



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék

Minősegbiztosítási és minőségvizsgálati labor

Mérési útmutató

Mechanikai és villamos mérések

Deformáció mérése



Készítette: **Hurtony Tamás**



Budapest, 2010

Bevezetés

1.1 A mérés célja

Az elektronikai termékek gyártása során, minden egyes technológiai lépésben különböző behatások (hőmérsékleti, mechanikai, vegyi, radiológiai, stb.) érik a termékeket. A gyártónak tisztában kell lennie az általa használt technológia káros hatásaival, és azok mértékeivel, hiszen a megrendelőt csakis hiteles bizonyíték birtokában képes meggyőzni arról, hogy a meghibásodott termék, nem a gyártó keze alatt hibásodott meg. A legtöbb meghibásodás mechanikai sérülés eredménye. Éppen ezért egy áramkört ért mechanikai hatások vizsgálata és számszerűsítése minden gyártó számára aktuális kérdés.

A laborgyakorlat során a hallgatók megismerkedhetnek a mechanikai deformáció mérésének alapjaival, majd egy előkészített áramkör bizonyos pontjain fellépő deformációt mérik különböző erők hatására, végezetül levonják a szükséges következtetéseket a gyártmányra és az alkalmazott technológiai lépésekre vonatkozóan.

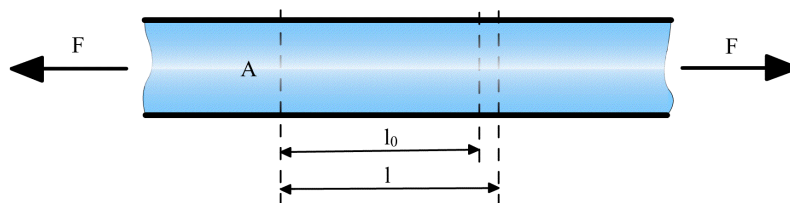
2 Elméleti összefoglaló

2.1 A szilárdságtan alapösszefüggései* [1]

Egy állandó, A keresztmetszetű rudat F erővel húzzuk. A rúd igénybevételét a felületegységre vonatkoztatott széthúzó erővel jellemezhetjük, melynek értéke: F/A . A szilárdságtan ezt nevezi *feszültségnek*, jelölése σ .

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

A feszültség mértékegysége N/m^2 . Jelen esetben a széthúzó erő merőleges a felületre. Ilyenkor *normális feszültség*ről beszélünk.



1. ábra Homogén, A keresztmetszetű rúd erő hatására megnyúlik

A feszültség következő képlet szerinti relatív hosszváltozást okoz:

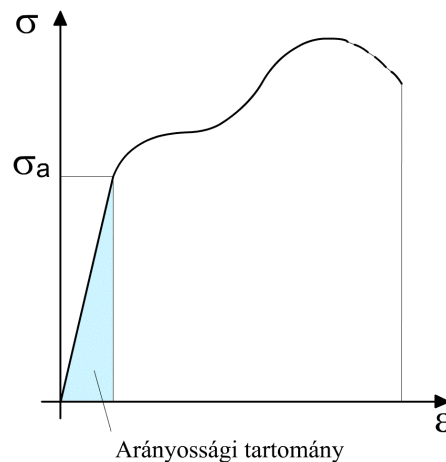
$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad (2)$$

ahol l_0 az igénybevételt megelőző, l az igénybevétel alatti hossza a rúd egy kiválasztott szakaszának. Az ε mennyiséget *fajlagos megnyúlásnak* nevezzük, dimenzió nélküli érték.

* A fejezet levezetései forrása: Dr. Székely Vladimír Integrált mikrorendszerek c. tárgyhoz írt jegyzete

Belátható, hogy a fajlagos megnyúlás és a feszültség között összefüggés van. Az összefüggés jellege, a legtöbb anyagra a 2. ábrán látható függvény szerinti. A továbbiakban csak a függvény első, közel lineáris szakaszára szorítkozunk, ahol a relatív megnyúlás egyenesen arányos a feszültséggel. A lineáris szakasz σ_a . határa alatti feszültségekre igaz, az, hogy a feszültség nem okoz maradó alakváltozást. A feszültség megszűntével visszaáll a rúd eredeti hossza (rugalmas viselkedés).

Az arányossági határ fölött a (nem túl rideg) anyagoknál megfolyás lép föl, majd egy felkeményedési szakasz után bekövetkezik a szakadás.



2. ábra A rugalmas alakváltozás során a görbe arányossági szakaszán mozgunk
Az arányossági tartományon belül az alábbi összefüggés igaz:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

ahol E vizsgált anyagra jellemző állandó, a *rugalmassági modulus* vagy *Young modulus*. Mértékegysége N/m^2 , értéke néhány anyagra

1. táblázat Néhány anyag tipikus rugalmassági modulusa

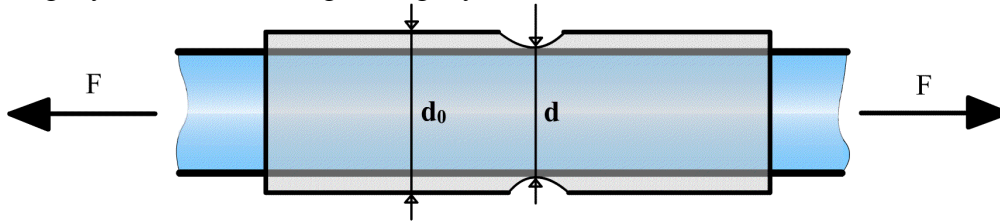
	$E \text{ [N/m}^2\text{]}$
FR4	$1,8 \times 10^{10}$
poliimid	$2,5 \times 10^{10}$
réz	$1,3 \times 10^{11}$
nikkel	$2,1 \times 10^{11}$
alumínium	7×10^{10}

Forrás: <http://www.mit.edu/~6.777/matprops> (2010.03.28)

Egy húzott rúd hossza az erő hatására megnövekszik, de ugyanakkor az átmérője lecsökken (3. ábra). Ezt az úgynevezett *keresztirányú méretváltozást* az alábbi összefüggés szerint definiálhatjuk:

$$\varepsilon_k = \frac{d - d_0}{d_0}, \quad (4)$$

ahol d_0 az igénybevétel előtti, míg d az igénybevétel alatti átmérő.



3. ábra Homogén rúd kezdeti, d_0 átmérője erő hatására csökken

A hosszirányú és a keresztirányú méretváltozás (a rugalmassági határon belül) arányos egymással és ellentétes előjelű. Arányukat az alábbi formában fejezhetjük ki:

$$|\varepsilon_k| = \nu |\varepsilon|, \quad (5)$$

ahol ν a *Poisson tényező*. Értékének felső határa 0,5, hiszen ez jelentené a térfogatváltozás nélküli deformációt. A gyakorlati anyagoknál ν értéke 0,25 és 0,33 közötti.

2. táblázat Néhány anyag Poisson tényezőjének tipikus értéke

	ν
FR4	0,13
poliimid	0,34 @ 23°C
réz	0,34
nikkel	0,31
alumínium	0,33

Forrás: <http://www.mit.edu/~6.777/matprops> (2010.03.28)

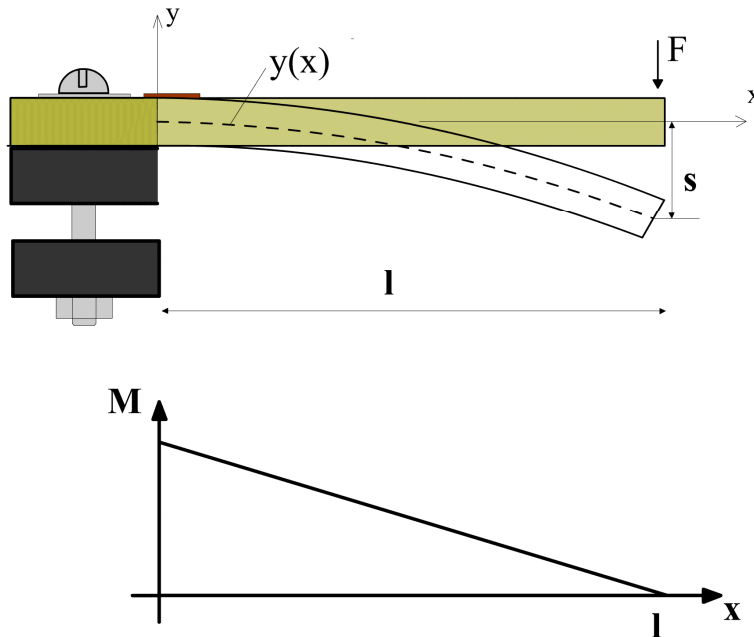
2.2 Hajlításra terhelt konzol alakváltozása*

A 4. ábrán látható elrendezésben egy FR-4-es hordozót egy oldalon mereven befogunk. Az egyenletes keresztmetszetű, l hosszúságú konzolt a szabad végén F erővel terheljük. Ennek folytán a rúd mentén helyfüggő nyomaték alakul ki:

$$M = F(l - x) \quad (6)$$

A terhelés hatására a rúd lehajlik. A középvonal helyfüggő függőleges elmozdulása legyen $y(x)$!

* A fejezet levezetéseinek forrása: Dr. Székely Vladimír Integrált mikrorendszerek c. tárgyhoz írt jegyzete



4. ábra Egy oldalon befogott konzol, erő hatására lehajlik.
A rúd mentén különböző nyomaték ébred

A konzol hosszához képest kis lehajlásokra korlátozzuk magunkat, akkor a lehajlás görbületi sugarának (r) reciprokja a következő összefüggéssel közelíthető:

$$\frac{1}{r} \cong \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (7)$$

Tudjuk továbbá még azt, hogy a görbületi sugár reciprokja szintén arányos a ható nyomatékkal. Ez az arányosság az alábbi formulával írható le:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI}, \quad (8)$$

Ahol I a másodrendű nyomaték melyet téglalap keresztmetszetű rúdra a következőképpen számolhatunk $I = \frac{ab^3}{12}$, ahol a a hajlításra merőleges oldalél. M helyére beírva a (6)-os képletet, valamint a (7)-es és (8)-as képletet egyenlővé téve a következőt kapjuk:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{F}{EI}(x-l) \quad (9)$$

(3.14)

Ennek a homogén másodrendű differenciálegyenletnek a megoldása szolgáltatja a keresett $y(x)$ függvényt:

$$y(x) = \frac{F}{EI} \left(\frac{x^3}{6} - l \frac{x^2}{2} \right) \quad (10)$$

Ebből a konzol végének s lehajlása

$$s = y(l) = \frac{F}{EI} \left(\frac{l^3}{6} - l \frac{l^2}{2} \right) = -\frac{Fl^3}{3EI} \quad (11)$$

A lehajlás tehát (kis deformációknál) arányos az erővel. A konzol egy lineáris viselkedésű rugó. Tulajdonságait egyetlen paraméterrel adhatjuk meg: az S rugóengedékenységgel:

$$S = \frac{|s|}{F} = \frac{l^3}{3EI} \quad (12)$$

2.3 Mechanikai deformáció mérése

A megnyúlás detektálásának, illetve kiértékelésének módja többféleképpen is történhet. Legtipikusabb alkalmazott módszerek a következők:

2.3.1 Mechanikai elvű nyúlásmérés

A mechanikai elvű mérés során két egymástól szabadon elmozduló nyelvet ragasztanak valamely felület egy kiválasztott szakaszának két végére. Az egyik nyelven a méretvonal, a másikon az indikátor található. Ahogy a nyelvek egymáshoz képest elmozdulnak az indikátor a megfelelő skála használatával a relatív elmozdulással arányos mértéket mutat (5. ábra). Ezt az elvet tipikusan makroszkopikus, szemmel látható elmozdulások mérésére használják (pl. építészmérnökök egy ház adott repedésének mérésére)



5. ábra A megnyúlás mérésének be- kimeneti modellje

Forrás http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hudson-Athens_Strain_Gauge.jpg 2010.03.28)

2.3.2 Piezoelektromos/ piezorezisztív elvű nyúlásmérés

A piezoelektromos nyúlásmérők azt a jelenséget használják ki, hogy bizonyos típusú anyagokban (pl. kvarc kristály) külső mechanikai feszültség hatására töltésmegosztás következik be. Az így kialakult feszültségkülönbség mérésével meghatározható a megnyúlás mértéke. A piezoelektromos nyúlásmérőket gyakran piezotransducer-nek is nevezik, hiszen a mechanikai deformációt (megnyúlást) alakítanak át, jól kezelhető villamos jeleké (6. ábra). Ezen az elven működő szenzorok rendkívül pontos nyúlásmérést tesznek lehetővé. Tipikus alkalmazási területük a kis relatív megnyúlásokkal járó hatások mérése (pl. repülőgépek bizonyos szerkezeti elemeinek nyúlásmérése). Hátránya, hogy nehéz megfelelő méretű alakú és tulajdonságú piezokristályt előállítani.



6. ábra A megnyúlás mérésének be- kimeneti modellje

Forrás: Miskolci Egyetem Automatizálás Tanszék: Mérőrendszerek gyakorlat Erőmérés nyúlásmérő bélyegekkel, pp. 1-2, 2003

A piezorezisztív átalakító, mint ahogyan azt a neve is mutatja ellenállás változáson alapuló mérést valósít meg. Az ellenállás változás pusztán a geometria változásából származtatható. Ezek a szenzorok az úgynevezett érzékenységi faktoral (gauge factor/ bélyegállandó) jellemezhetők:

$$K = \frac{dR}{R} \cdot \frac{1}{\varepsilon}, \quad (13)$$

ahol dR a deformáció hatására bekövetkezett ellenállás változás, R az eredeti ellenállás, ε pedig a fajlagos megnyúlás. Legegyszerűbb kialakítási formája a diffúziós ellenállásban, a Si szeleten megvalósított érzékelő. Mivel kialakításának módja illeszthető a félvezető technológiához, mikro mechanikai alkalmazásokban (pl. gyorsulásérzékelő) előszeretettel használják.

2.3.3 Ellenállás változáson alapuló nyúlásmérés [4]

Mint azt a 2.1 fejezetben beláttuk egy adott hosszúságú homogén rúdon, például egy vezető anyagból készült állandó keresztmetszetű huzalon, erő hatására mind hosszanti, mind keresztmetszeti méretváltozás is bekövetkezik. Ennek hatására létrejövő ellenállásváltozás az alábbiak szerint alakul:

Az ellenállás eredeti értéke:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}, \quad (14)$$

ahol l a huzal eredeti hossza, A a huzal eredeti keresztmetszete, ρ a huzal anyagának fajlagos ellenállása. A relatív ellenállás-változás:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon - \frac{dA}{A}, \quad (15)$$

A keresztmetszet relatív megváltozása kifejezhető a hosszúság relatív megváltozásával:

$$\frac{dA}{A} = -2\nu \varepsilon, \quad (16)$$

ahol ν a Poisson tényező. Behelyettesítve

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon + 2\nu \varepsilon, \quad (17)$$

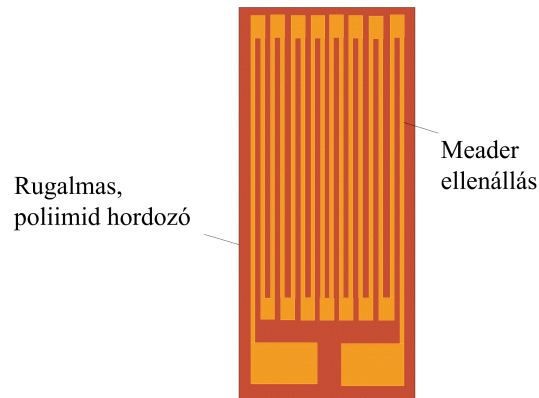
Mindkét oldalt ε -nal elosztva és a $\frac{R}{\varepsilon}$ hányadost K -val jelölve:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + 1 + 2\nu, \quad (18)$$

A (13)-as képlet a behelyettesítve:

$$K = \frac{d\rho}{\rho} + 1 + 2\nu, \quad (19)$$

K (gauge factor) átalakítási tényező tehát függ a fajlagos ellenállás változásától, illetve a Poisson tényezőtől, azonban független a bélyeg méreteitől. Értéke anyagtól függően lehet pozitív vagy negatív is. Egy ilyen bélyeg tipikus megvalósítási módja látható a 7. ábrán.



7. ábra A relatív hosszváltozást növelendő, meander ellenállás kialakítást használnak a gyakorlatban

K értéke tipikusan 2-2,7 között változik. Az alap ellenállás értékek szabványos sorokban érhetők el (90, 120, 300, **350**, 600 és 1000 ohm). A maximális deformáció 10-100 μm közötti lehet.

A nyúlásmérő bélyegek előnyei:

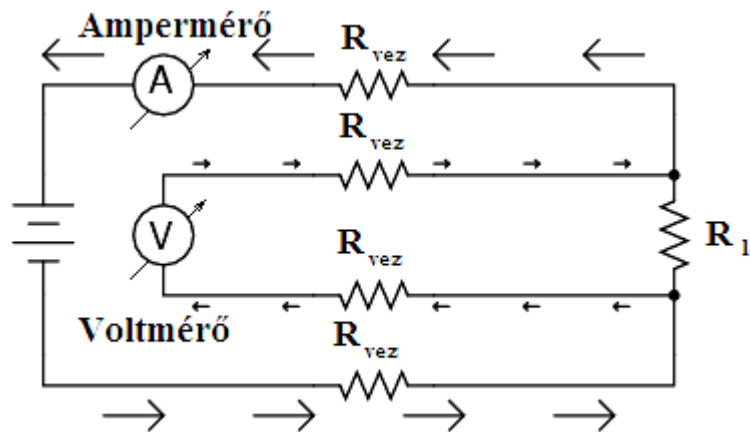
- kis méret,
- stabilitás,
- pontosság,
- a kisbelső impedancia miatt jó távadhatóság.

A nyúlásmérő bélyegek hátrányai:

- az ellenállásanyag hőmérsékletfüggése,
- a próbatest hőtágulásából származó hiba,
- a ragasztásból származó hiba (kuszás jelensége),
- kis érzékenység.

Mivel a nyúlásmérő bélyegek felhasználásával készült mérőátalakítók érzékenysége, és az ellenállás-változás igen kicsi, rendkívül pontos ellenállásmérésre van szükség. Ezt négyvezetékes elrendezéssel érhetjük el. A mérendő ellenállás kivezetéseihez 2-2 vezetékkel csatlakozunk. A középső 2 vezeték méri a feszültséget a szélső 2 az áramot.

Mivel a feszültségmérő belső ellenállása nagyon nagy, ezen az ágon a mérőáramhoz képest, elhanyagolhatóan kis áram folyik, vagyis a feszültségmérő vezetékén eső feszültség kicsi. A mérendő ellenállást a mért feszültség és a mért áram hányadosa adja.

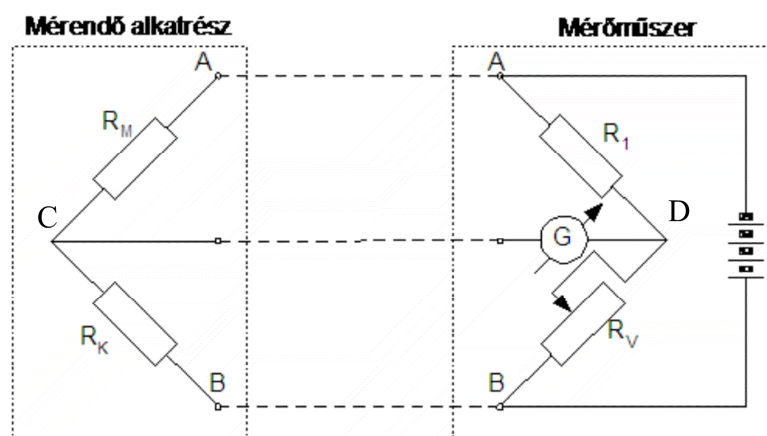


8. ábra A 4-vezetékes ellenállásmérés során kompenzáljuk a hozzávezetések ellenállását

A mivel jelentős lehet az ellenállások hőmérsékletfüggése, a gyakorlatban olyan mérőkapcsolásokat célszerű alkalmazni, melyek csökkentik ezeket a hatásokat. A legtipikusabb ilyen kapcsolás a fél híd, illetve a hídkapcsolás (9. ábra).

A híd A, B kapcsaira egyenáramú áramforrást, a C D kapcsok közé egy galvanométert (árammérő) kötünk. A mérendő alkatrész terheletlen. Az R_V változtatható ellenállást addig változtatjuk, amíg a galvanométer az átfolyó áramra nulla értéket nem mutat, vagyis $I_G = 0$ értéket nem jelez a mutatója. Ilyenkor a híd szemben lévő ágaiban lévő ellenállások szorzata egyenlő:

$$R_M \cdot R_2 = R_1 \cdot R_V, \quad (20)$$



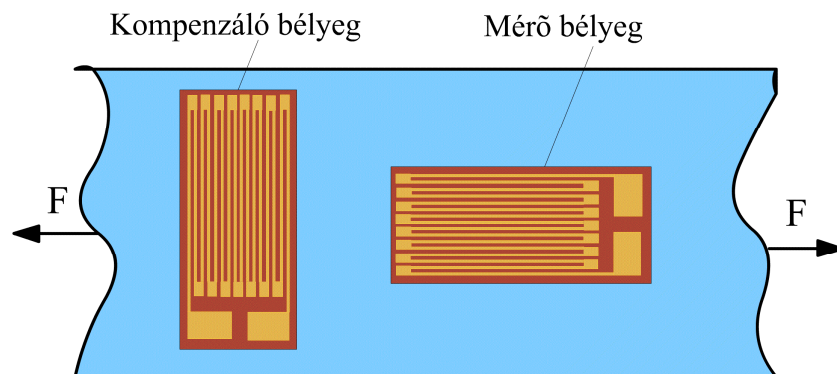
9. ábra A hídkapcsolással kiküszöbölhető a hőmérséklettől való függés

Forrás: <http://rs1.szif.hu/AG/letoltendok/laborgyakorlat> (2010.03.28)

Ha a mérendő alkatrészt megterheljük, akkor az R_M nyúlásmérő bélyeg ΔR_M értékkel megnyúlik, a híd elhangolódik, és a galvanométeren áram folyik. Ekkor az R_V ellenállást ismét addig változtathatjuk, míg az $I_G = 0$ értékűvé nem válik. A hangolási érték arányos lesz a megnyúlással. A leolvasás különbsége megadja tehát, hogy a kinullázott, vagyis a terheletlen állapothoz képest mennyi az R_V ellenállásnak a ΔR_V megváltozása. Mivel $\Delta R_V = R_M k_o \varepsilon$ és $\Delta R_V = \Delta R_M$ érvényes, így ebből ε meghatározható.

Mínt hogy a munkadarab hőmérsékletének változása miatt is változik az R_M értéke, ezt a változást ki kell egyenlítőnünk, kompenzálni kell.

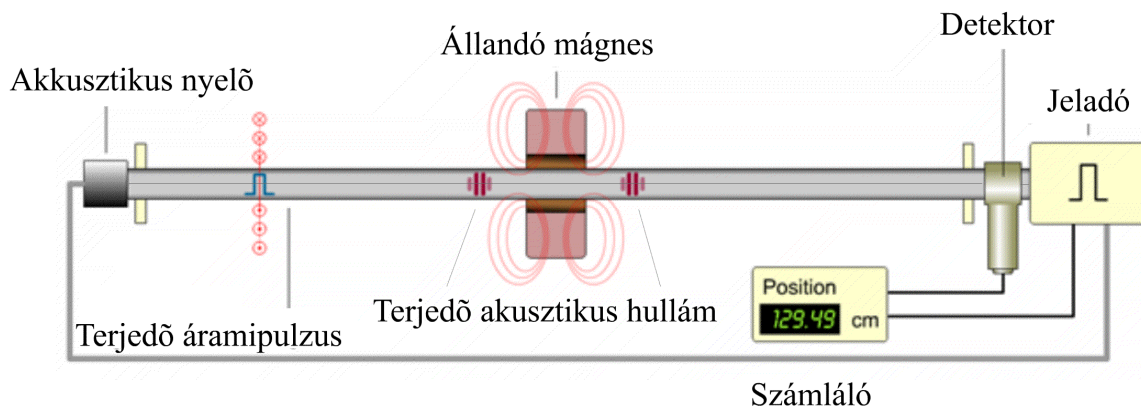
A mérendő alkatrész környezetében olyan helyre ragasztjuk az R_K kompenzátor bélyeget, amely helyen nem ébred feszültség, nem jön létre nyúlás, de a hőmérséklet közel azonos a mérendő P pont környezetével. Ekkor a hőmérséklet változásából adódó ΔR_M és ΔR_K azonos értékű, tehát a szemben lévő hídágakban az ellenállások szorzata azonos marad, nem szűnik meg a híd kiegyenlítetttsége. Ezzel tehát kompenzáltuk a hőmérsékletváltozás hatását. A 9. ábrán látható $R_M - R_K$ kapcsolást fél hídkapcsolásnak nevezzük [3].



10. ábra A kompenzáló bélyeget közeli (azonos hőmérsékletű) pontra kell ragasztani,

2.4 Elmozdulás mérése

A gyakorlat során az elmozdulás mérésére az úgynevezett megnetostriktív (mágneses tér hatására mechanikailag deformálódó) elven működő távolságmérőt fogjuk használni. A készülék elvi rajza 11. ábrán látható.



11. ábra A megnetostriktív mérési elv előnye, hogy a lineáris kimenetnek kicsi a hibája

Forrás: <http://www.ett.bme.hu/sensedu/menu.html>, (2010.03.28)

Ha a belső elektromos vezetőre egy feszültségimpulzust adunk, a vezetőkben végigfutó elektromos áram mágneses tere összegződik a pozícióadó mágnes mágneses terével. A pozícióadó helyén egy olyan aszimmetrikus mágneses tér alakul ki, amely akusztikus hullámot kelt. Ez a hullám 2850 m/s sebességgel elindul a hullámvezető két vége felé. Az egyik oldalon egy akusztikus csillapítón elnyelődik, a másik végen a mechanikai deformáció okozta mágneses tér változása egy tekercsben feszültséget indukál, amit mérhetünk. A gerjesztő és a mért impulzus közötti időből a pozícióadó mágnes helyzete nagy pontossággal meghatározható. Az akusztikus hullám futási ideje a távolsággal arányos, így az elv különösen alkalmas nagy pontosságú távolság lineáris mérésére.

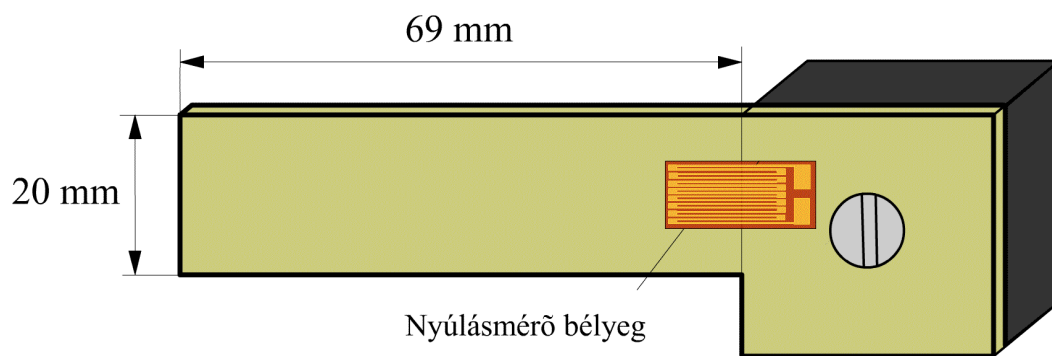
3 Gyakorlati feladatok

A mérés célja:

Egyes nem-villamos fizikai jellemzők (erő, nyomaték, nyomás, mechanikai feszültség, stb.) mérésére alkalmas nyúlásmérő bélyeg fontosabb statikus méréstechnikai jellemzőinek megállapítása.

Egy adott feladatra való alkalmazás megismerése. A mérést “zavaró” jellemzők közül a hőmérsékletváltozás hatásának, mértékének megállapítása, vizsgálata.

3.1 Nyúlásmérő bélyeg karakterisztika felvétele



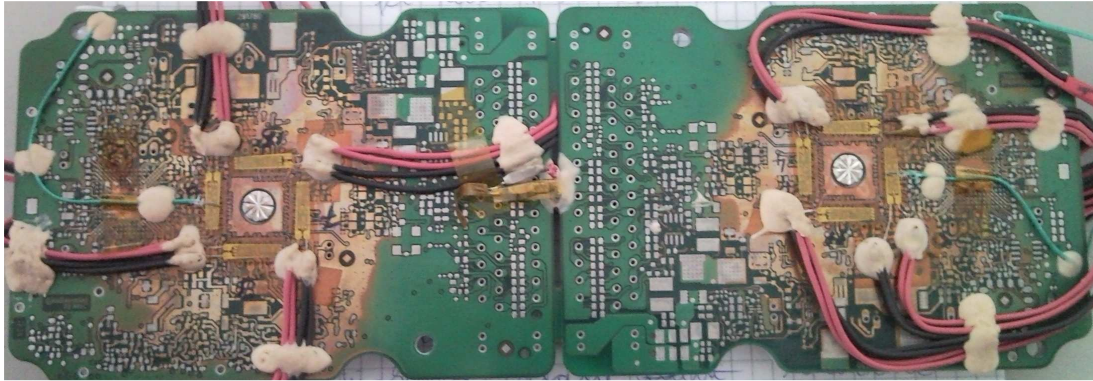
12. ábra 1,5 mm vastagságú 20 mm széles és 69 mm hosszú egy oldalon befogott konzol elhajlását vizsgáljuk

A (11)-es formula kapcsolatot teremt a konzol végének elmozdulása és az erő között. A távolságmérő segítségével a konzol végének elmozdulása pontosan detektálható. Ily módon a konzolra ható erő számítható.

1. Számítsa ki a hajlítással terhelt konzol másodrendű nyomatékát!
2. Határozza meg a konzol rugóengedékenységet!
3. Vegye fel a nyúlásmérő bélyeg erő-ellenállás változás karakterisztikát!
4. Adott mérési tartományban mekkora a linearitás hibája?
5. Adott linearitási hibához mekkora mérési tartomány tartozik?
6. Ábrázolja az erő-relatív megnyúlás görbét!

3.2 Külső behatással terhelt nyomtatott huzalozású panel deformációjának meghatározása

1. A 13. ábrán látható preparált panelon található furatokba hajtson be egy-egy csavart, az alatt rögzítse a panelt ért mechanikai deformáció mértékét!
2. Ismetelje meg az előbbi feladatot, gépi csavarbehajtóval!
3. Hasonlítsa össze az előzőekben rögzített mérési eredményeket!



13. ábra 1,5 mm vastagságú 20 mm széles és 69 mm hosszú egy oldalon befogott konzol elhajlását vizsgáljuk

4 A felkészülést segítő kérdések

1. Mit értünk arányossági tartományon?
2. Szemléltesse az egyszerű test deformációit erő hatására!
3. Mi a Hooke törvény?
4. Definiálja a Poisson tényezőt!
5. Vezesse le az egyszerű ellenálláshuzal ellenállásából a gauge-faktor meghatározását!
6. Rajzolja le egy nyúlásmérő egyszerűsített szerkezeti vázlatát!
7. Sorolja fel a nyúlásmérés előnyeit és hátrányait!
8. Milyen nyúlásmérési eljárásokat ismer?
9. Mi a magnetostrikciós távolságmérés lényege?
10. Hogyan történik a bélyeg hőmérsékletfüggésének kompenzálása?
11. Mi a referencia bélyeg elhelyezésének helyes módja, hőmérséklet kompenzáló félhíd kapcsolás esetén?

5 Felhasznált irodalom

- [1] Székely Vladimír: Segédanyag az Integrált mikrorendszerek c. tárgyhoz, BME-EET, pp. 3-18, 2005.
- [2] Tényi V. Gusztáv: Méréstechnika laboratóriumi mérések útmutató, Mérőátalakítók mérése pp. 3-5, 2005
- [3] Széchenyi István Egyetemen: Mechatronika és Gépszerkezettan tanszék, Nyúlásmérés Laborgyakorlat. Elektronikus jegyzet, pp. 4-5, 2004
- [4] Miskolci Egyetem Automatizálás Tanszék: Mérőrendszerek gyakorlat Erőmérés nyúlásmérő bélyegekkkel, pp. 1-2, 2003.