

SZENT ISTVÁN EGYETEM GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

GYORSULÁSÉRZÉKELŐK DINAMIKUS ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA

Készítette: **FARKAS CSABA**
I. évf. MSC hallgató

Témavezető: **DR. PETRÓCZKI KÁROLY**
egyetemi docens



**Gödöllő
2011**

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
1.1. Célkitűzések	1
2. Gyorsulásérzékelés alapösszefüggései és módjai, gyorsulásérzékelők	3
2.1. Jelek és értelmezésük	3
2.1.1. Jel, mérőjel fogalma.....	3
2.1.2. Folytonos és diszkrét jelek	3
2.2. Analóg jelek csoportosítása	4
2.3. Periodikus jelek, harmonikus rezgések	5
2.4. A gyorsulás	6
2.5. Gyorsulás mérése.....	6
2.5.1. Erő és gyorsulás közötti kapcsolat.....	6
2.5.2. A gyorsulásmérés alapmodellje	7
2.5.3. Csillapítás	8
2.6. Rezonancia görbék	9
2.7. Gyorsulásmérők típusai	10
2.7.1. Rezisztív érzékelők	12
2.7.2. Induktív érzékelők	13
2.7.3. Piezoelektromos érzékelők	13
2.7.4. Kapacitív érzékelők	14
2.7.5. Rezgésdiagnosztikai eszközök.....	15
2.8. Mérés nyúlásmérő bélyeggel	17
3. Érzékelők statikus kalibrálása, az LRG sajátfrekvenciájának mérése.....	19
3.1. Érzékelők ismertetése	19
3.1.1. LapRugós Gyorsulásérzékelő - LRG	19
3.1.2. HBM B12/200	20
3.1.3. Kistler K-Beam 8392B10	21
3.2. Adatgyűjtés és a mérőrendszer	21
3.3. Statikus kalibrálás.....	23
3.3.1. Az LRG statikus kalibrálása	23
3.3.2. A B12 és a K-Beam statikus kalibrálása	25
3.4. Az LRG csillapodása és sajátfrekvencia mérése	27

4. Lengőasztalos vizsgálatok	29
4.1. Az érzékelők rögzítése	29
4.2. Membrán kitérésének érzékelése	30
4.3. A gerjesztő jel előállítása	32
4.4. Optokapu statikus kalibrálása	33
4.5. Az LRG dinamikus kalibrálása	34
4.6. Az LRG frekvenciafüggésének meghatározása	37
4.7. A reprodukálhatóság vizsgálata	38
5. Összefoglalás	44
5.1. További célkitűzések	44
Irodalomjegyzék	46
Mellékletek	48
1. melléklet: 6. Gyorsulásérzékelő tervezése	48
6.1.1. Kitűzött célok	48
6.1.2. Anyagok megválasztása	48
6.1.3. Méretezés adott nyúlásra	49
6.1.4. Számítások a tényleges méretekkel	52
6.1.5. A rendszer további jellemzői	55
6.1.6. A felragasztott bélyegek jellemzői	57
2. melléklet: Felhasznált műszerek	58
3. melléklet: Az LRG adatlapja	59

1. Bevezetés

A gépipari berendezések üzemeltetésének és karbantartásának fontos része a folyamatos megfigyelés. A gépalkatrészek élettartamával előre számolni kell, a fellépő hibákat még a tönkremenetel előtt fontos észlelni, az üzemeltetőknek pedig idejében be kell avatkozni, mielőtt ezek a hibák kiterjedtebb meghibásodásokhoz és hosszabb leállásokhoz vezetnek.

Az ipari gépek egy fontos diagnosztizálási folyamata a rezgésmérés, amit gyorsulásérzékelőkkel végeznek el. A szenzor által szolgáltatott jeleket diagnoszták elemzik, majd a berendezés állapotára vonatkozó megfigyeléseket tesznek.

Az üzemi viszonyok monitorozása mellett a gépjárműiparban is elterjedten alkalmazzák a gyorsulásérzékelőket a megfelelő motorműködés és a komfortérzet növelése érdekében, ezeken kívül pedig a légzsáknyitó rendszer és a riasztóberendezések részeként.

A hagyományos, elektrodinamikus gyorsulásérzékelők felépítése ugyanarra a tömegből, rugóból és csillapító elemből álló mechanikai modellre vezethető vissza. Ezeket az érzékelőket az különbözteti meg egymástól, hogy a tömeget kitérítő erővel arányos gyorsulás milyen mérési elv alapján határozható meg.

1.1 Célkitűzések

A rezgésmérési alkalmazások során előnyt jelenthet, ha az alkalmazott gyorsulásérzékelő működési elve teljes mértékben ismert a gyári adatok mellett, ez az elektromechanikai működési elv pedig a lehető legegyszerűbb, ezáltal biztosítva a mérési eredmények könnyebb beláthatóságát. Sok esetben azonban a gyártók nem mellékelik érzékelőjükhöz a működési vázlatot, a lengőrendszer pontos paraméterei pedig minden esetben ismeretlenek.

A dolgozatban vizsgált és összehasonlított négy különböző működési elvvel és eltérő dinamikai paraméterekkel rendelkező gyorsulásérzékelő közül az egyik egy saját tervezésű és kivitelezésű laprugós gyorsulásérzékelő (LRG), mely egyszerűbb felépítéssel rendelkezik, mint a gyári mérő-átalakítók. A TDK munka célja a dinamikus összehasonlító mérésekkel igazolni, hogy az LRG alkalmas a vizsgálatban részt vevő gyári érzékelők kiváltására.

A megvalósítandó feladatok:

- Az érzékelők statikus kalibrálása a gravitációs térben.
- A laboratóriumi dinamikus összehasonlításhoz szükséges elektrodinamikus lengőasztal kialakítása.
- A mérések megvalósításához és mérési összeállítások kialakításához szükséges elektronikai kapcsolások és áramkörök megtervezése és kivitelezése.
- A mérések beállítása, és mérésadatok gyűjtése szoftveres úton.

A mechatronika témakörébe eső TDK munka, amely 2009-ben Bércesi Gáborral közösen kezdődött, egyrészt az LRG képességeinek meghatározásáról szól, utat nyitva ezzel a későbbi speciális alkalmazásainak, másrészt a reprodukálhatóságot vizsgálja, vagyis hogy egyforma körülmények között négy különböző érzékelővel milyen pontosan kapjuk meg ugyanazt a mérési eredményt, mindezt úgy, hogy az érzékelők működési elvüket tekintve különbözőek egymástól.

2. Gyorsulásérzékelés alapösszefüggései és módjai, gyorsulásérzékelők

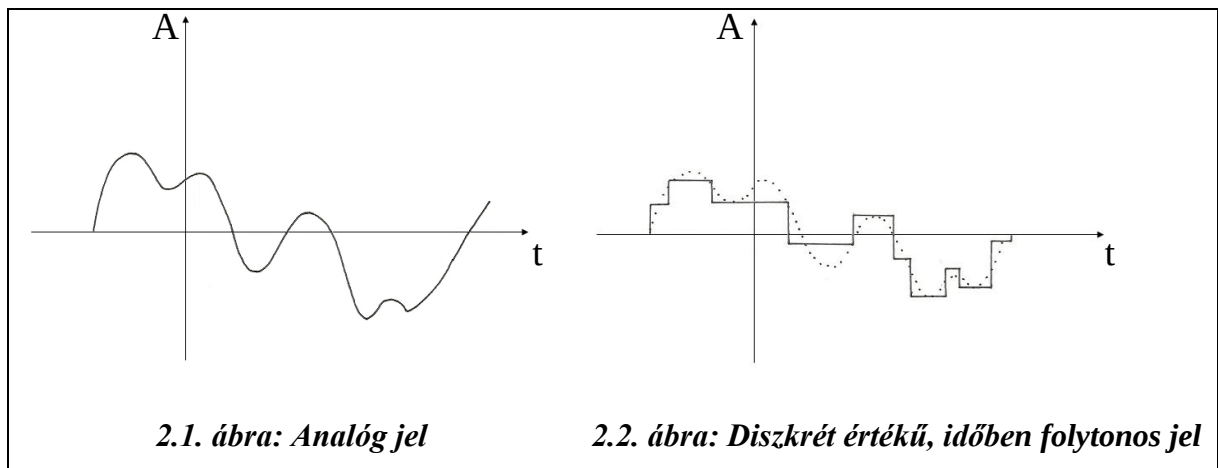
2.1. Jelek és értelmezésük

Jel, mérőjel fogalma

A jel általánosan megfogalmazva valamilyen információ, hír vagy adatok fizikai ábrázolását jelenti [17]. A mérőjel a mérendő mennyiséget reprezentáló és azzal függvénykapcsolatban lévő mennyiség [16].

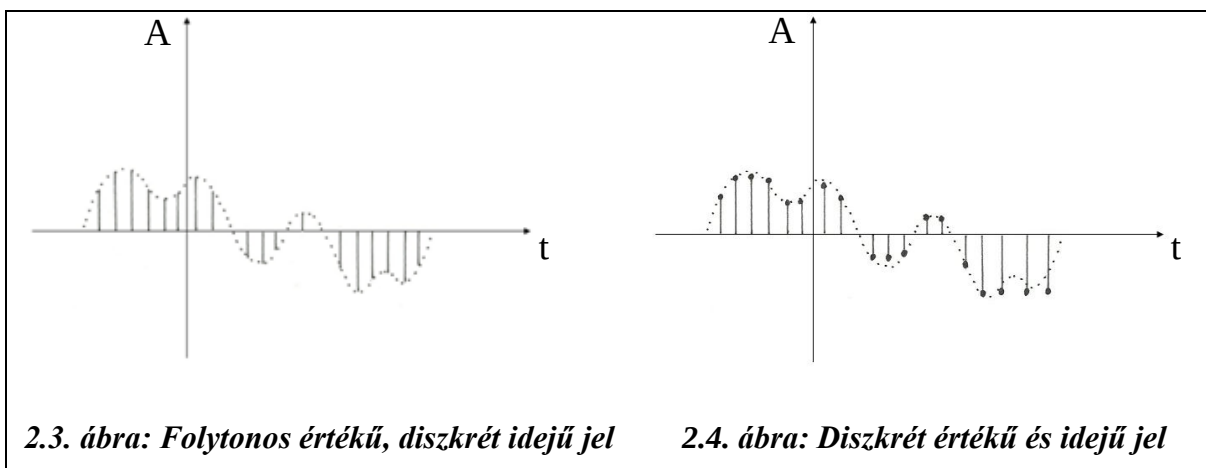
Folytonos és diszkrét jelek

Megkülönböztethetők folytonos és diszkrét jelek. A folytonos jelek minden valós számértékhez tartalmaznak jelparamétert, míg a diszkrét jelek csak bizonyos kitüntetett helyeken. Azok a jelfüggvények, melyek folytonos idejűek és folytonos értéktartománnyal is rendelkeznek, analóg jelek (2.1. ábra).



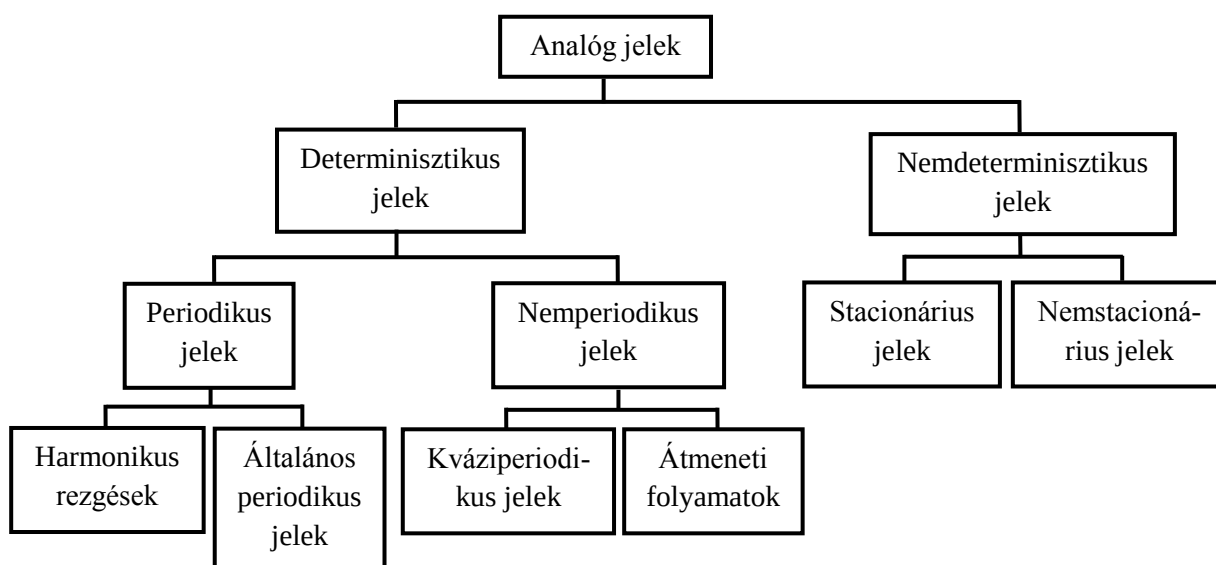
Az érzékelők általában analóg jeleket továbbítanak a mérőrendszerhez. Léteznek olyan jelek is, amelyek vagy az idő vagy az értéktartományban vizsgálva nem folytonosan változnak.

A diszkrét értékű, időben folytonos jelek amplitúdó értékei ugrásszerűen változnak, a jel értéktartománya véges számú lépcsőből tevődik össze. Amikor az értéktartományt ilyen egységes értékekké bontjuk fel, akkor kvantálásról van szó (2.2. ábra). Ha egy időben folytonos függvényből diszkrét időpontokban veszünk mintát, akkor egy időben szakaszosan változó jel alakul ki. Ezek a folytonos értékű, diszkrét idejű jelek (2.3. ábra).



Amikor diszkrét időpontokban mintát vesznek, és egyszerre kvantálják is a jelet, akkor digitális jel keletkezik (2.4. ábra). A mérési eredményeket digitális jelekké kell átalakítani, hogy számítógépen feldolgozható legyen. Ezt a feladatot az analóg-digitális átalakítók (AD konverterek) látják el [17].

2.2. Analóg jelek csoportosítása



2.5. ábra: Analóg jelek osztályozása

Az analóg jeleket tulajdonságaik alapján több csoportra is lehet osztani (2.5. ábra). Elsőként megkülönböztetünk determinisztikus és nem determinisztikus jeleket. Akkor beszélünk determinisztikus jelekről, ha értékeinek változása minden tetszőleges időpontra előzetesen megadható, kiszámítható. A nem determinisztikus jelekre ez az állítás nem igaz.

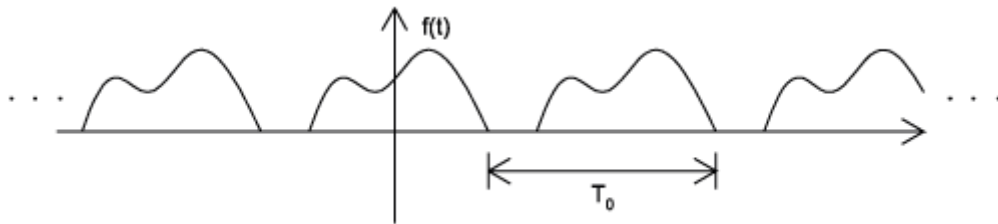
A továbbiakban a determinisztikus jelek csoportjába tartozó periodikus jelek, azon belül is a harmonikus rezgések tárgyalásával juthatunk el a gyorsulásjelek analíziséig [17].

2.3. Periodikus jelek, harmonikus rezgések

A periodikus jeleknél a függvényérték ($f(t)$) T periódusidő, vagy T periódusidő egész számú többszöröse elteltével visszatér (2.6. ábra). Matematikailag:

$$f(t) = f \cdot (n \cdot T_0 + t) \quad (2.1)$$

$$n = 0, 1, 2, 3 \dots$$



2.6. ábra: Periodikus jel

Annak ellenére, hogy a jelet előidéző fizikai folyamat valamikor elkezdődött, és be is fog fejeződni, matematikailag ettől mégis elvonatkoztatva úgy tekintjük, hogy egy végtelen folyamatról van szó.

A harmonikus rezgés periodikus függvény (2.7. ábra), amelyet a következő összefüggés jellemez:

$$f(t) = A \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) \quad (2.2)$$

ahol: A – csúcserték, amplitúdó vagy kitérés nagysága

ω_0 – körfrekvencia

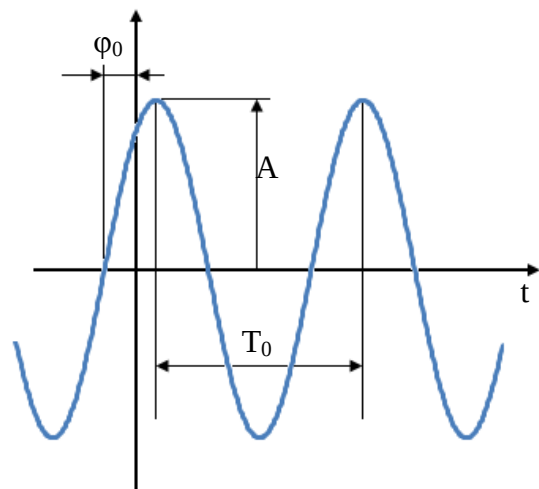
φ_0 – fáziseltolás szöge

A harmonikus függvényt tehát definiálni lehet minden t időpontban a szinusz függvény argumentumának és a hozzá tartozó amplitúdó megadásával [17],[18]. A további paraméterek megadása:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/T_0 \quad (2.3)$$

$$T_0 = 1/f_0 \quad (2.4)$$

ahol: f_0 – alaphfrekvencia [Hz]



2.7. ábra: Harmonikus rezgés paraméterei

2.4. A gyorsulás

A kinematikában az anyagi pontnak tekintett objektum által időegységenként megtett út hosszát és azok változását az út-idő függvénnyel jellemzik. Ennek a függvénynek a deriválásával megkapjuk a sebesség időbeli lefutását leíró függvényt.

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (2.5)$$

A mozgás közben ennek valamely 't' időpontban vett helyettesítési értéke az adott időpillanathoz tartozó pillanatnyi sebesség. A függvény újbóli deriválásával a gyorsulás időbeli alakulását leíró egyenletet kapjuk meg [13].

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (2.6)$$

A gyorsulásmérés közben valamilyen harmonikus lengésfüggvény szerinti mozgást vizsgálunk, ezért a gyorsulásmérést rezgésmérésnek is nevezik. A leíró függvény tehát az állandó mozgáshoz képest a fent tárgyalt harmonikus rezgésnek megfelelően korlátos, és legalább kétszer előjelet vált a vizsgált időtartományban [6]. Ennek megfelelően a mozgást leíró egyenletek:

$$s(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2.7)$$

$$v(t) = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2.8)$$

$$a(t) = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = -\omega^2 \cdot s(t) \quad (2.9)$$

Ezen összefüggések ismeretében a gyorsulás mérésének alapjai a következő fejezetekben tárgyalhatóak.

2.5. Gyorsulás mérése

Erő és gyorsulás közötti kapcsolat

Newton II. axiómája kimondja, hogy a tehetetlen tömegre gyorsuláskor ható erő nagysága arányos a gyorsulással [14].

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} \quad (2.10)$$

ahol : $\mathbf{F}$ – a testre ható erő

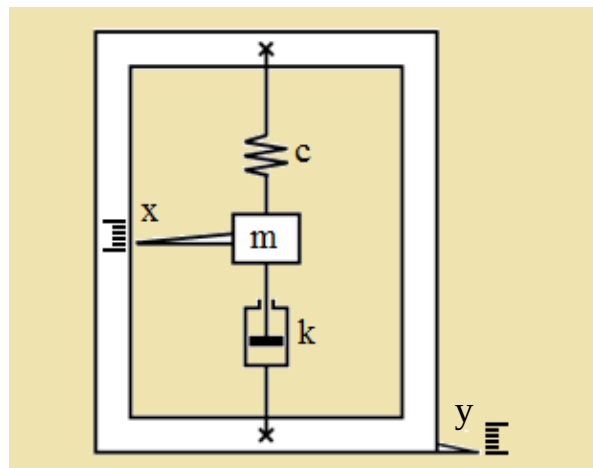
m – a test tömege

$\mathbf{a}$ – a test gyorsulása

A gyorsulásmérés alapmodellje

Az elektromechanikai gyorsulásmérés során egy ismert tömegre ható tehetetlenségi erőt határozzunk meg. Ez a tömeg egy egyszabadságfokú csillapított mechanikai lengőrendszer (2.7. ábra) része, melyet szeizmikus tömegnek nevezünk.

A rendszerben az erő kitéríti a szeizmikus a tömeget, melyet a rugó térít vissza. Az erő nagysága meghatározható a tömeg kitérésével vagy a rugó alakváltozásának mérésével. A 2.8. ábra a rezgésmérés általános modelljét szemlélteti [4]. A modell házát mereven kapcsolják a mérendő rendszerrel, melynek mozgási koordinátája y . A rezgésmérő tömege (m) külső gerjesztés hatására x -irányú mozgást végez.



2.8. ábra: Gyorsulásmérés általános modellje

A rugóra függesztett tömeg szabadrezgéseit a következő differenciálegyenlettel írhatjuk le:

$$m(\ddot{y} + \ddot{x}) + k\dot{x} + \frac{x}{c} = 0 \quad (2.11)$$

$$\text{ill.} \quad m\ddot{x} + k\dot{x} + \frac{x}{c} = -m\ddot{y} \quad (2.12)$$

$$\text{Ha:} \quad \alpha = \frac{1}{\sqrt{mc}} \quad (2.13)$$

$$D = \frac{k}{2} \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (2.14)$$

$$\ddot{y} = a \quad (2.15)$$

ahol: k – a rugó csillapítási tényezője

c – a rugóállandó

D – a csillapítási viszonyszám

Ekkor az ábrán látható gyorsulásmérő viselkedését leíró differenciálegyenlet [4]:

$$\ddot{x} + 2\beta\alpha\dot{x} + \alpha^2 x = -\ddot{y} = -a \quad (2.16)$$

Csillapítás

A rendszer tartalmaz egy csillapítást is, ami az egyenletekben is megjelenik. Általában a csillapítást folyadékfékkel ábrázolják. Hogyha a csillapítóerő nagysága a tömeg sebességével arányos, sebességvektor irányú és azzal ellentétes értelmű, akkor nedves (viszkózus) csillapításról beszélünk [13].

$$F_c = -k \cdot v \quad (2.17)$$

Ahol: F_c – csillapítási erő

k – csillapítási tényező

v – sebesség

Az (2.11) differenciálegyenletből látható, hogy csak abban az esetben alakul ki rezgés, ha a fajlagos csillapítási tényező (β) értéke kisebb a sajátkörfrekvenciánál.

$$\beta < \alpha \Rightarrow \frac{k}{2m} < \alpha \Rightarrow k < 2m\alpha \quad (2.18)$$

Tehát csillapítási tényező kritikus értéke:

$$k_{kr} = 2m\alpha = 2\sqrt{\frac{m}{c}} \quad (2.19)$$

A csillapítási tényező és a kritikus csillapítási tényező hányadosa a csillapítási viszonzszám (Lehr-féle csillapítás):

$$D = \frac{k}{k_{kr}} = \frac{k}{2m\alpha} \quad (2.20)$$

Abban az esetben jön létre rezgés, ha a csillapítási viszonzszám kisebb, mint egy. Ekkor a csillapított rezgőmozgás út-idő függvénye:

$$s_{(t)} = A \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\alpha \cdot \sqrt{1 - D^2} \cdot t + \psi) \quad (2.21)$$

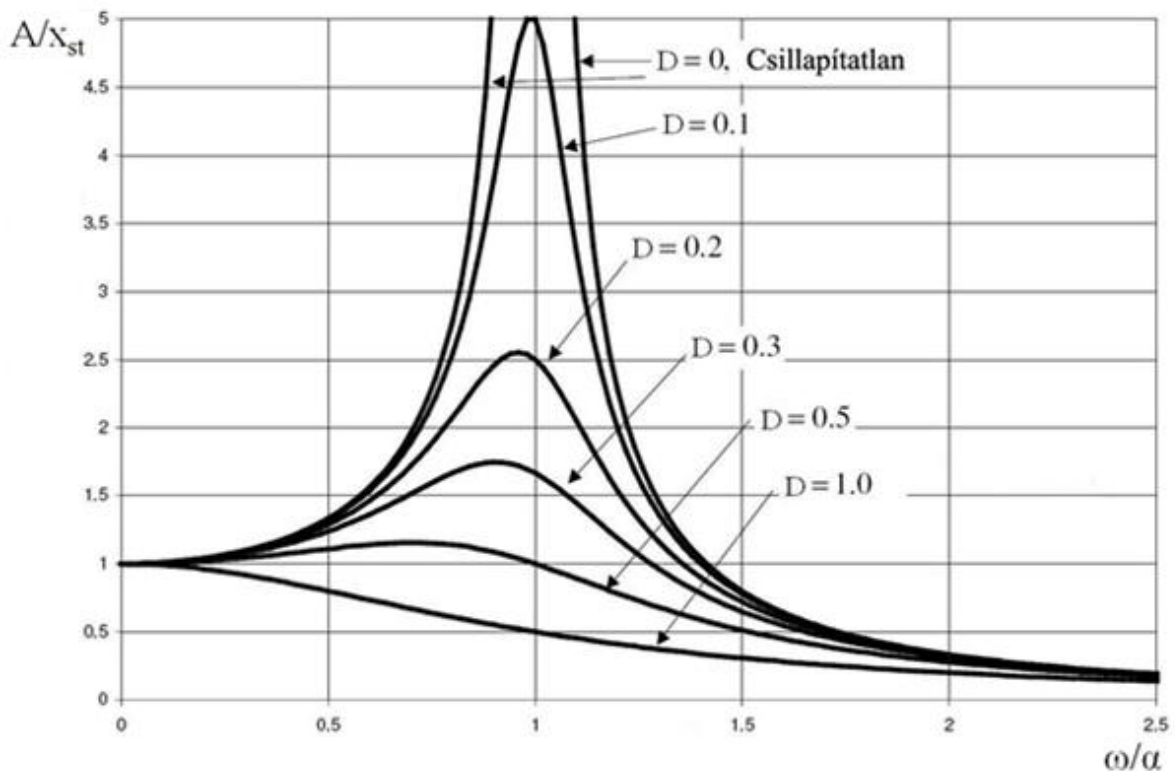
ahol: A és ψ a kezdeti feltételtől függő állandók

Valós esetben ez a függvény mutatja a magára hagyott rezgő test kitérésének változását. A függvény szerint az amplitúdó egyre jobban csökken, amíg a rezgés teljesen meg nem szűnik [6].

2.6. Rezonancia görbék

A rezonancia görbék a kényszerrezgés relatív amplitúdóját (A/x_{st}) a frekvenciaarány (ω/α) függvényében ábrázolják (2.9. ábra).

- A/x_{st} – A gerjesztett rezgés amplitúdójának és a maximális gerjesztő erő által statikus esetben létrehozott rugó kitérésének aránya
- ω/α – A gerjesztő frekvencia és a rendszer körfrekvenciájának aránya



2.9. ábra: Rezonancia görbék

Az ábrán látható görbék egy-egy csillapítási viszonzszám értékre vonatkoznak. Amikor a gerjesztés körfrekvenciája megközelíti a sajátkörfrekvenciát, az amplitúdónak maximuma van. Ezt a gerjesztési frekvenciát rezonancia körfrekvenciának nevezzük (ω_r).

A rezonancia amplitúdó nagysága és a sajátkörfrekvenciától való eltolódás a rendszer csillapításától függ. Ha a csillapítási tényező elhanyagolható, vagy nagyon kicsi, a rezonancia körfrekvencia gyakorlatilag megegyezik a sajátfrekvenciával, az amplitúdó pedig igen nagy értékű is lehet, aminek a valóságban káros hatásai lehetnek egyes gépekre, szerkezetekre nézve.

A rezonancia körfrekvencia:

$$\omega_r = \alpha \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot D^2} \quad (2.22)$$

A gerjesztett rezgés amplitúdója erő-, illetve útgerjesztés esetén (a rezgő tömeg kitérítésével):

$$A = \frac{x_{st}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^2\right]^2 + \left(2 \cdot D \cdot \frac{\omega}{\alpha}\right)^2}} \quad (2.23)$$

A gerjesztett rezgés amplitúdója inerciális (tehetetlenségi) gerjesztéskor:

$$A = \frac{x_{st} \cdot \left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^2\right]^2 + \left(2 \cdot D \cdot \frac{\omega}{\alpha}\right)^2}} \quad (2.24)$$

Ezekből, a (2.21)-et behelyettesítve a rezonancia amplitúdó:

$$A_r = \frac{x_{st}}{2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - D^2}} \quad (2.25)$$

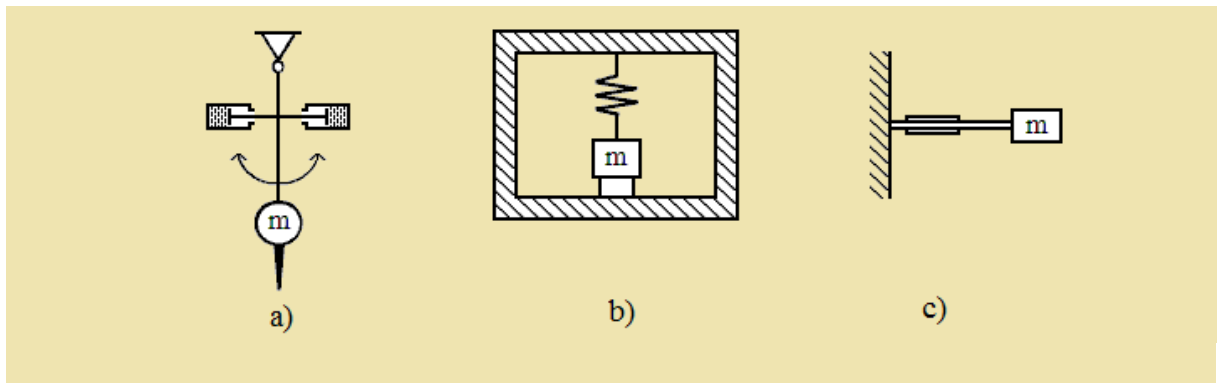
$$A_r = \frac{x_{st} \cdot (1 - 2 \cdot D^2)}{2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - D^2}} \quad (2.26)$$

A gyorsulásmérők inerciális gerjesztésű rendszerek. Ha a csillapítás elhanyagolható, és a gerjesztő frekvencia sokkal kisebb a sajátfrekvenciánál, akkor a statikus kitérést a gerjesztő rendszer amplitúdójaként értelmezve a (2.24) képlet alapján a gerjesztett rezgés amplitúdója [6]:

$$A = \frac{1}{\alpha^2} \cdot x_{st} \cdot \omega^2 \quad (2.27)$$

2.7. Gyorsulásmérők típusai

A gyorsulásmérők mindegyike elektro-mechanikai szerkezet, melyek számos kivitelben léteznek (2.10. ábra) [4].



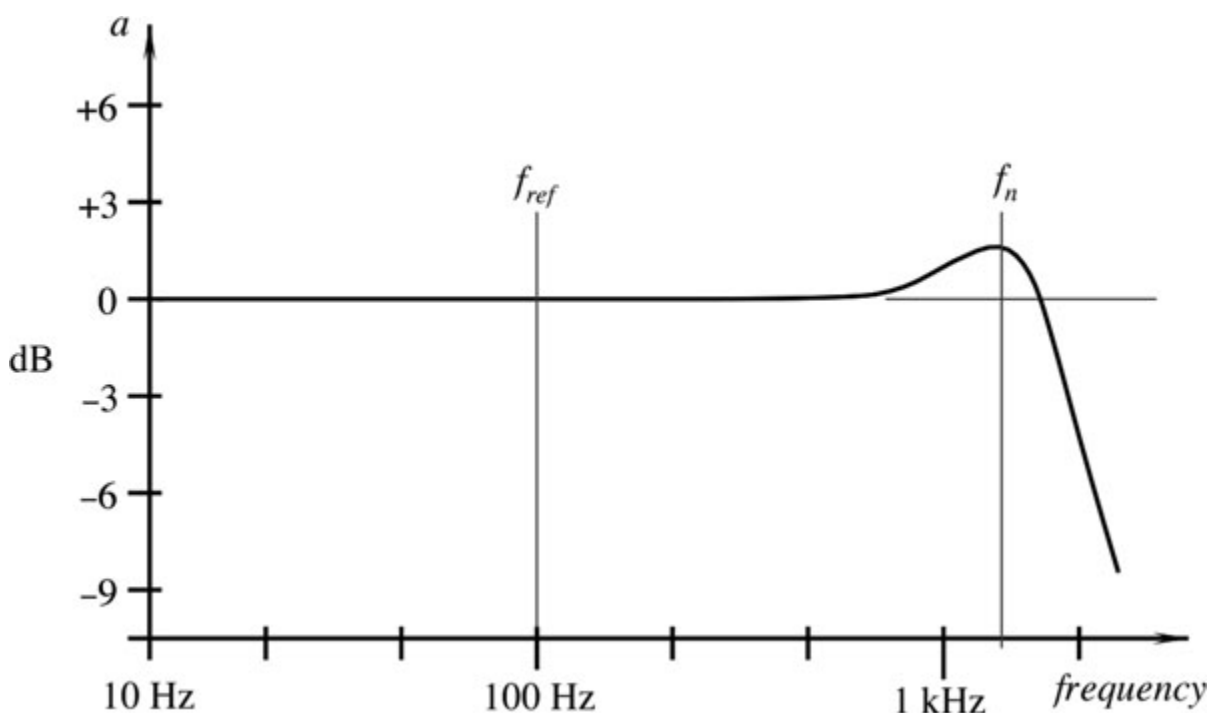
2.10. ábra: Gyorsulásmérők néhány jellemző kivitelben:

a) ingás visszatérítés; b) rugós visszatérítés; c) hajlított rugós visszatérítés

A piacon kapható érzékelők gyakran ezen egyszerű lengőrendszerek működési elvén alapulnak. Mindegyik érzékelőben található szeizmikus tömeg, illetve valamilyen rugóként viselkedő visszatérítő elem, a gyorsulás pedig minden esetben a tömegre ható erővel lesz arányos. A különbség a konstrukciók között az eltérő méretek mellett csak a kitérés illetve alakváltozás mérésének módjában található.

A gyorsulásérzékelő típusok részletes ismertetése előtt a szenzorok néhány jellemző tulajdonsága:

Az *érzékenység* a mérőműszer kimenő jelének megváltozása osztva a bemenő jel megfelelő megváltozásával [16]. A gyorsulásérzékelők esetén a kimeneten elektromos jel jön létre, ami a mechanikai bemenő jel hatására változik meg. Általában mV/g-ben fejezik ki az érzékenységet, amelyet az állandó gyorsulás érzékelésére képes érzékelők nyugalmi helyzetben is képesek kimutatni a gravitációs erő hatására. Dinamikus kalibrálás során az érzékenység valamilyen referencia frekvencián (pl. 100 Hz, 2.11. ábra) mért időfüggvény adataiból számítható [9].



2.11. ábra: Egy gyorsulásérzékelő frekvencia függése: f_{ref} – referencia frekvencia, f_n – sajátfrekvencia

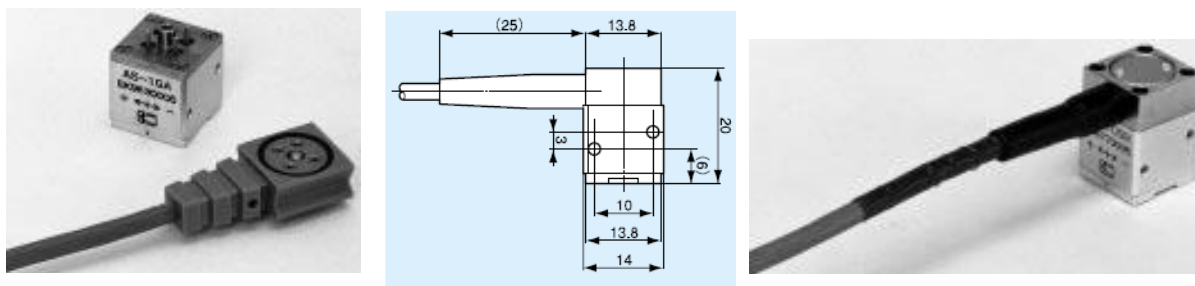
A *frekvenciafüggés* (frequency response) az érzékelő kimenő jele különböző frekvenciákon mérve. A frekvenciafüggés diagramokból (2.11. ábra) leolvasható, hogy mennyire tág tartományban használható az adott érzékelő.

A rezonancia frekvencia egy csillapítatlan rendszer esetén jól azonosítható csúcsként jelenik meg a frekvenciafüggés diagramban, általában 3-4 dB-el nagyobb, mint a referencia frekvencia (f_{ref}) és annak környezete. A megfelelően csillapított rendszereknél ez a csúcs nem annyira kiugró [9]. Ezeken kívül még sok egyéb itt nem ismertetett jellemző létezik, (pl: ismétlési pontosság, linearitás, különböző hibák, stb.), ebben a fejezetben kizárólag a későbbiek során is felmerülő fogalmakra koncentráltam.

Rezisztív érzékelők

A rezisztív szenzorokban található fém nyúlásmérő ellenállások vagy piezorezisztív ellenállások valamilyen mechanikai alakváltozást, általában lehajlást alakítanak át elektromos jelváltozássá, pontosabban ellenállás változássá. Kialakításuk a 2.10. ábra c) jelű mechanikai modelljén alapul. Az ellenállások Wheatstone-hídba vannak kötve, mellyel kis mértékű ellenállás változások nyomon követése is megvalósítható (bővebben a mérés nyúlásmérő bélyeggel című fejezetben). A lehajlás mértéke a lemezzrugó végén kialakított szeizmikus tömeg méretével és a lemezzrugó kialakításával is befolyásolható. A kialakítástól függően az ilyen elven működő érzékelők 0 Hz-től több kHz-es frekvencia mérésére is alkalmasak lehetnek, illetve képesek az állandó gyorsulás (gravitáció) érzékelésére is [9].

A gyártók közül a Kyowa és az Endevco kínálatában is megtalálhatóak az ilyen működési elven alapuló gyorsulásérzékelők.

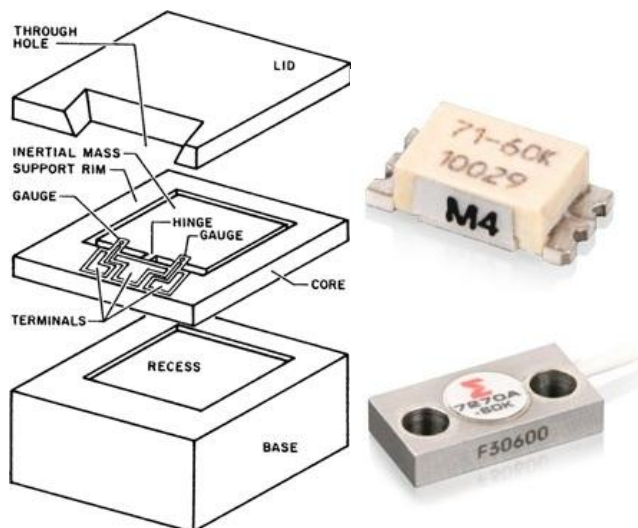


2.12. ábra: A Kyowa nyúlásmérő bélyeggel érzékelő mérő átalakítói

A Kyowa által gyártott AS-GA és AS-GB típusú érzékelők kisebb gyorsulások mérésére alkalmasak, jellemző méréstartományuk $\pm 1-20$ g gyorsulásig terjed, sajátfrekvenciájuk 70 Hz 530 Hz között változik, tömegük 15-25 g. Az érzékelőből található olyan is amelyik, három irányban képes mérni a gyorsulást (AS-TG) [19].

Az Endevco rezisztív érzékelői a precíz gyártástechnológiának köszönhetően kis méretűek és nagy méréstartománnyal rendelkeznek. A mechanikai lengőrendszer szilícium-alapú megvalósításon nyugszik, az érzékelő három lapkából tevődik össze (2.13. ábra).

A középső lapkán található a szeizmikus tömeg, amely mindössze egy vékony konzol által csatlakozik a kerethez. Mellette találhatóak a nyúlásmérő ellenállások. A másik két lapka a tetején és az alján helyezkedik el, a rajtuk található bemarások biztosítanak szabad mozgásteret a szeizmikus tömeg számára [9].

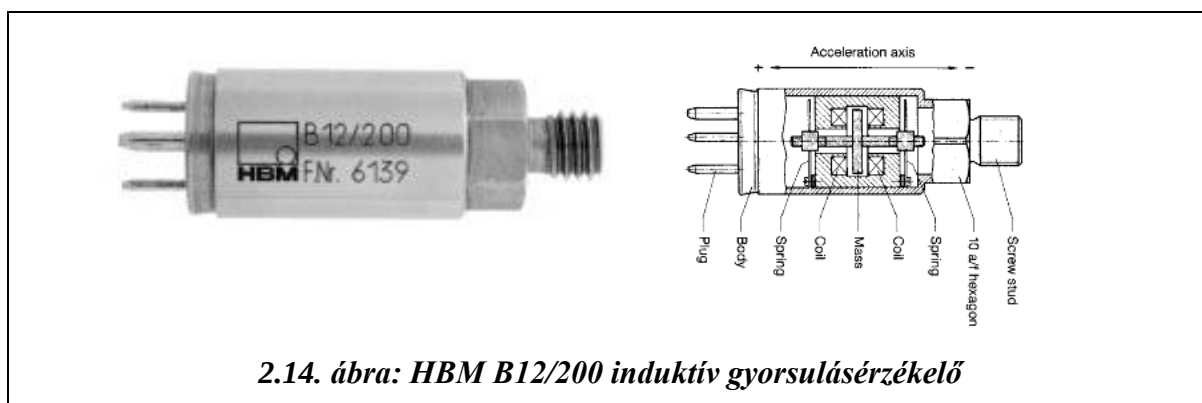


2.13. ábra: Endevco rezisztív érzékelők

A 71M és a 7270A típusú érzékelők például ezen az elven működnek, a gyártó adatai alapján méréshatáruk 2000-60000 g-ig terjedhet, sajátfrekvenciájuk magas, a 71M típus tömege mindössze 0,06 g [20],[21].

Induktív érzékelők

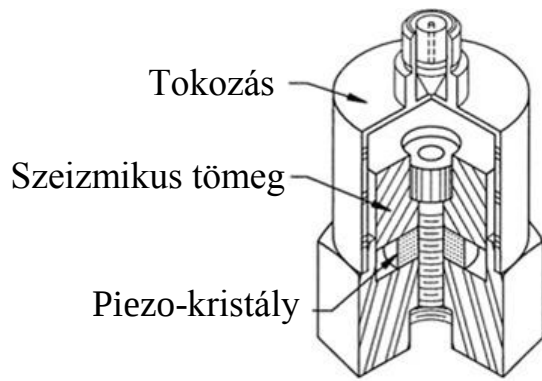
Az induktív érzékelőkben a rendszerben található tekercsek adnak információt a szeizmikus tömeg aktuális állapotáról. Egy ilyen elven működő szenzor, a HBM B12/200 és B12/500-as a 2.8. ábrán látható alapmodell működését veszi alapul (2.14. ábra), [7]. A B12-es érzékelő működéséről a 4. fejezetben részletesebben is szó esik az egyes érzékelők összehasonlítása során.



2.14. ábra: HBM B12/200 induktív gyorsulásérzékelő

Piezoelektromos érzékelők

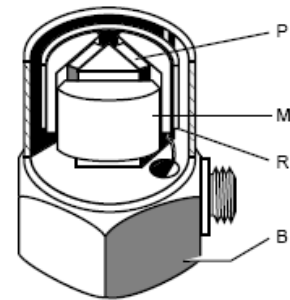
A piezoelektromos szenzorokban a szeizmikus tömeg egy piezo-kristály felett helyezkedik el (2.15. ábra). Mozgás közben a tömeg által kifejtett erő hat a kristályra, amelyben ennek hatására töltésváltozás következik be, a kiadott jel a gyorsulással arányos [9].



2.15. ábra: Piezo-elektromos érzékelő felépítése



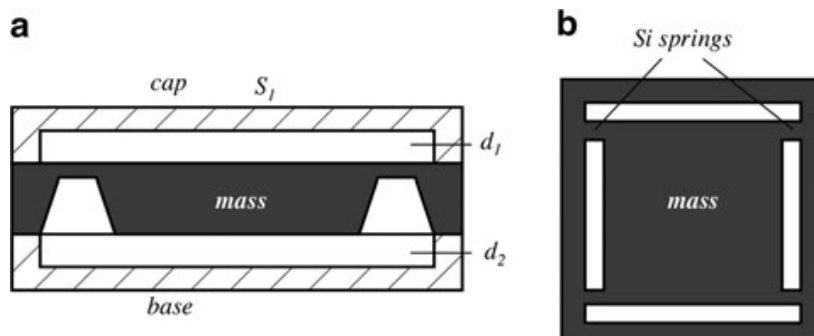
2.16. ábra: A Brüel&Kjaer piezoelektromos érzékelője



Ezek a műszerek jellemzően tág méréshatárokkal rendelkeznek, a Brüel&Kjaer 4370 típusú érzékelőjével (2.16. ábra) például 0,1-4800 Hz-ig lehet mérni, de több érzékelőjük meghaladja a több 10 kHz-es tartományt [22]. A piezoelektromos érzékelők nem képesek 0 Hz-től működni (általában 0,1 vagy 1 Hz-től kezdődik a méréshatár), a szenzorok csak dinamikus gyorsulást tudnak érzékelni.

Kapacitív érzékelők

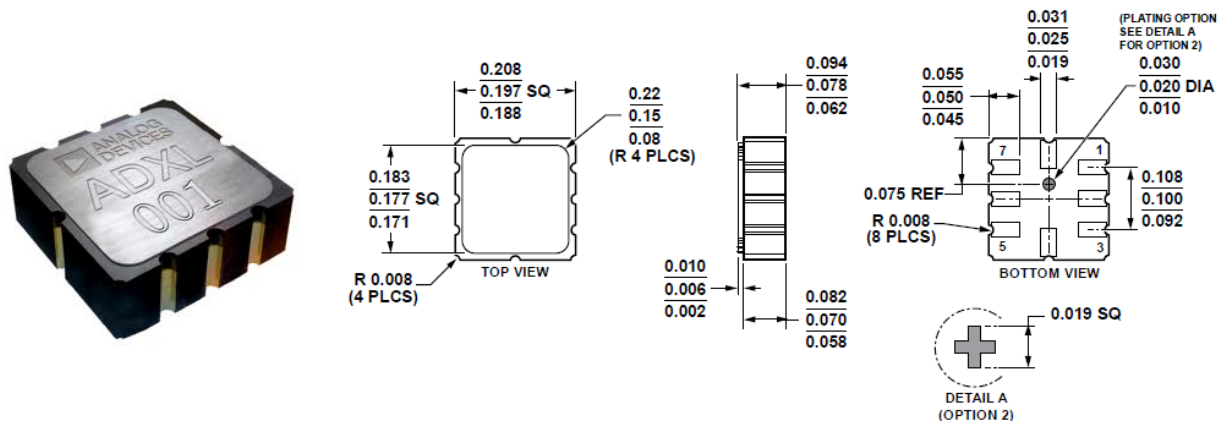
A kapacitív gyorsulásérzékelők szeizmikus tömegének mozgása egy kondenzátor kapacitását befolyásolja (2.17. ábra). A tömeg tölti be a „mozgó fegyverzet” szerepét, amely két lemez között helyezkedik el, ezeken pedig az „álló fegyverzet” található (vagy csak az egyik, vagy mindkettő). A kapacitás változása speciális mérőhidak segítségével állapítható meg [9].



2.17. ábra: Kapacitív gyorsulásérzékelő felépítése a) oldalról, b) felülről

A kapacitív érzékelők is kivitelezhetők a szilícium alapú technológia segítségével, az ilyen szenzorok MEMS kivitelben is elérhetőek (Mikro Elektromechanikai Rendszerek). Az Analog Devices kínálatában megtalálhatóak alacsony és magas gyorsulás (low g és high g) érzékelésre is alkalmas áramkörti elemként beépíthető, chip kivitelű egységek.

Az ADXL001 (2.18. ábra) típusból létezik ± 70 , ± 250 és ± 500 g méréshatárú kivitel, a struktúra 22 kHz-es sajátfrekvenciával rendelkezik [23].



2.18. ábra: Analog Devices ADXL001 és méretei Inch-ben

Rezgésdiagnosztikai eszközök

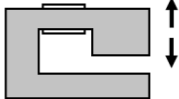
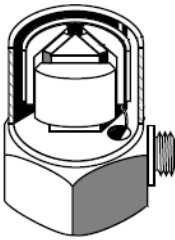
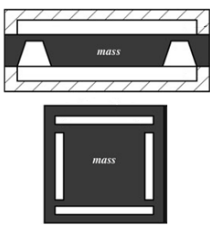
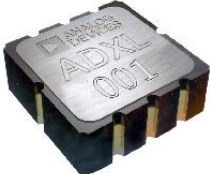
Az elterjedt gyorsulásérzékelők mellett léteznek olyan eszközök, melyeket a mérőrendszerrel együtt lehet megvásárolni, ezek komplett rezgésdiagnosztikai berendezések. Az ilyen rendszerek a karbantartás és a gazdaságos gépüzemeltetés eszközei. Az SKF Microlog AX rezgésdiagnosztikai rendszerével számos üzemi vizsgálat elvégezhető, erről a rendszerről egy későbbi fejezetben részletesebben is szó esik az összehasonlítások során.



2.19. ábra: SKF Microlog AX és rezgésmérő ceruza

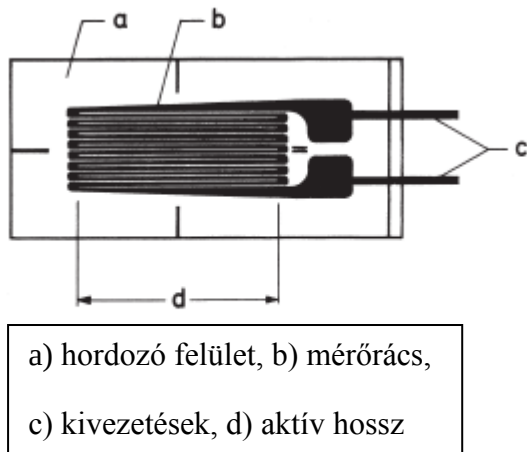
Az SKF egy másik eszköze a rezgésmérő ceruza (2.19. ábra), melyben egy piezoelektromos érzékelő található, kijelzője pedig a legfontosabb információkat közli, úgy mint az effektív rezgéssebesség, a gyorsulás és a hőmérséklet, a leolvasott értékeket pedig automatikusan összehasonlítja a szabványos ISO határértékekkel [5]. Az eddig ismertetett gyorsulásérzékelők jellemzőit a 2.1. táblázat ismerteti.

2.1. táblázat: Gyorsulásérzékelők, egy-egy jellemző gyártó/típus és tulajdonságaik

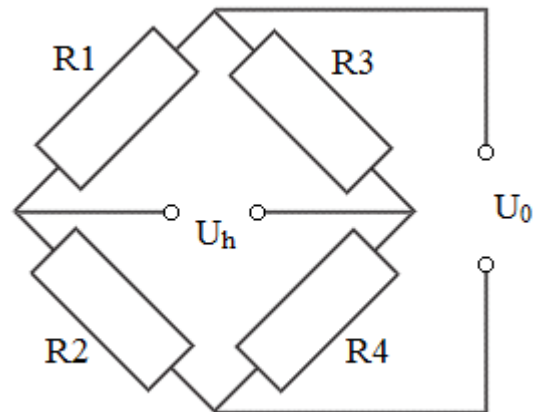
Működési Elv:	Rezisztív	Piezo-elektromos	Kapacitív	Rezgémérő rendszerek
				
Gyártók, Típusok		Brüel & Kjær 		
	AS-GA és AS-GB	4370	ADXL001	CMAS 100-SL
				
Méréshatár	$\pm 1-20 \text{ g}$	$\pm 20 \text{ km/s}^2$, (mágnessel: $0,6 \text{ km/s}^2$)	$\pm 500 \text{ g}$	$\pm 50 \text{ g}$
Frekvencia tartomány	70 Hz, 530 Hz (0 Hz-től)	0,1-4800	kb. 5 Hz – 10 kHz	0,32 – 10000 Hz
Jellemzők	Állandó gyorsulás is mérhető, kis gyorsulások mérésére alkalmazható (csak a nem szilícium konstrukciók!).	Nagy méréshatárok, állandó gyorsulás nem mérhető vele.	Kis méret, integrálhatóság, áramköri elemként használható.	Mérőrendszerrel egybeépítve, csak a fontos adatok jelennek meg (pl. ISO határértéknek megfelel vagy nem).
Alkalmazási példák	Ipar, laboratóriumok.	Gépjárművek, rezgésdiagnosztika.	Légzsák nyitó rendszer.	Rezgésdiag-nosztika.

2.8. Mérés nyúlásmérő bélyeggel

A nyúlásmérő bélyegek (2.20. ábra) az alakváltozást elektronikus jelváltozássá, pontosabban ellenállás változássá alakítják át. A bélyegek kismértékű igénybevétel hatására történő minimális megnyúlásokat és összehúzódásokat is képesek pontosan érzékelni, a veszteségek és hibák kialakulása nélküli méréshez azonban pontos pozicionálásra van szükség.



2.20. ábra: Nyúlásmérő bélyeg



2.21. ábra: Wheatstone-híd

A mérőtestre felragasztott bélyegre jellemző 'k' bélyegtényező teremt kapcsolatot az ellenállás változás és az alakváltozás között [10],[11].

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.28)$$

ahol: ε – a fajlagos nyúlás

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.29)$$

ahol: Δl – megnyúlás, l_0 – eredeti hossz

Ahhoz, hogy ilyen kismértékű ellenállás változás nyomon követhető legyen, egy speciális kapcsolást kell alkalmazni, amit Sir Charles Wheatstone angol fizikus talált fel 1843-ban. A kapcsolást Wheatstone-hídnak nevezik (2.21. ábra), és egyebek mellett egy tipikus alkalmazási területe a nyúlásmérő bélyegekkel való mérés [11].

A hídkapcsolásban négy azonos értékű ellenállás található, melyek közt az alábbi összefüggés írható fel:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.30)$$

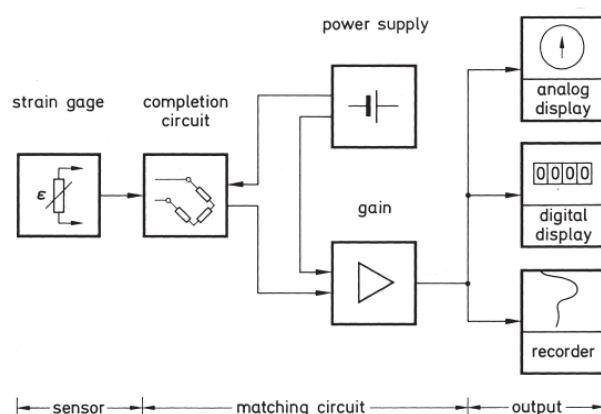
Ha az ellenállások értéke megegyezik, az egyes ágakon ugyanakkora feszültség esik, ezért a két ág közötti potenciálkülönbség nem alakul ki, vagyis $U_h=0$.

A négy ellenállás közül egy, kettő (R_1 és R_3 vagy R_2 és R_4), vagy mind a négy lehet nyúlásmérő ellenállás. Ennek alapján megkülönböztetünk negyed-, fél- és teljes hidat. Ha a megnyúlás következtében egy ellenállás értéke megváltozik, azzal arányosan módosul a hídfeszültség is. Negyedhíd esetén:

$$U_h = \frac{1}{4} \cdot U_0 \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (2.31)$$

Fél- illetve teljes hidas kapcsolás esetén két aktív bélyegnél kettő- négy aktív bélyegnél négyszeresére változik a kimenő feszültség.

A nyúlásmérő bélyegek relatív ellenállás változása rendszerint nagyon kis értéket vesz fel, ezért a Wheatstone híd kimenő hídfeszültsége még teljes hidas kapcsolás esetén is csekély, mV-ban mérhető nagyságrendű. Ezt a híd tápfeszültséggel (U_0) leosztva mV/V -ban adjuk meg. A jelfeldolgozás előtt a hídfeszültséget erősíteni kell (2.22. ábra), ami általában egy differencia erősítő alkalmazásával valósul meg.



2.22. ábra: Nyúlásmérő bélyeges mérőrendszer

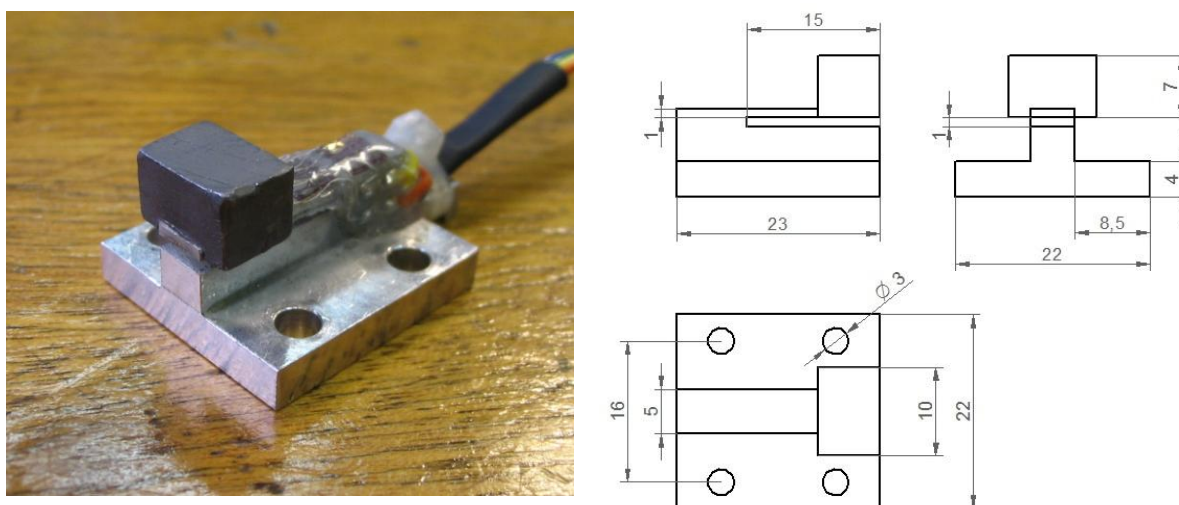
Napjainkban jellemzően azok a cégek gyártanak nyúlásmérő bélyegeket és nyúlásmérő bélyegekkel működő rendszereket, akik a technológia kifejlődésének kezdetén is foglalkoztak a kérdéskörrel (pl. HBM, Kyowa). A nyúlásmérő bélyegek felragasztását és működtetését a vállalatok általában egy szigorúan beosztott technológia betartásához kötik, melyek elsajátítása szükséges a sikeres mérések végrehajtásához [24].

3. Érzékelők statikus kalibrálása

3.1. Érzékelők ismertetése

LapRugós Gyorsulásérzékelő - LRG

Az LRG (3.1. ábra) egy saját tervezésű és kivitelezésű rezisztív gyorsulásérzékelő, melynek mechanikai modellje egy befogott tartó. A laprugó végén található szeizmikus ólomtömeg mögött található 4 db Wheatstone-hídba kapcsolt nyúlásmérő ellenállás, melyek az alakváltozással arányos kimenő jelet szolgáltatják. A mérő-átalakító alján a felfogatást biztosító talpazat helyezkedik el. Az érzékelő paramétereit a 3.1. táblázat ismerteti.



3.1. ábra: Az LRG

3.1. táblázat: Az LRG paramétereit.

Paraméterek		Meghatározásának módja
Kalibrálási érzékenység	0,0065 (mV/V)/g	statikus kalibrálással, dinamikus kalibrálással (elektrodinamikus lengőasztal)
Sajátfrekvencia	600 Hz	frekvenciafüggés karakterisztika (elektrodinamikus lengőasztallal), csillapodó rezgés görbe
Üzemi tartomány	300 Hz	frekvenciafüggés karakterisztika (elektrodinamikus lengőasztallal)
Méréstartomány	± 160 g	Méretezés közben számítva

Az elektrodinamikus lengőasztallal meghatározott paraméterek mérési folyamatára a lengőasztalos vizsgálatok című fejezetben (4. fejezet) részletesen kitérek. Az érzékelő méretezésének folyamatát, és a közben meghatározott tulajdonságok számítását a mellékletben közlöm.

Az LRG-t és a vizsgált érzékelőket többféleképpen lehet kalibrálni, ezt a 3.2. táblázat mutatja be. Ez a fejezet a statikus kalibrálás folyamatát tárgyalja, azonban nem csak az LRG-ről lesz szó. A másik két érzékelővel történő összehasonlítás már ebben a fejezetben kezdetét veszi, ugyanis a statikus kalibrálás a három érzékelő esetében hasonlóan zajlik.

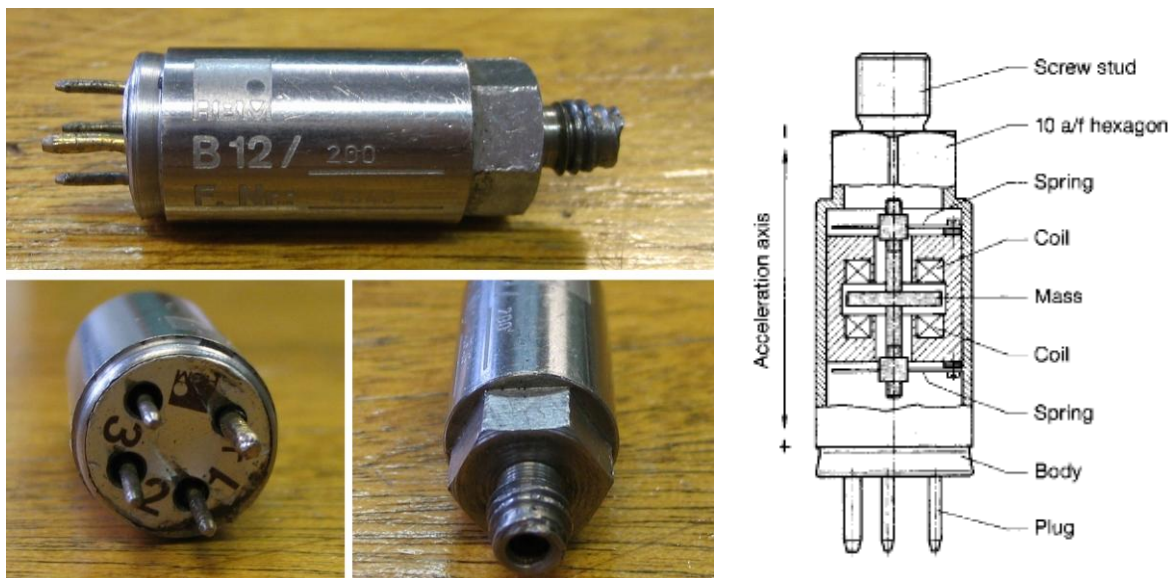
3.2. táblázat: Érzékelők kalibrálásának módjai

Kalibrálás módjai	
Statikus	Érzékelők forgatása a gravitációs térben
Dinamikus	Elektrodinamikus lengőasztallal

HBM B12/200

A B12 egy mechanikai lengőrendszert tartalmaz a hengeres tokozásban (3.2. ábra), a szerkezet közepén elhelyezkedő szeizmikus tömeg két rugóra van felfüggesztve.

A tömeg alaphelyzetben két indukciós tekercs között helyezkedik el, mozgás közben pedig induktivitás változást idéz elő az egymással szemben elhelyezkedő tekercsekben. A tekercsek együtt egy félhidat alkotnak, amik a mérőerősítőben egy Wheatstone-kapcsolású teljes híddá egészülnek ki.



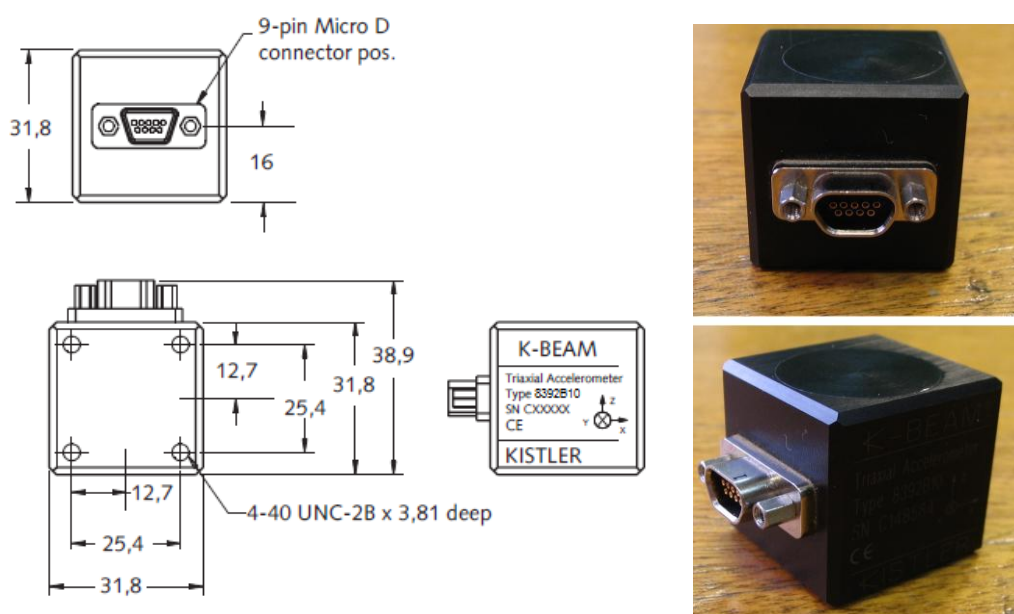
3.2. ábra: B12/200 és működési modellje

A mérés során a mozgás kimotoztatja ezt a hidat az egyensúlyi helyzetből, így egy olyan mérési jel jön létre, ami egyenesen arányos a tömeg elmozdulásával és ezzel együtt a gyorsulással is.

A szeizmikus tömeg mozgása folyadécsillapítású. A szerkezet mechanikai működési elve alapvetően a már második fejezetben tárgyalt egy szabadságfokú lengőrendszerre (2.8. ábra) vezethető vissza, annak ez egy továbbgondolt változata [7].

Kistler K-Beam 8392B10

A Kistler érzékelője egy triaxiális (három irányban mérő) szenzor, melynek a tokozásán feltüntetett koordináta rendszer mutatja a mérés iránytengelyeit (3.3. ábra). A mérő-átalakító ± 10 g gyorsulás mérésére alkalmas, és szintén képes érzékelni az állandó gyorsulást is. Működési elve kapacitív, egyéb információt a gyártó nem adott meg.



3.3. ábra: Kistler K-Beam 8392B10 méretei és mérési iránytengelyei

A negyedik mérő-átalakító az SKF gyorsulásérzékelője, azonban ez az érzékelő a gravitációs gyorsulást nem érzékeli, így csak a dinamikus tesztek során kerül bemutatásra.

3.2. Adatgyűjtés és mérőrendszer

Az adatfeldolgozás minden esetben a HBM gyártmányú Spider8 PC-s mérőelektronikával történt (3.4. ábra). Lényegében egy PC-hez kapcsolódó elektronikus mérőrendszerről van szó, amelyet mechanikai mennyiségek mérésére alkalmaznak úgy, mint a nyomás, megnyúlás, erő, út, gyorsulás vagy a hőmérséklet.

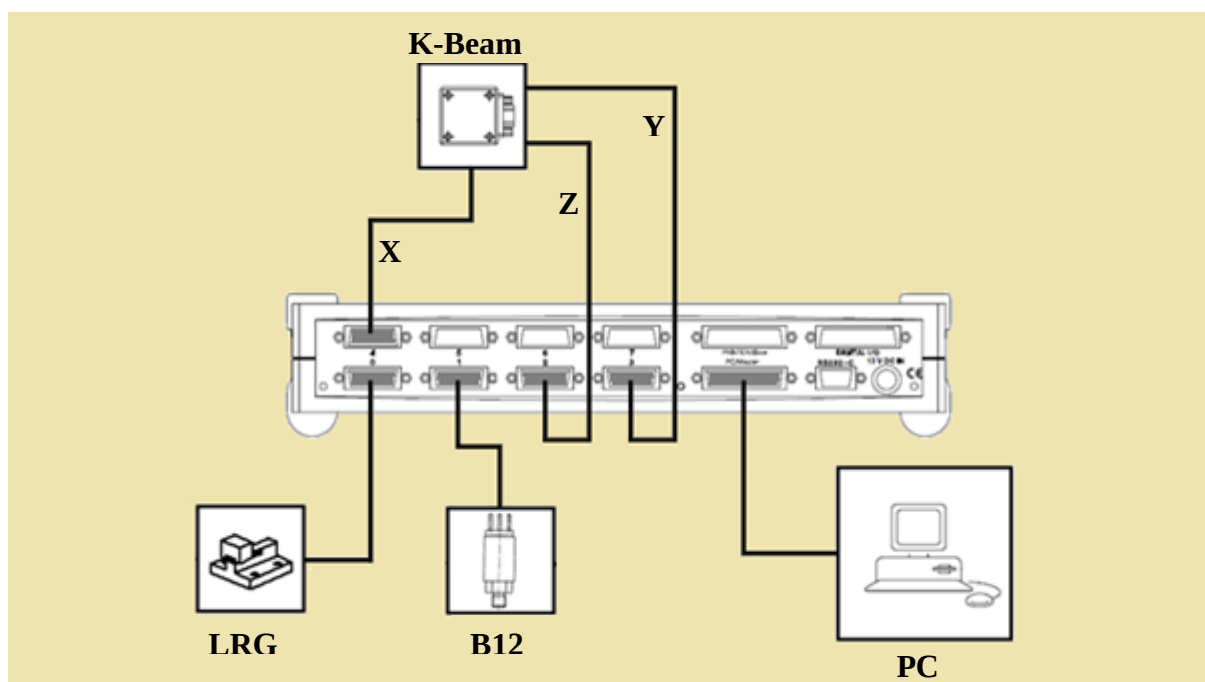


3.4. ábra: Spider 8 mérésadat gyűjtő

Minden jelfeldolgozási művelet, beleértve a passzív jeladók kezelését, erősítést, digitalizálást egy berendezésben történik. A műszer 8 bemeneti csatornával rendelkezik, a számítógéphez párhuzamos porton vagy USB-n keresztül csatlakoztatható.

A beállítási műveletek elvégzése nem potenciométerek vagy nyomógombok, esetleg jumperek átrakásával zajlik, hanem minden a számítógépen keresztül történik. A hardverbe csak új modul beillesztése esetén indokolt belenyúlni.

A mérések során használt input hardver konfigurációt a 3.5. ábra és 3.3. táblázat ismerteti.



3.5. ábra: Mérési bemenetek a Spider 8 mérésadatgyűjtő hátoldalán

3.3. táblázat: Mérési bemenetek

Csatorna	Típus	I/O Csatorna megnevezés	Sorozatszám
CH0	LRG	LRG	1.0
CH1	HBM B12/200	B12	4343
CH2	Kistler 8392B10	Kistler z	C148584
CH3		Kistler y	
CH4		Kistler x	

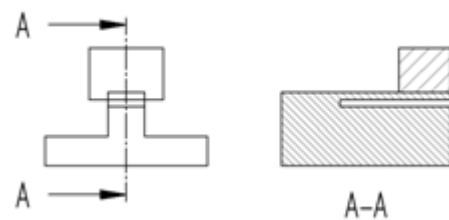
Az adatgyűjtés és jelfeldolgozás a számítógépen a Catman 4.5 nevű HBM fejlesztésű szoftverrel történt. A mérőműszer kalibrálására, a mintavételi frekvencia beállítására, és egyéb mérési finomhangolások elvégzésére itt nyílik lehetőség (pl. különböző szűrők bekapcsolása). A mért értékek exportálása is megoldható további adatfeldolgozás céljából.

3.3 Statikus kalibrálás

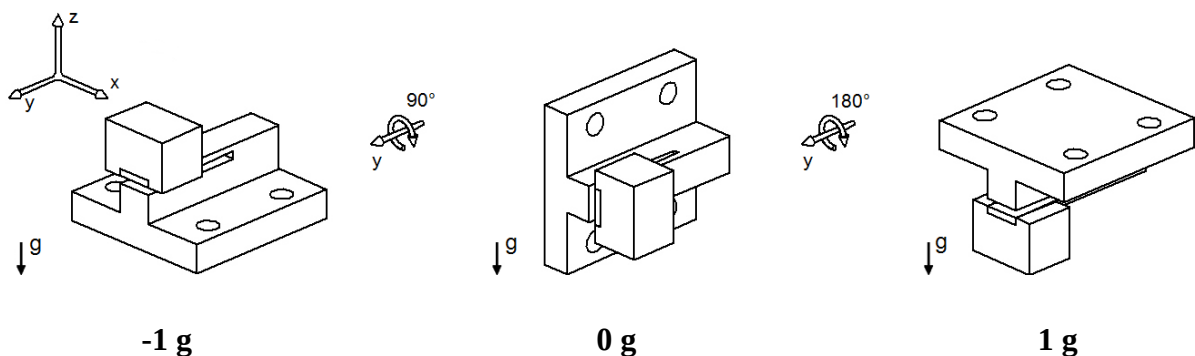
A statikus kalibrálás egy folyamatosan jelenlévő, állandó értékű gyorsulás, a gravitáció segítségével történik. Kalibráláskor az első feladat a nullázás, ami úgy valósul meg, hogy a mérő műszer (akár kézzel vagy géppel történő) forgatásával elérjük, hogy a gravitációs gyorsulás iránya merőleges legyen a mérés síkjára, és az ekkor mért értéket állítjuk be a 0 m/s^2 gyorsulásnak. Ekkor a vizsgált irányban valóban nem történik gyorsulás. Ezután a mérési síkot (3.6. ábra) függőleges helyzetbe állítjuk olyan módon, hogy a gravitáció vektor iránya megegyezzen a mérés irányával. Ekkor a mért értéket 1g-nek, azaz $9,81 \text{ m/s}^2$ gyorsulásnak nevezzük. Ezen két pont ismeretében lineáris függvénykapcsolat adható meg a műszerből kijövő jel erőssége és az adott irányú gyorsulás értéke között mellyel bármely mért értékből számítható a gyorsulás.

Az LRG statikus kalibrálása

Az LRG esetében a mérés síkja a laprugóra merőleges sík (3.6. ábra). Ha ez a sík tehát olyan helyzetbe kerül, hogy a gravitációs gyorsulásvektor merőleges rá, akkor az érzékelő nulla helyzetben van. Ha ezután 90° -kal elforgatjuk a megadott tengely körül, akkor felvehetjük vele az 1 g-s vagy -1 g-s állapotot attól függően, hogy melyik irányba forgatjuk (3.7. ábra).



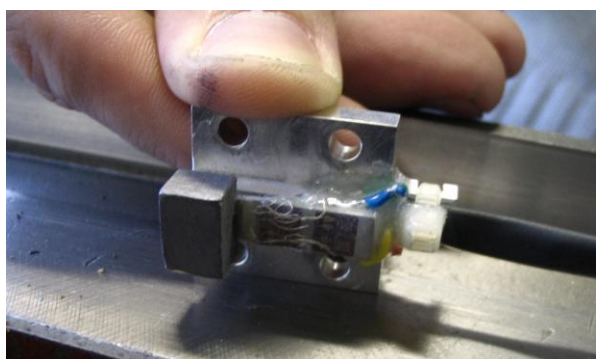
3.6. ábra: A mérés síkja



3.7. ábra: Az LRG állapotai a gravitációs térben

A kalibrálási és tárazási műveletek a Catman 4.5-ben végezhetőek el. Az 'I/O definition' menü táblázatában látható hogy az érzékelő melyik csatornán helyezkedik el, miután az eszköz felismerése megtörtént (a nem használt csatornákat ezután kikapcsoljuk).

Ezután, a 'setup device' modulban a megfelelő mérési beállítások kerülnek kiválasztásra (mV/V a kimenő jel egysége és Fullbridge, azaz teljes hidas mérőeszköz), ekkor az aktuális hídfeszültség érték megjelenik a táblázatban.

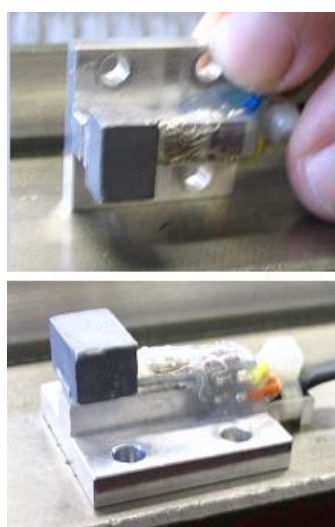


-0,069 mV/V		0,001 mV/V
0,000 mV/V		-3,932 mV/V
0,000 mV/V		-3,932 mV/V
0,000 mV/V		-3,932 mV/V
0,000 mV/V		-3,932 mV/V
0,000 mV/V		-3,932 mV/V
0,000 V		-0,002 V
0,000 V		0,002 V
		0,000

3.8. ábra: Az LRG nulla helyzetben, tárazás és tárazás utáni hídfeszültség

Ha a mérőeszközt az előbbiekben tárgyalt módon nulla helyzetbe állítjuk (4.8. ábra), akkor is tapasztalható minimális kimenő jel, ami gyártási illetve bélyeg felragasztási pontatlanság miatt alakulhat ki. A tárazó gomb lenyomása után a hibát kiküszöbölve a rendszer a továbbiakban ezt az állapotot tekinti nullának (3.8. ábra).

Visszatérve az 'I/O channels' menübe, a 'Scaling' oszlopból megnyitható 'Define user scaling' menüpontban egy táblázat segítségével rendelhető hozzá a megfelelő mechanikai mennyiség a kibocsátott villamos jelhez. Jelen esetben a jobb oldali oszlopban lesz megadva a gyorsulás, annak fejlécében pedig az egysége, m/s^2 . A bal oldali oszlopban a kiadott villamos jel a 'measure' gomb megnyomásával mérés útján lesz felvéve a megfelelő gyorsulás értékhez tartozóan (3.9. ábra).



Scaling method		
Linearisation table		
Linearization table Polynomial Function f(x) Strain gage scaling		
	mV/V	m/s ²
1	-0,00108	0
2	0,00648	-9,81
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		

Measure

Signal

☐ Gross

☐ Net

☐ Peak 1

☐ Peak 2

☐ Apply shunt

3.9. ábra: Lineáris függvénykapcsolat megadása a mért feszültségértékek és a gyorsulás között 0 és 9,81 m/s^2 -es állapotban

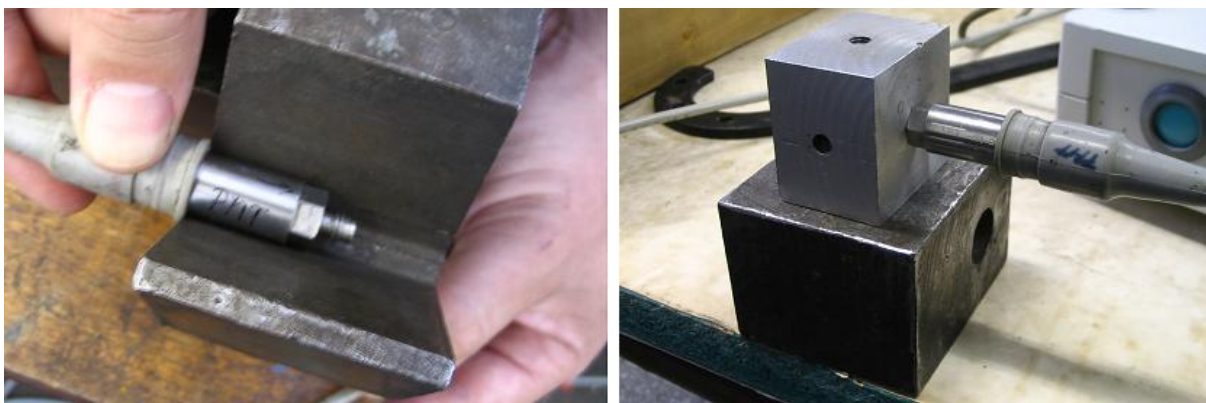
Az érzékelőt nulla helyzetbe fordítva 0, vagy 0-hoz nagyon közeli kibocsájtott feszültséggel keletkezik az előzőekben leírt tárazási művelet eredményeképpen. Ehhez az értékhez rendeljük hozzá a 0 m/s^2 gyorsulást. Az érzékelőt az aljára helyezve és a mérést elvégezve megkapjuk a $-9,81 \text{ m/s}^2$ -hez tartozó feszültség értékét (3.9. ábra). Ezzel a definiált lineáris függvénykapcsolattal a mért feszültség érték és a megadott gyorsulás közt az érzékelő kalibrálása megtörtént, a továbbiakban a mérési műveletek végrehajthatóak a szenzorral.

Megjegyzés: A két érték úgy is definiálható, hogy az első pontban az érzékelő a talpán áll, a másodikban pedig fejjel lefelé fordítjuk. Az első állapothoz továbbra is az 1 g-s állapot tartozik, a másodikhoz azonban $19,62 \text{ m/s}^2$ gyorsulást, azaz 2 g-t rendelünk. A két állapot közötti különbség ebben az esetben ténylegesen 2 g.

A B12 és a K-Beam statikus kalibrálása

A B12 kalibrálási érzékenysége 80 mV/V , ez a feszültségérték 200 m/s^2 gyorsulás esetén igaz. Ez a maximális gyorsulás, ami a mérő átalakítóval mérhető. A Catman képes automatikusan elvégezni a kalibrálást azzal, hogy megadja ezeket az értékeket a táblázatban, azonban az összehasonlítás szempontjából szerencsésebb, ha ugyanazon ismert körülmények között és ugyanolyan módon zajlik a kalibráció az összes érzékelő esetében.

A B12-nél az LRG-től eltérően 'Halfbridge' opció a kiválasztandó az érzékelő típusánál, a kibocsátott jel pedig nagyobb lesz mint az LRG esetében, ezért a 'measuring range' oszlopot 125 mV/V -ra kell beállítani.



3.10. ábra: B12 kalibrálása prizmával és furatos fémtesttel

Az érzékelő nulla állapota a hengerpalástjának vízszintes állapotba helyezésével valósítható meg, szabad kézzel azonban nehezebb statikus állapotban tartani a szenzort, mint egy kiterjedtebb síkfelülettel rendelkező érzékelő esetén. Ez a bizonytalanság elkerülhető, ha a B12 egy prizma vagy egy furatos fémtest segítségével kerül kalibrálásra (3.10. ábra).

A Kistler érzékelője az előzőektől eltérő módon Volt nagyságrendben ad ki jelet a gerjesztő impulzusra, így a 'Setup device' menüben az érzékelő által használt mindhárom csatorna 'Transducer type' oszlopát Voltage-ra kell állítani. A mérési határ beállítása 10 V. A tárazás és kalibrálás művelete az előző érzékelőkkel bemutatott módon zajlik, ezúttal három irányban. A gyorsulás irányvektoraival párhuzamos koordináta-rendszer tengelyek az érzékelő oldalán fel vannak tüntetve, ennek segítségével elvégezhető a kalibrálás (3.11. ábra).



3.11. ábra: Kistler K-Beam kalibrálása

Összességében mindhárom érzékelőt sikerült ugyanazzal a módszerrel kalibrálni. Elmondható, hogy azok az érzékelők kalibrálhatóak a legkönnyebben, melyeken nagyobb sík felületek állnak rendelkezésre. A Kistler kocka alakú, így mindhárom irányban megfelelően felfekszik valamelyik lapján, az LRG pedig megfelelő felületekkel rendelkezik a kívánt irányokba fordításához. A B12 gyártói valószínűleg úgy alakították ki érzékelőjüket, hogy a felismerése után ne legyen szükséges elvégezni ezt a műveletet.

A kalibrálási érzékenységek (3.4. táblázat) a három érzékelő esetében drasztikusan eltérnek egymástól, ami az eltérő dinamikai tulajdonságokkal magyarázható.

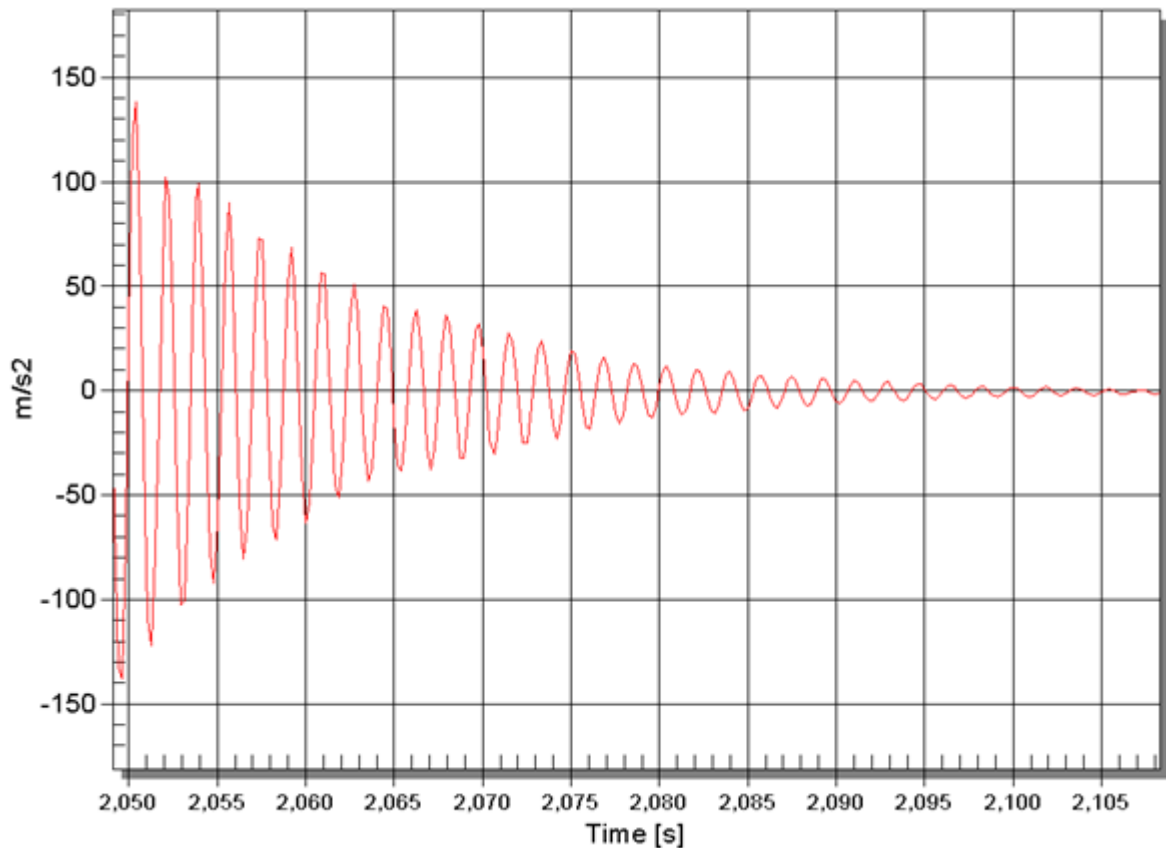
3.4. táblázat: A három érzékelő érzékenysége a statikus kalibrálás elvégzése után

Csatorna	Típus	I/O Csatorna megnevezés	Érzékenység (mV/V)/g
CH0	LRG	LRG	0,0065
CH1	HBM B12/200	B12	4,015
CH2	Kistler K-Beam 8392B10	Kistler z	0,103 (V/g)
CH3		Kistler y	0,1 (V/g)
CH4		Kistler x	0,098 (V/g)

Megjegyzés: A statikus kalibrálás műveletét érdemes síkfelületen végezni, például egy szerszámgép munkaasztalán. A három érzékelő egy esztergagép hídján került beállításra, kivéve azokat a fentebb tárgyalt eseteket, amikor a B12 kalibrálásához egyéb segédeszközök kerültek felhasználásra.

3.4. Az LRG csillapodása és sajátfrekvencia mérése

A gyorsulásérzékelőt rövid ideig tartó, ütésszerű erőhatással gerjesztve, csillapított jelalakot sikerült létrehozni (3.12. ábra).



3.12. ábra: Csillapodó rezgés

A méréssel ellenőrizhető a rendszer frekvenciája, valamint feltárhatóak a rendszer csillapítási jellemzői. A szabad, csillapított rezgés mindig a rendszer frekvenciáján történik, tehát a diagramról a periódusidő leolvasásával a frekvencia meghatározható. A leolvasott periódusidő: $1,666 \cdot 10^{-3}$ s.

Ebből a frekvencia a (2.4) összefüggésből:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,666 \cdot 10^{-3}} = 600 \text{ Hz}$$

Megjegyzés: A gyakorlatban a méretezés során számítottól nagyobb frekvenciaérték (538,6 Hz) a bélyegragasztó jelenlétének ki nem számított hatása miatt lehetséges. A későbbi dinamikus mérések során is a 600 Hz-es sajátfrekvencia igazolódik vissza.

A 3.12. ábra diagram út-idő függvénye az (2.21) összefüggés alapján alakul. A levezetéseket mellőzve ismert:

$$\frac{s_n}{s_{n+1}} = e^{\beta T} \quad (3.1)$$

Ennek alapján:

$$\ln \frac{s_n}{s_{n+1}} = \beta \cdot T = 2\pi \cdot \frac{D}{\sqrt{1-D^2}} \quad (3.2)$$

Ebből a csillapítási viszonzszám (D) majd a kritikus csillapítási tényező (k_{kr}) ismeretében a csillapítási tényező (2.20) összefüggés alapján számítható.

$$D = \frac{\ln \frac{s_n}{s_{n+1}}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{1 + \left(\ln \frac{s_n}{s_{n+1}} \right)^2}} \quad (3.3)$$

Az amplitúdók arányából meghatározható a csillapítás mértéke. A görbéről leolvasott két egymást követő csúcstérték 3.2-es képletbe helyettesítésével megkapjuk a csillapítási viszonzszámot. A vizsgálat több helyen is megtörtént [2].

Így a csillapítási viszonzszám:

$$D=0,019$$

Ebből a csillapítási tényező (2.20) képlet alapján:

$$k=D \cdot k_{kr}=0,019 \cdot 3,492=0,066 \text{ kg/s}$$

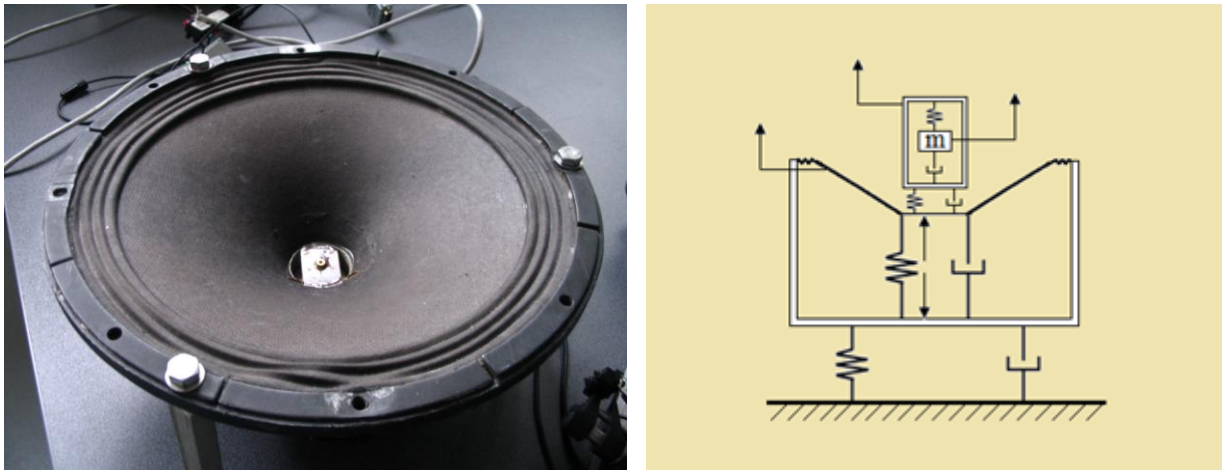
A fajlagos csillapítási tényező értéke:

$$\beta = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{T \cdot \sqrt{1-D^2}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{0,019}{1,666 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1-0,019^2}} = 71,699 \text{ 1/s}$$

4. Lengőasztalos vizsgálatok

A gyorsulásérzékelők statikus vizsgálata után elengedhetetlen egy olyan eszköz alkalmazása, mellyel a mérő-átalakítókat laboratóriumi körülmények között dinamikusan lehet tesztelni a géprezgés-mérések megkezdése előtt.

Egy laboratóriumi kalibráló berendezés beszerzése helyett egy megfelelő hangszóróval történt a gerjesztés létrehozása (elektrodinamikus lengőasztal, 4.1. ábra).



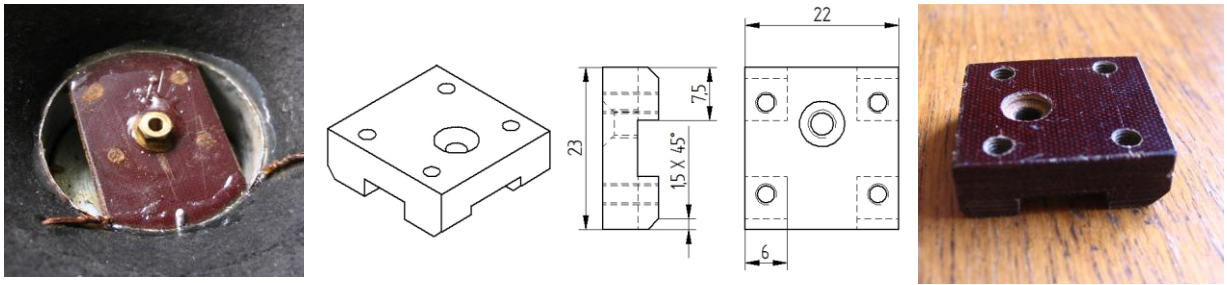
4.1. ábra: Elektrodinamikus lengőasztal és mechanikai modellje

A hangszóró membránjával tetszőleges frekvenciájú és amplitúdójú harmonikus rezgések állíthatóak elő, lehetőséget biztosítva az LRG képességeinek feltérképezésére. Az elektrodinamikus lengőasztal segítségével megvalósított feladatok:

- Az LRG dinamikus kalibrálása (megfelelő eszköz infrastruktúra kifejlesztése a mérés és a kitérés érzékeléséhez egy időben).
- Az LRG frekvenciafüggésének meghatározása.
- Az LRG laboratóriumi összehasonlító vizsgálata a gyári érzékelőkkel.

4.1. Az érzékelő rögzítése

A speciális kialakítású hangszórón a tekercsburkolat helyett egy síkfelület található, amely lehetővé teszi az érzékelő megfelelő elhelyezését. A rögzítést egy a sík lemezhez ragasztott menetes anyacsavar teszi lehetővé (4.2. ábra). Az anyacsavarhoz egy erre a célra legyártott közdarab csatlakozik, amelyhez 4 db M3-as csavarral lehet felszerelni az érzékelőt, illetve egyéb eszközöket a későbbiekben.



4.2. ábra: Rögzítő anyacsavar és az érzékelőt lefogató közdarab.

A hangfalhoz a megfelelő feltámaszkodás és stabilitás érdekében 3 db tartó láb is készült (4.3. ábra).

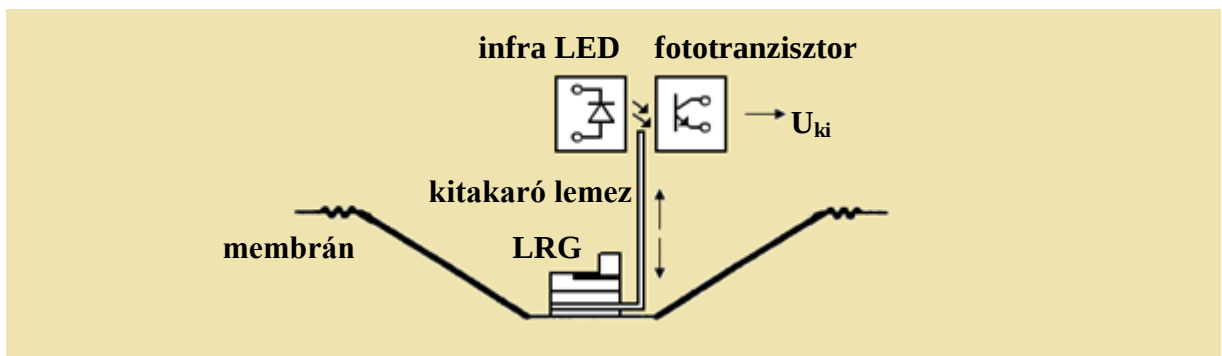


4.3. ábra: Hangszóró lábak

4.2. Membrán kitérésének érzékelése

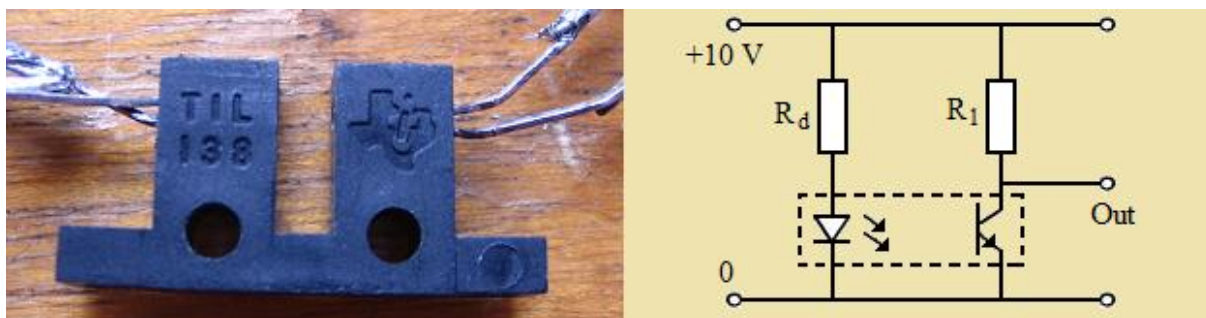
A dinamikus kalibráláshoz és a tesztelesekhez szükség van a hangszóró membrán kitérésének pontos meghatározására. A meglévő felszerelést egy olyan eszközrendszerrel kell bővíteni, amely a mérések közben képes erre a feladatra.

A membrán elmozdulása egy transzmissziós optikai érzékelő segítségével meghatározható, melynek kimenő jelét a membránnal együtt mozgó fémlemez által okozott kitakarás mértéke befolyásolja (4.4. ábra).



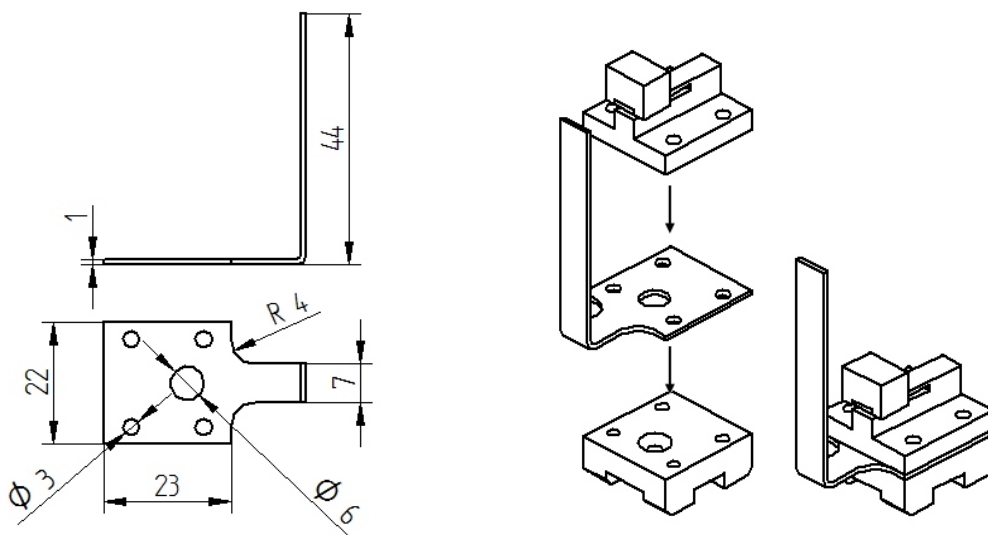
4.4. ábra: Membrán kitérés érzékelésének elvi vázlata

A méréshez használt TIL-138 típusú optokapu tokozásában egy infravörös tartományban sugárzó LED és egy ebben a tartományban fénysugárzásra érzékeny fototranzisztor helyezkedik el egymással szemben (4.5. ábra). Az eszköz úgy van kialakítva, hogy a tranzisztorra eső fénysugár mennyiségét egy vékony kitakaró elemmel befolyásolni lehet, így a rajta eső feszültség ennek függvényében változik. Az ilyen kialakítású transzmissziós optokapuk alkalmasak a helyzetérzékelésre.



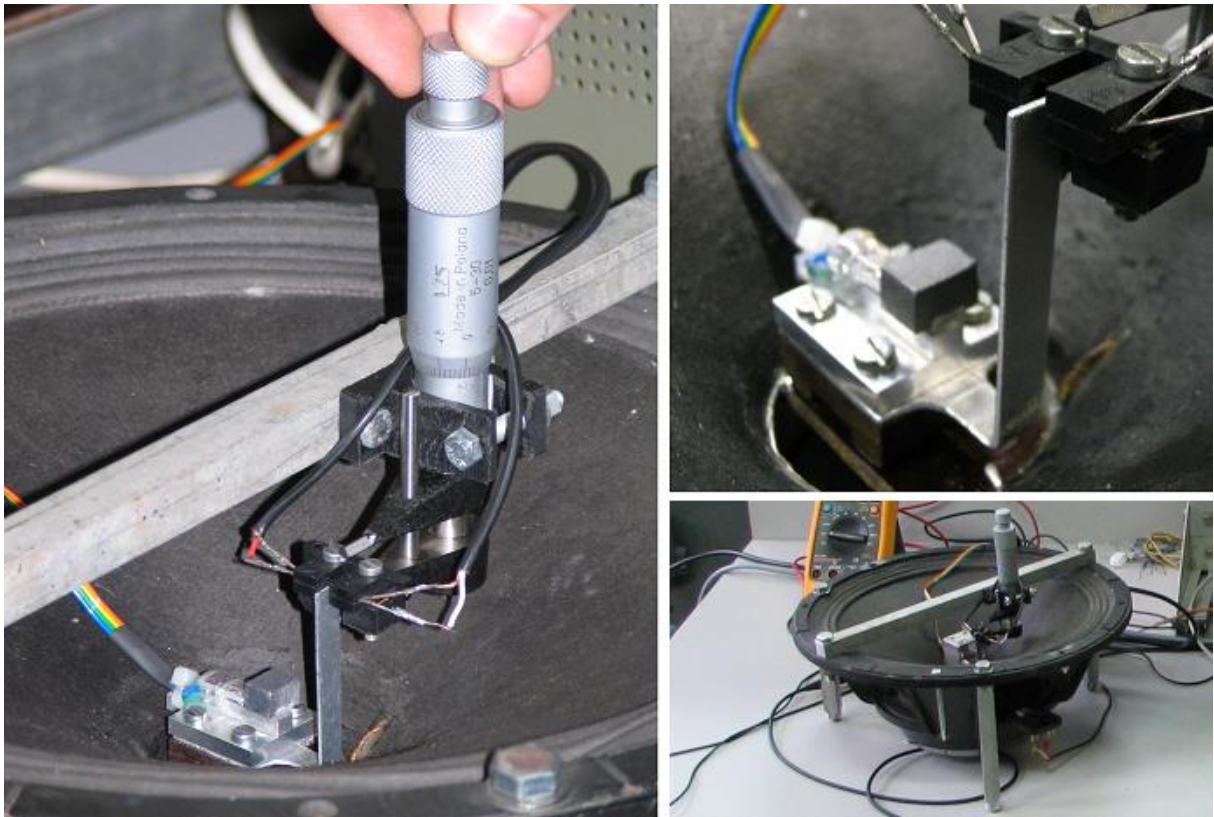
4.5. ábra: TIL-138 optokapu és kapcsolása

A kitakaró elem egy hajlított fémlemez, amely a hangszóróhoz rögzítő közdarab és a gyorsulásérzékelő között helyezkedik el (4.6. ábra). A középen elhelyezkedő furat más gyorsulásérzékelők elhelyezését is lehetővé teszi a kalibráló berendezésben.



4.6. ábra: Kitakaró lemez méretei és rögzítése

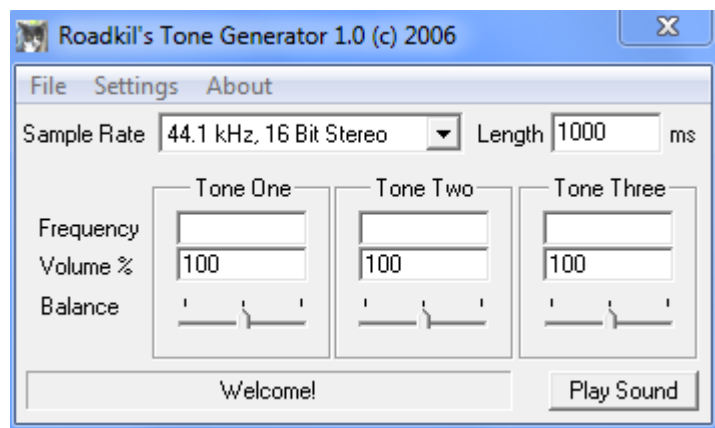
Az optokapu kalibrálása, és a megfelelő mérési tartományba való precíz beállítása egy mikrométer beépítésével valósítható meg. A hangszóró tetejéhez erősített rúdra (4.7. ábra) kerül a mikrométer, annak tapintóján elhelyezkedő fénysorompó pedig század mm-es pontossággal pozícionálható.



4.7. ábra: Optikai érzékelő pozicionálása mikrométerrel

4.3. A gerjesztő jel előállítása

A megfelelő szinuszos jelet egy PC-s jelgeneráló szoftver állítja elő (ToneGen – ingyenes szoftver, 4.8. ábra). Beállítható a frekvencia, az amplitúdó (a Windows hangerő szabályzója mellett), és a mintavételi frekvencia, amely a jel finomságának beállítását teszi lehetővé. A szoftver által kiadott jel oszcilloszkóppal ellenőrizhető.



4.8. ábra: Megfelelő frekvenciájú jel előállítása hanggenerátor szoftverrel

A teljesség kedvéért megemlíthető, hogy a jelet az ingyenes szoftver mellett jelgenerátor segítségével is elő lehet állítani, számottevő különbség azonban nem tapasztalható, így az egyszerűség kedvéért érdemes a szoftvert használni, hogy a mérőkör minél kevesebb elemből álljon.

A PC-laptop hang-kártyája által adott jelet erősíteni kell, ezt a feladatot egy külső erősítő látja el. A szervoerősítő egy összeszerelhető készletben került beszerzésre és összeillesztésre (4.9. ábra).

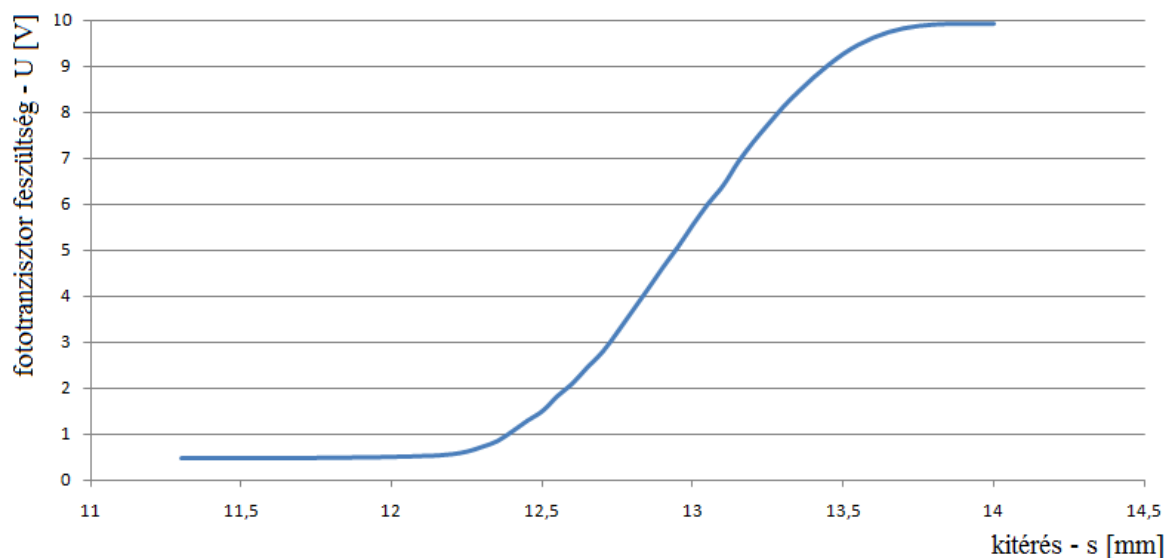


4.9. ábra: Erősítő kit csomagolása és összeszerelve hűtőbordával

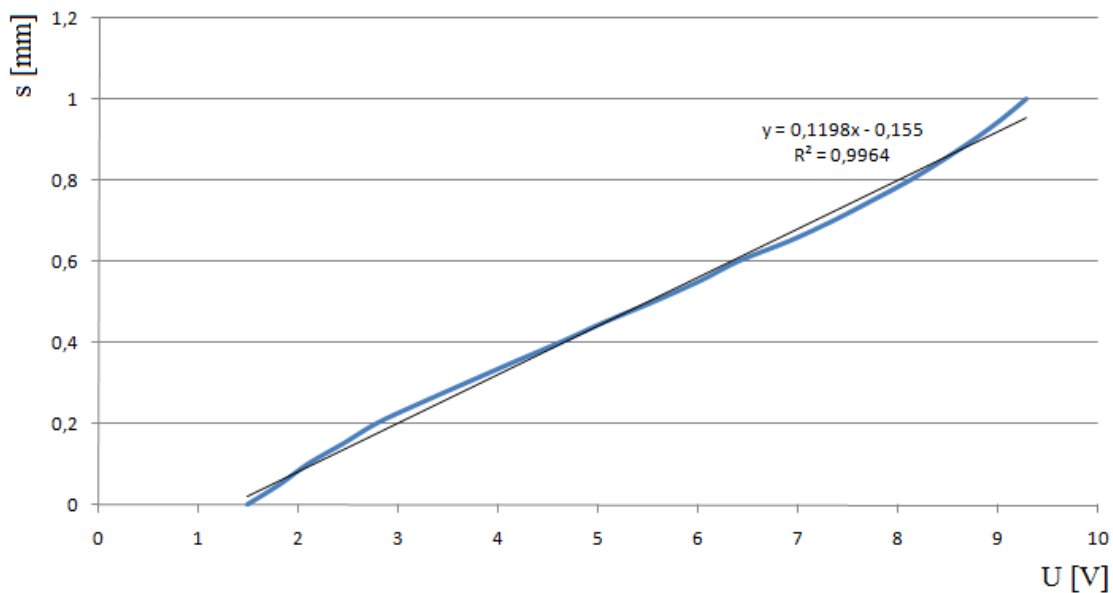
4.4. Optokapu statikus kalibrálása

A dinamikus kalibráláshoz szükség van a membrán kitérésének pontos érzékelésére, ehhez pedig ismerni kell az erre a célra beépített fénysorompó feszültség karakterisztikáját.

Meg kell határozni, hogy a tranzisztoron eső feszültség milyen arányban van a rá eső fényhez képest, és hogy lineáris kapcsolat áll-e fenn a két mennyiség között. Mivel viszonylag kisméretű kitéréseket kell mérni működés közben (mm valamekkora részét), ezért a kalibrálás során a lépésközt is kellően kis egységekre kell megválasztani, ez a század mm-es pontosságú mikrométer segítségével valósítható meg. A mérés 5 század mm-es lépésekben történt, a teljes kitakarás állapotától kezdődően addig a pontig, amíg a tranzisztor teljes kisugárzott fénymennyiséget érzékelte (4.10. ábra).



4.10. ábra: Feszültségváltozás a kitakarás függvényében



4.11. ábra: A mérés lineárisnak tekinthető szakasza

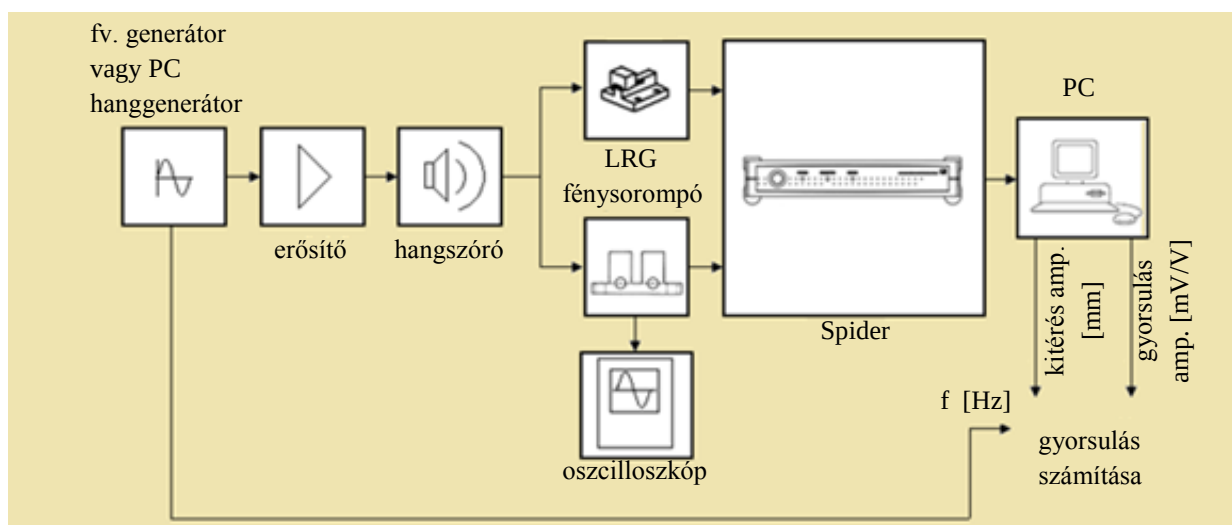
A többször elvégzett kalibrálás eredményeként megállapítható, hogy a feszültségértéket a kitérés függvényében ábrázoló diagram egy kb. 1mm-es szakaszon lineáris, így ebben a tartományban elvégezhető a kitérés érzékelése.

Az egyenes egyenlete:

$$s = 0,1198U - 0,155 \quad (4.1)$$

4.5. Az LRG dinamikus kalibrálása

Az LRG dinamikus kalibrálásának folyamatát az 4.12. ábra szemlélteti. Miután az érzékelő megfelelően rögzítésre került, a mikrométer segítségével az optokaput a mérési tartományba kell állítani.



4.12. ábra: Dinamikus kalibrálás folyamatábrája

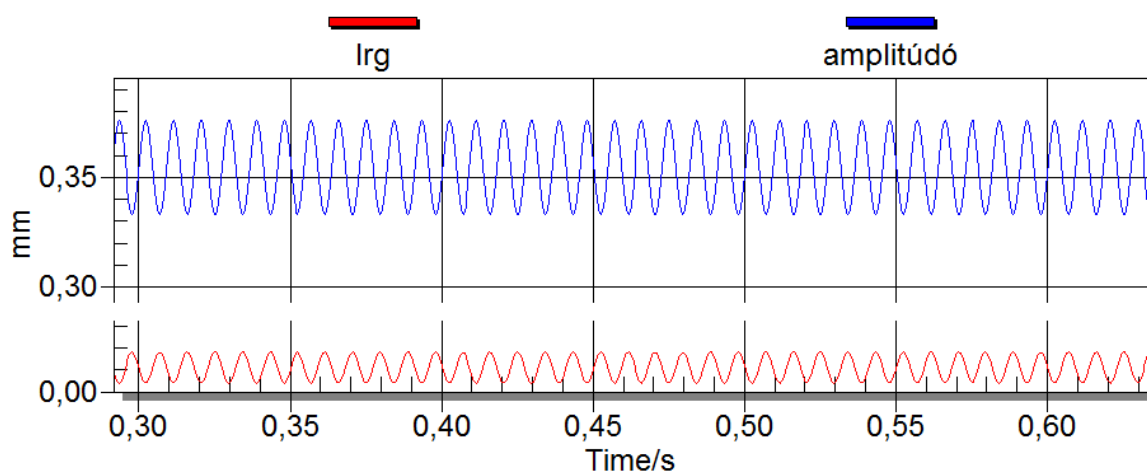
A Catman 'Setup device' menüjében a fénysorompó 'Transducer type' legördülő menüjében a 'Voltage' egységet kell beállítani, a méréstartomány 10 V (4.13. ábra).

4	$\frac{DC}{V}$	unnamed	SR55	2.506 V	Voltage	10 V	Variable
5	$\frac{DC}{V}$	unnamed	SR55	9.925 V	Voltage	10 V	Variable
6	$\frac{DC}{V}$	unnamed	SR01	-0.004 V	Voltage	10 V	Variable

4.13. ábra: Fénysorompó beállításai

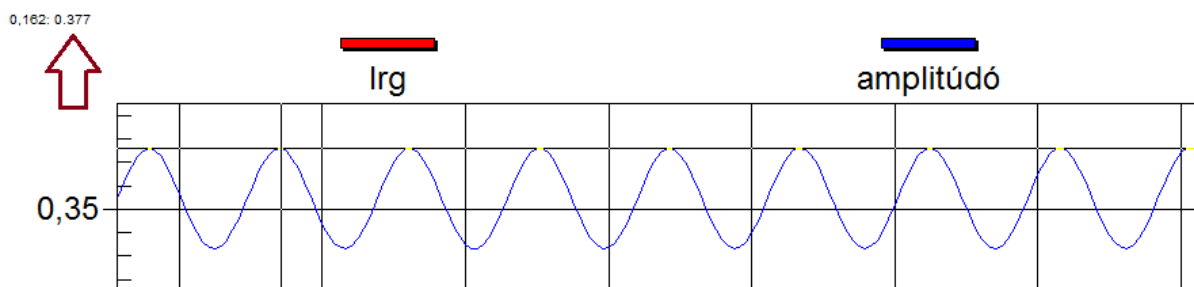
A 'Linearisation table' értékmegadásánál a statikus kalibrálás során kapott egyenes meredekségét (0,1198 – 5.1 egyenlet) rendeljük hozzá az 1 mm értékhez.

A beállítások után a mérés a Catman 'Data logger' moduljával történt, 2400 Hz-es mintavételi frekvencián. A rendszert $f_0 = 110$ Hz alapfrekvencián gerjesztettük a Tonegen szoftver segítségével. A diagram egyszerre jelzi a kitérés nagyságát mm-ben, és a gyorsulásérzékelő által kiadott jelet, ezúttal mV/V-ban az egyszerűbb számítás érdekében (4.14. ábra).



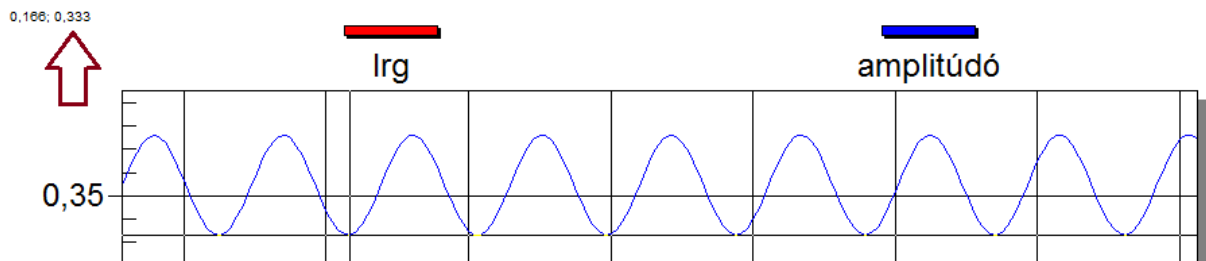
4.14. ábra: Hangszóró kitérés (mm) és a gyorsulásérzékelő jele (mV/V)

A kalibrálás az értékek pontos leolvasásával folytatódik. A jelalakok a Catmanben tetszőlegesen nagyíthatóak, a csúcsértékek pedig a kurzorral ezredes pontossággal leolvashatóak.



4.15. ábra: A kitérés felső csúcsértéke

Az 4.15. ábráról leolvasható, hogy a kitérés felső csúcsértéke: $A_{kf} = 0,377 \text{ mm}$.



4.16. ábra: A kitérés alsó csúcsértéke

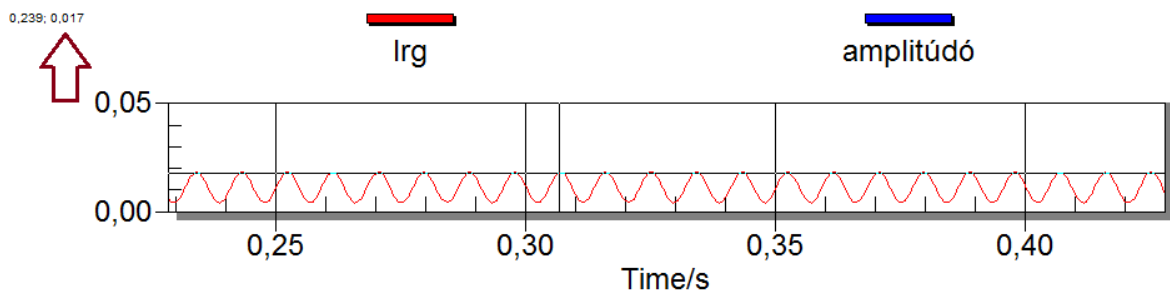
A kitérés alsó csúcsértéke: $A_{ka} = 0,333 \text{ mm}$ (4.16. ábra).

Ezekből az amplitúdó értéke:

$$A_k = (A_{kf} - A_{ka})/2 \quad (4.2)$$

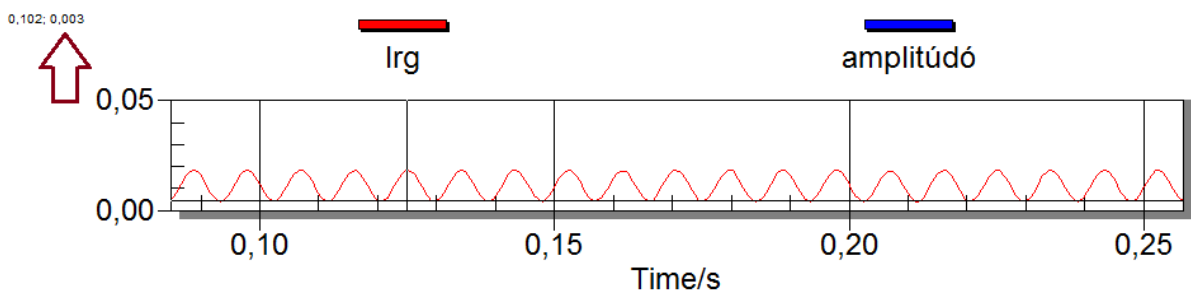
Behelyettesítve:

$$A_k = (0,377 - 0,333)/2 = 0,022 \text{ mm} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$



4.17. ábra: Az LRG által kiadott jel felső csúcsértéke

A gyorsulásérzékelő jelének felső csúcsértéke: $A_{gf} = 0,017 \text{ mV/V}$ (4.17. ábra).



4.18. ábra: Az LRG által kiadott jel alsó csúcsértéke

A gyorsulásérzékelő jelének alsó csúcsértéke: $A_{ga} = 0,003 \text{ mV/V}$ (4.18. ábra).

Ezekből az amplitúdó értéke:

$$A_g = (A_{gf} - A_{ga})/2$$

Behelyettesítve:

$$A_g = (0,017 - 0,003)/2 = 0,007 \text{ mV/V}$$

A körfrekvencia a (2.3) összefüggés alapján:

$$\omega_0 = 110 \cdot 2\pi = 691,15 \text{ Hz}$$

Arányosság a gyorsulások és a kiadott jelek között:

$$\frac{\omega_0^2 \cdot s}{A_g} = \frac{1g}{K_{\text{érz}}} \quad (4.3)$$

Ebből a kalibrálási érzékenység 1 g-re vonatkoztatva:

$$K_{\text{érz}} = \frac{A_g}{\omega_0^2 \cdot s} \cdot 9,81$$

Behelyettesítve:

$$K_{\text{érz}} = \frac{0,007}{691,15^2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-5}} \cdot 9,81 = 0,0065 \text{ mV}$$

A kalibrálási érzékenység megegyezik a statikus kalibrálás során elvégzett eredménnyel (3. fejezet, 3.4. táblázat), így megállapítható, hogy az LRG nem csak a gravitációs térben, hanem dinamikusan is kalibrálható.

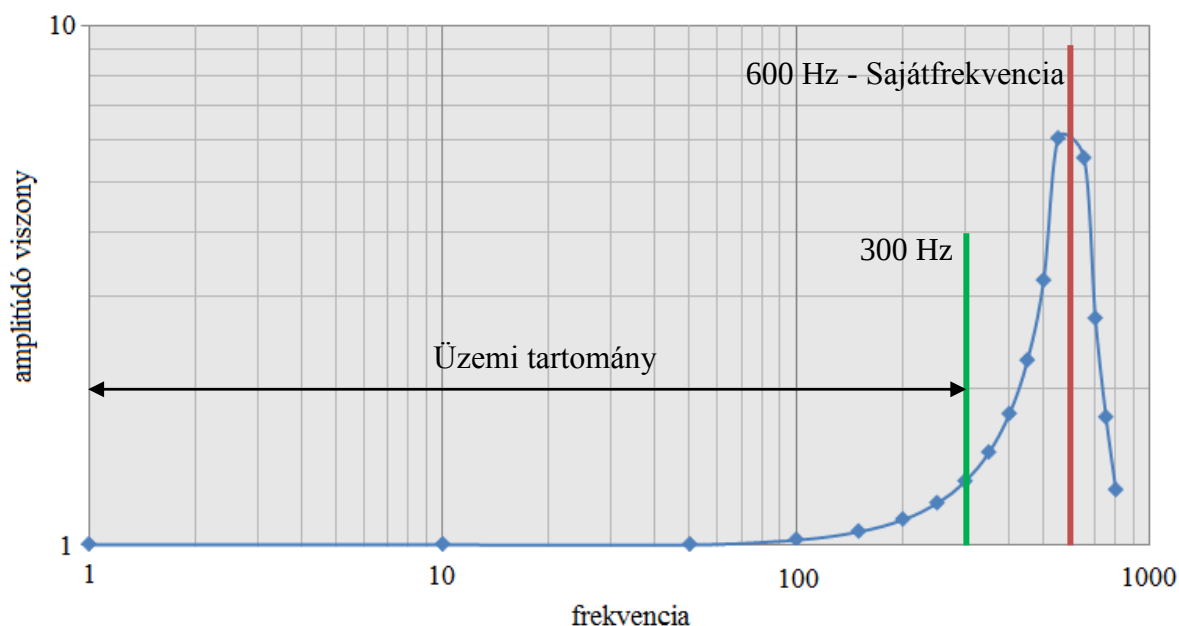
4.6. Az LRG frekvenciafüggésének meghatározása

Az LRG frekvenciafüggésének meghatározására a Mezőgazdasági Gépesítési Intézet Elektromos mérések laboratóriumában került sor. A mérési összeállítás ugyanaz, mint ami az érzékelők statikus kalibrálása című fejezetben ismertetésre került, kivéve, hogy a kitérés egy digitális oszcilloszkópról lett leolvasva. A mérési adatok Excelben kerültek feljegyzésre, azokból pedig diagram készült.



4.19. ábra: Mérési összeállítás a frekvenciafüggés meghatározásához

A mérés az alacsony frekvenciáktól a magasabbak frekvenciák felé haladva történt, az adatokból készült karakterisztikák pedig az érzékelő működési tartományát prezentálják. Az 4.20. ábra az LRG rezonancia görbéje.



4.20. ábra: Relatív amplitúdó a frekvencia függvényében

Az előző fejezetben az ütősszerű erőhatással történő gerjesztés hatására adott csillapodó rezgésből meghatározott 600 Hz-es rezonancia frekvencia ezekből a mérésekből is visszaigazolható. A vizsgálat során az átalakító 600 Hz körüli tartománynál erős rezonanciába kezdett, ezért itt a mérés elvégzése nehézségekbe ütközött, ez a tartomány a későbbi mérések során kerülendő a pontatlanságok elkerülése miatt.

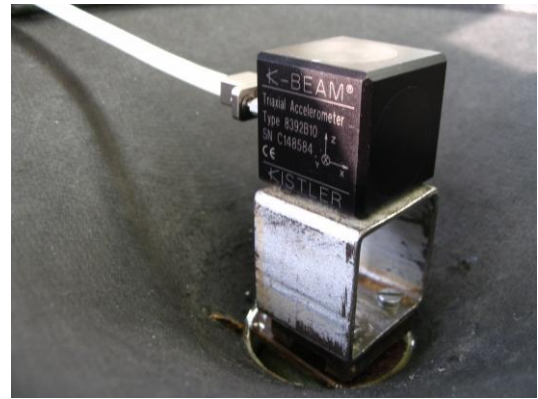
4.7. A reprodukálhatóság vizsgálata

Reprodukálhatóság: Azonos mérendő mennyiség megváltoztatott feltételek mellett megismételt mérései során kapott eredmények közelsége [16].

A mérések során megváltoztatott feltételek:

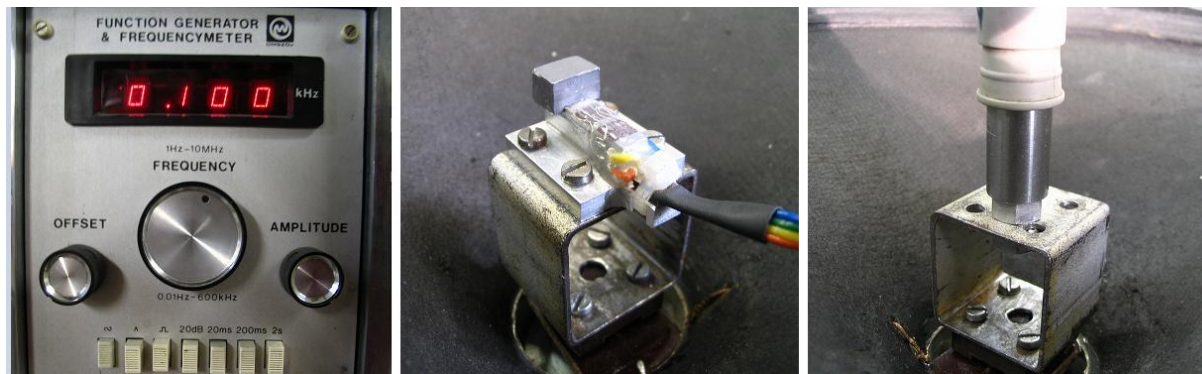
- Az érzékelő típusa
- Az érzékelők felfogatásának módja

A Kistler érzékelőjét csak egy speciális magasító szelvény segítségével lehet az elektrodinamikus lengőasztalhoz szerelni (4.21. ábra), ezért a másik két érzékelővel meg kell vizsgálni, hogy a szelvénnel együtt ugyanazokat a mérési eredményeket kapjuk-e, mint a szelvény használata nélkül. A B12 és az LRG először közvetlenül a hangszóróhoz rögzítő elemhez került felszerelésre. Az adatgyűjtés után a szelvény tetején történt velük a mérés.



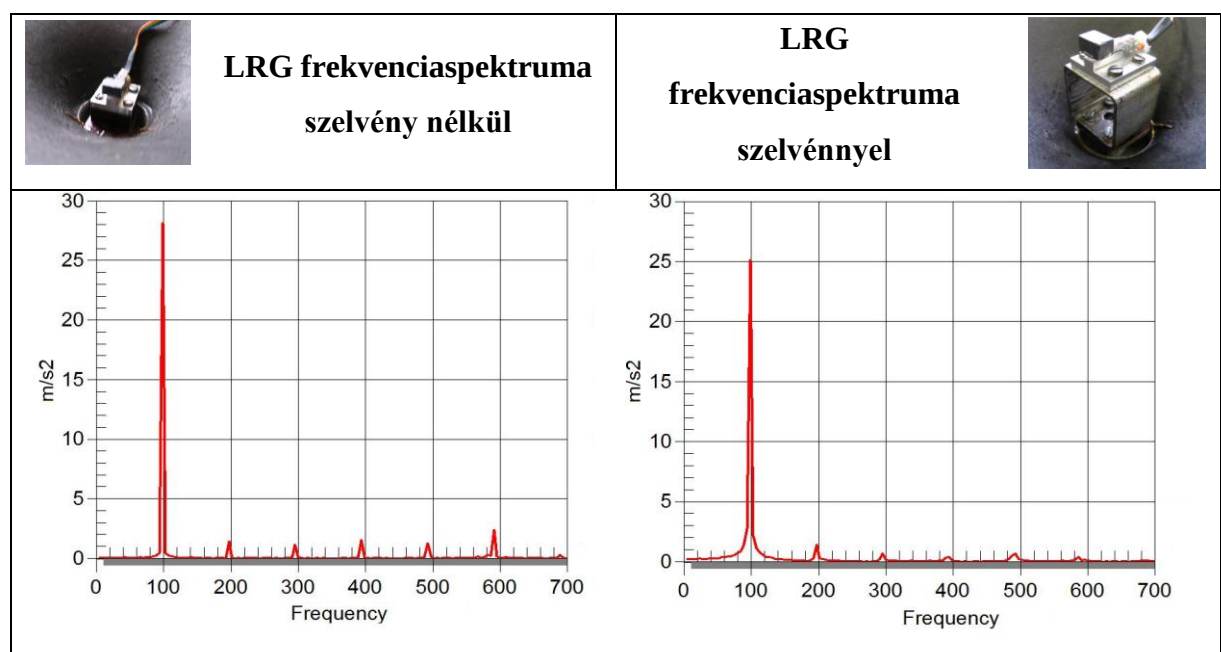
4.21. ábra: Kistler érzékelő felfogatása speciális magasító szelvénnel

A vizsgálat 100 Hz-es frekvencián történt, a gerjesztést egy függvénygenerátor szolgáltatta (4.22. ábra). A mérés eredményeit a 4.1. és 4.2. táblázat ismerteti.

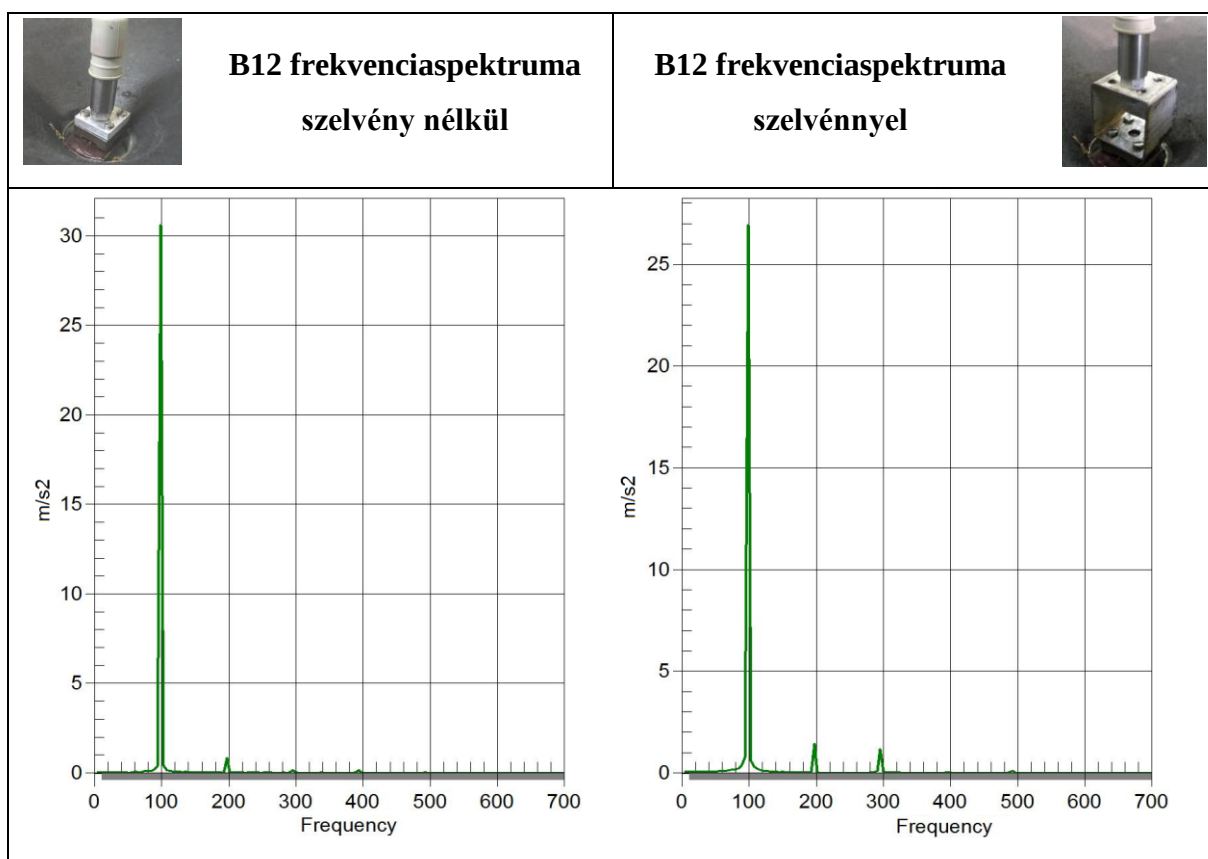


4.22. ábra: Összehasonlító vizsgálat szelvény nélkül és szelvénnel

4.1. táblázat: Az LRG frekvenciaspektruma szelvény nélkül és szelvénnel 100 Hz-en



4.2. táblázat: A B12 frekvenciaspektruma szelvény nélkül és szelvénnel 100 Hz-en

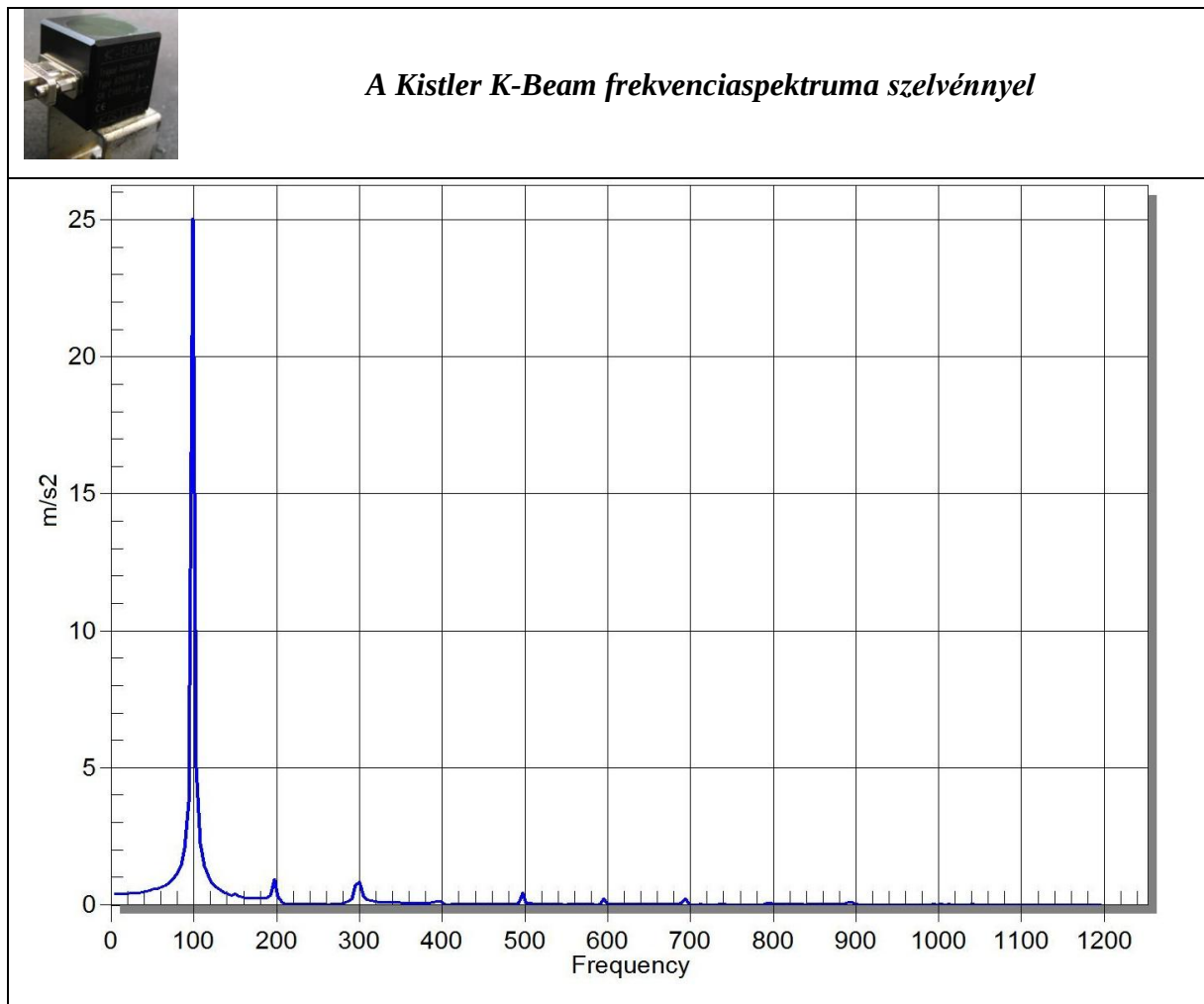


A mérések eredményeként látható, hogy a szelvénnel felfogatott érzékelők valamivel kisebb gyorsulást mérnek ugyanakkora gerjesztő amplitúdó hatására, mint amikor közvetlenül vannak rögzítve a hangszóró lemezéhez, valószínűleg a megnövekedett tömeg miatt, ami a membránt terheli. A különbség mindkét érzékelő esetében kb. 3 m/s^2 .

Mivel a különbség minimális, és mindkét érzékelő kis eltéréssel ugyanazt az eredményt méri (a minimális különbség szintén az érzékelők tömegbeli különbségéből adódhat), ezért megállapítható, hogy az összehasonlítás mind a három érzékelővel elvégezhető a szelvény segítségével.

A Kistler K-Beam frekvenciaspektruma a szelvénnel való rögzítés esetén az 4.3. táblázatban látható. A mérés az előző két esethez hasonlóan 100 Hz-es frekvencián és ugyanakkora gerjesztő amplitúdóval történt.

4.3. táblázat: A K-Beam frekvenciaspektruma rögzítő szelvénnel 100 Hz-en



Az LRG-nek 300 Hz-ig terjed az üzemi mérési tartománya, ezért egy nagyobb frekvenciatartományban mérő gyári érzékelő bevonásával, az SKF Microlog AX rezgésdiagnosztikai rendszerrel (4.23. ábra) további összehasonlító vizsgálatokat végeztem el.



4.23. ábra: SKF Microlog AX rezgésdiagnosztikai rendszer és gyorsulásérzékelője

Az SKF rendszerét főleg csapágyhibák diagnosztizálásához használják, ezért piezoelektromos érzékelője (cmss2200, 4.23. ábra) rendkívül nagy méréshatárokkal rendelkezik (4.4. táblázat).

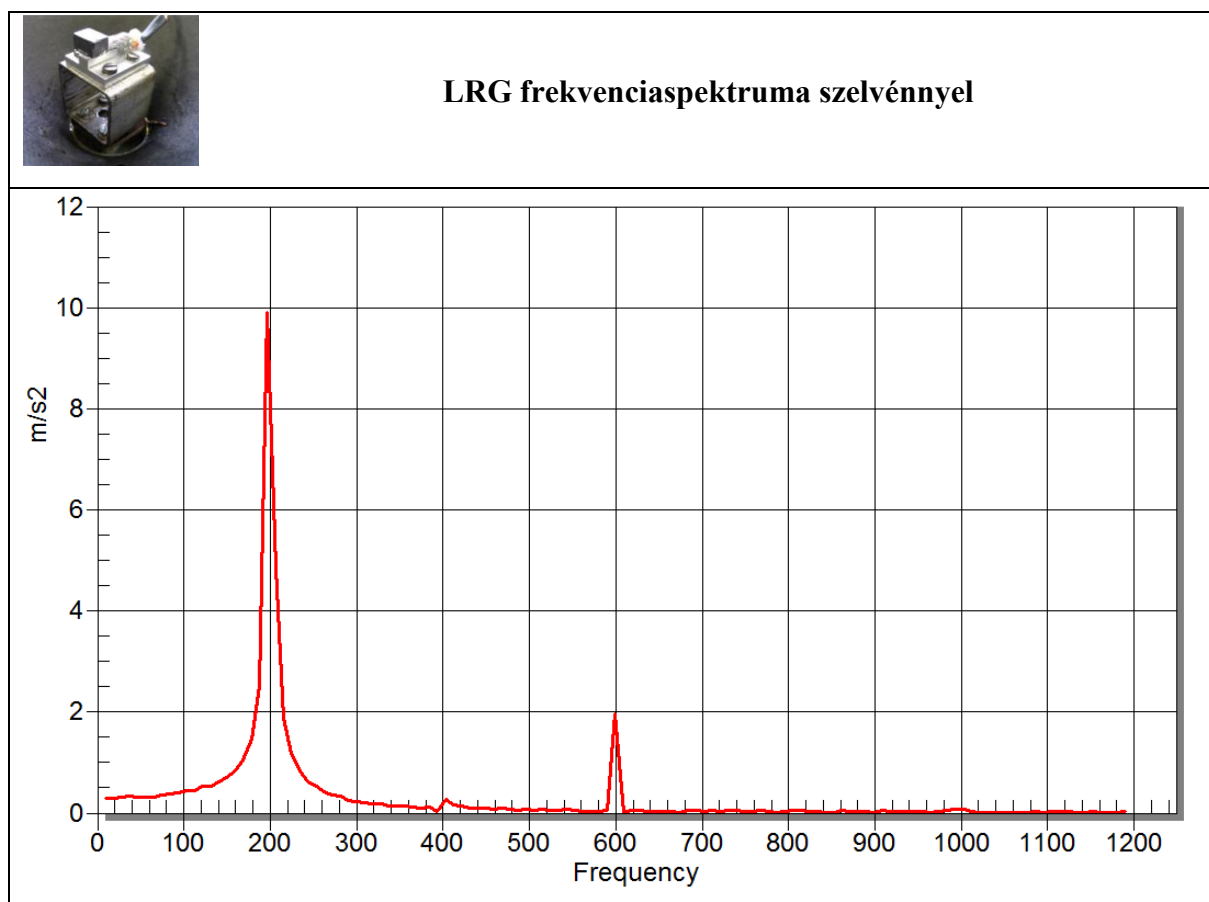
4.4. táblázat: cmss2200 piezoelektromos érzékelő paraméterei

Frekvenciatartomány	Rezonancia frekvencia	Méréshatár
1-5000Hz	22 kHz	500 g

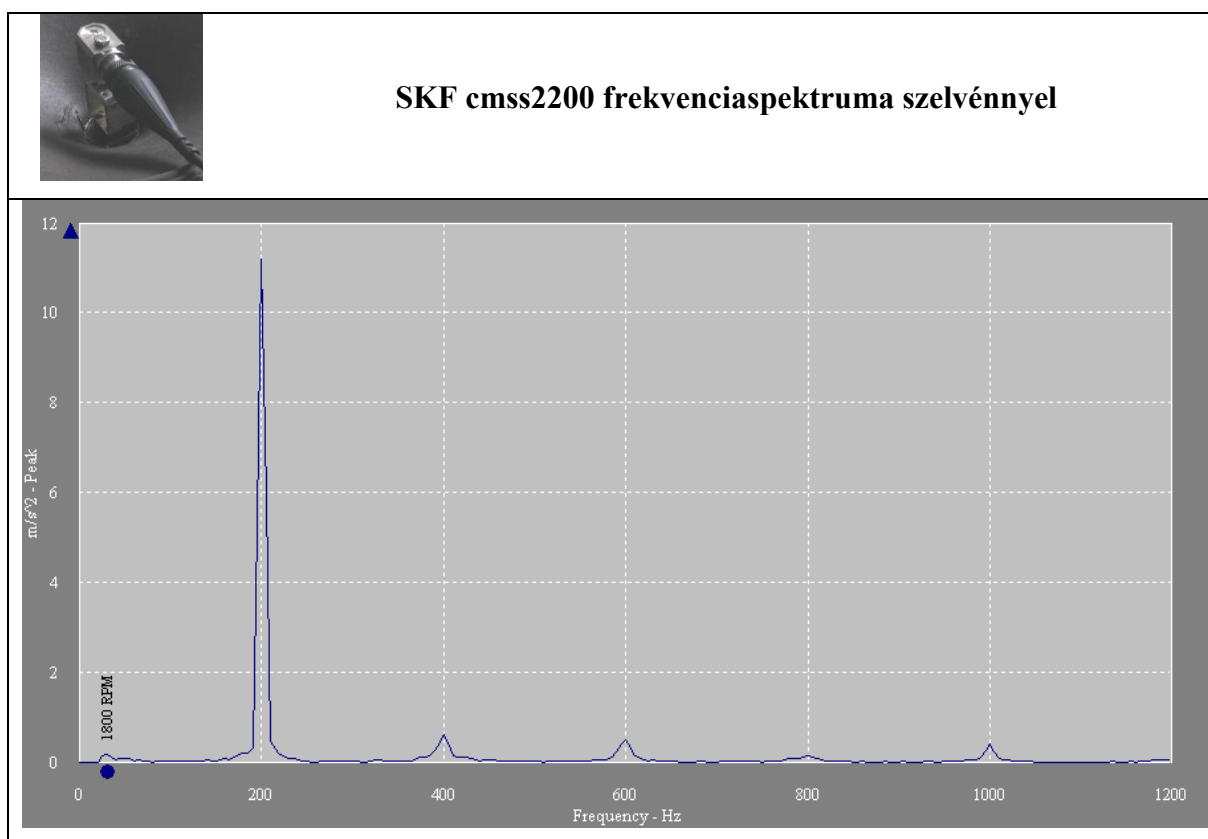
A berendezés mérésadatgyűjtő rendszeréből az adatok PC-re feltölthetők és az SKF saját szoftverével megjeleníthetők. A szoftverből az adatok más formátumban nem exportálhatóak, a mérési eredményeket numerikus formában nem lehet lekérdezni, ezért az összehasonlítás során a két különböző mérőrendszer között nem lehet hidat verni. Ennek ellenére az @plitude Analyst-al is elvégezhetők ugyanazok a műveletek, amik a kiértékeléshez szükségesek, így az összehasonlítás probléma nélkül megoldható.

A mérést 200 Hz-en végeztem azonos gerjesztő amplitúdóval és a rögzítő szelvény alkalmazásával, az eredményeket az 4.5. és az 4.6. táblázat ismerteti.

4.5. táblázat: Az LRG frekvenciaspektruma, 200Hz-en



4.6. táblázat: Az SKF cmss2200 frekvenciaspektruma, 200Hz-en



Az összehasonlítások eredményeként elmondható, hogy az érzékelők gyorsulás amplitúdói kis mértékben eltérnek egymástól. Az eltérések magyarázhatóak egyrészt az érzékelők eltérő csillapítási paramétereivel, másrészt pedig feltételezhetjük, hogy az érzékelők kicserélése hatással van az egész lengőrendszerre. Amikor egy más tömegű és más paraméterekkel rendelkező érzékelő kerül a szelvényre, akkor a szelvény rugalmassági tulajdonságai kis mértékben megváltoznak, ami azt eredményezheti, hogy a membrán által átadott rezgéseket máshogy továbbítja, mint egy másik érzékelő esetében.

Mindent egybevetve azonban a mérési eredmények kimutatják, hogy a reprodukálhatóság az érzékelők által kisebb hibákkal megvalósítható, a minimális eltérések a dinamikus lengőrendszer nehezen befolyásolható, és nem teljesen kontrollált tulajdonságai miatt következhetnek be.

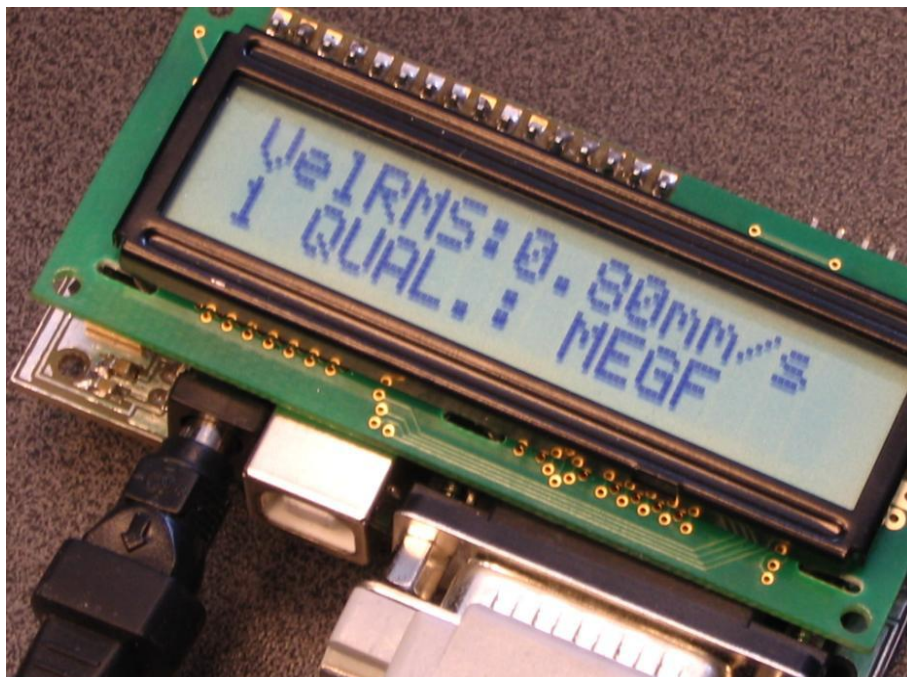
5. Összefoglalás

A dolgozatban megfogalmazott célkitűzéseknek megfelelően az érzékelőket statikusan és dinamikusan is összehasonlítottam, utóbbi esetben a saját tervezésű és kivitelezésű elektrodinamikus lengőasztalt használva. A laboratóriumi vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy az LRG-vel végrehajthatóak azok az alkalmazások, mint a másik kettő dolgozat során tesztelt, különböző működési elvű érzékelővel (HBM B12/200 és Kistler K-Beam 8392B10). Ennek köszönhetően a továbbiakban a mérések és összehasonlítások már a laboron kívül, konkrét mérési feladatok megvalósításával folytatódhatnak.

Az LRG egyszerű kialakítása révén könnyen létrehozhatóak feladat-specifikus szenzorok, egy lehetséges alkalmazási módszerként pedig kialakíthatóak olyan gépalkatrészek, melyek integráltan tartalmazzák az érzékelőt, elkerülve ezzel a felfogatással kapcsolatos teendőket és az ezzel járó hibákat.

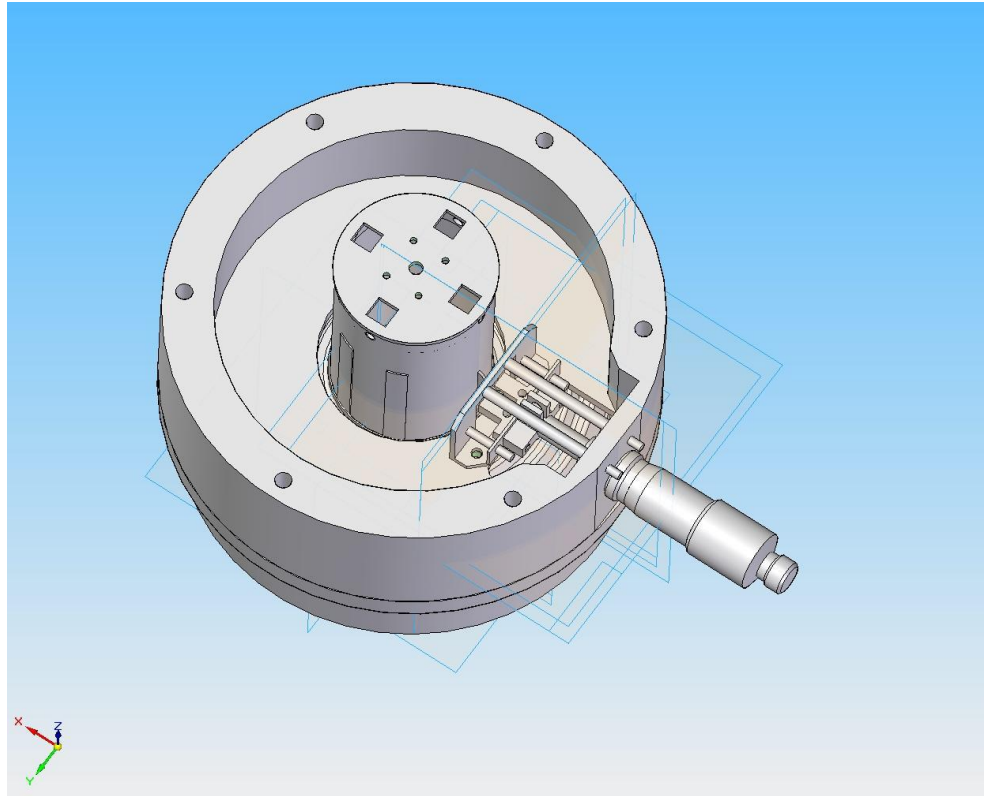
5.1. További célkitűzések

Az elvégzett munka mellett további feladatok elvégzése is folyamatban van. Az LRG-hez Bércesi Gábor készített egy hordozható digitális mérőrendszert, amely a sebesség RMS-t jelzi ki a mérés során (5.1. ábra). Bővebb információk Bércesi Gábor „Intelligens érzékelő tervezése géprezgés monitorozáshoz” című dolgozatában.



5.1. ábra: LRG digitális mérőrendszer (LRG Smart Sensor)

A jelenlegi elektrodinamikus lengőasztal mellett kezdetét vette egy új kalibráló eszköz megtervezése is (5.2. ábra). A kitérést meghatározó berendezés mellett egyéb mérőelektronikák elhelyezésére is lehetőség van, melyek segítségével akár az is megvalósítható, hogy a mérésekhez ne legyen szükséges külső mérőműszerek használata.



5.2. ábra: Új kalibráló lengőasztal tervezése

A távolabbi kilátások között szerepel más LRG konstrukciók megtervezése és legyártása, a jelenlegi méretek csökkentése.

Végezetül köszönet azoknak, akik hozzájárultak a TDK munkában szereplő mérések megvalósításához: Dr. Korzenszky Péter – villamos gép mérések, Dr. Kátai László, Mezei Tibor, Tötös Tamás – SKF laborhasználat, Deákvári József, Dudás László – MGI elektromos mérések labor eszközhasználat, Bércesi Gábor, valamint témavezető tanárom, Dr. Petróczki Károly.

Irodalomjegyzék

- [1] Bércesi Gábor: Géprezgések mérése és elemzése (TDK dolgozat), Gödöllő, 2010
- [2] Bércesi Gábor, Farkas Csaba: Gyorsulásérzékelő tervezése és kalibrálása (TDK dolgozat), Gödöllő, 2009
- [3] BME: Transzmissziós és reflexiós optoelektronikus szenzorok (mérési útmutató), BME Mechatronika, Optika és műszertechnika tanszék, évszám nélkül
- [4] Dr. Boros Andor: Villamos mérések a gépészetben, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978
- [5] Dr. Dömötör Ferenc: A rezgésdiagnosztika elemei, SKF Svéd golyóscsapágy Rt., Budaörs, 1996
- [6] Dr. Hegedűs Attila: A műszaki lengéstan alapjai, Szent István Egyetemi Kiadó, 2009
- [7] HBM: B12 Acceleration transducer mounting instructions, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, évszám nélkül
- [8] HBM: Spider8, Spider8-30 and Spider8-01 operating manual, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, évszám nélkül
- [9] Jacob Fraden: Handbook of Modern Sensors, Springer, New York, Usa, 2010
- [10] Karl Hoffmann: An Introduction to Measurements using Strain Gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989
- [11] Karl Hoffmann: Applying the Wheatstone Bridge Circuit, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Évszám nélkül
- [12] M. Csizmadia Béla, Nándor Ernő: Modellalkotás (Mechanika mérnököknek sorozat), Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2003
- [13] M. Csizmadia Béla, Nándor Ernő: Mozgástan (Mechanika mérnököknek sorozat), Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2001
- [14] M. Csizmadia Béla, Nándor Ernő: Statika (Mechanika mérnököknek sorozat), Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1996
- [15] M. Csizmadia Béla, Nándor Ernő: Szilárdságtan (Mechanika mérnököknek sorozat), Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1999
- [16] MTA-MMSZ: Nemzetközi metrológiai értelmező szótár, Országos mérésügyi hivatal, Budapest, 1998
- [17] Norbert Hesselmann: Digitális jelfeldolgozás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985

- [18] Richard Baraniuk: Signals and Systems, Connexions, Rice University, Houston, Texas, 2010
- [19] <http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/sensors/acc/pdf/2-101.pdf>, 2011-03-20 16:54, A Kyowa nyúlásmérő bélyeggel működő érzékelőinek adatlapja.
- [20] <http://www.endevco.com/product/prodpdf/71M.pdf>, 2011-03-20 16:58, Az Endevco egy rezisztív érzékelőjének adatlapja.
- [21] <http://www.endevco.com/product/prodpdf/7270A.pdf>, 2011-03-20 17:00, Az Endevco egy rezisztív érzékelőjének adatlapja.
- [22] <http://www.bksv.com/Products/TransducersConditioning/VibrationTransducers/Accelerometers.aspx>, 2011-03-20 17:06, A Brüel&Kjaer piezo-elektromos gyorsulásérzékelői.
- [23] http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL001.pdf, 2011-03-20 17:09, Az Analog Devices egyik MEMS gyorsulásérzékelőjének adatlapja.
- [24] <http://www.hbm.com/en/menu/industries/universities/knowledge/videos/>, 2011.03.20 17:13, HBM nyúlásmérő bélyegek felragasztási művelete.
- [25] http://www.tequipment.net/pdf/tektronix/TDS2000B_datasheet.pdf, 2011.03.20. 17:17, A használt Tektronix oszcilloszkóp adatlapja.

1. melléklet

6. gyorsulásérzékelő tervezése

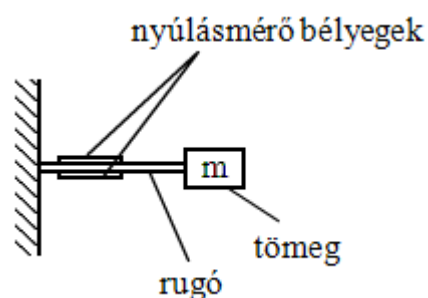
6.1 Gyorsulásérzékelő méretezése

Kitűzött célok

A gyorsulásérzékelő méretezését Bércesi Gáborral együtt végeztük el, ez a fejezet a Gyorsulásérzékelő tervezése és kalibrálása című TDK munkánkban is ismertetett művelet [1].

A tervezés előtt számos szempont megfogalmazódott. Célunk egy egyszerű konstrukció megtervezése, amely nagy mérési tartománnyal rendelkezik, tehát jelentős gyorsulás mérése is megoldható a mérő-átalakító túlterhelése, tönkremenetele nélkül, valamint állandó gyorsulás érzékelésére is használható (0 Hz-től). Az egyszerű kidolgozás velejárójaként maga a mérés különösebb nehézség nélkül megvalósítható, nem igényli a bonyolult kiegészítő áramkörök jelenlétét, vagy speciálisan az eszközhöz illeszkedő szoftver kifejlesztését.

A korábban leírt gyorsulásmérési lehetőségek közül az anyagtakarékosság, a kis méret és kis tömeg célkitűzése alapján a hajlított rugós visszatérítésű rendszer volt a logikus választás (6.1. ábra). A bonyolultabb mechanikai megoldások helyett a legegyszerűsebb megvalósítás számunkra ez a lengőrendszer, mely csupán egy tömegből és a rugó szerepét betöltő lemezből áll, a későbbiekben pedig a méretek tovább csökkentésének lehetősége is fennáll.



6.1. ábra: Hajlított rugós visszatérítésű rendszer felépítése

Esetünkben az alakváltozást a lemeZRugóra ragasztott 4 db Wheatstone-hídba kötött nyúlásmérő bélyeggel mérjük, ezáltal a deformációval arányos feszültségváltozás alapján számítható a gyorsulás.

Anyagok megválasztása

Az anyag megválasztása a tömeg és méret minimalizálásának figyelembe vételével történt. Ezt, és a nagy ellenálló képességet egyszerre szem előtt tartva egy könnyű, mégis nagy szilárdságú és rugalmas anyagra van szükség.

Az ötvöztelen alumínium nem rendelkezik kiemelkedő szilárdsági paraméterekkel, azonban az ötvözött és hőkezelt típusok nagyobb teherbírásuk és mégis az egyszerű alumíniuménál nem lényegesen nagyobb fajlagos nyúlásuk révén, már elterjedtnek számítanak az ipari alkalmazások területén. A célkitűzéseinknek megfelelően tehát:

Választott anyag: CERTAL EN AW-7022 / AlZnMgCu 0.5

6.1 táblázat: A CERTAL fizikai paraméterei

Sűrűség	2,76 g/cm ³
Szakító szilárdság	490 MPa
Folyáshatár	115 MPa
Rugalmassági (Young) modulus	72000 MPa
Lineáris hőtágulási együttható (20°-100°C)	23,6·10 ⁻⁶ K ⁻¹
Hővezetőképesség	120-150 W/mK
Elektromos vezetőképesség	18-22 S

A lemezugó végén elhelyezkedő szeizmikus tömeg nagyobb sűrűségű anyagból készül a lehajlás növelése érdekében. A kézenfekvő megoldás egy ólomnehezék.

6.2 táblázat: Az ólom (Pb) fizikai paraméterei

Sűrűség	11,34 g/cm ³
Rugalmassági (Young) modulus	16000 MPa
Hővezetőképesség	35,3 W/mK

Méretezés adott nyúlásra

A nyúlásmérésen alapuló gyorsulásérzékelés miatt a tervezést nem maximális feszültségre történő méretezéssel kezdtük, hanem az egyszerű Hooke-törvény felhasználásával, a lehető legnagyobb fajlagos nyúlás elérésére törekedve.

Az egyszerű Hooke-törvény [13]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.1)$$

ahol: σ - az ébredő feszültség

E - a rugalmassági modulus

ε - a fajlagos nyúlás

Esetünkben az ébredő feszültséget a lemezugó szélső szálában, a bélyeg felragasztás helyén értelmezzük. Ezt a rugalmassági modulussal megszorozva a megnyúlást kapjuk. A fajlagos nyúlás értékét az eszközeinkkel még jól mérhető $20\text{ }\mu\text{m/m}$ -nek vettük fel. Ha a rugó szélessége megengedi, hogy egymás mellett két aktív bélyeget is elhelyezzünk, a kimenő jel értéke a negyedhidas méréshez képest annak kétszeresére növelhető, ezért elegendő, ha a kitűzött érték felével számolunk. Ilyen esetben ahhoz, hogy a 72000 MPa rugalmassági modulussal rendelkező alumínium $10\text{ }\mu\text{m/m}$ alakváltozást szenvedjen:

Az egyszerű Hooke törvényből (6.1) kiindulva:

$$\sigma = 72000 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 0,72\text{ MPa}$$

az ébredő feszültségnek $0,72\text{ MPa}$ -nak kell lennie.

A méretek meghatározásához a Navier-formula hajlító igénybevételre:

$$\sigma = \frac{M_h}{I_z} \cdot y; \quad (6.2)$$

A rugóra ható nyomaték:

$$M_h = F \cdot l; \quad (6.3)$$

Lemezugó másodrendű nyomatéka [13]:

$$I_z = \frac{h^3 \cdot b}{12} \quad (6.4)$$

ahol: y – szélső szál súlyponttól mért távolsága ($h/2$)

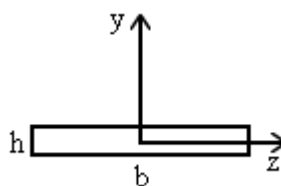
F – rugót terhelő erő

l – lemez hosszúsága

h – lemezugó magassága

b – lemez szélessége

A lehajlás növelése érdekében a lemezugó magasságát a lehető legkisebbre kell megválasztani.



6.2. ábra: Lemezugó keresztmetszet

Gyárthatósági szempontokat is figyelembe véve:

A lemez szélessége (6.2. ábra):

$$h = 1 \text{ mm}$$

$$b = 5 \text{ mm}$$

A másodrendű nyomaték értéke (6.4)-ből:

$$I_z = \frac{1^3 \cdot 5}{12} = \frac{5}{12} = 0,41\dot{6} \text{ mm}^4$$

A méréstartomány kibővítésének feltétele, hogy a lemezugó hosszát csökkentsük, ezáltal növekedik a körfrekvencia. A lemez hossza tehát:

$$l = 15 \text{ mm}$$

A szükséges hajlítónyomaték, az ébredő hajlítófeszültség (6.2) alapján:

$$M_h = \frac{\sigma \cdot I_z}{y} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot I_z}{h} = \frac{2 \cdot 0,72 \cdot 0,416}{1} = 0,6 \text{ Nmm}$$

A rugót felületen megoszló erőrendszerként terhelő tömeg által kifejtett erő nyomatéka úgy számítható, hogy a súlyerőt az erőrendszer súlypontjában ható koncentrált terhelésnek tekintjük. Az ólom tömeg hosszúsága:

$$l_t = 7 \text{ mm}$$

A tömeg súlypontja a befogástól:

$$l - \frac{l_t}{2}$$

A rugót terhelő erő (6.3):

$$F = \frac{M_h}{l - \frac{l_t}{2}} = \frac{0,6}{15 - \frac{7}{2}} = 0,052 \text{ N}$$

A terhelő erő ismeretében a tömeg, (2.10) egyenlet:

$$m = \frac{F}{g} = \frac{0,052}{9,81} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

Az ólomtömeg térfogata:

$$V = \frac{m}{\rho_{Pb}} = \frac{5,3 \cdot 10^{-3}}{11,34 \cdot 10^3} = 4,67 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 = 467 \text{ mm}^3$$

A tömeg keresztmetszete:

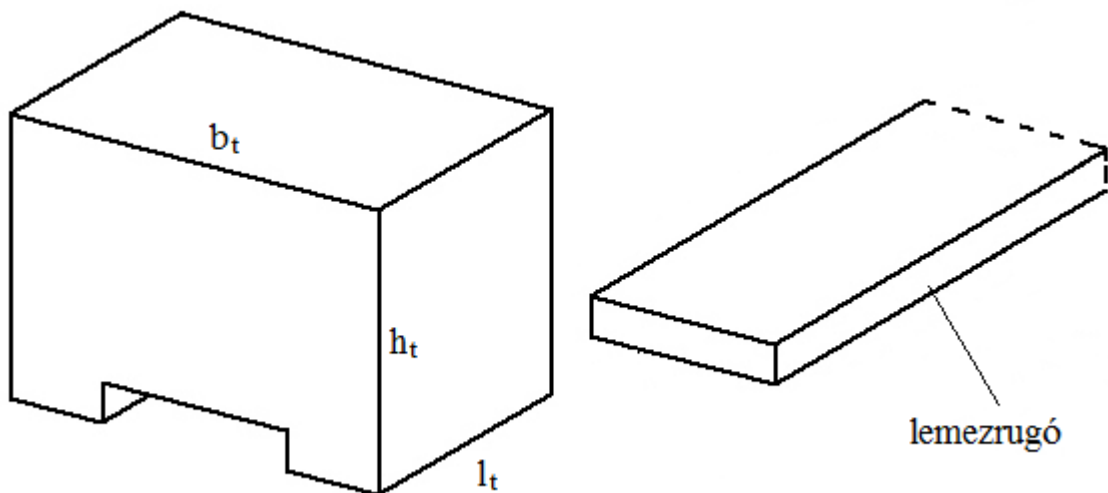
$$A = \frac{V}{l_t} = \frac{467}{7} = 66,71 \text{ mm}^2$$

A térfogat, a keresztmetszet és a korábban már megválasztott tömeghosszúság alapján a többi méret:

$$b_t = 10 \text{ mm}$$

$$h_t = 6,671 \approx 7 \text{ mm},$$

Azonban a lemezre való megfelelő illeszkedés érdekében a tömeg alján 1 mm magas, 5 mm széles horony helyezkedik el (6.3. ábra).



6.3. ábra: Ólomtömeg

Számítások a tényleges méretekkel

A szerkezet méreteit tehát ilyenformán határoztuk meg. A tényleges alakváltozást (megnyúlást) és a mérő további paramétereit már ezen méretek felhasználásával számítjuk. Először az ólomtömeg térfogatát kalkuláljuk, majd ebből a terhelő erő nagyságát határozzuk meg.

$$V_1 = l_t \cdot b_t \cdot h_t = 7 \cdot 10 \cdot 7 = 490 \text{ mm}^3$$

Ebből a térfogatból ki kell vonni a horony térfogatát, ami

$$V_2 = 2 \cdot 2,5 \cdot 1 \cdot 7 = 35 \text{ mm}^3.$$

A tömeg térfogata tehát:

$$V = V_1 - V_2 = 490 - 35 = 455 \text{ mm}^3$$

A terhelő erő nagysága:

$$F = \rho \cdot V \cdot g = 11,34 \cdot 10^3 \cdot 455 \cdot 10^{-9} \cdot 9,81 = 0,0506 \text{ N}$$

Az ébredő hajlítófeszültség meghatározásához szükség van a hajlítónyomaték nagyságára (6.3):

$$M_h = 0,0506 \cdot 15 - \frac{7}{2} = 0,5819 \text{ Nmm}$$

A keresztmetszet másodrendű nyomatéka az előzővel megegyező:

$$I_z = 0,416 \text{ mm}^4$$

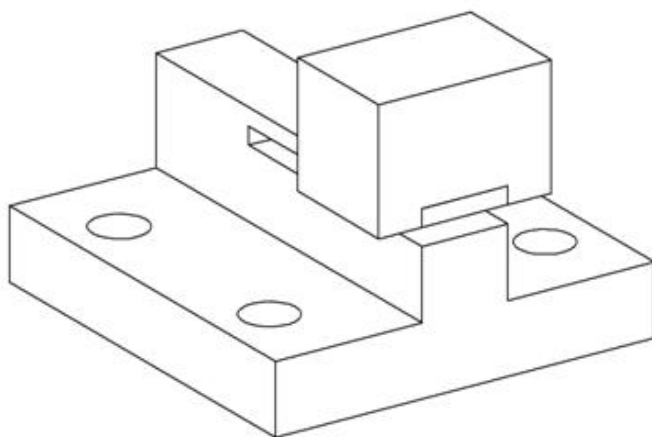
A hajlítófeszültség (6.2) összefüggés szerint:

$$\sigma = \frac{0,5819}{0,416} \cdot 0,5 = 0,6994 \text{ MPa}$$

A megnyúlás (6.1) képletből:

$$\varepsilon = \frac{0,6994}{72000} = 9,714 \cdot 10^{-6} = 9,7 \text{ } \mu\text{m/m}$$

A nyúlás értéke azonban a kiszámolt értékét kétszereseként vesszük figyelembe, mivel a rugó szélessége lehetővé teszi, hogy két db bélyeget ragasszunk fel egymás mellé.



6.4. ábra: Az elkészült gyorsulásérzékelő

A könnyű és biztos rögzíthetőség miatt a szerkezet alapját egy négy darab, 3 mm átmérőjű furattal ellátott 22 x 23 mm-es alapterületű hasáb képezi. Ennek és a számított paramétereknek az ismeretében már képet alkothatunk a valós szerkezetről (6.4. ábra). A gyorsulásérzékelő elnevezése a 'LapRugós Gyorsulásérzékelő' rövidítéséből adódóan: LRG.

A méretek kiszámítása után a lengéstani jellemzőket határozzuk meg. A rezgésmérő műszerek méréstartományát alapvetően a mérő átalakító sajátfrekvenciája határozza meg. Ennek a kitüntetett rezgésszám értéknek a környezetében a mechanikai lengőrendszerek rezonanciába kezdenek, így a mért jellemző a valódi érték többszöröse is lehet. Ezért a műszert ennek a frekvenciának nagyjából a feléig használhatjuk biztonsággal. Így már a mérőműszer tervezésekor is fontos figyelembe venni és meghatározni ezt a jellemzőt. Ehhez szükségünk lesz a lemez rugóállandójára.

A befogott tartókara értelmezve (6.4) felhasználásával:

$$c = \frac{l^3}{3 \cdot E \cdot I_z} = \frac{(0,015 - \frac{0,007}{2})^3}{3 \cdot 72000 \cdot 10^6 \cdot 0,416 \cdot 10^{-12}} = 1,692 \cdot 10^{-5} \frac{m}{N} \quad (6.5)$$

Az ilyen lengőrendszereknél gyakran felvetődik, hogy elhanyagolhatjuk-e a lemezzugó önsúlyát. Érdeemes megvizsgálni, hogy mennyi többletsúlyt jelent ez a rendszerben.

A rugós visszatérítésű rendszer esetén számított redukált tömeg [10]:

$$m_{red} = m + 0,236m_r \quad (6.6)$$

ahol: m_r – A lemezzugó tömege

m – A szeizmikus tömeg

A lemez tömege:

$$m_r = 0,01 \cdot 0,05 \cdot 0,015 \cdot 2,76 \cdot 10^3 = 2,07 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

Már ezen a ponton megállapítható, hogy a rugó tömege lényegesen kisebb, mint az ólomtömegé, ezért nem szükséges az önsúlyt belekalkulálnunk sajátfrekvencia számításába.

A sajátkörfrekvencia értéke (2.13) alapján:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{0,00516 \cdot 1,692 \cdot 10^{-5}}} = 3384,35 \frac{1}{s}$$

A rendszer frekvenciája:

$$f = \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{3384,34}{2\pi} = 538,6 \text{ Hz} \quad (6.7)$$

A rendszer további jellemzői

A rendszer további határainak meghatározása során kiszámítjuk, hogy mekkora gyorsulást tudunk mérni vele.

Elsősorban arra kérdésre keressük a választ, hogy mekkora gyorsulás hatására érjük el az anyag folyáshatárát.

A folyáshatár a 6.1. táblázatból:

$$R=115 \text{ Mpa}$$

A folyáshatárra való méretezés során először a hajlítónyomaték értékét számítjuk ki:

$$M_h = \frac{R \cdot I_z}{y} = \frac{115 \cdot 0,416}{0,5} = 95,68 \text{ Nmm}$$

Az erő (6.3):

$$F = \frac{95,68}{15 - \frac{7}{2}} = 8,32 \text{ N}$$

A folyáshatár eléréséhez szükséges gyorsulás (2.10) alapján a mérés irányában:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{8,32}{0,00516} = 1612,4 \frac{m}{s^2}$$

Ezután kiszámítjuk, hogy ezen gyorsulás hatására mennyire hajlik le a lemezugó:

$$v = \frac{F \cdot (l - \frac{l_t}{2})^3}{3 \cdot I \cdot E} = \frac{8,32 \cdot (15 - \frac{7}{2})^3}{3 \cdot 0,416 \cdot 72000} = 1,064 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \quad (6.8)$$

Ebből látható, hogy még jóval azelőtt elérjük az anyag folyáshatárát, hogy a lemezugó felütkezne a talpazathoz.

A számított adatokból a rendszer kritikus csillapítási tényezője (2.19)-es egyenlet alapján:

$$k_{kr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,00516}{1,692 \cdot 10^{-3}}} = 3,492 \frac{\text{kg}}{\text{s}} .$$

Tehát a rendszer sebességtől függő csillapítási tényezőjének ennél az értéknél mindig kisebbnek kell lennie, hogy létrejöjjön rezgés.

Az ilyen, kisméretű merev rugóval rendelkező lengőrendszereknél nem használhatunk külön csillapító rendszert (mint pl. az 2.7. ábrán látható folyadékféket). A csillapítási tényezőt befolyásoló paraméterek:

- a levegő közegellenállása
- az alumínium belső súrlódása
- a nyúlásmérő ragasztónak, a bélyeg anyagainak és az azt fedő szilikon belső súrlódása

A későbbi rögzítési megoldások miatt meghatározzuk még a függőleges súlyvonal helyzetét a hátsó (befogáshoz közelebbi) laphoz viszonyítva. A 6.4. ábrán látható, hogy a szerkezet a hossz tengelyére szimmetrikus, tehát a súlyvonal egyik koordinátája - nevezzük ezt Y_s -nek - a keresztmetszet középvonalával egybeesik.

Azaz:

$$Y_s = 11 \text{ mm}$$

A másik koordináta - ami legyen X_s - meghatározása nem ennyire egyszerű, mivel a szerkezet két különböző sűrűségű anyagból áll, a térfogati középpont meghatározása nem elegendő.

Az X_s koordináta:

$$X_s = \frac{\sum_i x_{s_i} \cdot m_i}{\sum_i m_i} \quad (6.9)$$

Először a műszer teljes tömege:

$$\sum_i m_i = 0,00516 + 2,76 \cdot 10^{-6} \cdot [(22 \cdot 23 \cdot 10) - (1 \cdot 5 \cdot 15) - 2 \cdot (23 \cdot 8,5 \cdot 6) - 4 \cdot (3^2 \cdot \pi)] = 0,01213 \text{ kg}$$

Ebből X_s (6.9) szerint:

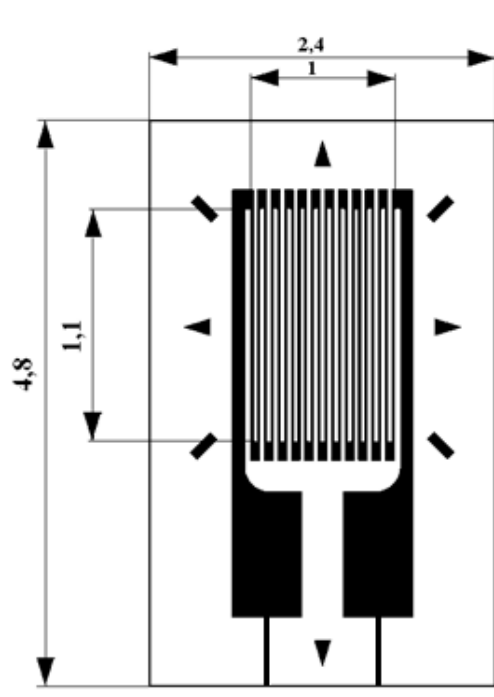
$$X_s = \frac{19,5 \cdot 0,00516 + 2,76 \cdot 10^{-6} \cdot [5060 \cdot 11,5 - 75 \cdot 15,5 - 2 \cdot 1173 \cdot 11,5 - 2 \cdot 3^2 \cdot \pi \cdot (5 + 18)]}{0,01213}$$

$$X_s = 14,834 \text{ mm}$$

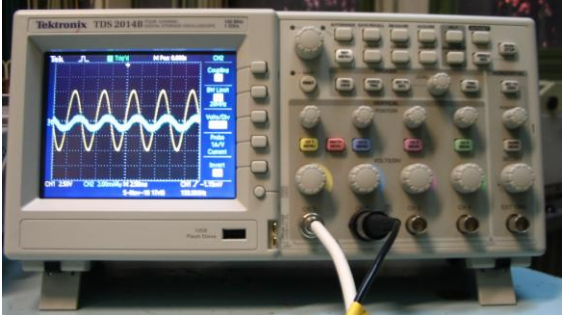
A felragasztott bélyegek jellemzői

Az LRG használatba vétele előtt feltétlenül szólnunk kell még annak egy nélkülözhetetlen részegységéről, az alkalmazott nyúlásmérő bélyegekről is. A szerkezetre összesen négy darab bélyeg került felragasztásra, amelyek közül kettő aktív, kettő pedig kompenzáló bélyegként funkcionál. Az aktív bélyegek a lemezzugón a befogási keresztmetszethez a lehető legközelebb kerültek elhelyezésre, míg a kompenzálók szintén a szerkezet felső részén, a meghosszabbított tartó részen, amely megnyúlást már nem végezhet. A bélyeg főbb jellemzőit és vázlatát a 6.3. táblázat mutatja

6.3. táblázat: Felragasztott bélyegek jellemzői

Típus:	KYOWA KFG-1-120-C1-11	
Alkalmazható:	-196°C-tól 150°C-ig	
Hőmérséklet kompenzáció:	10°C-tól 80°C-ig	
Névleges ellenállás (R):	$119,6 \pm 0,4 \Omega$	
Bélyegtényező (k):	$2,14 \pm 1\%$	
Ellenállás huzal anyaga:	Konstantán (Cu-Ni)	
Aktív terület:	1 x 1,1 mm	
Bélyeg terület:	4,8 x 2,4 mm	

2. melléklet: Felhasznált műszerek

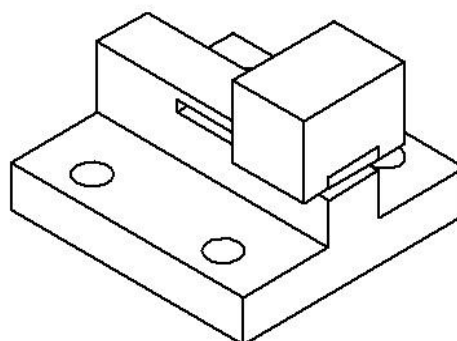
	
Spider 8 mérésadatgyűjtő	Tektronix TDS 2014B digitális oszcilloszkóp
	
Agilent 33220A és Omszöv függvénygenerátor	EMG függvénygenerátor
	
Hitachi oszcilloszkóp	SKF Microlog AX rezgésdiagnosztikai rendszer
	
Kistler K-Beam 8392B10 gyorsulásérzékelő	HBM B12/200 gyorsulásérzékelő

3. Melléklet: Az LRG adatlapja

Adatlap – 1. oldal	LRG
	Laprugós Gyorsulásérzékelő

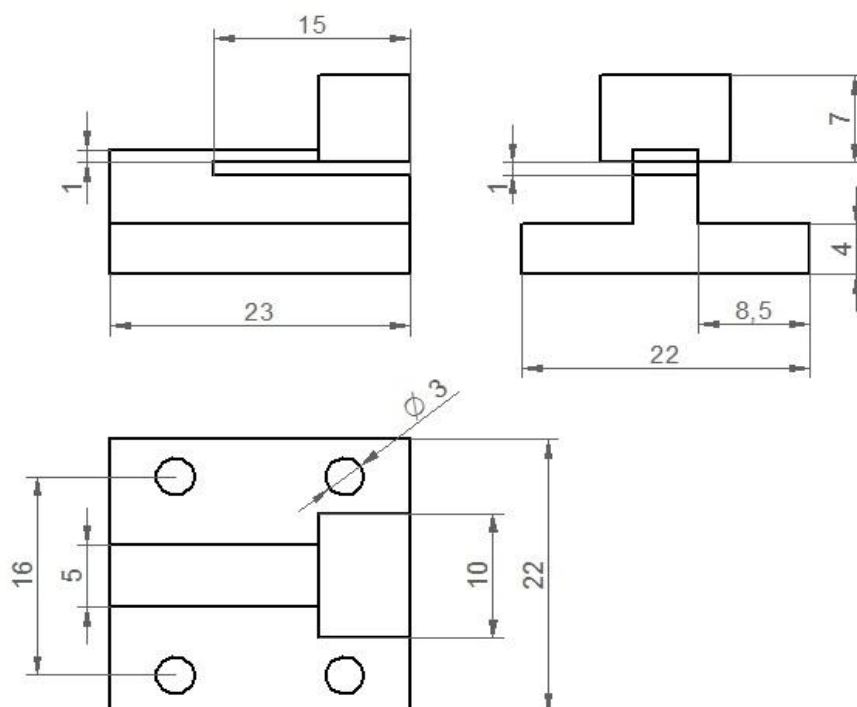
Méréshatárok

Gyorsulás	m/s ²	± 1600
	g	± 163
Rezonancia frekvencia	Hz	600
Hőmérséklet	°C	-10 - +60 °C



Kalibrálási érzékenység	(mV/V)/g	$6,5 \cdot 10^{-3}$
-------------------------	----------	---------------------

Méretetek



Anyagok

CERTAL EN AW-7022 / AlZnMgCu 0.5

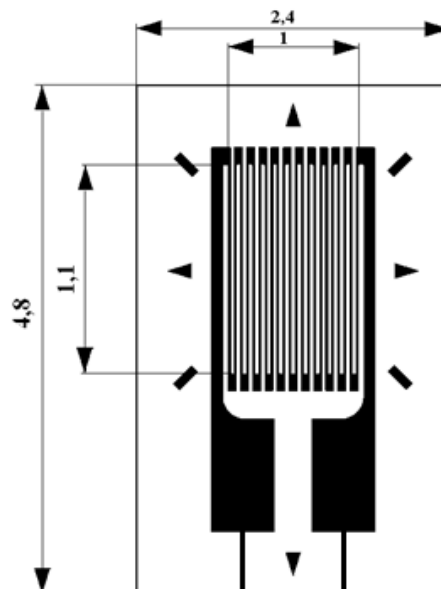
Szeizmikus tömeg: Ólom / Pb

Nyúlásmérő bélyegek

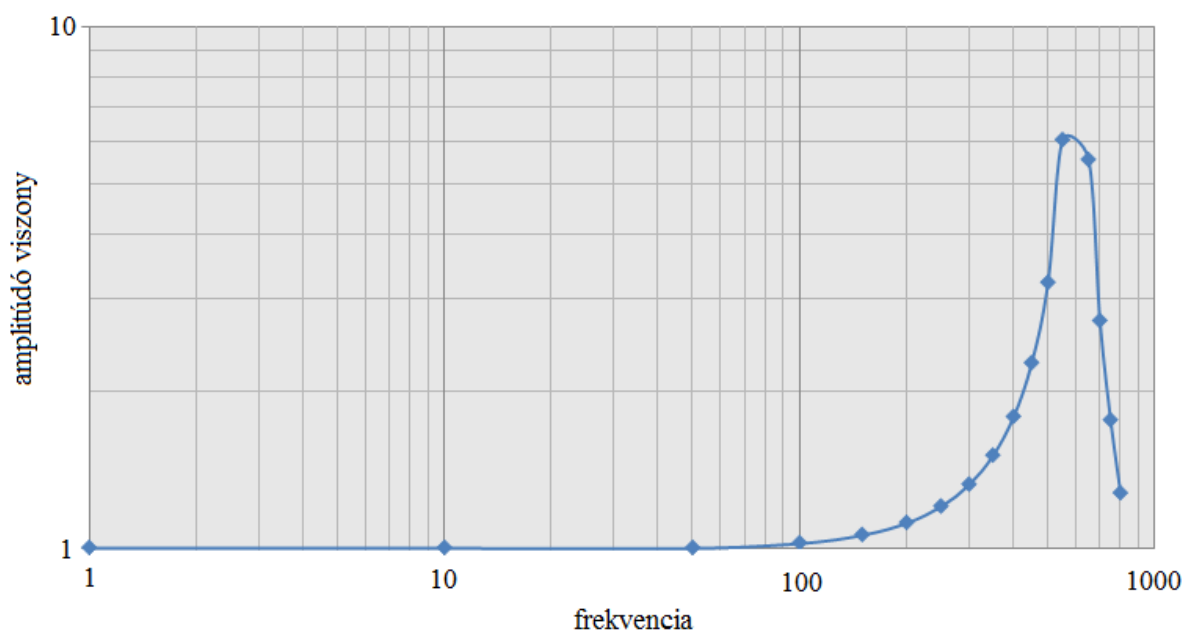
2 aktív bélyeges teljes hidas mérés

KYOWA KFG-1-120-C1-11 (4db)

Alkalmazható	°C	-196 -150
Hőmérséklet kompenzáció	°C	10 – 80
Névleges ellenállás	Ω	$119,6 \pm 0,4$
Bélyegtényező	-	$2,14 \pm 1\%$
Aktív felület	mm	1 x 1,1
Bélyeg felület	mm	4,8 x 2,4

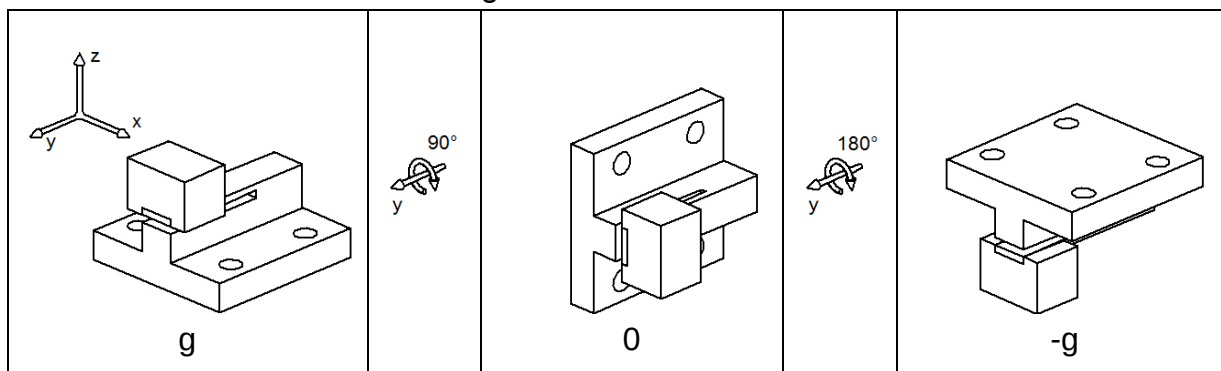


Frekvencia függés



Kalibrálás

Az LRG statikusan kalibrálható a gravitációs térben.



Szent István Egyetem/Gépészmérnöki Kar/Folyamatmérnöki
Intézet/Méréstechnika Tanszék
Bércesi Gábor/Farkas Csaba
Konzulens: Dr. Petróczki Károly, egyetemi docens
Gödöllő, 2010