Állóhullámok megfeszített, rugalmas húrban

A mérés célja:
- az állóhullámokkal kapcsolatos ismeretek elmélyítése,
- az állóhullámokra és a hullámterjedésre vonatkozó legfontosabb összefüggések kísérleti ellenőrzése.

A cél érdekében:
- összefoglaljuk az állóhullámokra vonatkozó alapvető ismereteket,
- megvizsgáljuk egy mindkét végén rögzített húrban kialakuló állóhullámokat,
- hullámhossz- és frekvenciamérésekkel meghatározzuk a húrban a hullám terjedési sebességét, és annak függését a húr jellemző adataitól.

1. Elméleti összefoglaló

Kísérleteink során mindkét végén rögzített húrban terjedő hullámokat vizsgálunk. A hullám leírásánál feltételezzük, hogy a hullámterjedés egydimenziósnak tekinthető (a hullám a húr mentén terjed), a hullám transzverzális (a húr pontjainak elmozdulásvektorai a húrra merőlegesek) és síkban polarizált (a pontok elmozdulásvektorai mindig ugyanabban a síkban vannak). Ez azt jelenti, hogy a húr pontjainak az egyensúlyi helyzetből való kitérése (elmozdulása) egyetlen skaláris mennyiséggel jellemezhető. A hullám leírására a fentiek alapján a húrral párhuzamosan választott x-tengely esetén a

$$c^2 \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial t^2}, \qquad (1)$$

egydimenziós hullámegyenletet használhatjuk. Itt x a koordináta, t az idő, $\Psi(x,t)$ a kitérés hely- és időfüggését megadó - tehát a hullám terjedését leíró - hullámfüggvény, c pedig a hullám terjedési sebessége a húron. Ha a hullámegyenletet a húr esetére levezetjük, akkor kiderül, hogy a c terjedési sebessége a húrt megfeszítő erőtől (F) és a húr egységnyi hosszára jutó tömegtől (μ) függ, és ezekkel az alábbi módon fejezhető ki

$$c = \sqrt{\frac{F}{\mu}}\,. \qquad (2)$$

A húrban valamilyen külső gerjesztés hatására kialakuló hullám általában igen bonyolult. Tapasztalatból tudjuk azonban, hogy meghatározott frekvenciákon történő gerjesztés esetén a húron, a végekről visszaverődő hullámok interferenciája révén sajátos, állandósult hullámalakzat - ún. állóhullám - jön létre. Ennek jellegzetessége az, hogy a húr meghatározott szakaszán levő pontok azonos fázisban rezegnek, a rezgés amplitúdója pedig a hely függvénye. Ez matematikailag úgy fogalmazható meg, hogy az (1) egyenletnek létezik olyan megoldása, amely egy csak helytől és egy csak időtől függő függvény szorzata [az (1) parciális differenciálegyenletben a változók szeparálhatók]. Harmonikus gerjesztés esetén ez a megoldás a

$$\psi(x,t) = \varphi(x)\sin(\omega t + \alpha) \qquad (3)$$

alakban írható fel, ahol $\omega = 2\pi\nu$ a rezgés körfrekvenciája (ν frekvencia, Hz), α pedig a fázisszög.

A (3) megoldást az (1) egyenletbe helyettesítve az időfüggő rész kiesik, a helyfüggő részre pedig - amely a rezgés amplitúdójának a húr mentén való változását adja meg - az alábbi közönséges másodrendű differenciálegyenletet eredményezi:

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} + k^2\varphi(x) = 0\,. \qquad (4)$$

Az egyenletben bevezettük a k hullámszámot, amelyet a $k = \omega/c$ összefüggés definiál.

A (4) egyenlet általános megoldása

$$\varphi(x) = A\sin(k\,x) + B\cos(k\,x), \qquad (5)$$

ahol A és B tetszőleges állandók, melyeket a konkrét fizikai feltételek határoznak meg. Esetünkben az egyik ilyen feltétel az, hogy a húr két vége rögzített, ami azt jelenti, hogy itt a kitérés mindig nulla. Emiatt a matematikailag lehetséges (5) általános megoldásnak csak olyan alakjai lehetnek elfogadhatóak, amelyekre fennáll, hogy

$$\varphi(0) = 0, \qquad (6a)$$

$$\varphi(L) = 0, \qquad (6b)$$

(koordinátarendszerünk kezdőpontja a húr egyik vége, így a másik végpont koordinátája L, a húr hossza).

Könnyen belátható, hogy a (6a) határfeltétel csak B = 0 esetén elégíthető ki, vagyis a megoldás csak egy

$$\varphi(x) = A\sin(k\,x) \qquad (7)$$

típusú függvény lehet, de a (6b) feltétel miatt ez is csak akkor, ha a k hullámszám értéke a

$$k_n = n\,\frac{\pi}{L}\,, \quad (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad (8)$$

összefüggéssel meghatározott értékeket veszi fel.

Mivel a k hullámszám a λ hullámhosszal egyértelmű kapcsolatban van ($k = 2\pi/\lambda$), a (8) feltétel azt jelenti, hogy állóhullám csak meghatározott

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad (9)$$

hullámhosszak esetén jön létre. Ez a $\nu = c/\lambda$ összefüggés miatt egyben azt is jelenti, hogy meghatározott c terjedési sebességgel [ami húrnál a (2) egyenlet miatt meghatározott feszítő erőt és lineáris sűrűséget jelent] a húr ν rezgési frekvenciája sem lehet tetszőleges, hanem csak a

$$\nu_n = n\,\frac{c}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad (10)$$

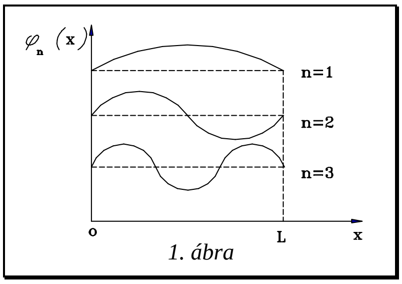
értékeket veheti fel. Ezek a frekvenciák a húr rezonanciafrekvenciái.

A fentiek alapján a határfeltételeket kielégítő megoldások az alábbi alakban írhatók fel

$$\varphi_n(x) = A_n \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (n = 1,2,3, \ldots) \qquad (11)$$

Az A_n állandót - vagyis az amplitúdó maximális értékét - a gerjesztés körülményei (a kezdeti feltételek) határozzák meg, ez azonban vizsgálataink szempontjából érdektelen. Feltételezve, hogy a húrban egyetlen n értéknek megfelelő állóhullám-alakzat jött létre, az (1) egyenlet megoldása végül az alábbi módon irható fel

$$\psi_n(x,t) = A_n \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_n}x\right)\sin(\omega_n t + \alpha_n), \qquad (12)$$



1. ábra

ahol n ismét tetszőleges egész szám. A létrejött állóhullám lehetséges amplitúdó-eloszlásait a (11) megoldás adja meg. A megfelelő - csomópontokat és duzzadóhelyeket tartalmazó - amplitúdóeloszlások az 1 ábrán láthatók néhány n érték esetén. A (11) egyenletből az is látszik, hogy adott n esetén a csomópontok egymástól mért d_n távolsága

$$d_n = \frac{L}{n} = \frac{\lambda_n}{2}. \qquad (13)$$

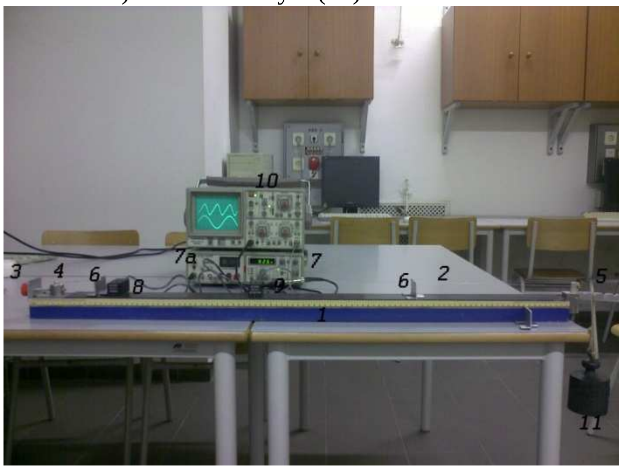
A különböző n értékekhez a (10) összefüggésnek megfelelően - különböző frekvenciák ill. hangmagasságok tartoznak. A szokásos elnevezés szerint az n = l értékhez tartozó frekvencia a húr alaprezgése, míg a magasabb értékekhez tartozók a felharmonikusok.

A rezgő húr a levegőben longitudinális mechanikai hullámot kelt, ezt nevezzük hangnak, amennyiben frekvenciája az emberi fül érzékelési tartományába esik. Tehát a húr rezgését egy közvetítő közeg által halljuk, de az egyszerűbb megfogalmazás miatt szokás a húr hangjáról beszélni. Itt jegyezzük meg, hogy egy húr szokásos gerjesztésekor (pl.: pengetéssel, vonóval) általában sok lehetséges rezgési forma jelenik meg egyidejűleg. [Matematikailag ez azt jelenti, hogy a hullámegyenlet megoldása az egyes rezgési formákhoz tartozó (12) típusú megoldások összege.] Egy húrnak azért lehet mégis meghatározott hangmagassága, mert az alaphang amplitúdója rendszerint sokkal nagyobb, mint a felharmonikusoké. Mindig megszólalnak azonban a felharmonikusok is: ezek határozzák meg a húr hangjának hangszínét. Ezért tudjuk megállapítani, hogy egy adott magasságú hangnak milyen hangszer a forrása.

Méréseink során harmonikus (szinuszos) gerjesztést alkalmazunk, ezért a húrban a frekvencia megfelelő megválasztásával különböző n értékekhez tartozó állóhullám-formákat tudunk létrehozni. Mivel azonban a gerjesztés meglehetősen bonyolult folyamat, a létrejött hullámalakzat meghatározásánál legyünk óvatosak és azt ne a gerjesztő rezgés frekvenciája alapján, hanem közvetlen mérés útján próbáljuk azonosítani. A gerjesztés során ugyanis - minden igyekezetünk ellenére - a húrban több rezgési forma gerjesztődik és előfordulhat, hogy ezek közül nem a gerjesztő rezgés frekvenciájának, hanem valamelyik felharmonikusának megfelelő forma válik dominánssá. Így a gerjesztett rezgés frekvenciája a gerjesztő frekvencia egészszámú többszöröse is lehet.

2. A mérőberendezés és használata

A mérőberendezés (2. ábra) egy alaplapra (1) szerelt, megfeszített acél húr (2), melynek végei egy csavarral (3) mozgatható alumínium tömbhöz (4) ill. a kétkarú emelőhöz (5) csatlakoznak. A húrhosszúság csúsztatható támaszokkal (6) szabályozható. A rezgést egy függvénygenerátorral (7) és teljesítményerősítővel (7a) meghajtott gerjesztő tekercs (8) hozza létre mágneses csatolás révén, melynek hatására transzverzális- és gyakorlatilag síkban polarizált hullámok keletkeznek a húron. A létrejövő rezgést egy detektor-tekerccsel (9) észleljük, melynek jelét (a gerjesztő jellel együtt) kétsugaras oszcilloszkópon (10) jelenítjük meg. A húrt feszítő erőt az (5) emelő megfelelő karjára (a hosszabb, a használat során a vízszintes kar) akasztott súllyal (11) hozzuk létre.



2. ábra

A húr rögzítése: Az (5) emelő karján levő résbe a húr egyik végét úgy helyezzük be, hogy a rajta levő sárgaréz bütyök megakadjon, a másik végén levő fület pedig a (4) tömbön levő csavarra akasztjuk. Ehhez a tömböt a (3) csavarral a szükséges mértékben elmozdítjuk. Ezután ugyanezen csavarral a húrt megfeszítjük, úgy hogy az emelő erőkarja vízszintes legyen.

A berendezéssel a mérés szempontjából fontos paraméterek az alábbi módon változtathatók:

- A húr vizsgált hosszát a (6) támaszok eltolásával változtathatjuk.
- A húrt feszítő erő az erőkarra akasztott tömeg helyének (az erőkar hosszának) változtatásával szabályozható. Az emelő kialakítása olyan, hogy a feszítő erő éppen a felakasztott tömeg súlyával egyezik, ha az a tengelytől számított első vájatban van, az erő kétszeres, ha második vájatban van, háromszoros, ha a harmadik vájatban van stb. (A súly felhelyezése után a (3) csavarral mindig állítsuk be az erőkar vízszintes helyzetét).
- A húr egységnyi hosszra eső tömegét a húr kicserélésével tudjuk változtatni. Az egyes húrok μ értéke az átmérő méréséből (csavarmikrométer) az acél ismert (7800 kg/m^3) sűrűségének felhasználásával számolható ki.
- A húron létrejövő állóhullám alakzatot a függvénygenerátor frekvenciájának változtatásával módosíthatjuk.

A mérés során a függvénygenerátort szinuszos rezgésre állítsuk, a gerjesztő tekercset pedig az egyik támaszhoz közel (kb. 5 cm) helyezzük el (leghatékonyabban csomópont közelében működik)! A függvénygenerátor jelét egy teljesítményerősítőbe vezetjük, ennek kimenetéhez csatlakoztatjuk a gerjesztő tekercs banándugó csatlakozóit. A detektor tekercset kezdetben a vizsgált húrszakasz közepe tájához tegyük, majd a feladatnak megfelelően változtassuk meg helyét. (A detektor a legnagyobb jelet a duzzadóhely közelében adja.) A detektor tekercs BNC csatlakozóját az oszcilloszkóp CH2 bemenetéhez csatlakoztatjuk.

A különböző állóhullám alakzatok (rezonanciák) keresésekor a gerjesztő frekvenciát kb. 50 Hz-től kezdve lassan növeljük, közben figyeljük a detektor jelét és a húr hangját: stabil állóhullám alakzat (rezonancia) elérésekor a jelnek és a hang erősségének maximuma van. Ha a jel kicsi, először próbáljuk a detektor tekercset elmozdítani, ha ez sem segít, akkor növeljük a gerjesztő jel amplitúdóját. Ügyeljünk arra, hogy a teljesítményerősítőn levő piros LED, ami a túlvezérlést jelzi, ne világítson! A maximum észlelése után a detektort húzzuk végig a húr mentén, és a jel-amplitúdó helyfüggéséből állapítsuk meg az állóhullám jellegét és a hozzátartozó *n* értékét. Ha túl nagy a meghajtás, a húr hozzáérzet a gerjesztő tekercshez (kopog), ilyenkor a függvénygenerátoron csökkenteni kell kimenő jel amplitúdóját.

Az állóhullám frekvenciáját mindig a detektor jelének vizsgálatával határozzuk meg: az oszcilloszkók CH1 bementére a függvénygenerátor jelét, vagyis a gerjesztő jelet csatlakoztatjuk, a CH2-n a detektor jele van, így a két jel frekvenciájának azonossága vagy különbözősége jól látható.

Mérési felszerelés:

Állóhullám berendezés (húr befogó + feszítő, gerjesztő és érzékelő tekercs), hanggenerátor, teljesítményerősítő, kétsugaras oszcilloszkóp, kábelek, terhelő súly.

Mérési feladatok:

1. Állítsa be a 60 cm-es húrhosszúságot, majd feszítse meg a húrt kb. 60 N erővel (pl. 2 kg tömeget az emelő erőkarjának harmadik vájatába akasztva)!
   A gerjesztő frekvencia változtatásával állítsa elő az első három (n = 1, 2, 3) állóhullám alakzatot! Mindegyiknél mérje meg a frekvenciát, az egyes csomópontok és duzzadóhelyek koordinátáit (pl. a húr egyik végétől mérve) és a **mért koordináták** alapján állapítsa meg az állóhullám hullámhosszát! Az eredményeket foglalja táblázatba! Ellenőrizze, hogy teljesül-e a (9) összefüggés!

2. Ábrázolja az egyes állóhullám-alakzatok frekvenciáját (ν_n) az alakzat n sorszámának függvényében, és illesszen egyenest a pontokra! Mérje meg a húr hosszát, majd az egyenes meredekségéből számítsa ki a hang c terjedési sebességét a húrban! Vesse össze az értéket a (2) összefüggésből számolt hangsebességgel!

3. Állítsa elő az n = 1-hez tartozó állóhullámot változatlan feszítő erő, de négy másik hosszúság esetén is, és mindegyik esetben mérje meg a rezgés frekvenciáját! Ábrázolja a frekvenciát a húr hosszúság reciprokának függvényében, majd illesszen a mérési pontokra egyenest! Határozza meg ismét a hang terjedési sebességét, és vesse össze a korábban kapott értékekkel!

4. Kiválasztva az egyik húrt, állítson be kb. 60 cm-es húrhosszúságot, akasszon egy súlyt az emelő erőkarjának első vájatába, majd a gerjesztő frekvencia változtatásával állítsa be az első állóhullám alakzatot (n = 1)! Mérje meg az állóhullám hullámhosszát és frekvenciáját és a $c = \lambda\,\nu$ összefüggés alapján számítsa ki a hang terjedési sebességét a húrban! Készítsen táblázatot és írja be a F feszítő erő, a μ lineáris sűrűség, a ν alapfrekvencia és a c terjedési sebesség értékeit! Ismételje meg a mérést még négy különböző feszítő erővel (a súlyt helyezze egyre távolabb az emelő tengelyétől) és írja be ismét az adatokat a táblázatba! Ezután közepes feszítő erőnél ismételje meg a mérést a mérőhelyen található többi húrral, és ismét írja be az adatokat a táblázatba!

5. Az 4. pontban kapott táblázat alapján ellenőrizze a (2) egyenletet! (Az egyenlet szerint <u>állandó</u> μ mellett a $c \sim T^{1/2}$ összefüggés lineáris, <u>állandó</u> F mellett pedig a $c \sim \mu^{-1/2}$ összefüggés lineáris.) Ha a táblázat alapján elkészítjük ezeket a grafikonokat, akkor a pontoknak egy egyenesen kell lenniük és a meredekség az első esetben $\sqrt{1/\mu}$ második esetben pedig $\sqrt{F}$

A kényszerrezgés vizsgálata

A harmonikus rezgés alapvető fizikai jelenség. Vibrációk, oszcillációk harmonikus rezgéssel modellezhetők, ha az amplitúdók elég kicsinyek. A harmonikus mozgás differenciálegyenlete nem csupán a klasszikus fizikában (mechanika, villamosságtan), de a kvantumfizikában, szilárdtestfizikában, és optikában is gyakran előfordul.

1. Elméleti összefoglaló

1.1 Csillapítatlan rezgések

Ha egy *m* tömegű anyagi pontra rugalmas erő hat, akkor a mozgásegyenlet $ma = -Dx$ alakú, ahol *D* a rugóállandó, *x* a tömegpont kitérése az egyensúlyi helyzetből, *m* a tömeg, és *a* a gyorsulás.

A mozgásegyenlet megoldása

$$x(t) = A\sin(\omega_o t + \alpha)\,, \tag{1}$$

ahol *A* a kitérési amplitúdó, α a fázisállandó, vagy kezdőfázis,

$$\omega_o = \sqrt{\frac{D}{m}} \tag{2}$$

a csillapítatlan rezgő rendszer körfrekvenciája ($\omega_0 = 2\pi f_0$, ahol f_0 a megfelelő frekvencia). A harmonikus rezgőmozgás sebessége

$$v = \frac{dx(t)}{dt} = A\omega_o\cos(\omega_o t + \alpha)\,, \tag{3}$$

ahol $A\omega_0$ a maximális sebesség, a sebesség-amplitúdó.

1.2 Csillapodó rezgések

A csillapodást okozó erők gyakran a sebességgel arányosak. Ekkor a tömegpont mozgásegyenlete: $ma = -Dx - kv$, ami a $\delta = k/2m$ csillapodási tényező (*k* a súrlódásra jellemző mennyiség) és (2) felhasználásával az alábbi alakra hozható:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2\delta\frac{dx(t)}{dt} + \omega_o^2 x = 0\,. \tag{4}$$

A differenciálegyenlet megoldása $\omega_0^2 \geq \delta^2$ esetén időben csökkenő amplitúdójú lengéseket eredményez:

$$x(t) = A\exp(-\delta t)\sin(\omega' t + \alpha).$$

A rezgés körfrekvenciája

$$\omega' = \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2}\,. \tag{5}$$

Az amplitúdó változás jellemzésére különböző mennyiségeket használnak. A csillapodási hányados két, azonos irányban egymás után következő amplitúdó hányadosa: $K = x_n/x_{n+1} = \exp(\delta T)$, ahol $T = 2\pi/\omega'$. Használatos még a *K* csillapodási hányados logaritmusa, az ún. logaritmikus dekrementum:

$$\Lambda = \ln K = \delta T. \tag{6}$$

1.3 Kényszerrezgések

Egy *m* tömegre motor és excenter segítségével időben periodikusan változó erőt alkalmazva egy átmeneti időszak után időben állandósult rezgés alakul ki, melynek frekvenciája megegyezik a kényszerítő erő frekvenciájával míg amplitúdója függ az erőtől, a rugóállandótól, a tömegtől, a csillapítástól valamint a gerjesztő frekvenciától. Az anyagi pont mozgásegyenlete ekkor: $ma = -Dx - kv + F_o \sin \omega t$. Az (1) egyenletnél bevezetett jelöléseket alkalmazva másodrendű lineáris, inhomogén differenciálegyenletet kapunk:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2\delta\frac{dx(t)}{dt} + \omega_o^2 x = \frac{F_o}{m}\sin(\omega t)\,, \tag{7}$$

ahol F_o a kényszererő maximális értéke. Az egyenlet megoldása:

$$x = A\exp(-\delta t)\sin(\omega' t + \alpha) + \\ + \frac{F_o}{m\sqrt{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}}\sin(\omega t + \varphi) \tag{8}$$

melynek második tagja írja le az állandósult állapotot. A φ fázisállandó nem az időmérés kezdetétől függ, hanem a kényszerítő erő fázisától való eltérés. Az állandósult állapot amplitúdójának maximuma van az

$$\omega_{max} = \sqrt{\omega_o^2 - 2\delta^2} \tag{9}$$

frekvenciánál, míg a fázisállandó

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{2\delta\omega}{\omega_o^2 - \omega^2}\,. \tag{10}$$

A kényszerrezgés energiaviszonyainak jellemezésére az egy periódus alatt disszipált energia $\langle W\rangle$ és a rendszerben tárolt átlagos energia $\langle P\rangle$ hányadosával arányos *jósági tényező*t használjuk

$$Q = 2\pi\frac{\langle W\rangle}{T\langle P\rangle} = \frac{\omega_o}{2\delta}\,. \tag{11}$$

2. A kísérleti berendezés leírása.

A kísérleti berendezés az 1. fénykép látható. Az alul elhelyezkedő elektronikai egység hátsó lapján található a kényszererőt létrehozó excenter.

1. fénykép

A kényszererő amplitúdója az amplitúdó-rúd helyzetének változtatásával szabályozható, ami a kényszert kifejtő zsinór rögzítési pontja és az excenter középpontja közötti távolságot befolyásolja (2. fénykép).

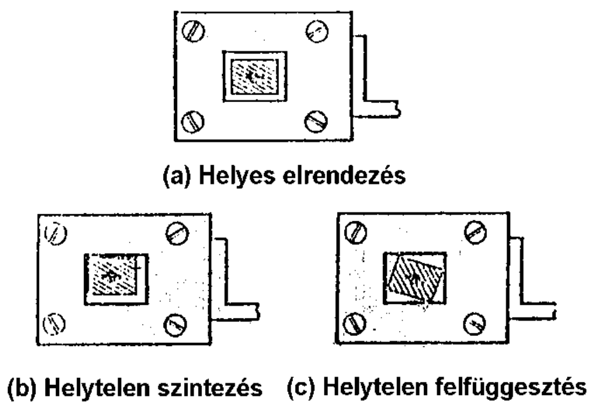

2. fénykép

A kényszert továbbító zsinór a tartóoszlop tetején található két csiga vájatain áthaladva egy hurokkal kapcsolódik a vizsgálandó rugó egyik végéhez. A rugó másik véghez a skálával ellátott mérőrúd csatlakozik. Ez a rúd a rezgőmozgást végző “alaptömeg”, melynek értéke 50 g.

A mérőkészlethez tartozik még egy 50 g tömegű rézkorong is. A korongot a mérőrúd felső végére lehet elhelyezni. A tartóoszlop középmagasságánál látható a rúdvezető, mely megakadályozza, hogy a rezgés során esetleg oldalirányba nagyon kilendüljön a rendszer. A mérőrudat a rúdvezető téglalap alakú nyílásán kell átvezetni.

A rúd mozgását ultrahangos távolságmérővel mérjük. A mérőfejet a mérőrúd alá, az asztalra helyezzük. Annak érdekében, hogy a kevéssé zajos jelet kapjunk, a mérőrúd aljára vékony kis rézkorongot ragasztunk, így nagyobb felületről verődik vissza az ultrahang. A mérőfej adatait USB porton keresztül visszük egy számítógépbe, ahol a Logger Lite 1.4 adatgyüjtő és kiértékelő szoftver megjeleníti a kapott értékeket. A szoftver szokásos ablakos menürendszerű, kezelése pár perc alatt elsajátítható.

A hajtótengelyre szerelt mutató egy optokapu fényútját keresztezi, így fordulatonként egy elektromos impulzust kapunk, amit egy feszültségmérő interfész USB porton keresztül juttat a számítógépbe. Ezt a jelet az amplitúdó értékkel együtt jelenítjük meg a képernyő. A két jel fázisának összevetéséből a kényszerrezgést jellemző fáziskülönbség leolvasható.



3. ábra

Helyes beállítás után a rezgés csillapodása - melyet a légellenállás ill. a berendezés egyes elemei között fellépő súrlódás okoz - igen kicsi. Ezért a csillapítás változtatása (növelése) céljából a kővetkezőképpen járhatunk el:

A rúdvezető alá egy U alakú tartóelemet szerelünk, amin két állítható tárcsa van. A tárcsákra korong alakú mágneseket helyezünk. (3. fénykép)


3. fénykép

Ezen mágnespofák között mozog az alumíniumból készült mérőrúd. A mágneses tér hatására a mozgó fémrúdban örvényáramok keletkeznek, melyek Joule-hőjének disszipációja okozza a rendszer csillapodását. A mágnespofák közötti távolság csökkentésével a mágneses térerősség növelhető, azaz a disszipáció, vagyis a csillapítás fokozható.

<u>*2.1 Beállítás*</u>

A. Ha a készülék jól van beállítva, a mérőrúd úgy függ, hogy egyik oldala sem ér hozzá a rúdvezető nyílásának falához (3. ábra). A nem jó a beállítás a 3. ábrán látható “b” vagy “c” esetben fordul elő. A “b” esetet az elektronika doboz változtatható magasságú lábainak megfelelő állításával korrigálhatjuk (vízszintezés). A “c” eset a mérőrúd felfüggesztésével (a függesztő elem elcsavarásával) javítható.

B. A zsinór hosszának állításával és az állvány tetején levő csavarral pontosan beállítható a mérőrúd pozíciója a rúdvezetőhöz képest

Figyelem!!!!!!
A mérésre ne felejtsen el hozni pendrive-ot!!!!!

Mérési feladatok

1. <u>*A rugóállandó mérése*</u>
   Állítsa be a zsinór hosszát úgy, hogy a mérőrúd skálájának legalsó osztása a rúdvezető felső szintjével egy vonalba essen! Erősítsen egy 25 g-os rézsúlyt a rugóra Mérje le a rugó sztatikus megnyúlását! Ezután helyezze fel a második rézsúlyt is, és mérje meg az újabb megnyúlást! Számítsa ki a rugó rugóállandóját!

2. <u>*Csillapítatlan rendszer lengésideje*</u>
   Ehhez a méréshez szerelje le a csillapító mágnespofákat a rézből készült csavarhúzó segítségével.
   Szabályozza be a készüléket.! (Beállítás A és B pontok alapján) Állítsa be a zsinór hosszát úgy, hogy a skála közepe legyen a rúdvezetőnél.
   Az ultrahangos távolságmérőt helyezze el a mérőrúd alatt az asztalon. A feszültségmérőt csatlakoztassa az optokapu kivezetéséhez.
   A mérőrúd aljáról csavarja ki a horgot és ragassza fel a kis körlapot. Húzza a mérőrudat 3 cm-rel az egyensúlyi helyzete alá, aztán engedje el, ezzel egy időben indítsa el a számítógépen az adatgyűjtést. A mérést üres mérőrúddal, majd 50 g-os terheléssel is végezze el! Minden mérési beállításnál három mérést végezzen. Az adatgyűjtés idejét úgy válassza meg, hogy 4-5 rezgés beleférjen. Az adatokat a mérésvezető által megadott könyvtáron belül saját alkönyvtárba mentse, megfelelően informatív névvel. Állapítsa meg a rezgések frekvenciáit és vesse össze az 1. pontban megmért D értékből számoltakkal.
   FIGYELEM!!! Az adatok menésére két lehetőség van. A *Save As…* esetén Excel-be beolvasva a file-t találunk két adatsort, az első az idő, második a távolság. Ezek egy másik munkalapra áttehetők, a továbbiakban a szokásos módon kezelhetjük. Ha az *Export As* mentési formát választjuk, akkor egy csv file-t kapunk, ami kis macerálás után olvashatóvá válik Excelben. Ez mind a négy adathalmazt (idő, távolság, sebesség, gyorsulás) tartalmazza.
   .

3. <u>*Kényszerrezgés amplitúdójának és sebesség-amplitúdójának vizsgálata a kényszerítő frekvencia függvényében*</u>
   A méréseket három különböző csillapítás esetén, mindkét esetben kétféle tömeggel (mérőrúd (50g), mérőrúd + 50 g) végezze el! Szerelje vissza a csillapító mágnespofákat! A kis csillapításhoz a csillapító mágnespofákat egymástól a lehető legtávolabb állítsa be, jegyezze fel a távolságot! A nagy csillapításhoz tekerje a mágnespofákat a lehető legközelebb, de csak annyira, hogy ne érjenek hozzá a mérőrúdhoz! Állítson be egy közepes csillapítást is. Ekkor is mérje meg és jegyezze fel a mágnespofák távolságát!
   A kényszerrezgést létesítő motort és az optokaput meghajtó tápegység képe a 4. fényképen látható. A tápegység egyik változtatható feszültségű kimenetét állítsa úgy be, hogy a Voltage fokozatkapcsoló és a forgatógomb nullán (azaz bal oldali végállásba), a Current forgatógomb középállásban legyen. Az elektronika egység előlapján levő, motor feliratú csatlakozót és a tápegység imént beállított kimenetét kösse össze a rendelkezésre álló vezetékkel. Az elektronika doboz előlapján levő Optokapu feliratú csatlakozót a megfelelő kábellel kösse össze a tápegység fix 5V-os kimenetével. Ügyeljen a polaritásra!!! **Piros:+, fekete:-** A változtatható kimeneten állítson be kb. 0,5V-ot (ezt a kijelzőn ellenőrizheti), és az excenter tárcsa kis elfordításával segítse a forgás beindulását. A feszültség lassú változtatásával keresse meg a rezonanciafrekvenciát, közben figyelje a kényszerítő frekvencia és a rezgés frekvenciája közötti fáziskülönbség alakulását. Mentse el az egyes beállításokat és ábrázolja az amplitúdót a frekvencia függvényében. Elemezze a mozgást a rezonanciafrekvencián, vizsgálja a meghajtó jel és a létrejött rezgés fázisváltozását a rezonanciához közeledve. Ha rezonancián túl nagy lenne az amplitúdó, akkor csökkentse a kényszererőt az excenter állításával. A méréseket mindkét tömeggel végezze el!

4. <u>*Csillapítási tényező és jósági tényező meghatározása*</u>
   Határozza meg az előző feladat eredményei alapján a csillapítási tényezőket a (6) egyenlet alapján.

5. <u>*Lebegés vizsgálata*</u>
   Két, kis mértékben különböző frekvenciájú, szinuszhullám szuperpozíciójakor „lebegés” alakul ki (5. ábra): Ha t_A időpontban a rezgések éppen fázisban vannak, akkor a hullámok összeadódnak és az eredő rezgés maximális amplitúdójú lesz. Egy későbbi t_B időpontban azonban a frekvencia különbség miatt a rezgések ellentétes fázisba kerülnek, és egymás hatását csökkentve minimális amplitúdót eredményeznek. Az amplitúdó változások burkológörbéje szintén szinuszos. A burkológörbe frekvenciája $f_L = (f_1 - f_2)/2$, ahol f_1 és f_2 a két összetevő rezgés frekvenciája. A differenciálegyenlet megoldása [(8) képlet] tartalmazza a bekapcsolás után kialakuló két fajta frekvenciát. Az egyik szinusz-hullám körfrekvenciája ω', a másiké ω. Lebegés akkor figyelhető meg, ha a kényszererő ω körfrekvenciája ω' közelében van, valamint, ha a csillapodás kicsi. Amint a tranziens elhal, a lebegés is megszűnik.
   Szerelje le a csillapító mágnespofákat! Erősítse a mérőrúdhoz az 50 g-os súlyt. A motor feszültségét finoman állítva vizsgálja a lebegés jelenségét.

4. fénykép