \varepsilon - a x_0,$$

amelyekből

$$C = x \cdot \sqrt{\frac{a^2+\alpha^2}{\alpha^2}}, \ \mathrm{tg}\, \varepsilon = \frac{\alpha}{a}, \text{ vagy } \sin \varepsilon = \sqrt{\frac{\alpha^2}{a^2+\alpha^2}}, \ \cos \varepsilon = \sqrt{\frac{a^2}{a^2+\alpha^2}}$$

s így

$$x = x_0 \sqrt{\frac{a^2+a^2}{a^2}}\, e^{-at} \sin(\alpha t + \varepsilon).$$

E kifejezést más formában írjuk, amennyiben ebből ε–t elimináljuk. Ezért

$$x = x_0 \sqrt{\frac{a^2+a^2}{a^2}}\, e^{-at}[\sin \varepsilon \cos \alpha t + \cos \varepsilon \sin \alpha t] =$$

$$= x_0 \sqrt{\frac{a^2+a^2}{a^2}}\, e^{-at}\left[\sqrt{\frac{a^2}{a^2+a^2}} \cos \alpha t + \sqrt{\frac{a^2}{a^2+a^2}} \sin \alpha t\right],$$

$$x = x_0 \frac{1}{\alpha}\, e^{-at}[\alpha \cos \alpha t + a \sin \alpha t], \ \alpha = \frac{\pi}{T}.$$

Ez egyenletből a kitérést minden időpillanatra ki lehet számítani.
Ha

$t = 0,$	akkor	$x = x_0,$
$t = T,$	akkor	$x_1 = -x_0 e^{-aT}$
$t = 2T,$	akkor	$x_2 = +x_0 e^{-2aT}$ s í. t.

Az $x_0, x_1, x_2 \dots$ az egymást követő amplitúdók. Az m-edik amplitúdó $\vartheta = mT$ idő múlva következik be és nagysága:

$$x_m = x_0\, e^{-a\vartheta}.$$

Legyen az x_m amplitúdó az x_0-nak n-ed része, akkor

$$x_0\, e^{-a\vartheta} = \frac{x_0}{n},$$

amiből

$$\vartheta = \frac{1}{a} \ln n.$$

Ha Λ a logaritmusos csillapodás, akkor könnyen kimutatható, hogy

$$a = \frac{\Lambda}{T} \text{ és } T = T_0 \sqrt{\frac{\pi^2+\Lambda^2}{\pi^2}},$$

amelyeket felhasználva kapjuk, hogy

$$\vartheta = \frac{T_0}{\pi} \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\Lambda^2}}\, ln\, n. \tag{4}$$

Ez az egyenlet megadja, hogyan függ a csillapodási idő, ϑ, a csillapodás nélküli lengésidőtől T_0-tól és a logaritmusos csillapodástól, Λ-tól? Kiolvasható, hogy a csillapodási idő azonos körülmények között, azaz azonos Λ esetén a csillapodás nélküli lengésidővel, T_0-val arányos.

Az Eötvös-inga ütközési köze általában kb. *120* skálaosztályrész, s így x_0 maximális értéke *60*. Mivel pedig a leolvasás pontossága egy tized skálaosztályzat, azért $n = 600$. Eötvös-inga esetében n-nek ezt az értékét kell a (4) alatti kifejezésbe írni.

2. $a > \omega_0$. Kimutatható, hogy

$$\sqrt{a^2 - \omega_0^2} = \beta$$

$-t$ írva, az (1) alatti egyenlet megoldása:

$$x = C\,e^{-at} sh(\beta t + \varepsilon),$$

amiből a mozgás sebessége:

$$v = C e^{-at} [\beta/ch\,(\beta t + \varepsilon) - a\, sh(\beta t + \varepsilon)].$$

Legyen $t = 0$ – kor $x = x_0$ és $v = 0$, akkor

$$x_0 = C\, sh\, \varepsilon,$$
$$0 = C([\beta\, ch\, \varepsilon - a\, sh\, \varepsilon],$$

s így az inga mozgás-egyenlete:

$$x = x_0 \sqrt{\frac{a^2 + a^2}{2}}\, e^{-at} sh(\beta t + \varepsilon),\ tgh\, \varepsilon = \frac{\beta}{a},$$

vagy

$$x = x_0 \frac{1}{\beta}\, e^{-at} [\beta\, ch\, \beta t + a\, sh\, \beta t].$$

Így a csillapodási idő, ϑ az

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{\beta}\, e^{-a\vartheta} [\beta\, ch\, \beta\vartheta + a\, sh\, \beta\vartheta] \tag{5}$$

egyenletből határozható meg. Az inga az x_0 állásból aperiodikusan áll be az egyensúlyi állásba; ϑ idő múlva az

$$\frac{x_0}{n}$$

állásba jut.

3. $a = \omega_0$.

Ez az ún. aperiodikus határállapot. Ebben az esetben a (2) alatti differenciálegyenlet általános megoldása:

$$x = C_1 e^{-\frac{\pi}{T_0}t} + C_2 e^{-\frac{\pi}{T_0}t}.$$

Ebből a mozgás sebessége:

$$v = -C_1 \frac{\pi}{T_0} e^{-\frac{\pi}{T_0}t} + C_2\left(1 - \frac{\pi}{T_0}t\right) e^{-\frac{\pi}{T_0}t}.$$

$t = 0$-kor $x = x_0$ és $v = v_0$ érvényes értékeket helyettesítve kapjuk, hogy

$$x_0 = C_1 \qquad C_1 = x_0$$

$$0 = -C_1 - \frac{\pi}{T_0} + C_2 \qquad C_2 = \frac{\pi}{T_0} x_0,$$

s így a megoldás

$$x = x_0\left(1 + \frac{\pi}{T_0} t\right) \cdot e^{-\frac{\pi}{T_0}t}.$$

Az inga az x_0 kitérésnek n-ed részét éri el oly ϑ idő múlva, amely eleget tesz az

$$\frac{1}{n} = \left(1 + \frac{\pi}{T_0}\right) \cdot e^{-\frac{\pi}{T_0}t} \tag{6}$$

egyenletnek. Látható, hogy kisebb T_0 esetében a csillapodási idő kisebb.

Fentiekből következik, hogy ha a csillapodás nélküli állapotból kiindulva a csillapodást (a Λ értékét) növeljük, akkor (4) értelmében a csillapodási idő végtelenből kiindulva folytonosan csökken addig, amíg az aperiodikus határállapothoz (6) jutunk, innen kezdve (5) szerint a csillapodási idő a csillapodás növelésével növekszik.

A csillapodási idő csökkentése

Az előzőekben megállapítottuk a csillapodási idő és a csillapodás nélküli lengésidő közötti összefüggést, illetve összefüggéseket. Ezekből következik, hogy csillapodás szempontjából az aperiodikus határállapot a legkedvezőbb, a lengőrendszer ebben az állapotban nyugszik meg leghamarább. Ezért az Eötvös-ingát akként szerkesztjük meg, hogy az inga közel aperiodikus állapotban legyen. Ez az inga belső doboza magasságának megfelelő megválasztásával érhető el.

A csillapodási idő (4) és (6) szerint a csillapodás nélküli lengésidő kisebbítésével csökken. Ezért arra lehetne gondolni, hogy a csillapodási időt az inga méreteinek csökkentésével, a lengési idő csökkentésével lehetne kisebbíteni. De mint alább kimutatjuk, az inga szögérzékenysége az inga csillapodás nélküli lengésidejének négyzetével arányos, ezért a csillapodási idő a szögérzékenység megtartása mellett az inga méreteinek (lengésidejének) megváltoztatásával nem kisebbíthető.

Legyen ξ, η, ζ az inga lengőrendszeréhez mereven hozzákötött derékszögű koordinátarendszer, amelynek kezdőpontja a felfüggesztési ponton O-n, és a lengőrendszer súlypontján S-en átmenő egyenesben van, a ζ tengelye függélyesen lefelé mutat (az S pontban levő nehézségi erő irányával összeesik), tengelye pedig a lengőrendszer egyik szimmetriatengelyével párhuzamos.

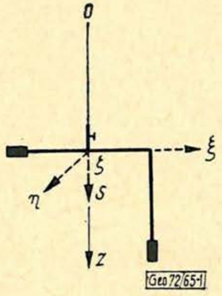
A szögérzékenység, azaz az egységnyi gradiens, – illetve görbületi – értékeknek megfelelő szögkitérés abszolút (radiál) értékben: a gradiensre

$$S_{gr} = \frac{1}{\tau} \int \xi\zeta\, dm,$$

a görbületi értékekre

$$S_g = \frac{1}{\tau} \int (\xi^2 + \zeta^2)\, dm,$$

ahol τ a torziósszál torziósnyomatékát jelenti és az integrál az egész lengőrendszerre terjesztendő ki *(1. ábra)*.



1. ábra
Фиг. 1.
Fig. 1.

Ez általánosan érvényes kifejezéseknek az eredeti Eötvös-féle lengőrendszerre való alkalmazása céljából helyezzük a ξ tengelyt az ingarúd geometriai tengelyébe.

Jelöljük továbbá a lógó súly tömegét m-mel, ennek a felső súlytól való függélyes távolságát h-val, az ingarúd karhosszát l-lel és a lengőrendszer tehetetlenségi nyomatékát K-val, akkor kimutatható (lásd az ábrát), hogy

$$S_{gr} = \frac{1}{\tau} \int \xi\zeta\, dm = \frac{m h l}{\tau},$$

$$S_g = \frac{1}{\tau} \int (\xi^2 - \zeta^2)\, dm = \frac{1}{\tau} \int (\xi^2 + \zeta^2)\, dm - \frac{2}{\tau} \int \eta^2\, dm = \frac{K}{\tau} - \frac{2}{\tau} \int \eta^2\, dm.$$

Az utóbbi kifejezésben előforduló $\int \eta^2 dm$ rúdalakú ingánál igen kicsiny a K-hoz képest, úgyhogy ezt elhanyagolva kapjuk, hogy

$$S_g = \frac{K}{\tau}.$$

Továbbá a lengőrendszer csillapodás nélküli lengésideje

$$T_0 = \pi \sqrt{\frac{K}{\tau}}.$$

Hogy a szögérzékenység és a lengésidő közötti összefüggést megállapíthassuk, vegyük tekintetbe, hogy az Eötvös-féle ingarúdnál a lengőrendszer tehetetlenségi nyomatékba nagy közelítésben a rúd végein levő tömegek tehetetlenségi nyomatékával egyenlő, azaz

$$K = 2\, ml^2$$

s így a lengésidő

$$T_0 = \pi \sqrt{\frac{2\, m l^2}{\tau}}.$$

Ennek figyelembevételével kapjuk, hogy a gradiensre nézve:

$$S_{gr} = \frac{mhl}{\tau} = \frac{1}{2\pi^2} \cdot \frac{h}{l} T_0^2,$$

a görbületi értékekre nézve:

$$S_g = \frac{K}{\tau} = \frac{\pi^2}{l} \cdot T_0^2.$$

A $\frac{h}{l}$ értéke a használatos ingáknál kb. *3*.

Ezzel kimutattuk, hogy az Eötvös-féle torziós inga *szögérzékenysége a lengésidő négyzetével arányos*.

Ha tehát az inga méreteinek megváltoztatásával a lengésidőt kisebbítjük, akkor az érzékenység is kisebbedik. Kétszer kisebb lengésidejű inga érzékenysége négyszer, háromszor kisebb lengésidejűé kilencszer kisebb. Tehát a méretek (m, l, h és τ) megváltoztatásával a lengésidőt, s így (4) és (6) szerint a csillapodási időt nem csökkenthetjük anélkül, hogy ezzel együtt a szögérzékenység ne csökkenne. Ezért csak ez az út nem vezet célhoz.

De a lengőrendszer elfordulásszögét tükörskála leolvasásával mérjük, ezért a gyakorlatban nem a szögérzékenység, hanem az a fontos, hogy mekkora az egységnyi gradiens, – illetve görbületi – értéknek megfelelő kitérés skálarészekben? Ezt az érzékenységet az inga effektív érzékenységének nevezik.

Jelöljük L-lel a skálatávolságot, akkor az effektív érzékenység egyszeri reflexiós tükörleolvasással; a gradiensre:

$$E_{gr} = 2 L S_{gr} = 2 L \frac{1}{2\pi^2} \frac{h}{l} T_0^2,$$

a görbületi értékekre:

$$E_g = 2 L S_g = 2 L \frac{1}{\pi^2} T_0^2.$$

Vagy ha az optikai leolvasás érzékenységét C-vel jelöljük, akkor általánosságban írhatjuk, hogy

$$E_{gr} = C S_{gr},$$

$$E_g = C S_g.$$

Tehát az effektív érzékenység a szögérzékenység és az optikai érzékenység szorzata.

Ez az összefüggés megadja a lehetőségét annak, hogy az inga csillapodási idejét csökkentsük anélkül, hogy ezzel együtt az inga effektív érzékenysége is csökkenne. Ezt azzal érhetjük el, hogy az inga méreteinek megváltoztatásával az inga lengésidejét kisebbítjük, vele szögérzékenységét csökkentjük, de ugyanakkor az optikai érzékenységet ugyanannyiszor nagyobbá tesszük, mint ahányszor a szögérzékenység kisebbedett. Ily módon az inga effektív érzékenysége változatlan maradt.

E gondolatmenetet a következő, gyakorlatból vett példával világítom meg:

Az „*Auterbal*” torziós inga adatai:

$$m = 15\,gr,\ h = 21\ \text{cm},\ l = 7\ \text{cm},\ \tau = 0{,}025\ \text{C. G. S.}$$

Ezekből kapjuk, hogy az inga csillapodás nélküli lengésideje:

$$T_0 = \pi \sqrt{\frac{K}{\tau}} = \pi \sqrt{\frac{2ml^2}{\tau}} = 762 \text{ sec} = 12 \text{ min. } 42 \text{ sec.}$$

A tényleges lengésidő a csillapodás miatt nagyobb.

Az inga szögérzékenysége:

a gradiensre: $S_{gr} = \dfrac{1}{2\pi^2} \dfrac{h}{l} T_0^2 = 88\,200,$

a görbületi értékekre: $S_g = \dfrac{1}{\pi^2} T_0^2 = 58\,800.$

Mivel pedig az ,,Auterbal" inga skálabeosztása 0,25 mm $= \dfrac{1}{4}$ mm, és skálatávolsága $L = 300$ mm $= 1200$ negyedmilliméter, azért optikai nagyítása: $C = 2400$, s így az inga effektív érzékenysége:

a gradiensre: $E_{gr} = 2400 \cdot 88\,200 = 0{,}21 \cdot 10^9$.

a görbületi értékekre: $E_g - 2400 \cdot 58\,800 = 0{,}14 \cdot 10^9$.

Tehát az ,,*Auterbal*" inga $\dfrac{1}{10}$ osztályzatának (ami még jól megbecsülhető)

a gradiensre: $\dfrac{1}{10} \dfrac{1}{E_g} = \dfrac{1}{10} \dfrac{1}{0{,}21 \cdot 10^9} = 0{,}5 \cdot 10^{-9}$ C. G. S. $= 0{,}5$ *Eötvös-egység*,

a görbületi értékekre: $\dfrac{1}{10} \dfrac{1}{E_g} = \dfrac{1}{10} \dfrac{1}{0{,}14 \cdot 10^{-9}} = 0{,}7 \cdot 10^9$ C. G. S. $= 0{,}7$ Eötvös-egység felel meg.

Ha már most az inga méreteit *(m, h, l ,τ)* úgy választjuk, hogy lengésideje az eredetinél kétszer kisebb legyen, azaz

$$T_0 = \frac{12{,}7}{2} = 6{,}4 \text{ min.} = 6 \text{ min. } 21 \text{ sec.},$$

akkor szögérzékenysége 4-szer kisebb lesz:

$$S_{gr} = \frac{1}{4} \cdot 88\,200 = 22\,050,$$

$$S_g = \frac{1}{4} \cdot 58\,800 = 14\,700.$$

S ha az optikai érzékenységet négyszer nagyobbítjuk, akkor az effektív érzékenység:

$$E_{gr} = 4 \cdot 2400 \frac{88\,200}{4} = 0{,}21 \cdot 10^9 \text{ C. G. S.}$$

változatlan marad. Ez esetben $\frac{1}{10}$ skálaosztályzatnak a gradiensre ugyancsak 0,5, a görbületi értékekre 0,7 Eötvös-egység felel meg.

Vagy ha sikerül az optikai érzékenységet az eredetinél pl. 8-szor nagyobbá tenni, akkor az ingát úgy méretezve, hogy szögérzékenysége az eredetinél 8-szor kisebb legyen, az inga effektív érzékenysége változatlan marad, ellenben lengés ideje:

$$T_0 = \frac{762}{8} = 269 \text{ sec} = 29 \text{ sec}$$

lesz.

Tehát az első feladat oly optikai, vagy más rendszerű leolvasó szerkezet megszerkesztése, amellyel az eredeti leolvasás érzékenysége megsokszorozható.

Erre többféle lehetőség kínálkozik. Legtermészetesebb, hogy a skálatávolságot megnöveljük. Ennek a szükséges nagyságú megnövelése azonban a készülék méreteit jelentékenyen megnagyobbítaná, ami nem kívánatos. Másik, az előzőnél előnyösebb lehetőség, hogy a skálabeosztást sűrítjük és az optikai leképezés nagyítását megfelelő mértékben megnöveljük. Ez a lehetőség célravezetőnek látszik. Harmadik lehetőség a többszörös fényreflexió alkalmazása. Ugyanis az ingarúdra erősített tükör a reá eső fénysugarat az inga elfordulása esetén kétszer akkora szöggel forgatja el, mint amekkorával az inga elfordult s így, ha a visszavert fénysugár egy oldalt elhelyezett tükörről visszaverődve ismét az ingatükörre esik és onnan visszaverődik, akkor e kétszeres reflexió folytán a tükörről kétszer visszavert fénysugár $2 \times 2 = 4$-szer akkora szöggel fordul el, mint amennyivel az inga elfordult; 3-szoros, 4-szeres reflexió esetében a visszavert fénysugár szögelfordulása hatszorosa, nyolcszorosa az ingarúd elfordulásának.

A két utóbbi lehetőséget, esetleg együttesen alkalmazva, célravezetőnek tartom. Az ingarúd elfordulásának meghatározására az optikai módszert tartom alkalmasnak, mert más jelenség felhasználásával a készüléket bonyolultabbá tesszük és új hibaforrásokat vezetünk be.

A kitűzött feladat kísérleti megoldása elé azonban igen nagy nehézségek tornyosulnak.

Az optikai leképezés céljára *igen erős fényforrás* és csakis igen nagy reflexióképességű fémbevonatú, kitűnően csiszolt síktükrök jöhetnek tekintetbe.

Egy másik igen nehéz probléma, amit meg kell oldani, a következő:

Az optikai nagyítás nemcsak a szögelfordulást nagyítja meg, de a zavaró hatásokat is, amelyeknek megszüntetése már eddig is, az egyszeres és kétszeres reflexió alkalmazása esetében is, igen sok tanulmányt és nehézséget okozott.

Ezért kitűnő, külön e célra készített oly torziósszálakra van szükségünk, amelyeknek „*járása*" és temperatúrakoefficiense nagyon kicsiny. A mai ingákhoz alkalmazott torziószálak erre a célra alkalmatlanok, mert bár ezeknek járása és temperatúrakoefficiense ezekben az ingákban nem okoz lényeges zavart, azonban a sokszoros szögnagyítással ezek is megnagyítva jelentkeznek. Ez okból a torziósszálaknak a mainál még tökéletesebb készítése és preparálása szükséges.

Ezenkívül nagy nehézséget okoz az ingaházban előálló légáramok hatásának oly mérvű csökkentése, hogy a nagy optikai nagyításnál ezek a leolvasás pontosságát meg ne haladják.

Ezért az ingaházat oly formában kell megszerkeszteni, hogy abban csakis kisfokú légáramlás jöhessen létre, a lengőrendszert pedig úgy megalkotni, hogy az a légáramlás iránt csak kismértékben legyen érzékeny, azonkívül az ingaházat az eddigieknél jobban hőszigeteléssel kell védeni, estleg termosztátba építeni.

Sok és nagy nehézséggel jár e követelmények teljesítése, de a siker reményében e vizsgálatokat el kell, végezni, mert az észlelési idő csökkentése nagy anyagi és munkamegtakarítással jár.

II. Az Eötvös-inga megbízhatósága. A torziósszálak preparálása

Az Eötvös-inga akkor megbízható, ha ugyanazon helyen történő észlelések folytatólagos ismétlésekor az inga ugyanazon azimutban ugyanabba az egyensúlyi állásba helyezkedik. Előfordul, hogy e követelmény nem teljesül. Ilyenkor az egyensúlyi állásban eltéréseket észlelünk. Megállapítható, hogy az eltérések főként két hatásból származnak; az egyik a torziósszáltól, a másik a hőmérsékletváltozáskor az ingaházban előálló légáramok hatásából ered.

A torziósszáltól származó hatás ismét két részből tevődik össze: *1.* a megterhelt torziósszál a hőmérsékletváltozáskor elcsavarodik; *2.* az inga visszaállítása (dezaretálása) után a torziósszál egyensúlyi állása egyirányban lassan eltolódik. Az utóbbi hatást a torziósszál „*járás*"-ának szokás nevezni.

1. A hőmérsékletváltozás okozta elcsavarodás a hőmérsékletváltozással arányos. Ennek a hatásnak mértéke: a torziósszál temperatúrakoefficiense. Ezalatt az *1* °C hőmérsékletemelkedés létesítette szögelfordulást értjük, amit rendesen az inga skálaosztályzatában szoktunk kifejezni. E hatás számításba vehető. Ha ugyanis ismerjük a torziósszál temperatúrakoefficiensét és a hőmérsékletváltozást, kiszámíthatjuk azt a szögelfordulást, amelyet a hőmérsékletváltozás okoz. Ezzel az észlelt egyensúlyi állások egy és ugyanazon hőmérsékletre redukálhatók.

2. Ha az ingát dezarretáljuk, akkor az addig lazán lógó torziós szálat a dezarretált lengőrendszer súlya megfeszíti, aminek következtében a torziósszál egyirányban elcsavarodik. A járás közvetlenül a dezarretálás után a legnagyobb; attól kezdve az idő elmúltával lassan folytonosan csökken, de a járás napokig, hetekig, sőt egyes száláknál még hónapokig is eltart. Újabb arretálás és azt követő dezarretálás (különösen hosszabb ideig tartó arretált állapot) után a torziósszál eme járása a megelőzőhöz hasonlóan ismétlődik.

A torziósszál az Eötvös-inga leglényegesebb része, mert ez a mérődrót, amellyel a mérések történnek. Ezért rendkívül fontos, hogy az Eötvös-ingához oly torziósszálakat használjunk, amelyeknek a fent részletezett fogyatékossága nincs meg, vagy helyesebben, amelyeknek temperatúrakoefficiense és járása kicsiny. Ezalatt azt értjük, hogy e zavaró hatások kicsinyek a meghatározandó gravitációs hatásokhoz képest. A gyakorlatban ezt elérjük, ha a temperatúrakoefficiens $0{,}15\ \dfrac{\text{skálarész}}{1\ °\text{C}}$-nál kisebb, s a *járás kicsiny és egyenletes.* Az egyenletes járás esetében ugyanis a járásból származó hatások a gravitációs értékeket meghatározó észlelési formulákból teljesen kiesnek, mert azokban kizárólag csakis az egyensúlyi állásoknak és a torziósszál megcsavaratlan állásának különbségei $(n-n_0)$ szerepelnek. Egyenletes járásnál a megcsavaratlan és az egyensúlyi álláseltolódás ugyanekkora, s így a kettő különbségéből a járás teljesen kiesik. Ezt az alábbiakban jobban megvilágítom.

A járás miatt az észleléseket legalább két azimutban megismételjük: legalább öt észlelést végzünk. Legyenek az egymást követő *I*, *II*, *III* azimutban egyenlő időközökben észlelt leolvasások w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 (a táblázat *1*-ső és *2*-ik oszlopa).

Azimut:	Leolvasások:	A torziósszál megcsavaratlan állása:	$w-w_0$
I	$w_1 = n_1$	$(w_0)_1 = n_0$	$w_1-(w_0)_1 = n_1-n_0$
II	$w_2 = n_2+\delta$	$(w_0)_2 = n_0+\delta$	$w_2-(w_0)_2 = n_2-n_0$
III	$w_3 = n_3+2\delta$	$(w_0)_3 = n_0+2\delta$	$w_3-(w_0)_3 = n_3-n_0$
I	$w_4 = n_1+3\delta$	$(w_0)_4 = n_0+3\delta$	$w_4-(w_0)_4 = n_1-n_0$
II	$w_5 = n_2+4\delta$	$(w_5)_5 = n_0+4\delta$	$w_5-(w_0)_5 = n_2-n_0$

Ezekből kiszámítjuk a következő értékeket:

$$\frac{w_4-w_1}{3} = \delta,$$

$$\frac{w_5-w_2}{3} = \delta.$$

Ez értékek az egymást követő észlelések közötti járást adják. Ha mind a két tört értéke ugyanaz, akkor a járás egyenletes. Egyenletes járás esetén az egyensúlyi állás egy észlelési időköz alatt δ-val tolódik el. Ezért, ha a járás nélküli (ismeretlen) egyensúlyi állásokat n_1, n_2, n_3-mal, a hozzájuk tartozó megcsavaratlan állást n_0-val jelöljük.

$$n_0 = \frac{n_1+n_2+n_3}{3},$$

akkor $w_1 = n_1$, $w_2 = n_2+\delta$, $w_3 = +2\delta$ s. i. t. (a táblázat 2-ik oszlopa).

Ha járás nincs, akkor valamennyi észlelési időpontban n_0 ugyanaz. Járás esetén azonban a megcsavaratlan állás egy észlelési időközben δ-val tolódik el. Mi a megcsavaratlan állás az egyes észlelési időpontokban? Mivel a járás egyenletes, azért a

$$\frac{w_1+w_2+w_3}{3} = \frac{n_1+n_2+\delta+n_3+2\delta}{3} = \frac{n_1+n_2+n_3}{3}+\delta = n_0+\delta = (w_0)_2$$

a w_2 észlelésekor érvényes megcsavaratlan állás $(w_0)_2$. A járás miatt a w_1 észlelésekor a megcsavaratlan állás $(w_0)_2$-nél δ-val kisebb, tehát $(w_0)_1 = n_0$ a w_3 észlelésekor (w_0)-nél δ-val nagyobb, azaz $(w_0)_3+2\delta$ (a táblázat 3-ik oszlopa). Így az észlelt w és a megcsavaratlan állás w_0 közötti különbség, amely az észlelési formulában szerepel: $n-n_0$ (a táblázat 4-ik oszlopa). Tehát a járás teljesen kiesik.

Ha a járás nem egyenletes, akkor befolyásolja az eredményeket. Ezért rendkívül fontos járásmentes, vagy legalábbis kis és egyenletes járású torziósszálak alkalmazása.

Az általunk preparált torziósszálak e követelményeknek nagymértékben megfelelnek úgy, hogy a járásból származó hatások lényegesen nem befolyásolják az eredményeket.

A torziósszálak minden előzetes preparálás nélkül nem használhatók, mert temperatúrakoefficiensük és különösen járásuk rendesen nagy és nem egyenletes.

Eötvös óta a torziósszálak e hátrányos tulajdonságait azzal csökkentették, hogy a torziósszálakat megterhelve kiizzították, s utána külön erre a célra alkalmas berendezésben sokszor egymásután kb. *110 °C* hőmérsékletig felmelegítették és lehűtötték. Az így preparált szálak közül az ún. próbaeszközökben kiválasztották azokat a szálakat, amelyeknek járása és temperatúrakoefficiense kicsiny.

Ezen eljárással a preparált szálak között még mindig csak csekély számban akadt megfelelő.

Hosszú kísérletezések alapján az alábbi eljárást találtam a torziósszálak preparálására alkalmasnak.

Vizsgálataim folyamán megállapítottam, hogy ha több száz méter hosszú, alkalmas vastagságú hajszáldrótból folytatólagosan a megfelelő hosszúságú célunknak megfelelő *20 cm* hosszúságú száldarabokat lemetszünk és ezek járását meghatározzuk, akkor az egymás után folytatólagosan következő *20 cm*-es szálak járása egyirányú, ezután ellenkező irányúak következnek, majd a járás iránya ismét megfordul, s. i. t. Vagyis: a hosszú hajszáldrót egyes szakaszai egyik irányú, más szakaszai ellenkező irányú járással bíró torziósszálakat adnak. Ez a tapasztalat a hajszáldrótok húzásának technológiáját figyelembe véve ahhoz a következtetéshez vezetett, hogy a hajszáldrót húzása közben szerzi meg „*járási*"-i tulajdonságát. Ez a tapasztalat és az ebből levont következtetés vezetett arr a agondolatra, hogy a torziósszálak preparálását a szál húzásához analóg módon végezzem úgy, hogy a torziósszálat izzítva megnyújtsam, mert azt véltem, hogy e művelettel a húzással megcsavart molekulasorokat bizonyos fokig kiegyenlítem. E célból a torziósszálat külön e célra készült készülékben felfüggesztettem és megfelelő súllyal megterheltem. Ezután a torziósszálat megcsavaratlan vagy közel megcsavaratlan állapotában rövid ideig tartó elektromos árammal megnyújtottam hosszának *1*%-val. A megnyúlást kathetométerrel figyeltem és ellenőriztem.

A preparálás céljára használt készülék kb. *5 cm* átmérőjű, kellő hosszúságú üvegcső, egyik végén beköszörült torziófejjel. A csövet függélyesre állítva alsó nyitott vége higanyba merül. A torziófejre függesztettem a preparálandó szálat, a szál alsó végére pedig hengeralakú sárgaréz súlyt akasztottam, amelynek tengelyébe forrasztott kb. *1 mm* vastag vasdrót a higanyba nyúlt. A megterhelés a szál vastagságától függ, kb. a szál szakítási szilárdságának egy negyede. A csövön át *30*%-os nitrogén-hidrogén gázt kis nyomás alatt egyenletesen áramoltattam. A gáz a csőbe lépése előtt rézforgáccsal megtöltött és vörösizzásig felhevült kvarc-csövön áramlott keresztül az oxigén-nyomok eltávolítása céljából.

Miután a torziósszál megcsavaratlan állását elfoglalta, a szálon (a torziófejen és a higanyon) át rövid áramlökést küldöttem keresztül akkora maximális erősséggel, hogy a szál *1–2 mp*-ig teljes hosszában sárga színben (becslésem szerint talán *800–1000 °C* hőmérsékleten) izzon. A maximális áramerősség a szál vastagságától függ.

A szál az izzítás közben teljes hosszában megnyúlik, hosszabb ideig tartó izzítás közben közepe táján valamivel jobban. Ezért a szálat csak igen rövid ideig tartó áramlökéssel izzítottam. Fontos, hogy a szál kellő hosszra való megnyújtása egyszeri izzítással megtörténjék. Ismételt izzítás hátrányos, a szál járási tulajdonságait rontja, valószínűleg azért, mert a szál az izzítás közben kissé kicsavarodik, s az újabb izzítás alkalmával a már az előző izzításkor egyirányba elrendeződött molekulasorokat az elcsavarodás miatt részben más elrendeződésbe kényszeríti.

A preparálási műveletek végrehajtásához nagy gyakorlat kell, mert kellő gyakorlat nélkül az izzításnál sok szál elszakad.

Az így preparált szál már külső megjelenésében is a nem preparált szálnál előnyösebbnek látszik. Amíg az így nem kezelt szál kunkorodó, spirálisszerű, addig a megnyújtott szál laza állapotában is egyenes, kunkorodásai eltűntek és merevebb. De nem ez a külső látszat, hanem az ily módon preparált torziósszálaknak a próbaeszközben történt megvizsgálása bizonyította e preparálási módnak helyességét és jóságát. Az így preparált torziósszálak között szép számban találtam kis temperatúrakoefficiensű és kis járású szálakat.

Amint fentebb láttuk, ahhoz, hogy az Eötvös-féle torziós-inga megbízható legyen, nem elégséges jó torziósszálak alkalmazása, hanem szükséges, hogy az ingaházban a légáramoknak a hatása is elenyésző csekély legyen. E hatás különösen a hőmérsékletváltozás irányának megfordulásakor okoz zavart. E zavaró hatás minden még be nem szabályozott ingában többé-kevésbé megvan, egyesekben igen nagy mértékben. E légáramhatás az ingák egyedi tulajdonsága, a különböző ingákban más és más, még a kettős Eötvös-inga összeépített két ingájának viselkedése is különböző. E zavaró hatás kiküszöbölése, illetve a minimumra való csökkentése „*szabályozás*”-sal történik, még pedig úgy, hogy először a szóban forgó ingaházban előálló légáramlást kell megvizsgálni, azután a nagy tapasztalattal szerzett ismeretekkel már megismert légáramlást alkalmas alakú és az ingaházban alkalmas helyen elhelyezett terelő lapokkal „*légkorlátok*”-kal kell irányítani úgy, hogy a légáramok hatása az ingára elhanyagolható legyen. E szabályozás nélkül az ingák rendszerint teljesen megbízhatatlan értékeket adnak. E szabályozás részleteivel ezen a helyen nem óhajtok foglalkozni.

A jó torziósszálakat tartalmazó és jól beszabályozott Eötvös-ingák a leghátrányosabb időjárási viszonyok között is megbízható észlelési értéket adnak

---

Lapszemle

Wissenschaftlich-Technischer Informationsdienst, kiadja a Központi Geológiai Intézet, Berlin, 5–6. különfüzet. 1–59. és 1–128. oldal. Sokszorosított kiadvány. A két füzet az 1969. október 26–30. között Lipcsében tartott Nemzetközi Geofizikai Szimpózium 18 előadását tartalmazza. Az 5. füzet címlapján *3. Nemzetközi Geofizikai Szimpóziumról* van szó és a G. Löser – G. Olszak által írott előszó is így említi a szimpóziumot, nem véve tudomást az immár több mint egy évtizedre visszamenő sorozatról! A cikkek csak német szöveggel szerepelnek.

Az 5. füzet – az előszón kívül – 6 cikket tartalmaz, valamint a később közzéteendő 24 dolgozat címét. Ezekből a 6. füzet 12-nek a szövegét hozza; mindkettő ábrákat is közöl. A cikkek nyelve német. Az 5. füzet 1970-ben, a 6-os 1971-ben jelent meg, mint a főcímben említett kiadvány 1970. évf. 11., illetve 1971. évf. 12. sz. füzete.

T. G.