



**BUDAPESTI MŰSZAKI és GAZDASÁGTUDOMÁNYI  
EGYETEM**

**Közlekedésmérnöki Kar**

**VASÚTI JÁRMŰ  
MÉRÉSTECHNIKA  
ÉS LABOR**

**OKTATÁSI SEGÉDLET**

**1. Bevezetés**

**2. Méréstechnika, az alkalmazott mérőeszközök**

**Készítette:**

**Dr. Benedek Teofil**  
egyetemi docens

**B U D A P E S T**  
**2 0 1 4**

## A szaktárgyhoz készült oktatási segédletek:

1. Bevezetés
2. Méréstechnika, az alkalmazott mérőeszközök
3. Méréselmélet, a mért jelek értékelése
4. Futástechnikai mérések
5. Menetdinamikai és energetikai mérések
6. Féktechnikai mérések
7. Szilárdsági mérések
8. Üzemkésztség-ellenőrzési mérések
9. Mellékletek

## Tartalom :

1. Bevezetés
  - 1.1 A vasúti járműmérések célja
  - 1.2 A mérések lebonyolítása
  - 1.3 A mérési jegyzőkönyv
2. Méréstechnika, az alkalmazott mérőeszközök
  - 2.1 Mérőérzékelők
    - 2.1.1 A nyúlásmérő bélyeg
    - 2.1.2 Mérőerősítők
      - 2.1.2.1 A mérendő jellemzőt egyetlen bélyeg érzékeli
      - 2.1.2.2 A hőmérséklet-változás hatásának kiküszöbölése
      - 2.1.2.3 A mérendő jellemzőt két bélyeg érzékeli
      - 2.1.2.4 Hajlítónyomaték mérése négy bélyeggel, a húzóerő hatásának kiküszöbölése
      - 2.1.2.5 Húzó-nyomó terhelés mérése négy bélyeggel, a hajlítás hatásának kiszűrése
      - 2.1.2.6 Kis elmozdulások érzékelése
    - 2.1.3 Induktív elmozdulás-érzékelő
    - 2.1.4 induktív gyorsulás-érzékelő
    - 2.1.5 induktív helyzetérzékelők
    - 2.1.6 Piezoelektromos gyorsulás-érzékelők
    - 2.1.7 Lézeres távolság-érzékelők
    - 2.1.8 Optoelektronikus szögelfordulás-érzékelők
    - 2.1.9 Erőérzékelők: a C9B típusú erőmérő cella
    - 2.1.10. Forgatónyomaték érzékelők
    - 2.1.11 Nyomásérzékelők
    - 2.1.12 Hőmérséklet-érzékelők
    - 2.1.13 Piezorezisztív érzékelők
  - 2.2 Jelrögzítő berendezések
    - 2.2.1 Grafikus jelrögzítő berendezések
    - 2.2.2 Mágneses jelrögzítő berendezések
  - 2.3 A jelek szűrése
    - 2.3.1 Aluláteresztő (felülvágó) szűrő
    - 2.3.2 Feluláteresztő (alulvágó) szűrő
    - 2.3.3 Sávszűrő („lyukszűrő”)
    - 2.3.4 Analóg jelek szűrése
      - 2.3.4.1 Passzív feluláteresztő szűrő
      - 2.3.4.2 Passzív aluláteresztő szűrő
      - 2.3.4.3 Aktív alul- és feluláteresztő szűrők
      - 2.3.4.4 Digitális jelek szűrése
  - 2.4 Mérési adatgyűjtő rendszerek

## Felhasználható irodalom:

1. Dr. Simonyi Alfréd: Vasúti járművek vizsgálata. Egyetemi jegyzet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1977. J7-860.
2. Thamm - Ludwig - Huszár - Szántó: A szilárdságtan kísérleti módszerei. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
3. Ludwig - Szűcs - Thamm – Gyarmathy: Laboratóriumi mérések mechanikából. Egyetemi jegyzet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1963. J4-271.
4. Destek Miklós: Pálya - jármű rendszer. Új módszerek a vasúti pálya és jármű rendszerszemléletű vizsgálatára. KÖZDOK, Budapest, 1976.
5. Jens Trample Broch: Messungen von mechanischen Schwingungen und Stößen. Die Anwendung der Brüel & Kjaer Meßsysteme. Brüel & Kjaer, Denmark. 1970.
6. Hottinger Baldwin Messtechnik. Product Catalogue 1999. Magyarországi képviselő: 2101. Gödöllő, Remsey krt. 9. Pf: 81.
7. Zobory, I. – Benedek, T. – Györy, J.: Járműdiagnosztika. Oktatási segédlet. 2005.
8. Dr. Sostarics Gy., Dr. Balogh V.: Vasúti járművek. Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
9. Tfirst Gy.: A vasúti járművek futásminőségének időszerű kérdései. Járművek, Mezőgazdasági Gépek. 30. évfolyam 1983. 10. szám.
10. Dr. Ambrózy András – Jávora András: Mérésadatok kiértékelése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976.
11. Gabor C. Temes – Sanjit K. Mitra: Modern Filter Design and Theory. John Wiley, New York, 1973.
12. Dr. Horváth Károly: Mérnöki Fizika. Egyetemi jegyzet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1989.
13. Korn, G.A., Korn, T.M.: Matematikai Kézikönyv Műszakiaknak. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
14. Dr. Benedek, T.: Vasúti járművek sérült kerekei által keltett dinamikai hatások. Vasúti Tudományos Kutató Intézet Évkönyve 1986. Közdok. Budapest, 1987.
15. Tietze, U., Schenk, Ch.: Analóg és digitális áramkörök. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
16. HBM Media Library. Technical documentation for customers. 2012. october.
17. VDI/VDE/DKD 2638. szabvány. Strain gauge catalog (=nyúlásmérő bélyeg ka-

- talógus). Magyar fordítás. Pdf formátumban.
18. Tarsoly, P.: Geodézia II. Nyugatmagyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar Geodézia Tanszék. 2009.
  19. Szatmáry, Z.: Mérések kiértékelése. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Természettudományi Kar. Budapest, 2002.

## 1. Bevezetés

A mérés technika a metrológia tudományához tartozik, amely a mérések technikájával és elméletével foglalkozik. A mérés technika keretében az alkalmazott mérőberendezéseket, mérőrendszereket fogjuk bemutatni.

Ennek a Segédletnek a bevezetésében röviden áttekintjük a vasúti járműmérések legfontosabb feladatait és céljait. Összefoglaljuk a mérések típusait a vizsgálandó járműjellemzők fajtái alapján, végül bemutatjuk a mérések végrehajtásának legfontosabb lépéseit.

A vasúti járműméréseknek az a feladata, hogy egy vasúti járműnek, vagy egy egész vonatnak valamilyen műszaki jellemző értékét meghatározzuk. A méréseket az esetek nagy többségében a valóságos járművön végezzük el, ritkábban a járművek kicsinyített modelljét is vizsgálhatjuk próbapadon. A valóságos léptékű járművek mérését mind a szokásos üzemi körülmények között, mind speciális, erre a célra épített 1:1 léptékű próbapadon is végrehajthatjuk.

A vasúti járműmérések feladatai, azok végrehajtása, a mérőeszközök, a mérés eredményeinek értékelése mind ahhoz alkalmazkodnak, hogy a vasúti járművek acélkerekei acélsínen gördülnek, ami – többek között – a járművek futását, a haladó főmozgásra szuperponálódó kereszt- és hosszirányú mellékmozgásokat is jelentősen befolyásolják, és így speciális mérési igények is (pl. a járművek futásminőségi mérései) felmerülnek.

### 1.1 A vasúti járműmérések célja

A vasúti járműmérések legfontosabb céljai és fajtái az alábbiak:

a/ **Átvételi mérések.** Ide tartozik egyrészt az újonnan épített, vagy főjavított vasúti járművek szilárdsági teherbírásának ellenőrzése, amelyet az európai vasutak szervezete, az **UIC 577** számú döntvényében, illetve az ennek alapján készült **MSZ EN 12663** szabványban részletesen rögzített. Ebben előírták, hogy milyen statikus szilárdsági próbapadi méréseket, valamint milyen dinamikus (ütköztetéssel végrehajtott) méréseket kell végrehajtani az átvétel során. Másrészt a járműveket gyártó, illetve a főjavítást végrehajtó cég és a megrendelő vasút megállapodhat más kiegészítő átvételi mérésben is, mint pl. a vontatójárművek kifejtett vonóerejének mérései, a leszállított járművek futásminőségének ellenőrző mérései, stb.

b/ **Üzemzavarok okának felderítése.** Ezeket a méréseket többnyire olyan üzemi körülmények között hajtják végre, amelyek között az üzemzavarok felmerültek. Ide tartoznak a vasúti járművek alvázában, szekrényvázában, stb. fellépő törések, repedések okának felderítésére végrehajtott szilárdsági mérések, a vontató járművek energetikai jellemzőinek (menetellenállási erő, vonóerő, energiafogyasztás, stb.) megváltozása okának felderítése mérések útján, stb.

c/ **Fejlesztési mérések.** Ide tartoznak az új járműtípus kifejlesztése során felmerült mérési igények, illetve a járműfejlesztéssel kapcsolatos kutatások mérési feladatai. Ezek lehetnek mind próbapadi mérések (pl. az alváznak egy részlete), mind vonali mérések.

## 1.2 A mérések lebonyolítása

A mérések lebonyolítása általában az alábbi mozzanatokból szokott állni:

a/ **Elméleti előkészítés:** ennek során meg kell határozni a mérési igényt, rögzíteni kell a mérendő (és mérhető) fizikai mennyiségeket. Ha a kérdéses műszaki-fizikai jellemzők közvetlenül nem mérhetők (pl. egy alkatrészt terhelő erőhatás mérése), akkor más, közvetlenül mérhető fizikai jellemzők mért értékeiből kell számítással meghatározni a kérdéses műszaki jellemzőt. Az említett erőmérés esetében (pl. egy fék függesztő elemében fellépő erők) a terhelő erőt az alkatrész felületi nyúlásának mérésével állapíthatjuk meg úgy, hogy a mért felületi nyúlásból húzó feszültséget, a húzó feszültségből pedig húzóerőt határozunk meg.

A mérés elméleti előkészítéséhez tartozhat az adott járművön, alkatrészen, modellen, stb. belül a konkrét mérési pontok meghatározása a mérés körülményeinek (például az érzékelő elhelyezésére rendelkezésre álló hely), az alkatrész sajátosságainak (például kritikus keresztmetszetének elhelyezkedése), stb. figyelembevételével.

b/ **A mérés gyakorlati előkészítése:** ennek során ki kell jelölni a mérendő járművet (vagy annak egy részletét, pl. csak a forgóvázat, vagy a gépészeti berendezést), meg kell határozni, hogy a mérést próbapadon, vagy egy kijelölt műhelyben álló helyzetben hajtjuk-e végre, vagy vonalon, üzemi körülmények között. Műhelyben végrehajtandó mérések esetén gondoskodni kell a megfelelő műhelyi vágányról, a vágány közelében a megfelelő kiszolgáló eszközökről, ilyen pl. a villamos csatlakozás 220 V 50 Hz váltakozó feszültséggel, vagy 24 V egyenfeszültséggel, vagy 3x380 V háromfázisú táplálással, továbbá sűrített levegő szükséges a légszerszámokhoz, esetleg vízcsatlakozás, stb. Ha vonalon, üzemi körülmények között kell a méréseket végrehajtani, biztosítani kell a szabad vágányt a szükséges időtartamra, valamint – ha szükséges – a megfelelő vontató járművet.

A vizsgált jármű biztosításán kívül ugyancsak fontos a szükséges mérőeszközök számbavétele és azok összegyűjtése, továbbá biztosítani kell a műszerek energiaellátását is a megfelelő villamos csatlakozókkal. Ha a mozdonyról lesznek táplálva a mérőberendezések, megfelelő tápkábelek szükségesek. A táplálás történhet akkumulátorról is, megfelelő teljesítményű inverter segítségével. A műszereknek a mérendő járműhöz való kiszállítása megfelelő szállítóeszközt is igényelhet, pl. olyan kényesebb mérőberendezések, mint mérőmagnetofonok, személyi számítógépek, stb. szállítását nem célszerű közönséges teherautó rakodófelületén, speciális csomagolás nélkül végezni.

c/ **A mérések végrehajtása:** minden mérést a léptékfelvétellel kell kezdeni, ennek során – általában a jelrögzítő berendezésen – olyan feszültséglépcsőt kell regisztrálni, amely a hozzá tartozó mechanikai mértékegységgel együtt használható. Fontos, hogy megfelelő mérési jegyzőkönyvet vezessenek, amelyből utólag minden egyes mérés minden szükséges adata visszakereshető.

d/ **A mérési eredmények értékelése:** általában sok mérési regisztrátum készül a mérések során, ezeknek az értékelése manapság csak számítógép segítségével hajtható végre kellően

rövid idő alatt és kellő pontossággal. Ennek a részleteivel a későbbiekben az egyes méréstípusok tárgyalása során foglalkozunk.

e/ **A mérési jegyzőkönyv.** Külön említést érdemel a mérési jegyzőkönyv, annak tartalma, szerkezete. Az alábbiakban bemutatjuk a Nyugat-magyarországi Egyetem Fizika és Elektrotechnika Intézete által a Wikipédiában közzétett ajánlását:

### 1.3 A mérési jegyzőkönyv

## MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV

**A mérés megnevezése:** *(Pl. Viskozitásmérés)*

**A mérést végző hallgatók:**

**A mérés ideje:** *(dátum!)*

**A mérés elve:** *A mért mennyiség definiálása, fizikai elvek, amelyek alapján valamely mennyiség mérésével hogyan számíthatjuk ki a keresett mennyiséget, néhány mondat az eszköz(ök)ről. Ez utóbbit nem kell túlzásba vinni, nyilvánvaló, hogy a tolómérő, mikrométercsavar, stopperóra, analitikai mérleg, voltmérő, ampermérő, tápegység stb. működési elvét nem kell ismertetni.*

**A mérés kivitelezése:** *Konkretizálva, hogy mit mérünk, esetleg milyen sorrendben. Feltétlenül szükséges a kapcsolási rajz az elektromos méréseknél. A leírás alapján a mérés rekonstruálható legyen, de nem szabad elveszni a részletekben. Például nem kell részletezni, hogyan olvassuk le a mikrométercsavar állását, mikor indítjuk el a stopperórát a viskozitásmérésnél stb.*

**Mérési adatok:** *Általában táblázatba foglaljuk. A táblázat a segédletek alapján előre elkészíthető, a fejlécében szerepeljenek a mért és az azokból számított fizikai mennyiségek betűjelei és mértékegységei.*

**Számolás:** *Itt szerepeljenek azok az összefüggések, amelyek segítségével a mérési adatokból kiszámítottunk további adatokat. Ahol ugyanazt a képletet kell alkalmazni több mérési eredményre is, ott elegendő csak a képlet közlése, egyéb esetekben a behelyettesítést is le kell írni. Ahol egyenletet vagy egyenletrendszert kell megoldani, szerepeljenek a kiinduló egyenletek a behelyettesített értékkel. A konkrét levezetés nem kell. Amennyiben az adatot grafikonról kell leolvasni, ezt is jegyezzük fel; ebben az esetben a leolvasásához szükséges szerkesztővonalakat be kell húzni a grafikonba (pl. fajhőmérés).*

**Eredmény:** *Az eredmény felírása a kért alakban. Ez a bekezdés nem szükséges, ha a táblázat már eleve tartalmazza (pl. viskozitásmérés).*

**Értékelés:** *A jegyzőkönyv egyik legfontosabb része. Itt kell összehasonlítani a kapott értéket az irodalmi értékkel, kifejezni százalékosan a mérés hibáját. A túlságosan nagy eltéréseket indokolni kell, általában a mérés során fellépő hibalehetőségekkel. Irodalmi adat hiányában (légnedvesség mérése, viskozitásmérés) a kapott értékeket kell elemezni. Ezen kívül fel kell jegyezni mindent, ami mérés közben az eredményt befolyásolhatta (pl. buborék volt a viskoziméter csövében, napra tettük a pszichrométert, ezért emelkedett a hőmérséklet stb.).*



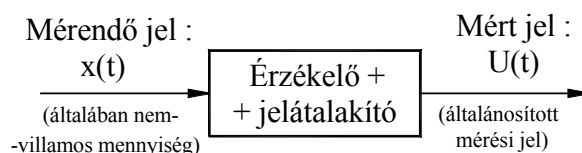
## 2. Méréstechnika, az alkalmazott mérőeszközök

Ebben a Segédletben sorra vesszük a használatos mérőérzékelőket, jelátalakítókat, mérőeszközöket, mérőerősítőket, a jelrögzítő berendezéseket, szűrőket, majd a nagyobb számú mérőeszközt is magában foglaló mérési adatgyűjtő rendszereket.

### 2.1 Mérőérzékelők, jelátalakítók

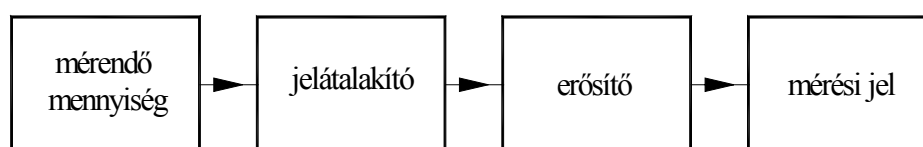
A vasúti járműmérési gyakorlatban nagyrészt nem-villamos, valamint gyorsan változó mennyiségeket (erő, gyorsulás, stb.) kell mérni, tehát a mérendő mennyiségeket át kell alakítani érzékelhető és rögzíthető mennyiséggé. A méréstechnikai gyakorlatban erre a célra villamos feszültséget alkalmaznak. Az átalakítás folyamatát az 1. ábrán láthatjuk:

Az ábrából látható, hogy általában két lépcsőből áll a mérendő mennyiségnek a villamos feszültség-jellé történő átalakítása:



1. ábra

Az érzékelők többnyire nem villamos feszültséggé alakítják át a mérendő jelet, hanem valamilyen villamos jellemzőjük (ellenállás, induktancia, stb.) változik a mérendő mennyiséggel analóg módon, vagyis minden időpillanatban arányosan. Ezért ezeket a jellemzőket meg kell mérni (folytonosan), és olyan nagyságú folytonos feszültség-jellé kell átalakítani, amilyen pl. a jelrögzítőhöz (analóg mérőmagnetofon) szükséges, pl.  $\pm 1 \text{ V}$ ,  $\pm 5 \text{ V}$ , stb. Így végül a mérési folyamat vázlatja a 2. ábrán látható lesz:



2. ábra

Mivel a gyakorlatban mindig villamos feszültség-jel a mérési folyamat eredménye, ezért ehhez a villamos jelhez hozzá kell kapcsolni azt a léptéket, amely megadja, hogy mekkora fizikai mennyiség tartozik a mért jelhez:

$$q_m = \frac{[\text{mérendő fizikai mennyiség}]}{[\text{mérési jel}]} = \frac{[\text{mérendő fizikai mennyiség}]}{\text{Volt}}$$

Ez a lépték tehát valamilyen fizikai mennyiségnek (N, J, m/s, stb.) és a villamos feszültségnek (Volt) a hányadosa. A továbbiakban a mért (és/vagy regisztrált) villamos jel és a  $q_m$  lépték együttesét **általánosított mérési jelnek** nevezzük. Ennek megfelelően ha a mért fizikai

mennyiség valamilyen  $X$  mennyiség, akkor az  $X$  mennyiség a mért villamos  $U$  feszültségből a  $q_m$  léptékkel így állítható vissza:

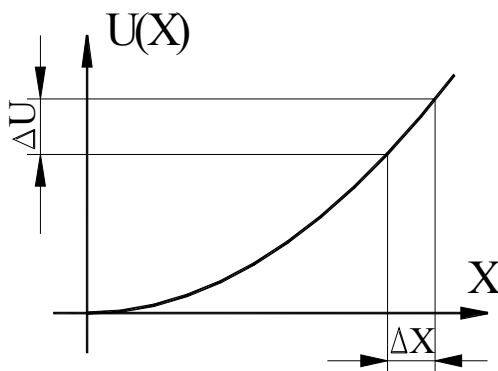
$$X = q_m \cdot U \quad ;$$

illetve figyelembe véve, hogy  $X$  és  $U$  az időben változnak, így a képlet:

$$X(t) = q_m \cdot U(t)$$

A jel átalakításának fontos jellemzői az átalakítás érzékenysége és az átalakítás beállási ideje. A bemenő jel (a mérendő mennyiség) és a kimenő jel (az  $U$  feszültség) közötti kapcsolatot **karakterisztikának** nevezzük.

A karakterisztika bemutatásához tekintsük először azt az esetet, amikor a be- és kimenő jel egyaránt állandó, illetve igen lassan változik. Ekkor a mérendő  $X$  mennyiség és a mért  $U$  jel közötti összefüggést az ú. n. **statikus karakterisztika** mutatja be (3. ábra):



3 ábra

A jelátalakítás érzékenységének a be- és kimenő jelek változásának hányadosát nevezzük:

$$\dot{E} \cong \frac{\Delta U}{\Delta X} \quad ;$$

és mivel  $U$  általában nem lineáris függvénye  $X$ -nek, ezért írható:

$$\dot{E} = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta X} = \frac{dU}{dX}$$

A gyakorlati esetek többségében a be- és kimeneti jelek gyorsan változnak. Ennek az a következménye, hogy a kimeneti jel változásának bizonyos késése figyelhető meg a bemeneti jel változásához képest, mivel az áramkörök induktivitása és kapacitása úgy viselkedik, mint a mechanikai lengőrendszerekben a tömeg, a rugó és a csillapító. A 1.5. ábra azt a szélsőséges esetet mutatja be, amikor a bemenő  $X(t)$  jel ugrásszerűen, végtelen rövid idő alatt változik ("egységugrás függvény" jelleggel), ugyanakkor a kimenő  $U(t)$  jel csillapodó lengések mellett tart az új érték felé (az "átmeneti függvény"-hez hasonlóan).

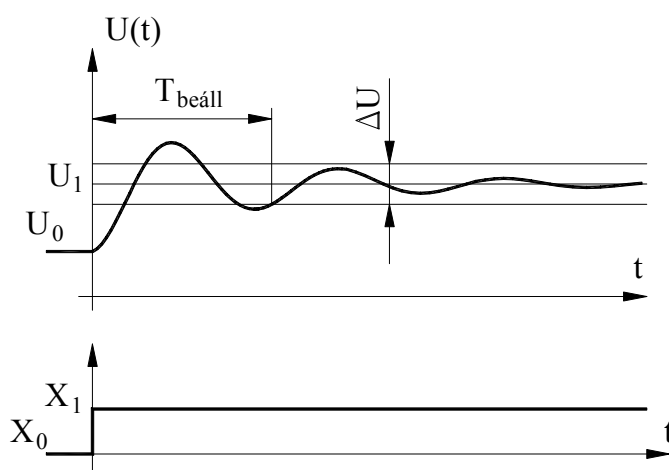
Látható, hogy míg a bemenő jel végtelen rövid idő alatt változott  $X_0$ -ról  $X_1$ -re, addig a kimenő  $U(t)$  jel csillapodó lengésekkel ugyan, de csak aszimptotikusan tart az  $U_1$  értékhez, tehát szigorúan véve csak végtelen hosszú idő után éri el  $U_1$  értékét. A gyakorlatban ilyenkor

kitűznek egy  $\Delta U$  sávszélességet, és azt a  $T_{\text{beáll}}$  időt tekintik az átalakítás **beállási idejének**, amelyen túl a kimenő  $U(t)$  feszültség-jel ingadozása kisebb a kijelölt  $\Delta U$ -nál.

Általános esetben a bemenő jel nemcsak az időnek, hanem az  $\omega$  körfrekvenciának is függvénye (tehát van harmónikus összetevője). Ekkor a kimenő jelet komplex függvényként célszerű kezelni, amelyet **átviteli karakterisztikának** nevezünk. Ha ez egy  $W(j.\omega)$  komplex függvény, akkor:

$$W(j.\omega) = A(\omega) + j.B(\omega)$$

és az abszolút értéke:  $|W(j.\omega)| = K(\omega) = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}$



4 ábra

A  $K(\omega)$  függvényt amplitúdó-karakterisztikának nevezzük.  $A(\omega)$  és  $B(\omega)$  hányadosa pedig:

$$\operatorname{tg} \varphi(\omega) = \frac{B(\omega)}{A(\omega)} ; \text{ illetve}$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{B(\omega)}{A(\omega)}$$

A  $\varphi(\omega)$  függvényt fáziskarakterisztikának nevezzük.

A fentiekből következik, hogy ha időben változó mennyiséget kell mérni, akkor célszerű, ha az érzékelő-átalakító együttes  $K(\omega)$  amplitúdó-karakterisztikája állandó abban az  $[\omega_1; \omega_2]$  tartományban, amelyben a bemenő jel körfrekvenciája is változik. Megfordítva, ha az érzékelő-átalakító amplitúdó-karakterisztikája egy  $[\omega_1; \omega_2]$  tartományban állandónak tekinthető (az ingadozás nem halad meg egy előírt  $\Delta K_0$  értéket), akkor ebben az  $[\omega_1; \omega_2]$  tartományban minden  $\omega$  körfrekvenciájú harmónikus összetevő amplitúdója azonos mértékben fog nőni, vagy csökkenni.

A továbbiakban sorra vesszük az alkalmazott érzékelők típusait, először azokat, amelyek valamilyen villamos jellemző (ellenállás, induktancia, stb.) változásává alakítják át a mérendő jeleket, majd azokat, amelyek villamos feszültséggé transzformálják a mérendő jelet. Az első

csoportba tartoznak a nyúlásmérő bélyeg, az induktív elmozdulás-érzékelő, az induktív helyzetérzékelő, valamint az induktív elven működő gyorsulás-érzékelő. Ilyen érzékelőket alkalmazva először meg kell mérni folyamatosan a változó villamos jellemzőt, majd a megmért ellenállás, induktancia, stb. változó értékével analóg módon változó és megfelelő nagyságú villamos feszültséget kell előállítani a jel további feldolgozásához. Ezt a kettős feladatot a **mérőerősítők** tudják ellátni, amelyek részleteit a további fejezetekben találhatjuk meg.

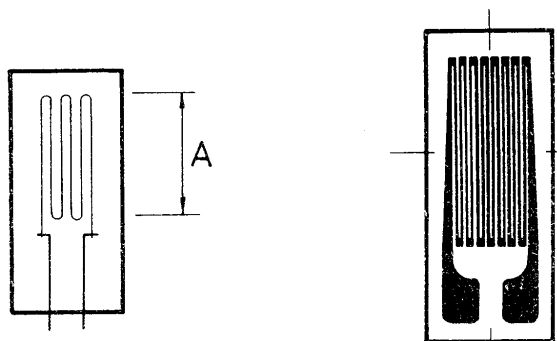
Az érzékelők második csoportjába tartozik – többek között – a lézeres távolságérzékelő, a piezoelektromos elven működő gyorsulásérzékelő, valamint az optoelektronikus elven működő szögelfordulás-érzékelő. A lézeres távolságérzékelő kimenetén a mért jellemző feszültségjele megjelenik digitális alakban is, és digitál-analóg konverzió alkalmazásával az érzékelő folytonos, de lépcsősen változó  $U(t)$  feszültséget is szolgáltat.

A továbbiakban ezeket az érzékelőket részletesebben is ismertetjük.

### 2.1.1 A nyúlásmérő bélyeg.

A nyúlásmérő bélyeg a deformálódó alkatrész felületi megnyúlását ohmikus ellenállásváltozással érzékeli. A bélyeg úgy van felépítve, hogy ellenálláshuzalt ragasztanak gyárilag két papír-, vagy műanyagréteg közé, és ezt lehet a vizsgált alkatrész felületére alkalmas ragasztóval (pl. műgyanta) felragasztani. A bélyegbe beépített ellenálláshuzal általában az 1.6. ábra baloldali részén látható módon van elhelyezve, hogy a beépített ellenálláshuzal  $A$  összhosszát meg lehessen növelni.

Manapság viszont terjed az 5. ábra jobboldali részén látható kivitel is, ahol – a nyomtatott áramkörök gyártásához hasonló módon – megfelelő vékony fóliát ragasztanak fel a hordozó alapra, majd kimaratják a felesleget, és így az ábrán látható huzal-alak marad.



5. ábra

A nyúlásmérő bélyeg fontos adata az  $A$  mérőhossz. Ez 2 ~ 50 mm lehet, legtöbbször 10 ~ 20 mm. Ennek az ismerete azért fontos, mert ezen a hosszön belül a bélyeg átlagolja a nyúlást, mivel csak a huzal összellenállásának megváltozása mérhető meg.

A nyúlásmérő bélyeg legfontosabb adata a  **$k$  nyúlási tényező**, amely a  $dR/R$  fajlagos ellenállásváltozás (nem tévesztendő össze a  $\rho$  fajlagos ellenállással !) és az  $\epsilon = dl/l$  fajlagos nyúlás közötti kapcsolatot fejezi ki:

$$k = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dl}{l}} = \frac{dR}{R} \cdot \frac{l}{\varepsilon}$$

A kísérletek szerint a huzalok anyagának folyáshatáráig  $k = \text{állandó}$ . (Bővebbet [2].- 5. fejezetében találhatunk.) A nyúlási tényező számértéke **2** körül mozog a szokásos gyártású és kivitelű nyúlásmérő bélyegek esetén, a gyártó cégek mindig közlik a bélyegeken.

Ekkor:

$$k \cdot \varepsilon = \frac{dR}{R} \cong \frac{\Delta R}{R},$$

mivel  $k$  értéke a tapasztalat szerint állandó.

Bevezetve az  $r$  relatív ellenállásváltozás értékét, kapjuk:

$$r = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R - R_0}{R_0},$$

ahol  $R_0$ : az ellenállás eredeti értéke,  $R$ : a megváltozott ellenállás értéke. Ekkor:

$$r = k \cdot \varepsilon,$$

tehát a relatív ellenállás-változás arányos az  $\varepsilon$  nyúlással, így  $r$  értékét mérve, az  $\varepsilon$  nyúlást megkaphatjuk:

$$\varepsilon = \frac{r}{k}$$

A nyúlásmérő bélyegeknél a terheletlen állapothoz tartozó  $R_0$  ellenállása – azonos típusú bélyegek esetén – eléggé csekély eltéréssel azonos, az eltérés általában nem haladja meg a  $\pm 0.5\%$ -ot. Tipikus érték a  $120 \Omega$ .

A nyúlásmérő bélyegek további fontos jellemzője a hőmérsékleti tényező, valamint a felhasználáshoz ajánlott hőmérsékleti tartomány. A hőfoktényező a hőmérsékletváltozás hatására bekövetkezett ellenállásváltozást adja meg:

$$\beta = \frac{1}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{r}{\Delta T}$$

Levezethető ([1].-7.4, [2].- 5.3.3), hogy a terheletlen bélyeg  $\Delta T$  hőmérsékletváltozás esetén a következő nagyságú megnyúlást szenved el a fémalkatrész megnyúlása következtében:

$$\varepsilon_{hő} = \left[ \alpha_0 - \alpha + \frac{\beta}{k} \right] \Delta T,$$

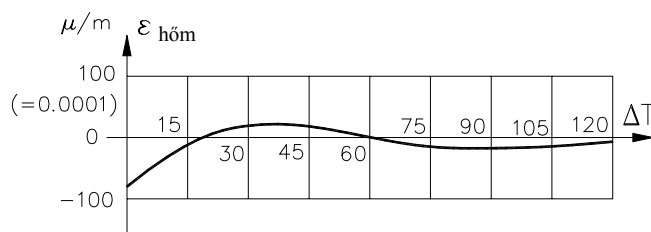
ahol  $\alpha_0$  : a hőmérséklet-változás előtti hőtágulási tényező;

$\alpha$  : a hőmérséklet-változás utáni hőtágulási tényező ;

$\beta$  : hőfoktényező.

Az  $\epsilon_{hő}$  hőfokváltozási nyúlást a 6. ábra szemlélteti a  $\Delta T$  hőmérsékletváltozás függvényében, a szokásos korszerű kivitelű nyúlásmérő bélyegekre.

Látható az ábráról, hogy a célszerűen használható hőmérsékletváltozási tartomány a  $20 \sim 100$  °C közötti terület. A gyárak a bélyegek huzalát olyan ötvözetekből állítják elő, amelyek ellenállása nem, vagy csak igen kicsi mértékben függ a huzal hőmérsékletétől. Mivel a járműmérési gyakorlatban a bélyegek hőmérséklete keveset változik, így a hőmérséklet ilyen befolyását el lehet hanyagolni. Ha viszont a mérendő fémalkatrész hőmérséklete változik, és emiatt a hossza változik, a bélyeg huzalával együtt, emiatt a bélyeg huzalának ellenállása úgy változik, mintha a mérendő alkatrészt mechanikai igénybevétel érte volna. Az ilyen eredetű ellenállásváltozást megfelelő bélyegkapcsolással lehet elkerülni, ezt a Mérőerősítők c. fejezetben részletesen is ismertetjük.

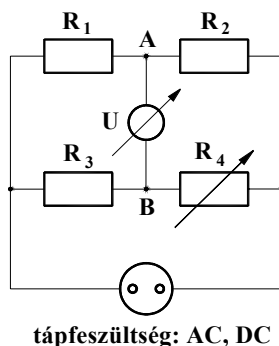


6 ábra

A nyúlásmérő bélyegek jellemzői közül még megemlíthető a megengedhető mechanikus igénybevétel és a megengedhető villamos terhelés. Statikus terhelésekre a bélyegek legfeljebb  $\epsilon_{max} = 0.3\% = 0.003 \text{ m/m} = 3000.0 \text{ } \mu\text{/m}$  nyúlást képesek garantáltan elviselni (ez kb. **600 Mpa** húzófeszültséget jelent). Ismétlődő igénybevételek okozta nyúlások mérésénél célszerű olyan bélyeget alkalmazni, amelyen a gyártó feltüntette, hogy legfeljebb mekkora nyúlást és milyen terhelési ciklusszámot képes a bélyeg elviselni.

A megengedhető villamos terhelés azt a legnagyobb feszültséget jelenti, amely a mérés során hathat a bélyegre, ez általában **20 V**.

Végezetül bemutatjuk, hogy az előbb elmondottak szerint a mérendő  $\epsilon$  felületi nyúlás meghatározásához meg kell mérni az  $r$  relatív ellenállásváltozást, illetve a mérőbélyeg  $R$  ellenállásának  $\Delta R$  abszolút ellenállásváltozását. Ezt a gyakorlatban **Wheatstone-híddal** végzik el (7. ábra):



7 ábra

Az ábrán látható négy ellenállás közül legyen  $R_1$  a mérendő ellenállás (a mérőbélyeg),  $R_4$  változtatható ellenállás,  $R_2$  és  $R_3$  pedig ismert értékű, állandó nagyságú ellenállások. Könnyen belátható, hogy az  $R_4$  ellenállás változtatásával elérhető, hogy az  $U$  feszültségmérő zérust mutasson, mert ekkor:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4},$$

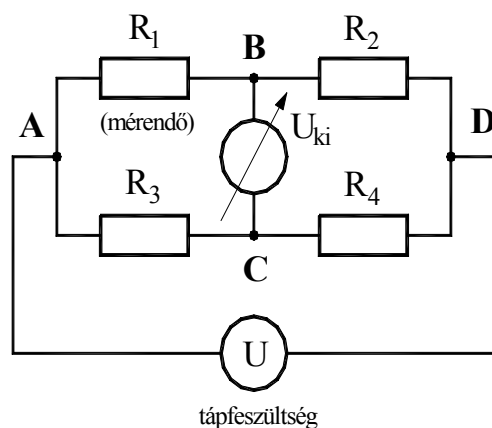
tehát az ismeretlen  $R_1$  ellenállás értéke:

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

Ez a módszer csak statikus méréseknél alkalmazható, tehát amikor  $R_1$  értéke állandó. Változó terhelések, tehát változó bélyegellenállások esetén egyszerűen nincs idő  $R_4$  változtatására, hanem a mért  $U$  feszültség értékéből következtethetünk az ismeretlen  $R_1$  értékére. Erről bővebben a következő, a Mérőerősítők c. fejezetben találhatunk.

### 2.1.2 Mérőerősítők

Amint azt az előbbieken is megemlítettük, hogy ha méréssel kell meghatározni az érzékelők megváltozott ohmikus ellenállását, induktivitását, stb. akkor erre a gyakorlatban a legáltalánosabban használt módszer a **Wheatstone-híd** (7 ábra), továbbá azt is említettük, hogy a híd egyik ellenállásának megfelelő változtatásával végzett kiegyenlítés nem járható út időben változó mérési jelek, tehát időben változó  $R$  ellenállás esetén. A gyakorlatban erre az a módszer terjedt el, hogy a híd  $R_3$  és  $R_4$  ellenállását ismertnek tételezik fel, és egyszerűen megméri a híd ki nem egyenlített  $U_{ki}$  feszültségét (8 ábra) :



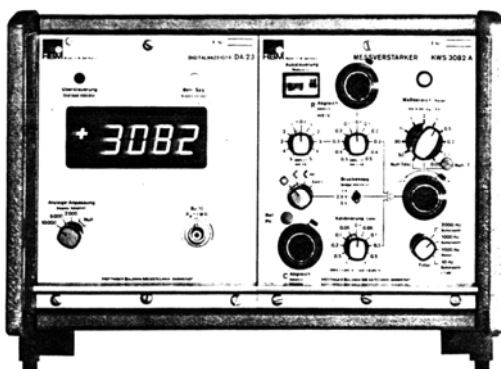
8 ábra

Az  $U_{ki}$  feszültség értéke nyilvánvalóan az ellenállásoktól és a tápfeszültségtől függ. Mivel feszültséget mérünk, ezzel meg van oldva egyrészt a jelátalakítás problémája (felületi nyúlás – ohmos ellenállásváltozás – villamos feszültség változása), másrészt az erősítés problémája is, ezért nevezik ezt a berendezést **mérőerősítőnek**. A mérés technikai gyakorlatban nemcsak egyetlen ellenállás lehet ismeretlen, a gyakorlatban előforduló fontosabb eseteket az alábbiak-

ban ismertetjük, megmutatva, hogy az  $U_{ki}$  feszültség a mérendő ellenállás(ok)nak mindig – jó közelítéssel - lineáris függvénye lesz. További megjegyzés, hogy nemcsak ohmikus ellenállásokból állhat a mérőhíd, hanem pl. induktív ellenállás is, pl. az induktív elmozdulás-érzékelők, vagy induktív gyorsulásérzékelők induktancia-változását is ugyanígy lehet mérni.

Manapság a mérőerősítőket úgy építik, hogy egyik felhasználási változatukban az  $R_3$  és  $R_4$  ellenállásokat eleve beépítik azonos értékkel (a további levezetésekben ezeket  $R_C$  –vel jelöljük, ilyenkor az  $R_1$  és/vagy  $R_2$  ellenállás értéke változik, ezt nevezik „fél-hídnak”. Ilyenkor a híd **A**, **B** és **D** pontját (lásd a 8 ábrát) kell csatlakoztatni a mérőerősítő megfelelő pontjaihoz. Más esetben mind a négy ellenállás értéke változik, ez az ú. n. „teljes híd” esete, ilyenkor az **A**, **B**, **C** és **D** pontot mind csatlakoztatni kell a mérőerősítő megfelelő bemeneti pontjaihoz.

A mérőerősítőket mindig úgy építik, hogy a vizuális megfigyelés lehetővé tételére mérőműszert is építenek be a mérőerősítőbe. Korábban mutatós (Deprez rendszerű) feszültségmérővel, manapság digitális kijelzésű műszerrel szerelik fel a mérőerősítőket. Így a lassan változó, vagy statikus jellemzők mérési eredményei közvetlenül is leolvashatók. Változó mennyiségek mérése esetén az  $U_{ki}$  feszültség kimenetére alkalmas regisztráló, vagy értékelő berendezést kell csatlakoztatni. A 9 ábrán a Hottinger gyártmányú KWS 82 típusú mérőerősítő látható, a 10 ábra a DMP 4.0 típusú mérőerősítőt mutatja be.



9. ábra



10. ábra

A következőkben bemutatjuk a leghasználatosabb mérőbéllyeg-elrendezéseket és mérőhíd-kapcsolásokat.



### 2.1.2.1 A mérendő jellemzőt egyetlen bélyeg érzékeli

Ez az eset pl. a 8. ábrán bemutatott  $R_1$  nyúlásmérő bélyeg esete. A mérőhídban az  $R_2$  bélyeget célszerű az  $R_1$  bélyeggel azonos típusúnak megválasztani, az általánosság érdekében legyen  $R_1 = R$  (ez a megváltozott ellenállású bélyeg) és  $R_2 = R_0$ . Terheletlen állapotban (nullázáskor)  $R_1 = R_0$ , ekkor írható, hogy a mérendő bélyeg megváltozott értéke:

$$R = R_0 + \Delta R,$$

továbbá a gyakorlatban  $R_3$  és  $R_4$  értékét ugyancsak célszerű egyenlőnek választani, így legyen:

$$R_3 = R_4 = R_C$$

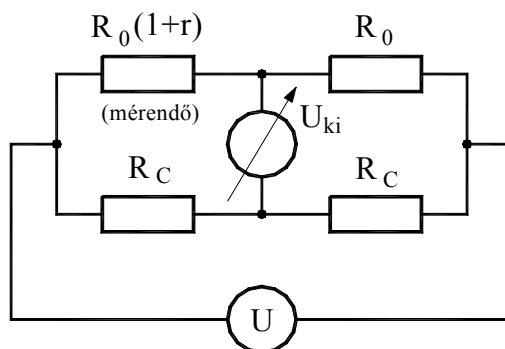
Ekkor írhatjuk, hogy a mérendő  $R$  ellenállás megváltozott értéke:

$$\Delta R = R - R_0$$

Célszerű az  $r$  fajlagos ellenállás-változás értékének bevezetése:

$$r = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0} ; \text{ ahonnan: } R = R_0 \cdot (1 + r)$$

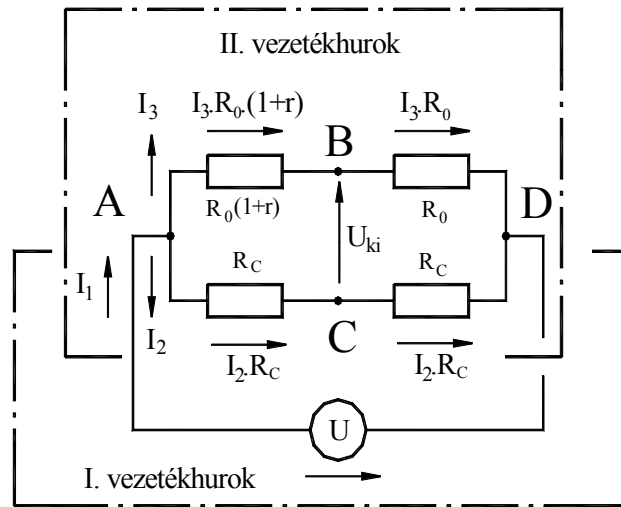
A híd most a 11. ábrán látható elemekből áll.



tápfeszültség

11. ábra

Írjuk fel az  $U_{ki}$  kimenő feszültség és az ellenállások közötti összefüggést, alkalmazva **Kirchhoff** törvényeit két vezetőhurokra. A számításokban a tápfeszültség-forrás belső ellenállását elhanyagolhatjuk ( $R_{belső} \cong 0$ ), mivel ez általában mindig csekély értékű szokott lenni, az  $U_{ki}$  feszültséget mérő berendezés belső ellenállása viszont általában igen nagy, tehát rajta áram gyakorlatilag nem folyik, ezért ezt az ágat egyszerűen elhanyagoljuk. Az ilyen számításokban szokásos módon felvesszük az egyes ágakban az áramok irányát, és a tápfeszültség értelmét az ágakban bekövetkező feszültségesséssel ellentétes értelemben vesszük fel. A 12. ábra bemutatja a számításokhoz szükséges két vezetőhurokot, az áram- és feszültségirányokkal együtt:



12. ábra

Az I. vezetékhurot csak az  $U$  áramforrás és a két  $R_C$  ellenállás alkotja ( $U - A - C - D - U$  kör), ebben a körben az  $U$  tápfeszültség (ellentétes az  $I_1$  áram irányával) és a két  $R_C$  ellenálláson eső  $I_2 \cdot R_C$  feszültségek vannak egyensúlyban:

$$I_2 \cdot R_C + I_2 \cdot R_C - U = 0$$

Végül a II. vezetékhurot az  $R_0(1+r)$ , az  $R_0$ , valamint a két  $R_C$  ellenállás alkotja ( $A - B - D - C - A$  csomópontok által alkotott huok). A feszültségesések algebrai összege:

$$I_3 \cdot R_0(1+r) + I_3 \cdot R_0 - I_2 \cdot R_C - I_2 \cdot R_C = 0$$

A két lineáris algebrai egyenletben két ismeretlen van:  $I_2$  és  $I_3$ . Az első egyenletből  $I_2$ -t kifejezve kapjuk:

$$I_2 = \frac{U}{2 \cdot R_C}$$

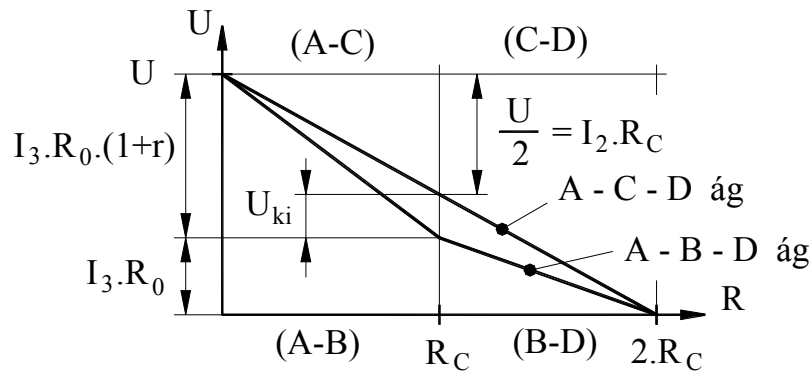
Ezt behelyettesítve a második egyenletbe, kapjuk:

$$I_3 \cdot R_0(1+r) + I_3 \cdot R_0 - \frac{U}{2 \cdot R_C} \cdot R_C - \frac{U}{2 \cdot R_C} \cdot R_C = 0, \text{ amelyből:}$$

$$I_3 \cdot R_0(2+r) = U; \text{ ahonnan:}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_0(2+r)}$$

Az ismeretlen  $U_{ki}$  feszültség az  $A - B$  és  $A - C$  áramkör-szakaszokon fellépő feszültségesések közötti különbség lesz. A 13. ábra mutatja be a két ágba a feszültségek esését:



13. ábra

Az **A – C** szakaszon a feszültségésés:  $\frac{U}{2} = I_2 \cdot R_C$ , ugyanakkor az **A – B** szakaszon a feszültség  $I_3 \cdot R_0 \cdot (1+r)$  értékkel csökken. A két esés különbsége lesz a mérendő  $U_{ki}$  feszültség (behelyettesítve  $I_3$ -nak az előbb levezetett képletét) :

$$U_{ki} = I_3 \cdot R_0 \cdot (1+r) - I_2 \cdot R_C = \frac{U}{R_0 \cdot (2+r)} \cdot R_0 \cdot (1+r) - \frac{U}{2 \cdot R_C} \cdot R_C = U \cdot \left[ \frac{1+r}{2+r} - \frac{1}{2} \right] =$$

$$= U \cdot \frac{2+2r-2-r}{2 \cdot (2+r)} = U \cdot \frac{r}{2 \cdot (2+r)} = U \cdot \frac{r}{4+2r}$$

Mivel a nyúlásmérési gyakorlatban a mért ellenállásváltozások kicsik, a fajlagos  $r$  ellenállásváltozás is kicsi, ennél fogva a  $2 \cdot r$  mennyiség is csekély 4-hez képest :

$$4 \gg 2r ;$$

ezért írható :

$$U_{ki} \cong U \cdot \frac{r}{4} ;$$

tehát a mért  $U_{ki}$  feszültség jó közelítéssel arányos az  $r$  fajlagos ellenállásváltozással. Hasonló eredményt kaphatunk az  $\varepsilon$  fajlagos hosszváltozásra is :

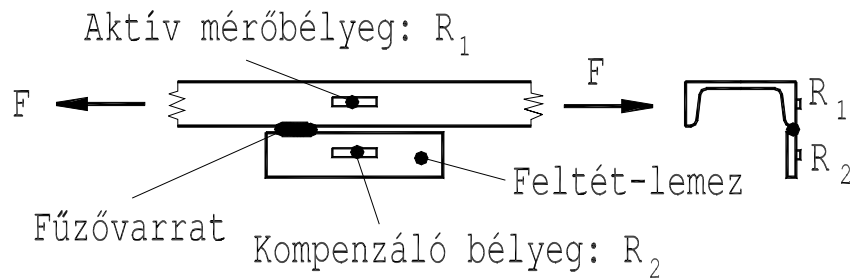
$$r = 4 \cdot \frac{U_{ki}}{U} ; \text{továbbá } r = k \cdot \varepsilon ; \text{innen}$$

$$\varepsilon = \frac{r}{k} = \frac{4}{k \cdot U} \cdot U_{ki} ;$$

tehát az  $\varepsilon$  fajlagos hosszváltozás is arányos  $U_{ki}$ -vel.

### 2.1.2.2 A hőmérséklet-változás hatásának kiküszöbölése

A 7. ábrán bemutatott Wheatstone-híd kapcsolás lehetőséget ad arra is, hogy a hőmérséklet-változás által okozott  $\varepsilon_{hő}$  nyúlás befolyását egyszerű módon lehessen kiküszöbölni. Ez az ú. n. **hőmérséklet-kompenzáló bélyeg** alkalmazása (14, ábra).



14. ábra

Az ábrán bemutatott tartóra az  $R_1$  nyúlásmérő bélyeget ragasztották a tartóban ébredő húzófeszültség-okozta nyúlás érzékelésére, a bélyeg ellenállás-változása nyilvánvalóan arányos lesz az érzékelt  $\varepsilon_1$  nyúlással, amiből – egytengelyű feszültségi állapotot feltételezve – következtetni lehet a tartót terhelő  $\sigma$  feszültségre:

$$\sigma = \varepsilon_1 \cdot E$$

Ha a vizsgált tartó hőmérséklete megváltozott a felragasztás hőmérsékletéhez képest, akkor a tartó hődilatációja következtében a mérőbélyeg ellenállása is megváltozik és  $\varepsilon_{hő}$  megnyúlást érzékel, mintha azt is az  $F$  terhelőerő keltette volna.

Mivel a tartó hőmérséklet-változására általában számítani lehet, ilyenkor felhegesztenek a tartóra egy olyan feltét-lemezt, amelyre az  $R_1$  bélyeghez hasonló kivitelű hőmérséklet-kompenzáló bélyeget ragasztottak, ezt jelöljük  $R_2$  -vel.

A feltét-lemezt rögzítő varrat csak egy rövid, ú. n. fűző-varrat lehet, hogy a feltét-lemez ne legyen kénytelen követni az U-tartónak az  $F$  húzóerő hatására bekövetkezett hosszváltozását. Ha a környezet hőmérséklete változik (pl. az alvázat körülújító menetszél hatására), az mind az  $R_1$ , mind az  $R_2$  ellenállású bélyegek hőmérsékletét egyenlőképpen változtatja (ezért célszerű az  $R_2$  bélyegnek az  $R_1$  közelében lennie). Viszont a mechanikai terhelés hatására bekövetkező felületi nyúlás csak  $R_1$  ellenállását változtatja meg. A hőmérséklet-változás azonban egyenlő arányban változtatja meg mind az  $R_1$ , mind az  $R_2$  értékét. Így felépítve a Wheatstone-hidat, az  $R_1$  ellenállás mérési eredményét nem befolyásolja a hőmérséklet esetleges megváltozása. Ennek igazolásául felhasználjuk az előzőkben említett összefüggést a bélyeg  $\Delta T$  hőmérsékletváltozása és az általa kiváltott  $\varepsilon_{hő}$  nyúlás között:

$$\varepsilon_{hő} = \left[ \alpha_0 - \alpha + \frac{\beta}{k} \right] \cdot \Delta T$$

ahol  $\alpha_0$  és  $\alpha$  a tartó anyagának állandói,  $\beta$  és  $k$  a nyúlásmérő bélyeg állandói, így általánosságban ez a képlet így írható:

$$\varepsilon_{hő} = \varepsilon_{hő}(\Delta T)$$

A 14. ábrán bemutatott mérési feladatban a mérendő tartót  $F$  húzóerő terheli, emellett a hőmérséklete is változik  $\Delta T$ -vel, a fűzővarrattal hozzákapsolt feltét-lemeznek a hőmérséklete szintén  $\Delta T$ -vel változik. A feltét-lemez ezért megnyúlik, a mérendő tartó hossza viszont a hőmérséklet emelkedésére éppen úgy megnyúlik, mint a húzóerő hatására.

Írjuk fel, hogy a mérendő tartó mennyire nyúlt meg a húzóerő hatására:

$$l_F = l_0 + l_0 \cdot \frac{F}{A \cdot E}$$

ahol  $l_0$  a tartó eredeti hossza,  $A$  a tartó keresztmetszete,  $E$  a rugalmassági modulus.

Így:  $l_F = l_0 + l_0 \cdot \varepsilon_F$

Ahol  $\varepsilon_F$  a húzóerő hatására fellépő fajlagos nyúlás:  $\varepsilon_F = \frac{F}{A \cdot E}$

Most melegítsük fel az  $l_F$  hosszúságra megnyúlt tartót  $\Delta T$ -vel:

$$\begin{aligned} l_{T,F} &= l_F + l_F \cdot \varepsilon_{h\delta} = (l_0 + l_0 \cdot \varepsilon_F) + (l_0 + l_0 \cdot \varepsilon_F) \cdot \varepsilon_{h\delta} = \\ &= l_0 + l_0 \cdot \varepsilon_F + l_0 \cdot \varepsilon_{h\delta} + l_0 \cdot \varepsilon_F \cdot \varepsilon_{h\delta} \end{aligned}$$

ahol  $\varepsilon_F \cdot \varepsilon_{h\delta} \approx 0$ , mivel másodrendűen kicsi  $\varepsilon_F$ , illetve  $\varepsilon_{h\delta}$  mellett. Következésképpen:

$$l_{T,F} \cong l_0 + l_0 \cdot \varepsilon_F + l_0 \cdot \varepsilon_{h\delta}$$

tehát a tartó jó közelítéssel úgy viselkedik, mintha külön-külön nyúlt volna meg a húzóerő, illetve a melegedés hatására. Tehát írható:

$$\varepsilon_{T,F} = \frac{l_{T,F} - l_0}{l_0} = \frac{l_0 + l_0 \cdot (\varepsilon_F + \varepsilon_{h\delta}) - l_0}{l_0} = \varepsilon_F + \varepsilon_{h\delta}$$

Ezzel szemben a feltét-lemez fajlagos megnyúlása csak  $\varepsilon_{h\delta}$ . Most írjuk fel a nyúlásmérő bélyegek fajlagos megnyúlásokhoz tartozó fajlagos ellenállásváltozásokat:

$R_1$  nyúlásmérő bélyeg a mérendő tartón:

$$r_F = k \cdot \varepsilon_F, \text{ ezzel } \Delta R_F = r_F \cdot R_0 \text{ és}$$

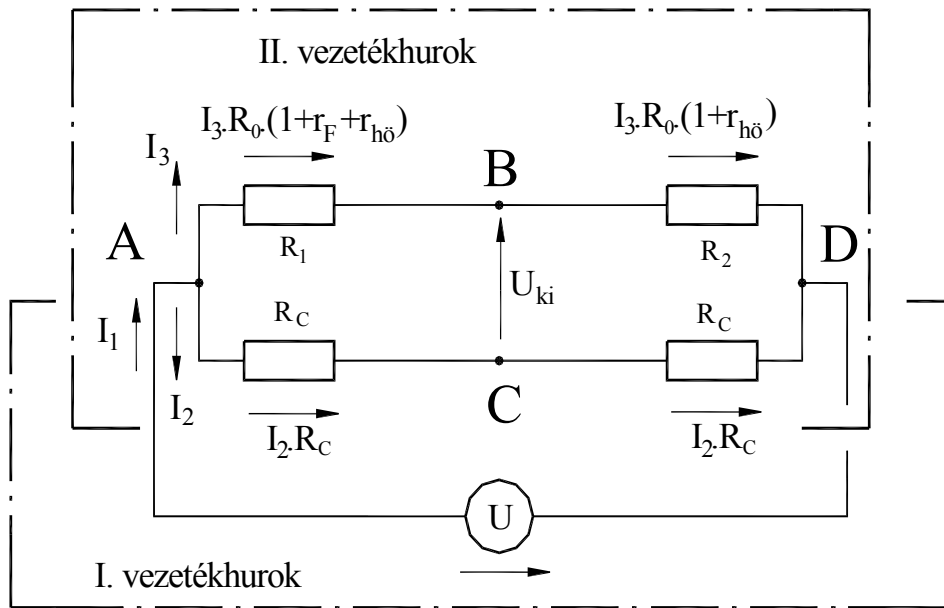
$$r_{h\delta} = k \cdot \varepsilon_{h\delta}, \text{ ezzel } \Delta R_{h\delta} = r_{h\delta} \cdot R_0, \text{ végül:}$$

$$R_1 = R_0 + \Delta R_F + \Delta R_{h\delta} = R_0 \cdot (1 + r_F + r_{h\delta})$$

$R_2$  nyúlásmérő bélyeg a feltét-lemezen:

$$R_2 = R_0 + \Delta R_{h\delta} = R_0 \cdot (1 + r_{h\delta})$$

Az  $R_1$  és  $R_2$  nyúlásmérő bélyegeket az előzőkhöz hasonlóan köthetjük *Wheatstone*-hídba (15. ábra):



15. ábra

Az ábrán feltüntetett I. és II. vezetékűkre alkalmazzuk **Kirchhoff** törvényét. Az I. vezetékűkben a feszültségesések összege:

$$I_2 \cdot R_C + I_2 \cdot R_C - U = 0, \text{ innen: } I_2 = \frac{U}{2 \cdot R_C}$$

A II. vezetékűkben:

$$I_3 \cdot R_0 \cdot (1 + r_F + r_{h\ddot{o}}) + I_3 \cdot R_0 \cdot (1 + r_{h\ddot{o}}) - 2 \cdot I_2 \cdot R_C = 0$$

$$I_3 \cdot R_0 + I_3 \cdot R_0 \cdot r_F + I_3 \cdot R_0 \cdot r_{h\ddot{o}} + I_3 \cdot R_0 + I_3 \cdot R_0 \cdot r_{h\ddot{o}} - U = 0$$

$$I_3 \cdot [2 \cdot R_0 + 2 \cdot R_0 \cdot r_{h\ddot{o}} + R_0 \cdot r_F] = U$$

Innen: 
$$I_3 = \frac{U}{R_0 \cdot (2 + 2 \cdot r_{h\ddot{o}} + r_F)}$$

A mérőhíd kimenő  $U_{ki}$  feszültsége:

$$U_{ki} = I_3 \cdot R_0 \cdot (1 + r_F + r_{h\ddot{o}}) - I_2 \cdot R_C$$

Behelyettesítve  $I_2$  és  $I_3$  képleteit:

$$\begin{aligned} U_{ki} &= U \cdot \frac{R_0 \cdot (1 + r_F + r_{h\ddot{o}})}{R_0 \cdot (2 + 2 \cdot r_{h\ddot{o}} + r_F)} - \frac{U}{2} = \\ &= U \cdot \frac{2 \cdot (1 + r_F + r_{h\ddot{o}}) - (2 + 2 \cdot r_{h\ddot{o}} + r_F)}{2 \cdot (2 + 2 \cdot r_{h\ddot{o}} + r_F)} = \end{aligned}$$

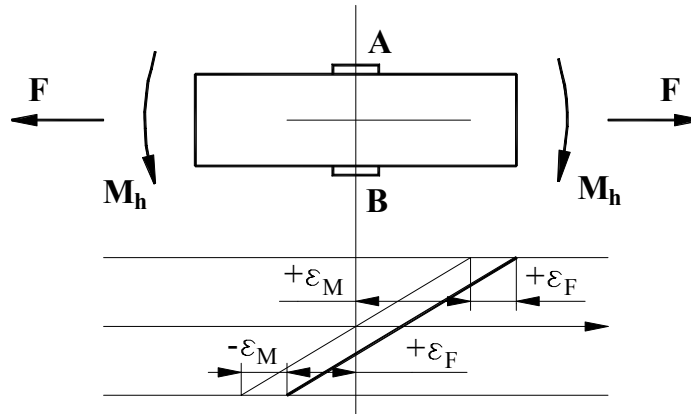
$$= U \cdot \frac{r_F}{2 \cdot (2 + 2 \cdot r_{h\ddot{o}} + r_F)} \cong U \cdot \frac{r_F}{4}$$

mivel itt alkalmazhatjuk a relációt:  $2 \gg \gg 2 \cdot r_{h\ddot{o}} + r_F$

Tehát az alkalmazott bélyegelrendezés valóban jó közelítéssel nem érzékeli a hőmérséklet emelkedését, csak a húzóerő hatását.

### 2.1.2.3 A mérendő jellemzőt két bélyeg érzékeli

Bizonyos mechanikai igénybevételek mérése esetén, különösen a hajlítás okozta húzó-feszültségek mérésénél a mérőhíd érzékenységét növelni lehet azáltal, ha kihasználjuk azt a jelenséget, hogy a mérendő húzófeszültség – pontosabban az ébredő nyúlás – egyidejűleg ellentétes értelmű alakban is fellép, mint pl. a hajlított tartó alsó és felső felületén ébredő nyúlás (16. ábra). A hajlított tartókat az esetek többségében hosszirányú húzás-nyomás is terheli, ami – hasonló fajlagos nyúlást ébresztve – meghamisítja a hajlítás okozta deformációk mérését.



16. ábra

A 16. ábra felső része a tartót, az alsó része a mért fajlagos nyúlásokat mutatja. Látható, hogy a tartót  $M_h$  hajlítónyomaték és  $F$  húzóerő terheli, a tartó felső felületére az **A** bélyeget, az alsó felületére a **B** bélyeget ragasztották. Így az **A** bélyeg az  $M_h$  hajlítónyomaték okozta pozitív  $+\varepsilon_M$  nyúlásnak és az  $F$  húzóerő okozta ugyancsak pozitív  $+\varepsilon_F$  nyúlásnak az összegét érzékeli, míg az alsó **B** bélyeg a negatív  $-\varepsilon_M$  és a pozitív  $+\varepsilon_F$  nyúlások **összegét méri**.

Ha a tartó keresztmetszete  $A_t$ , a keresztmetszeti tényezője  $K_z$ , a mért nyúlások értéke:

$$+\varepsilon_M = \frac{\sigma_M}{E} = \frac{M_h}{E \cdot K_t} ; \text{ továbbá}$$

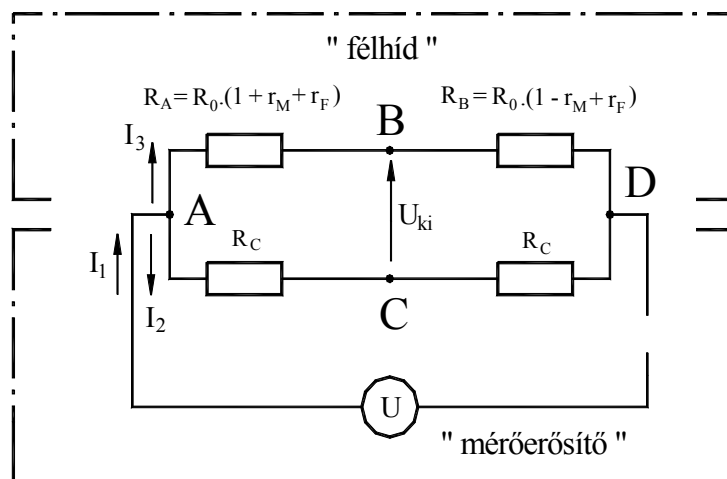
$$+\varepsilon_F = \frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{A_t \cdot E} ,$$

ezekkel a mért fajlagos  $r_M$  és  $r_F$  ellenállásváltozások:

$$r_M = k \cdot \varepsilon_M \text{ és}$$

$$r_F = k \cdot \varepsilon_F$$

Ha a két nyúlásmérő bélyeg azonos kivitelű és a terheletlen állapothoz tartozó ellenállásuk  $R_0$ , akkor a mérőhíd a 17. ábrán látható elrendezésű lesz:



17. ábra

Itt is felírhatjuk Kirchhoff törvényei alapján egyrészt az  $A - D - U - A$  körön eső feszültségek összegét:

$$2 \cdot I_2 \cdot R_C - U = 0 \text{ ; innen:}$$

$$I_2 = \frac{U}{2 \cdot R_C} \text{ ;}$$

másrészt az  $A - B - D - C - A$  körön eső feszültségek összege:

$$I_3 \cdot R_0 \cdot (1 + r_M + r_F) + I_3 \cdot R_0 \cdot (1 - r_M + r_F) - 2 \cdot I_2 \cdot R_C = 0 \text{ ; ebből:}$$

$$I_3 \cdot R_0 + I_3 \cdot R_0 \cdot r_M + I_3 \cdot R_0 \cdot r_F + I_3 \cdot R_0 - I_3 \cdot R_0 \cdot r_M + I_3 \cdot R_0 \cdot r_F - 2 \cdot I_2 \cdot R_C = 0$$

behelyettesítve  $I_2$  képletét, kapjuk: 
$$I_3 = \frac{U}{2 \cdot R_0 \cdot (1 + r_F)}$$

Az  $U_{ki}$  feszültség az  $A - B$ , illetve az  $A - C$  ágakon eső feszültségek különbsége lesz:

$$\begin{aligned} U_{ki} &= U_{A-B} - U_{A-C} = I_3 \cdot R_0 \cdot (1 + r_M + r_F) - \frac{U}{2} = \frac{U}{2 \cdot R_0 \cdot (1 + r_F)} \cdot R_0 \cdot (1 + r_M + r_F) - \frac{U}{2} = \\ &= U \cdot \frac{r_M}{2 \cdot (1 + r_F)} \end{aligned}$$

Mivel  $r_F$  értéke 1 mellett elhanyagolható:

$$1 \gg r_F \text{ ;}$$



ezért:

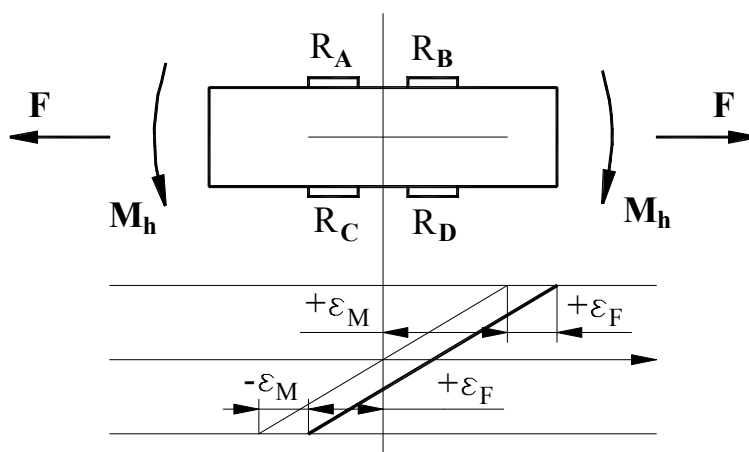
$$U_{ki} \cong U \cdot \frac{r_M}{2} = \frac{U}{2} \cdot k \cdot \varepsilon_N = \frac{U}{2} \cdot k \cdot \frac{M_h}{E \cdot K_z} = C \cdot M_h$$

tehát az  $U_{ki}$  feszültség arányos a terhelő  $M_h$  hajlítónyomatékkal, továbbá ez a kapcsolat éppen kétszeres érzékenységű az egyetlen bélyegnél levezetett  $U \cdot \frac{r}{4}$  - hez képest. További fontos eredmény, hogy az  $U_{ki}$  feszültség a húzóerő által ébresztett  $r_F$  fajlagos ellenállásváltozástól független, tehát az  $R_A$  és  $R_B$  bélyegek együttes alkalmazása egyrészt javítja a mérőhíd érzékenységét, másrészt kiszűri az esetleges húzó-nyomó igénybevétel által keltett zavaró feszültségjelet.

Ebben az esetben is az  $R_A$  és az  $R_B$  bélyegek a „félhidat” alkotják, a mérőerősítőhöz tehát az **A**, **B** és **D** pontokat kell csatlakoztatni.

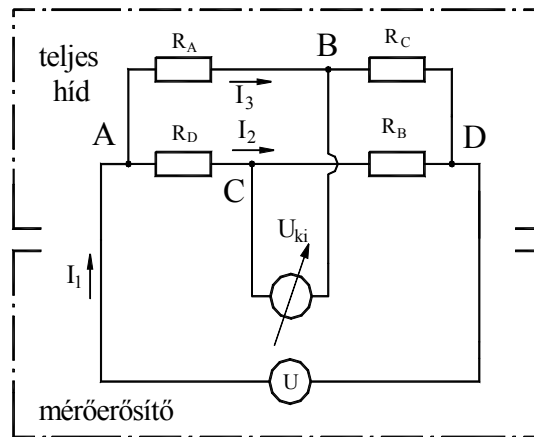
#### 2.1.2.4 Hajlítónyomaték mérése négy bélyeggel, a húzóerő hatásának kiszűrése

A mérőerősítő érzékenységét tovább fokozhatjuk, ha a 16. ábrán bemutatott terhelési esetben ébredő feszültségeket négy bélyeggel mérjük (18. ábra):



18. ábra

A mérési feladat most is az, hogy egyrészt meg kell mérni a terhelő  $M_h$  hajlító nyomatékot, másrészt a mért feszültségjelből le kell választani (ki kell szűrni) a várhatóan szintén fellépő  $F$  húzó-nyomó erő jelét. A 19. ábrán látható az alkalmazott mérőhíd kapcsolása, itt a négy nyúlásmérő bélyeg a teljes mérőhíd alkotja.



19. ábra

A híd akkor fogja érzékelni a hajlító nyomaték által keltett nyúlásokat, ha a **B**, illetve **C** csomópontok bal- és jobboldalán a hajlítás miatt ellentétesen változó ellenállásokat kapcsolunk, ezért került az  $R_A$  és az  $R_C$  a felső ágba, az  $R_D$  és az  $R_B$  pedig az alsóba.

Mivel a négy mérőbéllyeg kiteszi a teljes mérőhidat, a négy csatlakozási pont (**A**, **B**, **C** és **D**) mindegyikét be kell kötni a mérőerősítőbe. Az  $R_A$  és  $R_B$ , valamint az  $R_C$  és  $R_D$  bélyegeket a tartó hossz tengelyével párhuzamosan kell a tartóra ragasztani, a tartó ellentétes oldalára, az egy oldali bélyegeket célszerű egymáshoz minél közelebb elhelyezni. Ekkor feltételezhető, hogy a terhelés hatására a bélyegek eredeti  $R_0$  ellenállása az alábbi módon változik:

$$R_A = R_B = R_0 \cdot (1 + r_M + r_F) ; \text{ valamint}$$

$$R_C = R_D = R_0 \cdot (1 - r_M + r_F) ;$$

ahol az  $r_M$  és  $r_F$  fajlagos ellenállásváltozások összefüggései megegyeznek az előző fejezetben alkalmazottakkal.

A **Kirchhoff** - huroktörvényt most is először az  $U$  tápfeszültség, valamint az  $R_D$  és az  $R_B$  bélyegek által alkotott körre alkalmazzuk:

$$I_2 \cdot R_D + I_2 \cdot R_B - U = 0 ; \text{ behelyettesítve:}$$

$$I_2 \cdot R_0 \cdot (1 - r_M + r_F) + I_2 \cdot R_0 \cdot (1 + r_M + r_F) - U = 0$$

$$\text{innen: } I_2 = \frac{U}{2 \cdot R_0 \cdot (1 + r_F)}$$

Ezután az **A – B – D – C – A** pontok által alkotott hurok következik:

$$I_3 \cdot R_A + I_3 \cdot R_C - I_2 \cdot R_B - I_2 \cdot R_D = 0$$

$$I_3 \cdot R_0 \cdot (1 + r_M + r_F) + I_3 \cdot R_0 \cdot (1 - r_M + r_F) - I_2 \cdot R_0 \cdot (1 - r_M + r_F) - I_2 \cdot R_0 \cdot (1 + r_M + r_F) = 0$$

$$\text{Rendezve: } 2 \cdot I_3 \cdot R_0 \cdot (1 + r_F) - 2 \cdot I_2 \cdot R_0 \cdot (1 + r_F) = 0$$

Behelyettesítve  $I_2$  képletét, az összefüggés a következő lesz:

$$2.I_3.R_0.(1+r_F) - U = 0 ; \text{ ahonnan:}$$

$$I_3 = \frac{U}{2.R_0.(1+r_F)} = I_2$$

Az  $U_{ki}$  kimeneti feszültség az  $A - B$ , és az  $A - C$  ágakon eső feszültségek különbsége lesz:

$$\begin{aligned} U_{ki} &= U_{A-B} - U_{A-C} = I_3.R_A - I_2.R_D = \\ &= \frac{U}{2.R_0.(1+r_F)}.R_0.(1+r_M+r_F) - \frac{U}{2.R_0.(1+r_F)}.R_0.(1-r_M+r_F) = \\ &= \frac{U}{2} \left[ \frac{1+r_M+r_F - (1-r_M+r_F)}{1+r_F} \right] = \frac{2.r_M.U}{2.(1+r_F)} = U \cdot \frac{r_M}{1+r_F} \end{aligned}$$

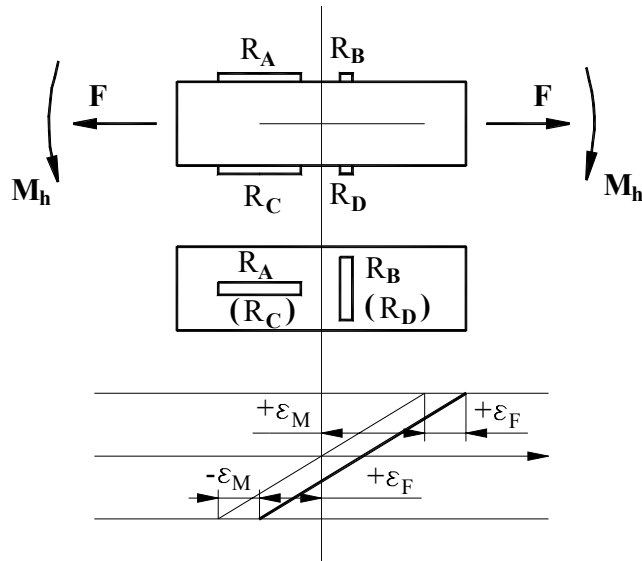
Az előző fejezet gondolatmenetéhez hasonlóan írhatjuk:  $r_F \lll 1$  ; tehát:

$$U_{ki} \cong U.r_M = U.k.\frac{M_h}{E.K_z} = C.M_h$$

tehát  $U_{ki}$  egyrészt arányos az  $M_h$  hajlítónyomatékkal, másrészt kétszerese a két mérőbélyeggel mérhető kimeneti feszültségnek, továbbá négyszerese az egyetlen bélyeggel mérhető  $U_{ki}$  feszültségnek.

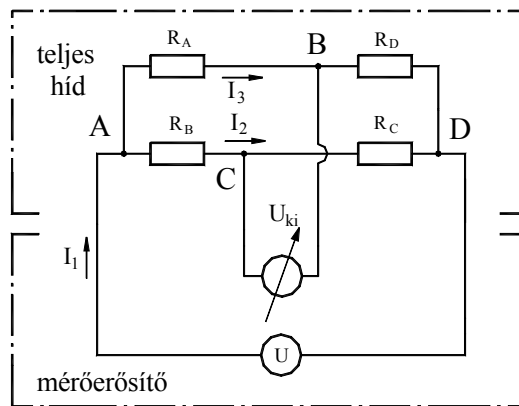
### 2.1.2.5 Húzó-nyomó terhelés mérése négy bélyeggel, a hajlítás hatásának kiszűrése

Nemcsak a hajlítási igénybevételhez társul rendszerint húzó-nyomó igénybevétel, a húzó-nyomó terheléshez is kapcsolódhat járulékos hajlítás. Pl. egy felfüggesztő elembe ébredő húzó-nyomó igénybevétel mérésénél a húzáshoz társulhat hajlítás is, ha a húzóerő excentrikusan terheli a felfüggesztő elemet. Ilyenkor a járulékos hajlítás okozta feszültség-jelet kell leválasztani (kiszűrni) a húzás-nyomás feszültségjeléből. Egy lehetséges bélyegrendezés a 20. ábrán látható.



20. ábra

Az  $R_A$  és  $R_B$ , valamint az  $R_C$  és  $R_D$  bélyegeket egymásra merőlegesen és egymáshoz lehetőleg közel kell felragasztani. A tartó keresztmetszete  $A_k$ , keresztmetszeti tényezője  $K_z$ . A mérőhíd egy lehetséges kapcsolási vázlatát a 21. ábra mutatja be.



21. ábra

Az  $R_A$  és  $R_B$ , valamint az  $R_C$  és  $R_D$  bélyegeket egymásra merőlegesen és egymáshoz lehetőleg közel kell felragasztani. A tartó keresztmetszete  $A_k$ , keresztmetszeti tényezője  $K_z$

A 20. ábrán feltüntetett előjelű terhelések esetén az egyes bélyegek helyén ébredő nyúlások és a hozzájuk tartozó fajlagos elenállásváltozások a következők lesznek:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_A \text{ bélyeg: húzóerőtől: } \quad \epsilon_{A,F} &= \frac{F}{E \cdot A_k} \quad ; \quad r_{A,F} = k \cdot \epsilon_{A,F} = k \cdot \frac{F}{E \cdot A_k} \\ \text{hajlítástól: } \quad \epsilon_{A,M} &= \frac{M_h}{E \cdot K_z} \quad ; \quad r_{A,M} = k \cdot \epsilon_{A,M} = k \cdot \frac{M_h}{E \cdot K_z} \end{aligned}$$

**R<sub>B</sub>** bélyeg: csak a húzóerő-okozta kontrakciót érzékeli, a hajlítás nem okoz keresztirányú hosszváltozást:  $\varepsilon_{B,F} = -\nu \cdot \varepsilon_{A,F} = -\nu \cdot \frac{F}{E \cdot A_k}$  ;  $r_{B,F} = k \cdot \varepsilon_{B,F} = -k \cdot \nu \cdot \frac{F}{E \cdot A_k}$

(ahol  $\nu$  : Poisson-állandó,  $\nu = 0,28$ )

**R<sub>C</sub>** bélyeg: húzóerőtől:  $\varepsilon_{C,F} = \varepsilon_{A,F} = \frac{F}{E \cdot A_k}$  ,  $r_{C,F} = k \cdot \varepsilon_{C,F} = k \cdot \frac{F}{E \cdot A_k}$

hajlítástól:  $\varepsilon_{C,M} = -\varepsilon_{A,M} = -\frac{M_h}{E \cdot K_z}$  ,  $r_{C,M} = k \cdot \varepsilon_{C,M} = -k \cdot \frac{M_h}{E \cdot K_z}$

**R<sub>D</sub>** bélyeg: csak a húzóerőtől:  $\varepsilon_{D,F} = \varepsilon_{B,F} = -\nu \cdot \frac{F}{E \cdot A_k}$  ,  $r_{D,F} = k \cdot \varepsilon_{D,F} = -k \cdot \nu \cdot \frac{F}{E \cdot A_k}$

Feltételezve, hogy a négy bélyeg azonos típusú, és terheletlen állapotban az ellenállásuk **R<sub>0</sub>**, a megváltozott ellenállásuk értékei:

$$R_A = R_0 \cdot (1 + r_{A,F} + r_{A,M})$$

$$R_B = R_0 \cdot (1 + r_{B,F})$$

$$R_C = R_0 \cdot (1 + r_{C,F} + r_{C,M})$$

$$R_D = R_0 \cdot (1 + r_{D,F})$$

Használjuk ki az alábbi összefüggéseket:

$$r_{B,F} = -\nu \cdot r_{A,F}$$

$$r_{C,F} = r_{A,F}$$

$$r_{C,M} = -r_{A,M}$$

$$r_{D,F} = r_{B,F} = -\nu \cdot r_{A,F}$$

Ezekkel az összefüggésekkel a bélyegek megváltozott ellenállása:

$$R_A = R_0 \cdot (1 + r_{A,F} + r_{A,M})$$

$$R_B = R_0 \cdot (1 - \nu \cdot r_{A,F})$$

$$R_C = R_0 \cdot (1 + r_{A,F} - r_{A,M})$$

$$R_D = R_0 \cdot (1 - \nu \cdot r_{A,F})$$

Az **U<sub>ki</sub>** feszültség meghatározása céljából írjuk fel a villamos feszültségek összegét először az **A – C – D – U – A** hurokban:

$$I_2 \cdot R_B + I_2 \cdot R_C - U = 0$$

Kifejezve **I<sub>2</sub>** értékét és behelyettesítve a fajlagos ellenállásváltozások értékeit, kapjuk:

$$I_2 = \frac{U}{R_B + R_C} = \frac{U}{R_0 \cdot [2 + (1-\nu)r_{A,F} - r_{A,M}]}$$

A feszültségek összege az **A – B – D – C – A** hurokban:

$$I_3 \cdot R_A + I_3 \cdot R_D - I_2 \cdot R_C - I_2 \cdot R_B = 0$$

Behelyettesítve a fajlagos ellenállásváltozások összefüggéseit, kapjuk:

$$\begin{aligned} I_3 \cdot (R_A + R_D) - I_2 \cdot (R_C + R_B) &= \\ = I_3 \cdot R_0 \cdot [2 + (1-\nu)r_{A,F} + r_{A,M}] - I_2 \cdot R_0 \cdot [2 + (1-\nu)r_{A,F} - r_{A,M}] &= 0 \end{aligned}$$

$I_2$  képletét behelyettesítve kapjuk:

$$\begin{aligned} I_3 \cdot R_0 \cdot [2 + (1-\nu)r_{A,F} + r_{A,M}] - \frac{U}{2 + (1-\nu)r_{A,F} - r_{A,M}} \cdot [2 + (1-\nu)r_{A,F} - r_{A,M}] &= \\ = I_3 \cdot R_0 \cdot [2 + (1-\nu)r_{A,F} + r_{A,M}] &= 0, \text{ ahonnan:} \end{aligned}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_0 \cdot [2 + (1-\nu)r_{A,F} + r_{A,M}]}$$

A mért  $U_{ki}$  feszültség az **A – B** és az **A – C** szakaszokon eső feszültség különbsége lesz:

$$\begin{aligned} U_{ki} &= U_{A-B} - U_{A-C} = I_3 \cdot R_A - I_2 \cdot R_B = \\ &= \frac{U}{R_0 \cdot [2 + (1-\nu)r_{A,F} + r_{A,M}]} \cdot R_A - \frac{U}{R_0 \cdot [2 + (1-\nu)r_{A,F} - r_{A,M}]} \cdot R_B = \\ &= \frac{U}{R_0} \cdot \left\{ \frac{R_0 \cdot (1 + r_{A,F} + r_{A,M}) [2 + (1-\nu)r_{A,F} - r_{A,M}]}{[2 + (1-\nu)r_{A,F} + r_{A,M}] [2 + (1-\nu)r_{A,F} - r_{A,M}]} \right\} - \\ &\quad - \frac{U}{R_0} \cdot \left\{ \frac{R_0 \cdot (1 - \nu r_{A,F}) [2 + (1-\nu)r_{A,F} + r_{A,M}]}{[2 + (1-\nu)r_{A,F} + r_{A,M}] [2 + (1-\nu)r_{A,F} - r_{A,M}]} \right\} \end{aligned}$$

Összevonva a két törtet és elvégezve a kijelölt műveleteket, elhanyagolhatjuk a fajlagos ellenállásváltozások négyzetét, illetve vegyes szorzatát, majd a kimenő  $U_{ki}$  feszültségre kapjuk:

$$\begin{aligned} U_{ki} &= U \cdot \frac{2 - 2 + (1-\nu)r_{A,F} - (1-\nu)r_{A,F} + 2r_{A,F} + 2\nu r_{A,F} + r_{A,M} - r_{A,M}}{[2 + (1-\nu)r_{A,F} + r_{A,M}] [2 + (1-\nu)r_{A,F} - r_{A,M}]} = \\ &= U \cdot \frac{2(1+\nu)r_{A,F}}{[2 + (1-\nu)r_{A,F}]^2 - r_{A,M}^2} = U \cdot \frac{2(1+\nu)r_{A,F}}{4 + 2r_{A,F} - 2\nu r_{A,F}} \end{aligned}$$

Végül végrehajtva a korábbi levezetésekben is megtett elhanyagolásokat, írhatjuk:

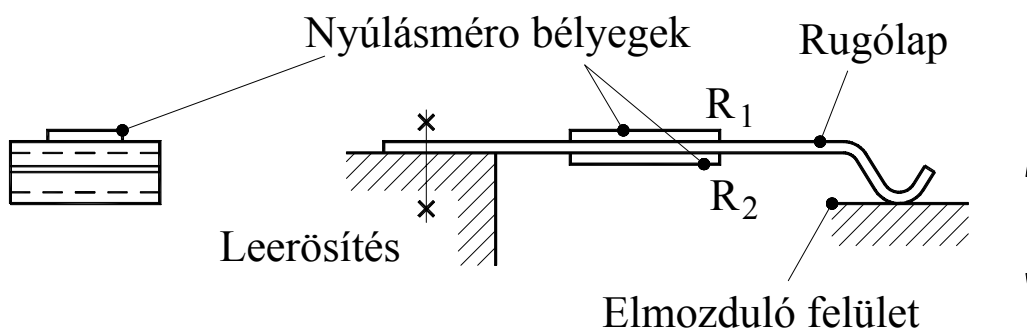
ha  $4 \gg \gg 2.r_{A,F}$ , és  $4 \gg \gg 2.v.r_{A,F}$ , akkor:

$$U_{ki} \cong U \cdot \frac{1+\nu}{2} \cdot r_{A,F} = U \cdot \frac{1+\nu}{2} \cdot k \cdot \frac{F}{E \cdot A_k} = C \cdot F$$

Tehát az alkalmazott kapcsolással egyrészt kiszűrtük a járulékos hajlítás zavaró feszültségjelét, másrészt a kapott eredmény szerint a mért  $U_{ki}$  feszültség arányos az  $F$  terhelőerővel.

### 2.1.2.6 Kis elmozdulások érzékelése

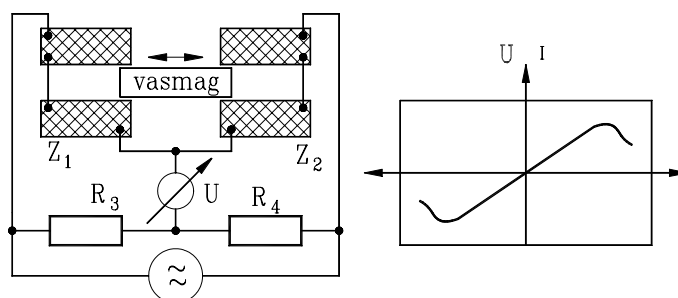
Kismértékű (néhány mm-es) elmozdulásokat egy rugólapra ragasztott nyúlásmérő bélyeg párral is érzékelhetünk (22. ábra). A módszer különösen akkor használható, ha nagyon szűk a hely, ahová az érzékelőt fel kell szerelni.



22. ábra

### 2.1.3 Induktív elmozdulás-érzékelő

Az induktív elmozdulás-érzékelő működésének az az alapja, hogy ha egy tekercsbe vasmagot tolunk be, a tekercs induktanciája ( $\omega L$ ) megváltozik. A sokféle lehetséges tekercsvasmag elrendezés közül az a változat terjedt el, amely két sorba kapcsolt tekercset tartalmaz, egyetlen elmozduló vasmaggal (23. ábra):



23. ábra

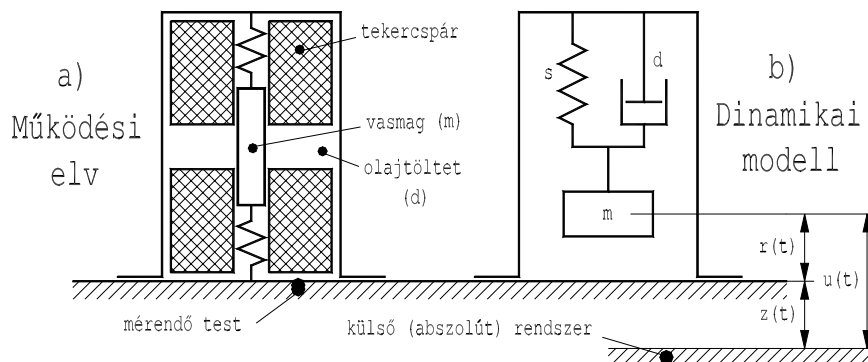
A vasmag bármelyik irányú kitérése a megfelelő tekercs-fél impedanciáját változtatja meg, mivel a tekercs belsejébe behatoló vasmag megnöveli a tekercs inductivitását, ugyanakkor a másik tekercs-fél inductivitása gyakorlatilag változatlan marad. Az ábra egyúttal a mérőerősítővel történő mérés működési vázlatát is bemutatja, a híd **A** és **B** pontja között folyó áram, így a mért feszültség is jó közelítéssel lineáris függvénye lesz a vasmag elmozdulásának, de túllépve a lineáris szakaszt (a mérési tartományt), a görbe nemlineárisává válik, tehát az érzékelő beépítésénél a kitérést megfelelő módon korlátozni kell, figyelembe véve a gyártó cég által közölt mérési tartomány hosszát. A 24. ábrán a **Hottinger** gyártmányú **WA** típusú, induktív elven működő elmozdulás-érzékelők közül kettőnek a képe látható ([6].-118. o.).



24. ábra

### 2.1.4 Induktív gyorsulás-érzékelő

Az induktív elmozdulás-érzékelők működési elvének egy érdekes felhasználási módja a gyorsulások mérésére történő alkalmazás oly módon, hogy az elmozdulás mérési eredményéből következtetünk a mérendő gyorsulásra. Ez az érzékelő egyszabadságfokú lengőrendszert tartalmaz, amelynek a tömege megegyezik a tekercspárban alternáló mozgást végző **m** tömegű vasmaggal, a vasmag az **s** merevségű rugóval van az érzékelő házához kapcsolva, a lengőrendszer **d** csillapítási együtthatóját az egész érzékelőt kitöltő olajtöltet viszkozitása eredményezi. Az érzékelőt vázlatosan a 25. ábra mutatja be:



25. ábra



Az ábra a/ része az érzékelő működési vázlatát, a b/ része az érzékelő dinamikai modelljét szemlélteti. A dinamikai modell szerint a mérendő test (pl. egy kocsiszekrény) valamilyen  $z(t)$  függőleges mozgást végez a külső, abszolútnak tekintett rendszerhez képest (a vasúti pálya környezete), az érzékelő  $m$  tömege az érzékelő házához képest – tehát a kocsiszekrényhez képest –  $r(t)$  relatív mozgást végez. A két mozgás algebrai összege legyen  $u(t)$ , vagyis az  $m$  tömegnek a külső, abszolút rendszerhez képest végzett mozgása.

Az érzékelő csak az  $r(t)$  relatív mozgásra tud felvilágosítást adni, viszont a mérendő test  $z(t)$  mozgásának gyorsulását kell meghatároznunk. Ezért összefüggést kell találni az érzékelt  $r(t)$  relatív mozgás és a  $z(t)$  gyorsulás között. Irjuk fel az  $m$  tömeg dinamikai erőegyensúlyát Newton II. axiómájának segítségével:

$$m \cdot \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + d \cdot \frac{dr(t)}{dt} + s \cdot r(t) = 0$$

Figyeljük meg, hogy a tömeg gyorsulása a külső, abszolút rendszerhez képest  $u(t)$  mozgás második deriváltjával egyenlő, viszont a tömegre ható csillapító és rugóerő az  $r(t)$  relatív mozgás jellemzőitől függ. Vezessük be az  $u(t)$  helyére is az  $r(t)$  függvényt:

$$u(t) = z(t) + r(t) ;$$

$$\text{és } \frac{d^2 u(t)}{dt^2} = \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \frac{d^2 r(t)}{dt^2} ;$$

illetve egyszerűbb jelöléssel :

$$\ddot{u}(t) = \ddot{z}(t) + \ddot{r}(t)$$

Behelyettesítve ezt a mozgásegyenletbe, kapjuk :

$$m \cdot \ddot{z}(t) + m \cdot \ddot{r}(t) + d \cdot \dot{r}(t) + s \cdot r(t) = 0 ,$$

illetve :

$$m \cdot \ddot{r}(t) + d \cdot \dot{r}(t) + s \cdot r(t) = -m \cdot \ddot{z}(t) ;$$

tehát az érzékelő lengőrendszerét a  $-m \cdot \ddot{z}(t)$  erő kényszeríti mozgásra. Tételezzük fel, hogy az ismeretlen  $z(t)$  mozgásfüggvény egyszerű harmonikus függvény :

$$z(t) = Z_0 \cdot \sin \omega t ,$$

vagyis  $Z_0$  amplitudójú és  $\omega$  körfrekvenciájú szinuszfüggvény, amelynek a második deriváltja:

$$\ddot{z}(t) = -\omega^2 \cdot Z_0 \cdot \sin \omega t ,$$

amelyet behelyettesítve kapjuk :

$$m \cdot \ddot{r}(t) + d \cdot \dot{r}(t) + s \cdot r(t) = m \cdot \omega^2 \cdot Z_0 \cdot \sin \omega t$$

Ez az egyenlet az  $r(t)$  függvény másodrendű, lineáris, állandó együtthatójú, inhomogén differenciálegyenlete. Ennek az általános megoldása :

$$r(t) = R(t)_{hom., \text{ áll.}} + r(t)_{inhom., part.}$$

Az  $\mathbf{R}(t)_{hom., \acute{a}ll.}$  homogén általános megoldás a differenciálegyenlet homogén részének megoldása:

$$m.\ddot{r}(t) + d.\dot{r}(t) + s.r(t) = 0$$

Ennek a homogén, általános megoldását úgy kapjuk meg, hogy az  $\mathbf{R}(t)_{hom,\acute{a}llt}$  függvényt az alábbi alakban keressük:

$$R(t)_{hom,\acute{a}llt} = e^{\lambda.t}$$

A megoldásfüggvény levezetésének teljes szövege a Melléklet-ben található, ahol a teljes 1.3.1.3 alfejezet megtalálható. Az  $\mathbf{R}(t)_{hom,\acute{a}llt}$  függvényre a következőt kaphatjuk:

$$R(t)_{hom., \acute{a}llt.} = e^{-\beta t} \cdot (C_1 \cdot \cos \gamma t + C_2 \cdot \sin \gamma t)$$

Az  $\mathbf{r}(t)$  megoldásának inhomogén partikuláris részét úgy kaphatjuk meg, hogy ugyanolyan harmónikus függvényt helyettesítünk be kísérletképpen, mint a jobboldalon álló függvény, kihasználva, hogy a jobboldalon álló gerjesztőfüggvény beletartozik a "t" hatványfüggvénye, exponenciális, valamint harmónikus függvénye által alkotott csoportba. Így az  $\mathbf{r}(t)_{inh., part.}$  kísérletező függvénye a következő lehet:

$$r(t) = A \cdot \sin \omega t + B \cdot \cos \omega t$$

Behelyettesítések és átrendezések után kapjuk:

$$r(t)_{inh., part} = K_r \cdot \sin(\omega t + \varepsilon) = \frac{\omega^2 \cdot Z_0}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{d \cdot \omega}{m}\right)^2}} \cdot \sin(\omega t + \varepsilon)$$

Mivel a mozgás az időben hosszan tart, a homogén általános megoldás  $e^{-\beta t}$  tényezője következtében csillapodik, ezért élhetünk azzal a közelítéssel, hogy a homogén, általános megoldás-összetevőt elhanyagoljuk:

$$r(t) \cong r(t)_{inh., part} = K_r \cdot \sin(\omega t + \varepsilon) = \frac{\omega^2 \cdot Z_0}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{d \cdot \omega}{m}\right)^2}} \cdot \sin(\omega t + \varepsilon)$$

Ez az összefüggés akkor igaz, ha a mérendő gyorsuláshoz tartozó  $\mathbf{z}(t)$  függvény harmónikus függvény.

Másrészt, mivel a  $\mathbf{z}(t)$  függvényt harmónikusnak tételeztük fel, ebből következik, hogy a mérendő test  $\ddot{z}(t)$  gyorsulása arányos az érzékelő által követett relatív mozgás elmozdulásával. A  $\ddot{z}(t)$  gyorsulás amplitúdója:

$$\ddot{z}(t) = -\omega^2 \cdot Z_0 \cdot \sin \omega t = A_z \cdot \sin \omega t$$

A mérés során az  $\mathbf{r}(t)$  relatív elmozdulást érzékeljük, viszont a  $\mathbf{z}(t)$  gyorsulásra kívánunk információt kapni, ezért írjuk fel a  $K_r$  amplitúdónak és az  $A_z$  amplitúdónak a hányadosát az  $\omega$  gerjesztő körfrekvencia függvényében, így megkaphatjuk az érzékelőnk gyorsulás-elmozdulás karakterisztikáját. E két amplitúdó hányadosa (a negatív előjelet elhanyagolva):

$$\frac{K_r}{A_z} = \frac{\frac{\omega^2 \cdot Z_0}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{d \cdot \omega}{m}\right)^2}}}{|-\omega^2 \cdot Z_0|} = \frac{1}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{d \cdot \omega}{m}\right)^2}}$$

Vezessük be a következő jelöléseket az egyszerűsítés és a jobb áttekinthetőség érdekében. A gerjesztés  $\omega$  körfrekvenciájának és az érzékelő dinamikai modelljének csillapítatlan  $\alpha$  sajátkörfrekvenciájának a hányadosa:

$$q = \frac{\omega}{\alpha}$$

valamint a *Lehr*-féle csillapítási együttható (vagyis az aktuális csillapításnak, valamint a kúszás és a lengés közötti határhelyzethez tartozó kritikus csillapításnak a hányadosa):

$$D = \frac{d}{2 \cdot m \cdot \alpha}$$

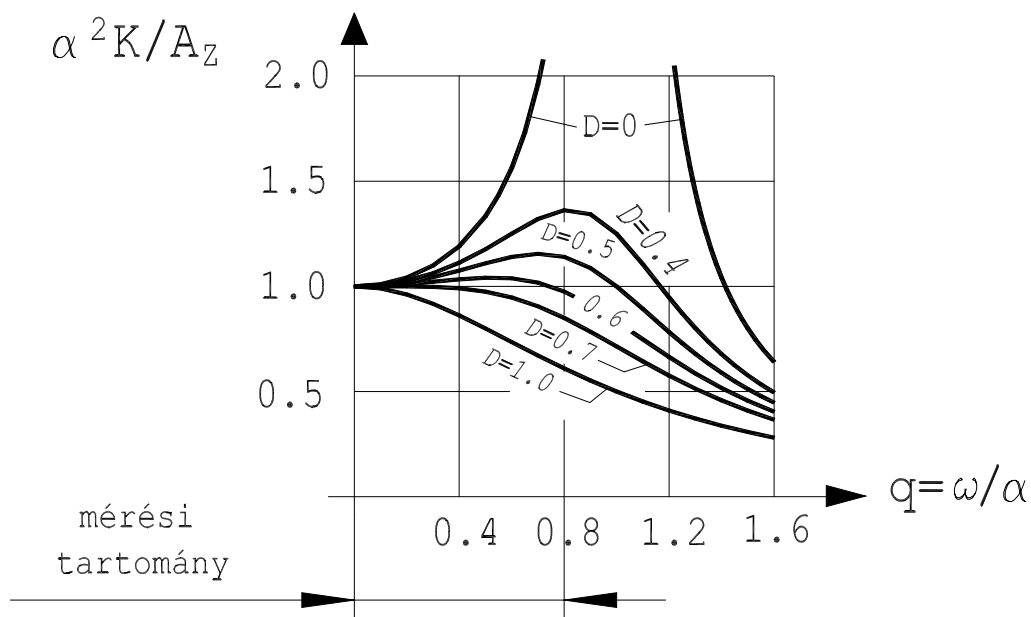
Ezeket behelyettesítve a  $K_r/A_z$  hányados képletébe, kapjuk:

$$\begin{aligned} \frac{K_r}{A_z} &= \frac{1}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{d \cdot \omega}{m}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha^4 \cdot \left(1 - \frac{\omega^2}{\alpha^2}\right)^2 + \alpha^4 \cdot \left(\frac{d \cdot \omega}{m \cdot \alpha^2}\right)^2}} = \\ &= \frac{1}{\alpha^2 \cdot \sqrt{\left(1 - q^2\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot d \cdot \omega}{2 \cdot m \cdot \alpha \cdot \alpha}\right)^2}} = \frac{1}{\alpha^2 \cdot \sqrt{\left(1 - q^2\right)^2 + 4 \cdot D^2 \cdot q^2}}, \end{aligned}$$

$\alpha^2$ -tel beszorozva mindkét oldalt:

$$\frac{\alpha^2 \cdot K_r}{A_z} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - q^2\right)^2 + 4 \cdot D^2 \cdot q^2}}$$

Az  $\alpha^2 \cdot K_r/A_z$  hányados dimenziója 1, így a karakterisztika fajlagos értékeket eredményez, ezt a hányadost a 26. ábrán látható görbesereg ábrázolja  $q$  függvényében, a  $D$  paraméter különböző értékei esetén.



26. ábra

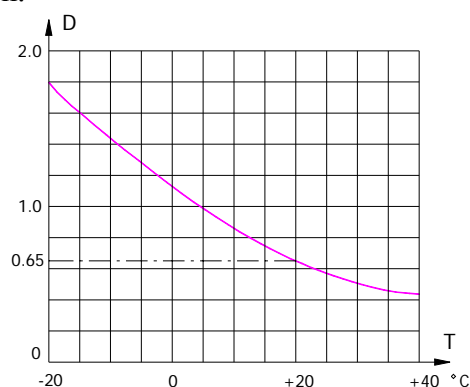
Látható az ábráról, hogy a két gyorsulás-amplitúdó  $\alpha^2 K/A_z$  hányadosa  $q$  függvényében (tehát a gerjesztő körfrekvencia függvényében) eléggé változik a  $D$  paraméter különböző értékeinek függvényében, de  $D = 0.6$  esetén a  $0 \leq q \leq 0.8$  tartományban alig különbözik 1.0-től. Ez azt jelenti, hogy ha az  $\omega$  gerjesztő körfrekvencia *kisebb* az érzékelő lengőrendszere  $\alpha$  csillapítatlan körfrekvenciájának 0.8-szorosánál, akkor az érzékelő tömege relatív kitérésének  $\alpha^2$ -szerese elég jó közelítéssel egyenlő lesz a járműrész mért gyorsulásával. Ezt a határértéket a gyártók minden esetben feltüntetik az érzékelőn, és a mérés előkészítése során ezt célszerű figyelembe venni. Ha bizonytalan, hogy mekkora a körfrekvenciája a mérendő járműalkatrész lengésének, magasabb sajátkörfrekvenciájú érzékelővel célszerű próba-mérést végezni.

**Fontos megjegyezni**, hogy az érzékelő kitérése és a mérendő gyorsulás közötti összefüggés levezetése annak a feltételezésével készült, hogy a mérendő  $\ddot{z}(t)$  gyorsulásfüggvény harmonikus függvény. Ha ez a feltétel nem teljesül, ez a levezetés sem érvényes, ezért ilyen esetekben a gyorsulásmérés eredményét kellő óvatossággal kell kezelni.

Az elmondottak szerint az induktív gyorsulás-érzékelő pontosan úgy használható, mint az induktív elmozdulás-érzékelő: meg kell mérni a vasmagnak a házhoz viszonyított elmozdulását, és ezt  $\alpha^2$ -tel szorozva kaphatjuk meg a kérdéses gyorsulás-értéket. A mérés technikai gyakorlat ezen úgy egyszerűsített, hogy a mérés kezdete előtt megállapítják az  $1g$  gyorsuláshoz tartozó vasmag-elmozdulást. Az érzékelőt  $90^\circ$ -kal elfordítva (hogy a vasmag elmozdulás-iránya vízszintesbe essék), a mért elmozdulás (és a keresett gyorsulás) zérus lesz, ez lesz a **nulla-szint**. Visszafordítva az érzékelőt a beépítési helyzetbe, az  $1g$ -nek megfelelő elmozdulás lesz mérhető. Ezt a jel-lépcsőt rögzítve a jelregisztráló berendezésen, a regisztrált  $\ddot{z}(t)$  függvény bármely ordinátája meghatározható.

Végül meg kell még említeni, hogy az induktív gyorsulásérzékelők olajöltésével beállított csillapítási együttható számértékét a beállított értéken (vagy annak a közelében) kell tartani. Köztudomású, hogy az olajok viszkozitása függ a hőmérséklettől, tehát az érzékelő dinamikai

modelljében a csillapítás is az érzékelő hőmérsékletének függvénye, A 27. ábrán bemutatjuk a szokásos induktív gyorsulásérzékelők  $D$  csillapítási együtthatójának változását az olajtöltet hőmérsékletének függvényében.

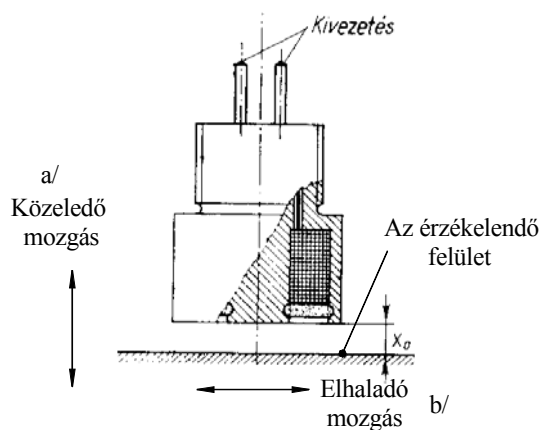


27. ábra

A szokásos  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  környezeti hőmérsékleten a  $D=0.65$  nagyságú csillapítás a megfelelő érték.

### 2.1.5 Induktív helyzetérzékelők

Az induktív helyzetérzékelők egyszerűbb felépítésűek az induktív elmozdulás-érzékelőkhöz képest, csak egyetlen tekercset tartalmaznak, a vasmag áll, nem mozdul el. Ha viszont ezt a tekercset megközelíti egy vastömeg, ennek a tekercsnek is megváltozik az induktanciája. Az érzékelő vázlatos működését a 28. ábra mutatja be.



28. ábra

Az ábra a/ és b/ jelű beépítési mozgásiránya mutatja be a két leggyakoribb alkalmazási módot. Az a/ változat esetén a közelítő vastömegnek meghatározott, fémes ütközés ellen biztosított véghelyzetét kell biztosítani (tehát az érzékelőnek nem fog nekiütközni, de azt megközelíteni), viszont a véghelyzetben az érzékelő tekercsének  $\omega L$  induktanciája megnövekszik, ezzel jelzi, hogy a tömeg a véghelyzetbe (illetve annak közvetlen közelébe) ért.

A b/ változat esetében a vastömegnek nincs meghatározott véghelyzete, hanem csak elhalad az érzékelő előtt, annak közvetlen közelében. Ekkor a megközelítés, tehát az érzékelő közelében való elhaladás tényét ismét a tekercs  $\omega L$  induktanciájának megváltozása jelzi.

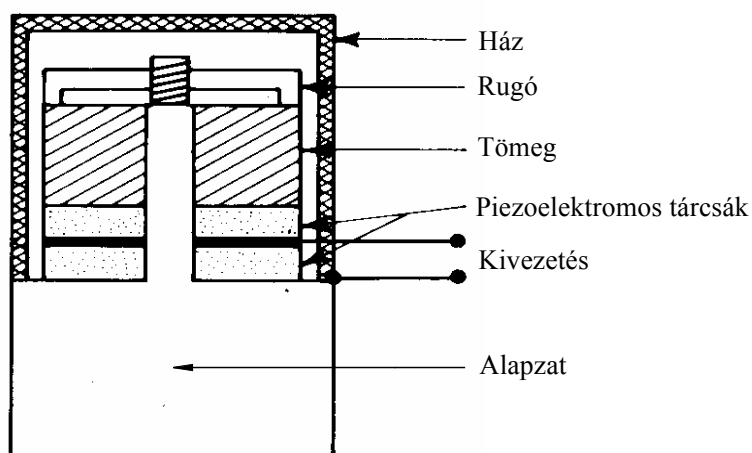
Fontos, hogy egyik változat esetében sem a pontos helyzet megadására szolgál, hanem csak az érzékelőnek a megközelítését, illetve az előtte való elhaladás tényét jelzi.

A gyakorlatban más elven működő helyzet-, illetve megközelítés-érzékelők is készülnek, pl. mágneses (Hall), kapacitív, stb. alapon működnek, a felhasználásuk teljesen hasonló az induktív érzékelőkhöz.

### 2.1.6 Piezoelektromos gyorsulásérzékelők

Az utóbbi időben az induktív elven működő gyorsulásérzékelők mellett terjed a piezoelektromos elven működő gyorsulásérzékelők alkalmazása. A piezoelektromos működési elvű érzékelők felépítése emlékeztet az induktív elvű érzékelőkre. A 29. ábra vázlatosan mutatja be a piezoelektromos gyorsulásérzékelők felépítését:

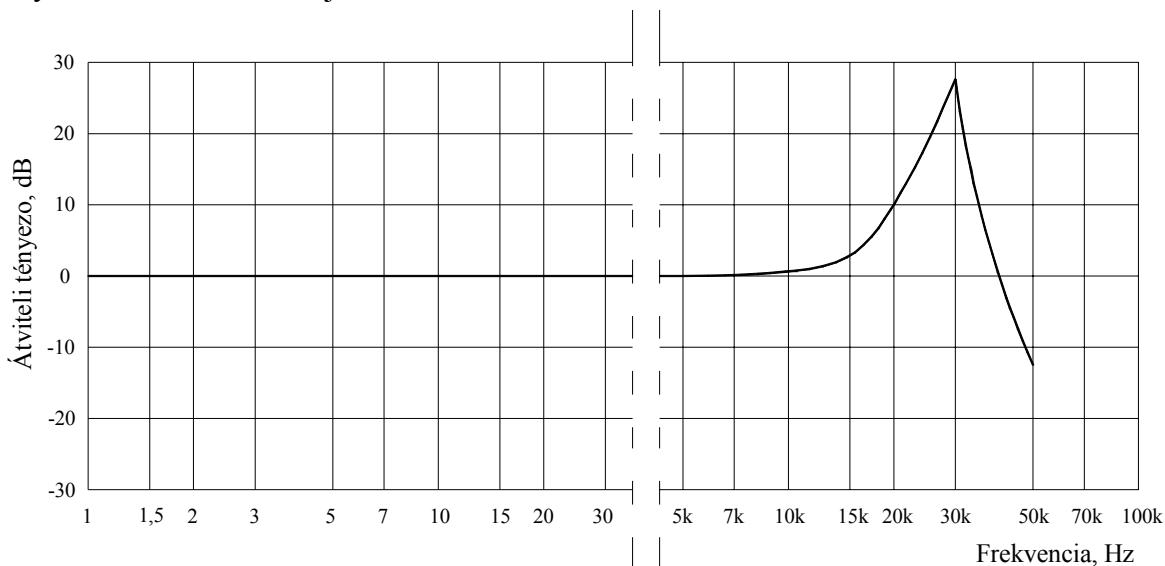
Az ábra az [5] forrásmű 4.12 ábrája alapján mutatja be vázlatosan az érzékelő felépítését. A rezgő környezettel együtt mozog az *alappat* és a *ház*. A rezgő tömeg – hasonlóan az induktív érzékelőkhöz – szolgáltatja a kimenő jelet azzal, hogy egy tárcsa alakú rugó nekiszorítja a tömeget a kettős piezoelektromos kristálytárcsához, a kristálytárcsát pedig az alappathoz. A rezgő tömeg a gyorsulásával arányos erőt fejt ki a piezoelektromos kristálytárcsákra, amelyek kimenetén a megjelenő feszültség így arányos lesz a terhelő erővel, tehát a rezgő tömeg gyorsulásával. Az [5]-ben található leírás nem tesz említést a rugótárcsa és a piezo-tárcsák rugómerevségi jellemzőiről, de nyilvánvalóan a rugalmas elemek eredő rugómerevsége és a tömeg alkotja az érzékelő dinamikai modelljének két legfontosabb elemét. A csillapítást itt is valószínűleg olajtöltet biztosítja.



29. ábra

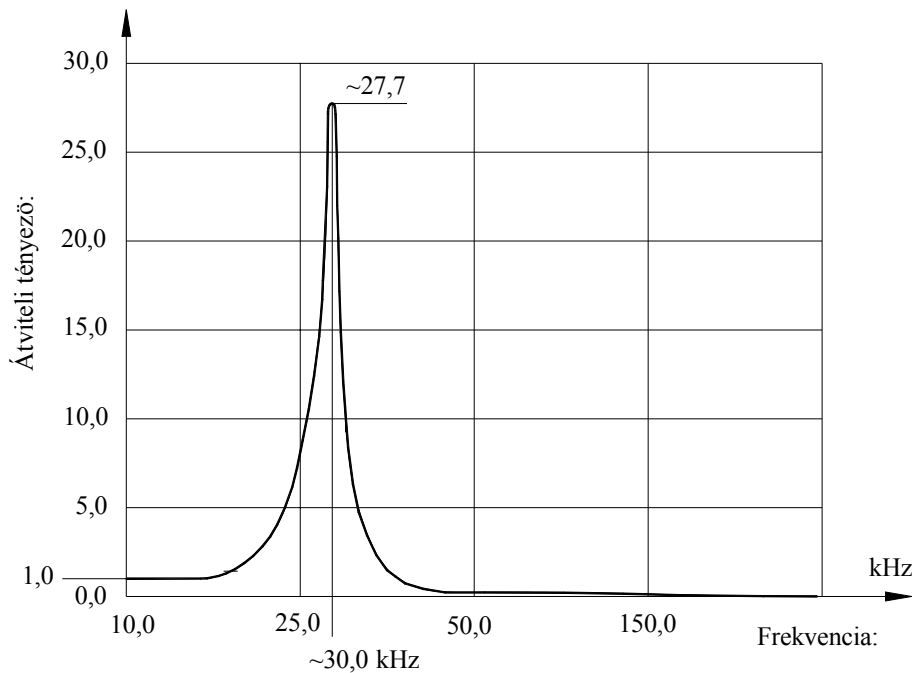
Az [5]-ben közölt leírás szerint amíg a környezet rezgésének frekvenciája meg nem közelíti az érzékelő dinamikai modelljének sajátfrekvenciáját, addig az érzékelő tömegének gyorsulása gyakorlatilag megegyezik a környezet gyorsulásával, így a piezoelektromos elven

működő gyorsulásérzékelők közvetlenül a mérendő gyorsulással arányos nagyságú feszültségjelet adnak ki. A 30. ábrán bemutatunk egy tipikus átviteli tényező görbét [5]-4.13 ábrája alapján, amely emlékeztet a 26. ábrán látható görbék közül a kisebb  $D$  csillapítási tényezőjű görbékre. A frekvencia függvényében ábrázolt *átviteli tényező* (Übertragungsfaktor) itt is feltehetően a rezgő tömeg gyorsulásának és a környezet gyorsulásának a hányadosa decibelben kifejezve.



30. ábra

Látható az ábráról, hogy meglehetősen magas az ilyen érzékelők sajátfrekvenciája, az ábrán látható görbének  $\sim 30$  kHz, ez sokszorososa az induktív érzékelők sajátfrekvenciájának, az ábrán az átviteli tényező  $\sim 1.0$ , ha a rezgés frekvenciája  $< 2$  kHz. A szokatlanul hegyesnek ábrázolt görbe eléggé csekély mértékű beépített csillapításról árulkodik. Az ábra frekvencia-tengelye logaritmikus skálájú, az átviteli tényező tengelye decibelben van skálázva, ennek az alkalmazásáról az Az analóg jelek szűrése c. fejezetben lehet több részletet találni. Összehasonlításképpen a 31. ábrán ugyanezt a diagramot lineáris skálákkal is bemutatjuk.



31. ábra

A piezoelektromos működési elvű gyorsulásérzékelők egyik előnye az induktívokéhoz képest az, hogy a sajátfrekvencia viszonylag magas, így tágabb a mérhető gyorsulás frekvenciatartománya. További előny, hogy az ilyen érzékelő közvetlenül feszültségjelet ad ki a kimenetén, bár ezt természetesen még erősíteni kell. Az is fontos előny, hogy a kimenő jel a megengedett frekvenciatartományon belül a jel alakjától függetlenül arányos a mérendő gyorsulással, nem kell tehát feltételezni, hogy a mérendő jel tiszta harmonikus függvény.

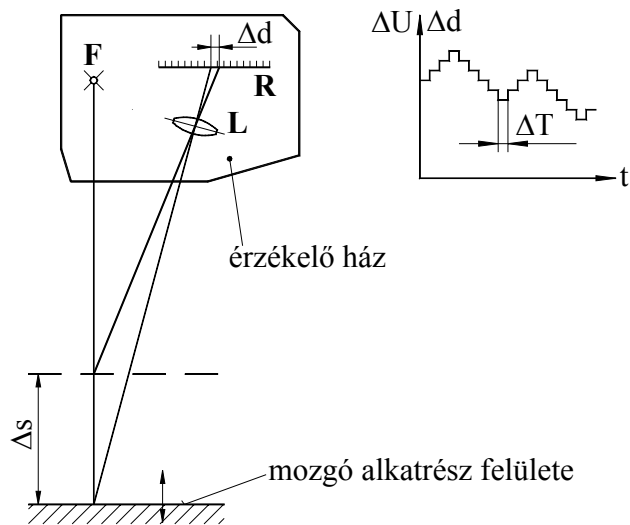
A bemutatott előnyöket némiképpen ellensúlyozza az ilyen érzékelők viszonylag magas árából eredő hátrány.

Az [5] szakirodalmi forrásműben még sok fontos részlet található a piezoelektromos érzékelők kalibrálására speciálisan gyártott készülékekről, de a piezoelektromos érzékelők esetében is jól használható az 1 g nagyságú jel léptékezésére bemutatott egyszerű módszer, amit az induktív gyorsulásérzékelők ismertetésében mutattunk be.

### 2.1.7 Lézeres távolságérzékelők

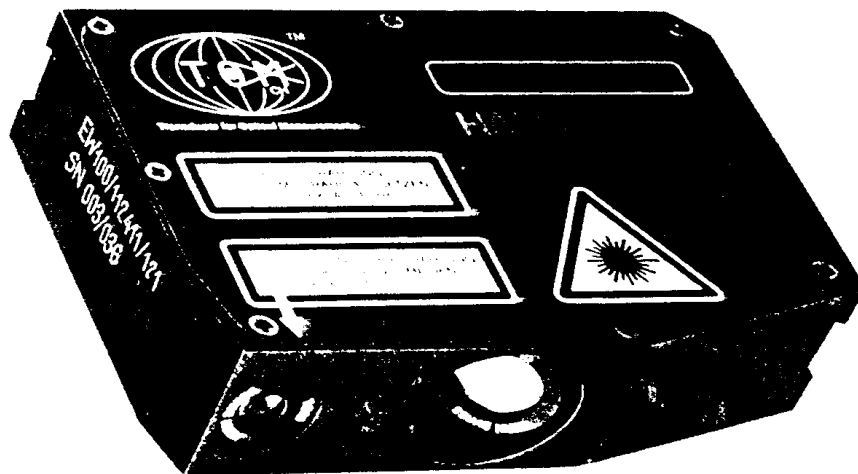
Amíg az induktív elven működő elmozdulás-érzékelő tapintó csúcsának mechanikusan érintkeznie kellett a mérendő alkatrész felületével, addig a lézeres távolság-érzékelőnek nem kell mechanikusan kapcsolódnia a mozgó alkatrészhez, mivel elegendő, ha a felületéről visszaverődik a lézersugár. A működési elvet a 32. ábra mutatja be.





32. ábra

Az érzékelő az  $F$  sugárforrásból lézersugarat bocsát ki, amely visszaverődik a mozgó alkatrész felületéről, és az  $L$  lencserendszeren keresztül az  $R$  optoelektronikus érzékelő rácásra esik, amely a lézersugár beesési helyzetét az igen finom raszter-felépítés következtében meglehetősen finom felbontásban képes érzékelni. A 33. ábrán a **HAENNI** cég (USA) által gyártott **EW 100** típusú lézeres távolságérzékelőt mutatjuk be.

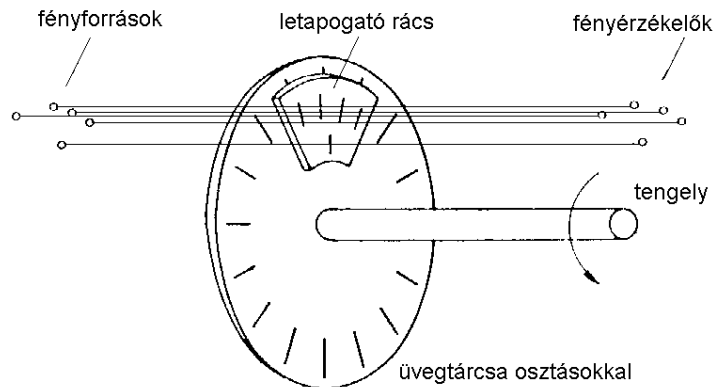


33. ábra

Ha a mozgó alkatrész  $\Delta s$  értékkel elmozdul, a lézersugár  $\Delta d$  távolsággal messzebb éri az optoelektronikus rasztert, amely a  $\Delta d$  -vel arányos  $\Delta U$  feszültséget kelt. Ez a feszültség a kimeneten kiolvasható, de bináris kódban (ASCII) is megjelenik a kimeneten. Az optoelektronikus rasztert megadott frekvenciával végigtapogatva, az időben változó  $\Delta U = \Delta U(t)$  feszültség lépcsős függvény alakjában jelenik meg, a lépcső  $\Delta T$  hossza a letapogatás periódus-ideje lesz.

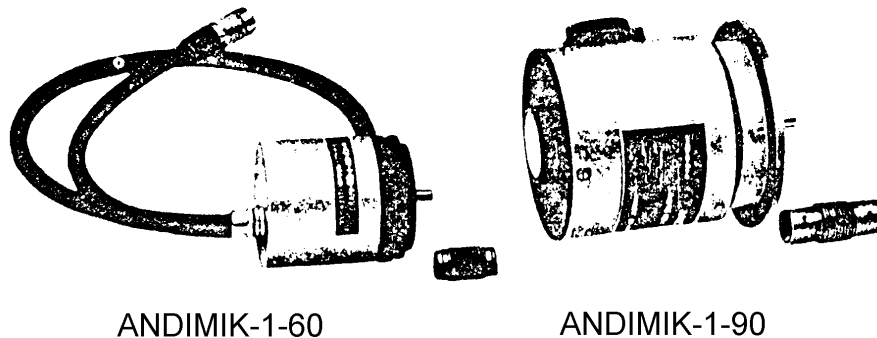
### 2.1.8 Optoelektronikus szögelfordulás-érzékelők

Ezek az érzékelők úgy érzékelik egy forgó gépalkatrész szögelfordulását, hogy a mérendő gépalkatrésszel mereven összekapcsolt tengelyükre épített optikai jelátalakítók segítségével négyyszög alakú feszültségimpulzus-sort állítanak elő, ahol egy impulzus a berendezés által érzékelhető legkisebb szögelfordulást jelenti. A működési elvet a 34. ábra mutatja be.



34. ábra

Ilyen érzékelő a Műszeripari Kutató Intézet ANDIMIK-I-60 és ANDIMIK-I-90 típusú optoelektronikus szögelfordulás-érzékelője. Az ANDIMIK-I-60 altípusai 100, 600, 900, vagy 1000 TTL-szintű feszültségimpulzus-sort állítanak elő körülfordulásonként, az ANDIMIK-I-90 altípusai pedig 3600, vagy 7200 impulzust. Így tehát ezek az érzékelő-típusok az alkatrészek szögelfordulását meglehetősen nagy pontossággal érzékelik. Megmérve az impulzusok frekvenciáját, a forgó alkatrész szögsebességét (fordulatszámát) folyamatosan is mérhetjük. Az említett két érzékelő a 35. ábrán látható.



35. ábra

### 2.1.9 Erőérzékelők: a C9B típusú erőmérő cella

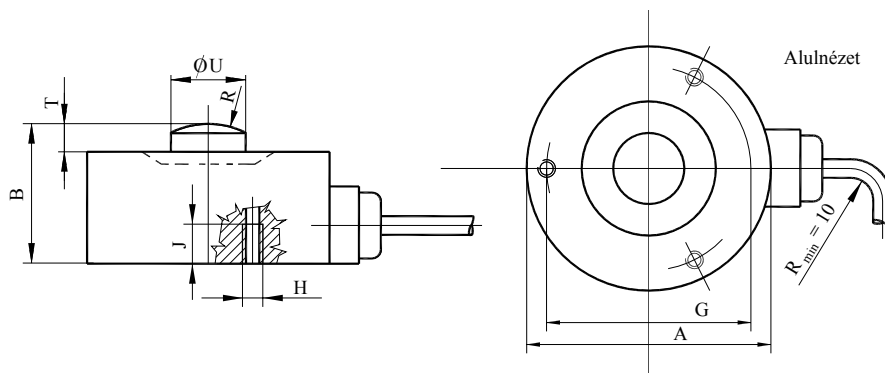
Ebben a fejezetben az erőmérő cellák működését a Hottinger gyártmányú C9B típusú erőmérő cella alkalmazási módjával mutatjuk be. Forrásműként az Irodalomjegyzék [16] sorszá-

mű közleménye szolgál. A cella működését a gyártó által publikált leírások [16] alapján mutatjuk be. A C9B erőmérő cella fényképe a 36. ábrán látható.



36. ábra

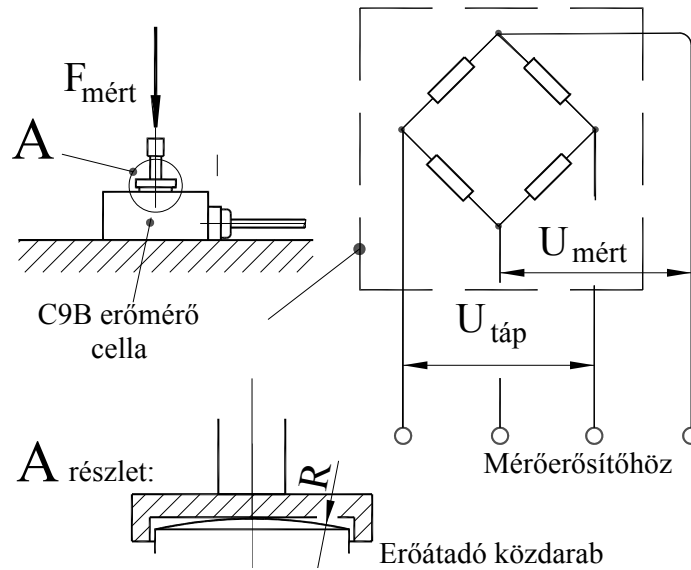
A C9B erőmérő cella 50 N-tól 50 kN nagyságú erő érzékelésére készül, a cellák gyártási méretei a 37. ábrán láthatók:



| A C9B cella névleges terhelése | A <sub>-0,1</sub> | B  | G <sub>±0,1</sub> | H    | J   | R  | T   | U <sub>-0,1</sub> | X               | Y              |
|--------------------------------|-------------------|----|-------------------|------|-----|----|-----|-------------------|-----------------|----------------|
| 50 N.....200 N                 | 26                | 15 | 20,5              | 3xM3 | 6   | 20 | 2,5 | 5,5               | körülbelül 10,5 | körülbelül 5,5 |
| 0,5 kN.....20 kN               | 26                | 13 | 22,75             | 3xM2 | 3,5 | 40 | 1   | 8                 | körülbelül 10,5 | körülbelül 5,5 |
| 50 kN                          | 46                | 28 | 40                | 4xM4 | 6   | 80 | 8   | 16                | körülbelül 10,5 | körülbelül 5,5 |

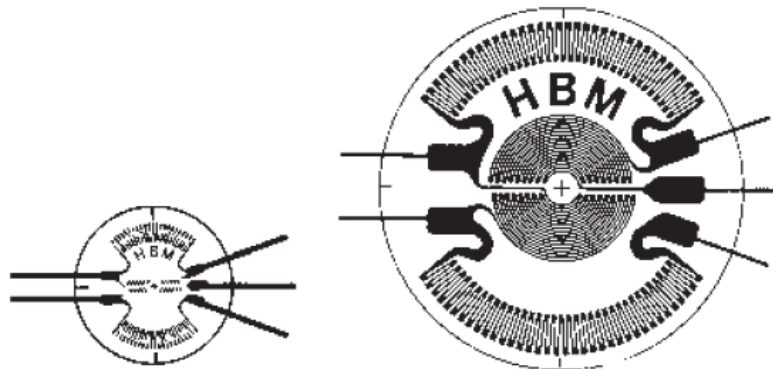
37. ábra

A cella felső felületéből kissé kiemelkedik az 5,5 – 16 mm átmérőjű, edzett acélból készült terhelő gomb (load button), amely 20....80 mm sugarú gömbfelülettel van kiképezve, ez veszi fel a mérendő terhelést. Az alakja miatt célszerű a terhelést sík felületű erőátadó közdarab közvetítésével kifejteni a terhelő gombra (38. ábra, „A” részlet). A közdarab alakjára [17].- 3.8.2.1-ben találhatunk ajánlást.



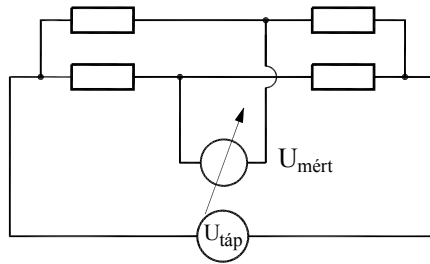
38. ábra

A cellában a mérendő  $F_{\text{mért}}$  erő hatására egy membrán hajlik be, amelyet négy nyúlásmérő bélyeg érzékel (az ábrán a jobboldali rész), két bélyeg összenyomódik, kettő megnyúlik. Az erőmérő cella leírása nem részletezi ezeket a bélyegeket, valószínűleg a 39. ábrán látható SG/Y sorozatú, ú. n. „diagfragma-bélyeg”, vagy ahhoz hasonló van alkalmazva ([17]-37. old.):



39. ábra

A Wheatstone-hídba kötött bélyegek a terheléssel arányos ellenállásváltozását (és a mérendő erőt) az  $U_{\text{mért}}$  kimenő feszültség mérésével kaphatjuk meg (40. ábra): Bővebbet a Méréselmélet c. Segédletben találhatunk.



40. ábra

### 2.1.10 Forgatónyomaték érzékelők.

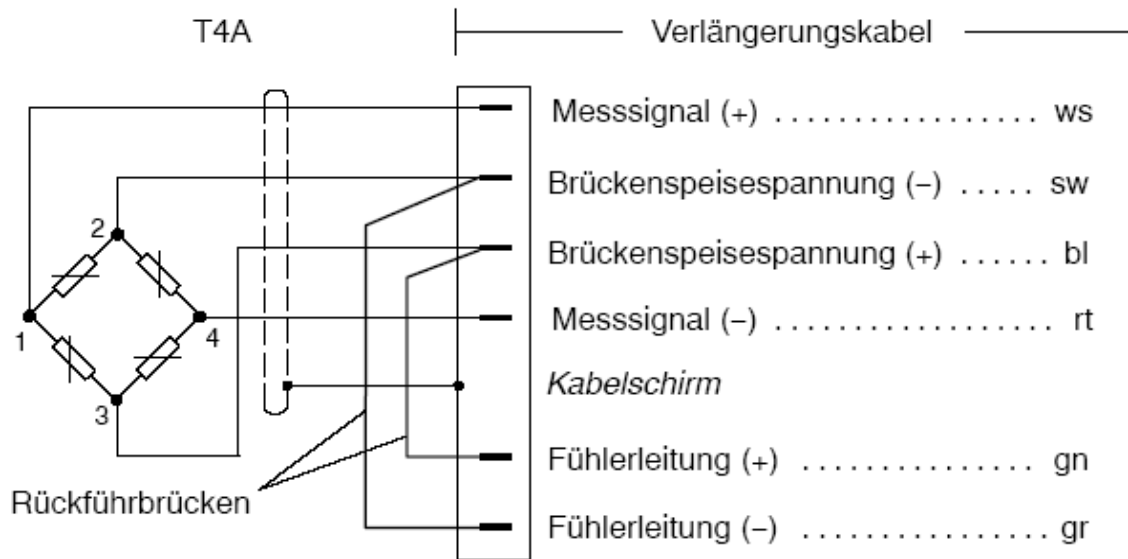
Sokszor felmerülő feladat, hogy két forgógép között átadott teljesítményt kell megmérni. Ilyenkor a hajtó nyomatékot és a szögsebességet (fordulatszámot) kell ismerni. Az alábbiakban a Hottinger cég néhány nyomaték-érzékelőjét mutatjuk be.

A T4A nyomatékmérő cella a 41. ábrán látható.



41. ábra. A T4A nyomatékmérő cella.

A T4A nyomatékmérő cella szerkezeti leírását a katalógus nem közli, az interneten talált link Montageanleitung. Drehmoment-/Schraubmesswelle T4A. című fejezete nagyon szűkszavúan mutatja be a működését. Ebből annyit lehet megtudni, hogy két, egy hajtó és egy hajtott gépegség (például egy hajtómotor és egy munkagép) közé beépítve a motor által a munkagép hajtására leadott hajtó nyomatékot lehet a nyomatékmérő cellával mérni. A kábelbekötést bemutató 3.2 ábrából (42. ábra) következtethetünk arra, hogy cellában egy forgó alkatrészre felragasztott négy nyúlás-mérő bélyeggel érzékelik a csavaró nyomatékot.



42. ábra. A T4A nyomatókmérő cella kábelbekötése

Szöveg az ábrán: *Verlängerungskabel* = Hosszabbító kábel; *Brückenspeisespannung* = a híd tápfeszültsége; *Messsignal* = mérési jel; *Kabelschirm* = kábel árnyékolása; *Fühlerleitung* = érzékelő (tapintó?) vezeték; *Rückführbrücken* = a híd visszavezetése.

A Wheatstone-hídba kötött négy bélyeg kimenő feszültségéből lehet meghatározni az érzékelt csavaró nyomatékot.

A kardántengelyek és a kapcsolt gépek karimái közé beszerelhető nyomatókérzékelők egyik fajtája a T10 F típusú nyomatók-érzékelők, amelyek a 43. ábrán láthatók.



43. ábra. T10 F típusú hajtó nyomaték érzékelők.

### 2.1.11 Nyomásérzékelők

Ilyen érzékelő például a Hottinger-féle **P 11** típusú induktív túlnyomás-érzékelő ([6].-111. o.), a 44. ábra két, különböző méréshatárú P 11 típusú érzékelőt mutat be:



44. ábra

Ennek az érzékelőnek az induktivitása az érzékelt nyomással arányos, tehát hasonlóan működik az induktív elmozdulás-érzékelőkhöz. így megfelelő mérőerősítővel a nyomás mérhető.

Nyomáskülönbség érzékeléséhez alkalmazhatjuk a Hottinger gyártmányú **PD1** típusú induktív nyomáskülönbség-érzékelőt, ilyen érzékelőt mutat be a 45. ábra:



45. ábra

A P31C nyomásérzékelő cella leírását az idézett link [Montageanleitung. Absolutdruckaufnehmer P31C.](#) című fejezetében találhatjuk meg, az érzékelők képe a 46. ábrán látható.



46. ábra. A P3IC nyomásérzékelő.

A leírás szerint az érzékelő folyadékok és gázok abszolút nyomását egyaránt képes érzékelni. Az érzékelő fő része egy, a végén lezárt cső, amelynek a külső felületére nyúlásmérő bélyegeket ragasztottak. A leírás nem közöl ábrát a bélyegek bekötéséről, azok feltehetően Wheatstone-hídba vannak bekötve.

#### 2.1.12 Hőmérséklet-érzékelők

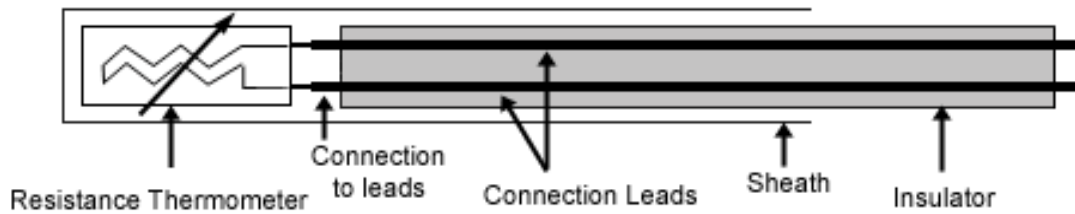
A Hottinger gyártmányú PT100 hőmérséklet-érzékelő leírása a Hottinger katalógusban nem található, a Wikipédiában, a Peak Sensors és a Pico Technology honlapjain lehet találni leírást és ábrákat. Az érzékelő képe a 47. ábrán látható.



47. ábra. PT100 hőmérséklet-érzékelő.

Az érzékelő szerkezetének elvi vázlata a 48. ábrán látható.



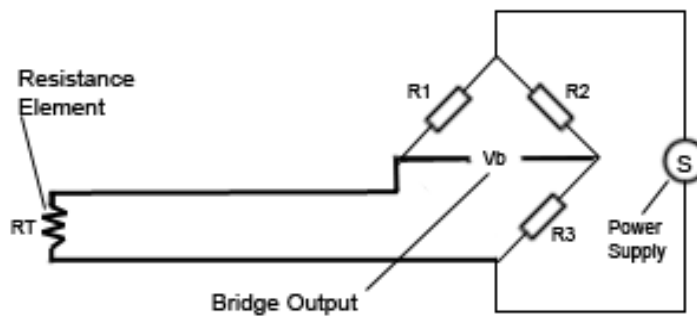


48. ábra. A PT100 érzékelő évi szerkezete.

Szöveg az ábrán: *Resistance Thermometer* = ellenállás-hőmérő; *Connection to leads* = összeköttetés a vezetékkel; *Connection Leads* = vezetékek; *Sheath* = köpeny; *Insulator* = szigetelő.

Az érzékelő platinahuzal ellenállásváltozásának mérésével érzékeli a hőmérséklet megváltozását. Az érzékelő bekötésének az egyszerű, kétvezetékes változatát a 49. ábrán láthatjuk.

### Resistance Thermometer Wiring Configurations Two Wire Configuration

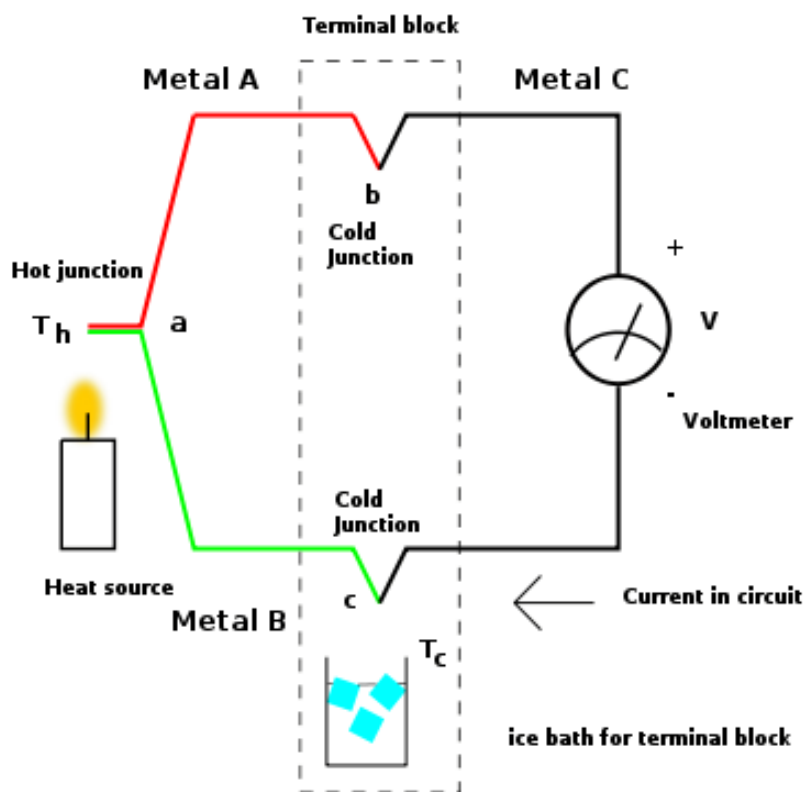


49. ábra. Az érzékelő bekötése.

Szöveg az ábrán: *Resistance Thermometer Wiring Configuration* = az ellenállás-hőérzékelő bekötése; *Resistance Element* = ellenállás-elem; *Power Supply* = tápfeszültség; *Bridge Output* = a híd kimenete.

Más típusú érzékelők a termoelemek. Ezek a hőmérséklet mérésére használt olyan érzékelők, amelyeknek a működése a Wikipédiában található leírás szerint azon alapszik, hogy ha két különféle anyagú fémot összeérintünk, az érintkezési pont közelében villamos feszültség keletkezik. A feszültség attól a hőmérséklet-különbségtől függ, amely az érintkezési pont hőmérséklete, és a két fém többi részének hőmérséklete között mérhető. Ezeket a részeket célszerű állandó hőmérsékleten tartani, például jéggel. A feszültség nagysága általában nem arányos ezzel a hőmérséklet-különbséggel, a fém párhoz tartozó jelleggörbe mérésrel meghatározható.

Elvileg akármilyen két fém alkalmazható, a gyakorlatban fémötvözeteket kísérleteztek ki, amelyek a használatos hőmérséklet-mérési tartományokhoz a legalkalmasabbnak bizonyultak. Az 50. ábra vázlatosan szemlélteti a termoelemek szokásos kapcsolását.



50. ábra Termoelemek kapcsolása.

Szöveg az ábrán: mérőtest; *Metal A* = „A” fém; *Metal B* = „B” fém; *Hot junction* = meleg kapcsolati pont; *cold junction* = hideg kapcsolati pont; *Heat source* = hőforrás; *Voltmeter* = feszültségmérő; *Current in circuit* = áram iránya az áramkörben; *ice bath for terminal block* = jégfürdő a mérőtestben.

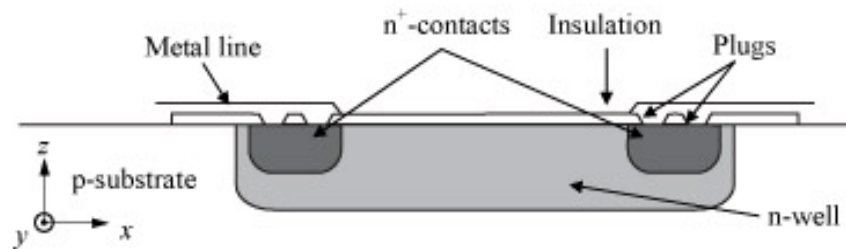
A termoelemeket széles körben alkalmazzák hőmérséklet érzékelésére, az 51. ábrán a Cooper-Atkins Company szobahőmérséklet mérésére alkalmas érzékelője látható, felszerelve a fém pár jelleggörbéje alapján korrigáló készülékkel.



51. ábra. Szobahőmérséklet mérésére szolgáló termoelem

### 2.1.13 Piezorezisztív mérőérzékelő

A piezorezisztív mérőérzékelők működése a piezorezisztív hatáson alapul. A Wikipédiában található leírás alapján ez a hatás azt írja le, ahogyan a félvezetők fajlagos ellenállása megváltozik, ha mechanikai feszültség hat rájuk. A piezorezisztív hatás sokkal nagyobb mértékben befolyásolja a fajlagos ellenállást, mint a méretek megváltozása, így például sokkal érzékenyebb nyúlásmérő érzékelőt lehet készíteni, mint a hagyományos nyúlásmérő bélyegek, bár a hőmérséklet változására sokkal érzékenyebbek. A sokféle lehetséges kivitel közül a legegyszerűbb a szilikon piezorezisztor, amelynek a vázlatos keresztmetszetét a 52. ábrán láthatjuk.



52. ábra. Egy n'-elvezetésű szilikon piezorezisztor vázlatos keresztmetszete.

Szöveg az ábrán: *Metal line* = fémvezeték; *n'-contacts* = n'-érintkezések; *Insulation* = szigetelés; *Plugs* = dugaszolók; *n-well* = n-elvezetés.

Az elmondottak alapján látható, hogy sokféle fajta érzékelő is készíthető piezorezisztív elven, az 53. ábrán az Endevco Corporation, USA cég által forgalmazott 8530B-2KM37 típusú nyomásérzékelő látható:

**insducer**



Actual size

**ENDEVCO  
MODEL  
8530B-  
2KM37**

53. ábra. Piezorezisztív nyomás-érzékelő

## 2.2 Jelrögzítő berendezések

A manapság használatos jelrögzítő berendezéseket két nagy csoportra lehet osztani: ezek a grafikus és a mágneses jelrögzítő berendezések

### 2.2.1 Grafikus jelrögzítő berendezések

Az a legfontosabb tulajdonságuk, hogy a grafikusan rögzített jel szabad szemmel, nyomban látható, ellenőrizhető. Ezt az előnyt azonban erősen ellensúlyozzák azok a hátrányok, amelyek a grafikus rögzítési módból erednek: a leolvasás pontossága nem csökkenthető néhány százalék alá, ez már meghatározza az értékelés pontosságát és megbízhatóságát, és az értékelés így is csak viszonylag lassan változó jelek esetében hajtható végre, így csak bizonyos egyszerű értékelési módszerek alkalmazhatók.

Sokféle grafikus jelrögzítő berendezés van használatban, legalábbis a legutóbbi időkig, pl. a vasúti vontató járműveken sok évtizeden át volt alkalmazva ilyen típusú sebesség-idő regisztráló műszer, de léteznek nagyobb méretű, sokcsatornás készülékek is. Általában akkor használják ezeket, amikor csak bizonyos egyszerű döntéseket kell hozni, vagy amikor szemrevételezéssel is fel lehet ismerni egy fontosabb jellemzőt, pl. a vasúti pálya adatainak regisztrálása során a pálya vonalvezetési hibái meghaladtak-e jelentősen valamilyen határértéket. A regisztrált jel értékelésénél használható módszerek itt is alkalmazkodnia kell a leolvasás pontossági korlátaikhoz.

### 2.2.2 Mágneses jelrögzítő berendezések

A mágneses jelrögzítő berendezések mágnesszalagra, vagy mágneslemezre (floppy lemez, merev lemez, számítógép memóriája, stb.) rögzítik a mérési jelet. A rögzített jel formája lehet analóg (az eredeti jellel folytonosan, analóg módon, tehát pontról pontra arányosan változó alakú), vagy digitális (megfelelő darabszámú számjegyek sorozata).

A mágneses jelrögzítés általános jellemzője, hogy szabad szemmel ugyan nem látható (ez is magyarázza a kezdetben a mágneses rögzítési móddal szemben tanúsított bizalmatlanságot), viszont megfelelő berendezéssel a rögzített jelek újra lejátszhatók, megtekinthetők, kiolvashatók, és a grafikus jelrögzítés értékelési lehetőségeihez képest sokkal kiterjedtebb értékelési módszerek alkalmazására van lehetőség, különösen, ha a jel már digitális formában áll rendelkezésre, illetve átalakítottuk digitális formájúvá.

Az analóg mágneses jelrögzítés a mérési jelet mágnesszalagra rögzíti ugyanolyan folytonos feszültség-idő függvény alakjában, mint az eredeti mérendő fizikai mennyiség. Ezek a berendezések a mágnesszalagra vivőfrekvenciás alakban rögzítik a mért feszültség-idő jelet, a visszajátszás során analóg módon változó feszültségjelet adnak ki. Általában többcsatornás berendezések, széles (1/2 ") szalagra pl. 14 mérési csatorna és egy hangcsatorna rögzíthető (Philips ANA-LOG 14), de van már kereskedelmi hangkazettára 5 csatornát rögzítő berendezés is. Az eddigi tapasztalatok szerint ezek a típusok gyorsan változnak, beleértve a gyártókat is, általában nem biztos, hogy néhány év múlva egy bizonyos mágnesszalagos egység még

ugyanannak a gyárnak a katalógusában lesz megtalálható. Érdekességképpen megemlíthetjük, hogy az analóg mágnesszalagos rögzítőknek a piacon tapasztalható hiánya következtében egy osztrák cég megpróbálkozott kereskedelmi videomagnetofon alkalmazásával úgy, hogy megfelelő adaptert használt mind a bemeneten, mind a kimeneten. Azóta erről a típusról nem jelent meg publikáció.

A digitális jelrögzítés a mérési jelet diszkrét számértékek halmaza formájában rögzíti és tárolja. Ehhez az szükséges, hogy az eredetileg folytonosan változó fizikai mennyiség mérését nem folytonosan, hanem meghatározott (esetenként igen sűrűn, több kHz frekvenciával) mérjék meg és a mérési eredményt digitális alakban rögzítsék. A mérési gyakorlatban az is sokszor előfordul, hogy a mérési jelet analóg formában rögzítik mágnesszalagra, majd visszajátszás során alakítják át digitális számértékek halmazává (A/D konverzió), és ezt rögzítik megfelelő digitális alakban. Kezdetben a mágneses adathordozók kis kapacitása korábban az analóg mágnesszalagok kapacitása bőségesen meghaladta a digitális adathordozók kapacitását, de ez utóbbiak rohamos fejlődése következtében (beleértve a rögzítés sebességét is) hosszabb időtartamú mérések adatrögzítése is könnyen lehetséges, akár analóg, akár digitális alakban. Ma már nem jelent problémát a Gbyte nagyságrendű számérték-halmaz tárolása akár merevlemezen, akár speciális mágnesszalag-kazettán.

A méréstechnikai gyakorlatban mind a mai napig megfigyelhető volt az a szemlélet, hogy a mérési jelet először lehetőleg analóg formában rögzítik mágnesszalagra, majd az analóg mérési jelet konvertálják digitális számértékekké. Ennek az az oka, hogy sokan az analóg jelrögzítést úgy tekintik, hogy ez az „eredeti” jelet képes rögzíteni, míg az analógról a digitális alakra történő konverzió információvesztéssel jár, ezért célszerű az „eredeti” alakú jelet rögzíteni elsőként. A bizonyos mértékű információvesztés kétségtelen, viszont ez elhanyagolható mértékűre csökkenthető, ha elegendő sűrűn történik a A/D konverzió során a mintavételezés. Az analóg mérőmagnetofon esetében viszont egyszerű nemcsak a jel újrajátszása, hanem bizonyos mértékű lassítása, vagy gyorsítása is, ami a digitális jelek esetében már megfelelő software eszközöket igényel. Másrészt a digitális jelek esetében nem jelent különösebb problémát a jelek megállítása és az álló mérési jel szemlélése, ami viszont az analóg berendezés esetében jelenthet problémát.

Itt jegyezzük meg, hogy manapság szinte kizárólagos a digitális adatgyűjtő készülékek használata, mivel az ezek által szolgáltatott digitális adatsorozatok feldolgozására a számítástechnika szinte korlátlan lehetőségeket biztosít, továbbá ezen adatgyűjtő készülékek által kezelt mérési csatornák száma elméletileg korlátlan, valamint ezen csatornákról az adatgyűjtés a mintavételezési frekvenciának megfelelően szimultán történhet, az egyes mérőérzékelőktől begyűjtött mérési adatok tehát azonos időpontból származnak. A csatornák számának természetesen határt szab az adatrögzítést és kiértékelést végző számítógép teljesítménye és háttértárolóinak mérete.

### 2.3 A jelek szűrése

A mérési jelek általában többféle frekvenciájú jel-összetevőket tartalmaznak. Pl. egy hajtómű által leadott hajtó nyomaték egyrészt a jármű sebessége által megszabott, az időben többnyire lassan változó  $M_h(t)$  összetevőből, másrészt a hajtásból, a nyomatékváltó kapcsolási

műveleteiből, stb. eredő  $\mathbf{M}_{\text{kap}}(\mathbf{t})$  összetevőből áll. A mérés során az  $\mathbf{M}(\mathbf{t}) = \mathbf{M}_h(\mathbf{t}) + \mathbf{M}_{\text{kap}}(\mathbf{t})$  nyomatóknak megfelelő  $\mathbf{U}_M(\mathbf{t})$  mérési jelhez még hozzáadódhat a mérőberendezés működéséből eredő, többnyire magasabb frekvenciájú „zaj” is. Ezt a zajt a mérési jel feldolgozása során mindenképpen el kell távolítani.

A mérés célja vagy az  $\mathbf{M}_h(\mathbf{t})$  hajtó nyomaték-összetevő mérése, vagy az  $\mathbf{M}_{\text{kap}}(\mathbf{t})$  járulékos nyomaték-összetevő mérése. Az első esetben a mérési zajon kívül el kell távolítani a járulékos  $\mathbf{M}_{\text{kap}}(\mathbf{t})$  nyomaték-összetevőt is, a második esetben a mérési zajon kívül a lassan változó, alacsony frekvenciájú  $\mathbf{M}_h(\mathbf{t})$  összetevőt kell eltávolítani. Ezt a műveletet a mérési jel **szűrésének** nevezzük (54. ábra):



54. ábra

A szűrés során tehát az eredeti  $\mathbf{U}_{be}(\mathbf{t})$  bemenő szűretlen feszültségből az  $\mathbf{U}_{ki}(\mathbf{t})$  kimenő szűrt feszültség-idő függvényt állítjuk elő, és a szűrés mértékét e két függvény hányadosával, a szűrő **átviteli** (frekvencia-átviteli) függvényével jellemezzük. Mivel a számlálóban és a nevezőben az  $\mathbf{U}_{be}(\mathbf{t})$  és az  $\mathbf{U}_{ki}(\mathbf{t})$  függvények általában harmonikus függvényekből (szinusz és koszinusz) tevődnek össze, ezért ezeket célszerű komplex függvényekként venni figyelembe, így a hányadosuk is komplex függvény lesz:

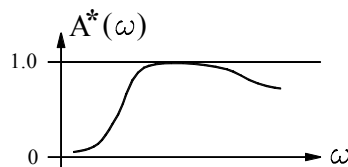
$$\overline{A}(j.\omega) = \frac{\overline{U}_{ki}(t)}{\overline{U}_{be}(t)}$$

Természetesen a szűrés végeredménye szempontjából az  $\overline{A}(j.\omega)$  átviteli függvény abszolút értékére van szükségünk:

$$|\overline{A}(j.\omega)| = A^*(\omega) = \left| \frac{\overline{U}_{ki}(t)}{\overline{U}_{be}(t)} \right|;$$

ahol látható, hogy az  $\mathbf{A}^*(\omega)$  már valós függvény.

A szűrés fogalma azt jelenti, hogy a jelből elveszünk (csökkentünk) bizonyos jelösszetevőket, ez az úgynevezett „passzív” szűrés. De létezik olyan szűrési eljárás is, amely során egyes jelösszetevők növekedhetnek is, ezek az „aktív” szűrők, ezek tehát már a műveleti erősítőkre emlékeztetnek. Az 55. ábra egy passzív szűrő átviteli jelleggörbáját szemlélteti:

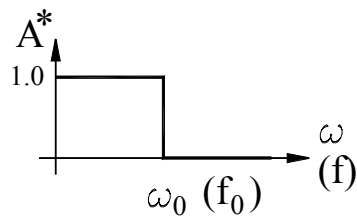


55. ábra

A mérési eredmények feldolgozásának gyakorlatában az előbb említett két esettel együtt három tipikus szűrési feladattal találkozunk: a „felülvágó” (= aluláteresztő), az alulvágó (= felüláteresztő) szűrés és a sávszűrés (= „lyuk”-szűrés). Ezek a következők:

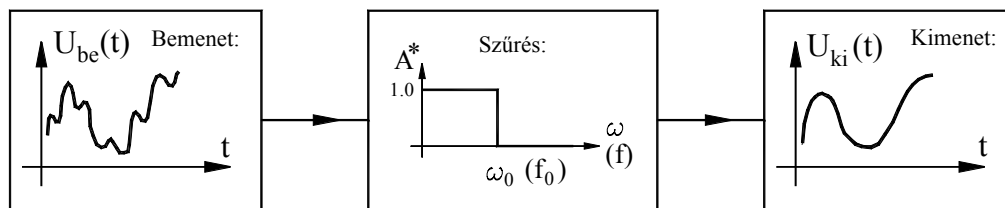
### 2.3.1 Aluláteresztő (felülvágó) szűrő

elméleti (ideális) átviteli jelleggörbe:



56. ábra

Ez a szűrő az  $\omega_0$  ( $f_0$ ) névleges határfrekvencia (határfrekvencia) alatt minden minden rezgésszámú összetevőt ideálisan átenged, felette mindent eltávolít. A szűrés menete tehát:

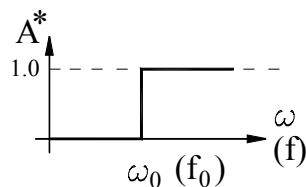


57. ábra

Ezt a szűrőt szokták használni, ha a mérési jelnek viszonylag magasabb frekvencájú, parazita zavaró jelösszetevői vannak, mert ez a szűrő ezeket kiszűrve „kiszimítja” a jelet.

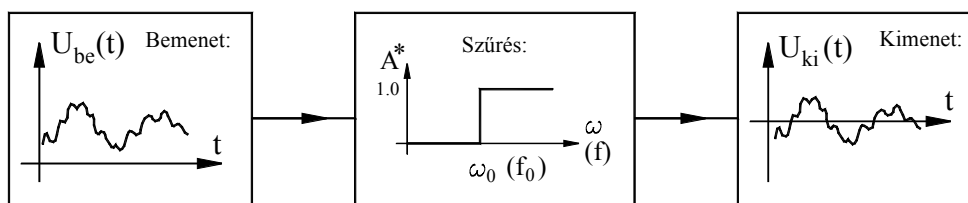
### 2.3.2 Felüláteresztő (alulvágó) szűrő

elméleti (ideális) frekvenciaátviteli függvény:



58. ábra

Ez a szűrő az  $\omega_0$  ( $f_0$ ) névleges határfrekvencia (határfrekvencia) felett minden minden rezgésszámú összetevőt ideálisan átenged, alatta mindent ideálisan eltávolít. A szűrés menete tehát:

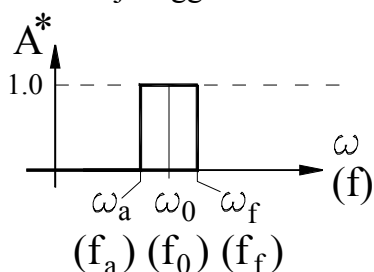


59. ábra

Ezt a szűrőt legtöbbször arra használják, hogy kiszűrjék a jel állandó (zérus.frekvenciájú) összetevőjét, ekkor a jel ú. n. „nullközepű” lesz.

### 2.3.3 Sávszűrő („lyukszűrő”)

az elméleti ideális frekvenciaátviteli jelleggörbe:



60. ábra

Ennek a szűrőnek két határfrekvenciája van:  $\omega_a$  az alsó,  $\omega_f$  a felső határfrekvencia. A szűrő egyik jellemző adata a névleges körfrekvenciája:  $\omega_0 = (\omega_a + \omega_f)/2$ , a másik jellemző adata a sávszélesség:  $[\omega_a ; \omega_f]$ , amelyet általában a két határ hányadosával adnak meg. A kereskedelmi forgalomban kapható sávszűrők egyik fajtája az **oktáv-szűrő**, amelynél ez az arány 2,0:

$$\frac{\omega_f}{\omega_a} = 2,0$$

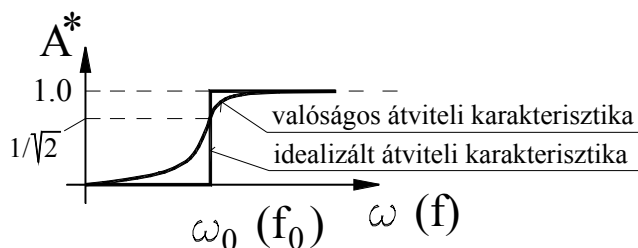
A sávszűrők másik fajtájánál az oktávot (vagyis a kétszeres frekvencia-arányt) három részre osztják, ezeket terc-szűrőknek hívják, itt a felső és az alsó frekvenciakorlát hányadosa:

$$\frac{\omega_f}{\omega_a} = \sqrt[3]{2} \cong 1,260 ;$$

tehát mind a terc-, mind az oktáv-szűrőknél a frekvenciasávok határai mértani sort alkotnak. Ezeket a sávszűrőket a gyárak úgy készítik, hogy egy megadott (viszonylag nagy, pl. 10 Hz – 40 kHz) frekvencia-intervallumot (elvileg) egyetlenesen fedjenek le.

Eddig a szűrőknek csak az idealizált. elméleti frekvencia-átviteli jelleggörbéit említettük, amelyek az  $\omega_0$  határfrekvencián ugrásszerűen változnak meg. A valóságban természetesen ilyen ugrásszerű megváltozást nem lehet megvalósítani, a frekvenciaátviteli függvény egy véges körfrekvencia-intervallumban változik meg:





61. ábra

Ilyen esetekben az  $\omega_0$  határkörfrekvenciát azzal az  $\omega$  körfrekvenciával adják meg, amelynél az átviteli karakterisztika értéke  $1/\sqrt{2}$ .

Az átviteli függvény valóságos alakja a szűrőt felépítő elemektől függ, a digitális jelek szűrését külön tárgyaljuk. Az alábbiakban röviden összefoglaljuk az analóg és a digitális jelek szűrésének módját, a szűrők felépítését és a legfontosabb elméleti alapokat. További részletek a hivatkozott szakirodalomban találhatóak meg.

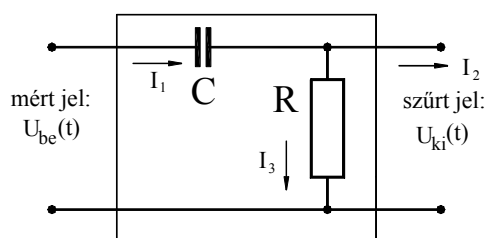
### 2.3.3 Analóg jelek szűrése

Folytonos, analóg feszültségjeleket ohmikus ellenállásokból, kondenzátorokból és induktív elemekből álló áramkörökkel szűrhetünk (a szakirodalomban ezeket **LR** és **LRC** elemeknek is nevezik). Ezekből passzív szűrőt lehet összeállítani. Vizsgáljuk meg az alábbiakban a passzív felül- és aluláteresztő szűrők legegyszerűbb változatait.

#### 2.3.3.1 Passzív felüláteresztő szűrő

A passzív felüláteresztő szűrőnek a legegyszerűbb változata mindössze egyetlen **C** kondenzátorból és **R** ohmikus ellenállásból áll (62. ábra).

A levezetés kedvéért tételezzük fel, hogy mind az  $U_{be}(t)$ , mind az  $U_{ki}(t)$  jel különböző körfrekvenciájú és amplitudójú harmonikus függvények összegéből állnak, tehát célszerű ezeket – a villamosságban szokásos módon – komplex függvényekként kezelni:  $\bar{U}_{be}(t)$  és  $\bar{U}_{ki}(t)$ .



62. ábra

Az átviteli függvény meghatározásához az  $\bar{U}_{ki}(t)$  jelet  $\bar{U}_{be}(t)$  függvényében határozzuk meg. Ezt a szokásos alakú **Kirchhoff** törvények segítségével tehetjük meg, de az **Ohm**-törvényt komplex alakban kell használni:

$$\bar{U}(t) = \bar{I}(t) \cdot \bar{Z}$$

ahol a  $\bar{Z}$  impedancia ohmos ellenállásra  $R$ , kondenzátorra  $\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}$  és induktív elemre  $j \cdot \omega \cdot L$ .

A Kirchhoff-huroktörvény értelmében az  $\bar{U}_{be}(t)$  -  $C$  -  $R$  körben a feszültségek összegét kell felírunk. A  $C$  és  $R$  tagok kapcsolódási pontján alkalmazzuk a szokásos közelítést, hogy az  $\bar{I}_2(t)$  áram elhanyagolható  $\bar{I}_1(t)$  -hez képest:

$$\bar{I}_2(t) \ll \ll \bar{I}_1(t) .$$

(Szűrők kimenetés általában előírják, hogy a kapcsolódó berendezésnek legalább mekkora bemeneti ellenállásúnak kell lennie, ez általában a  $M\Omega$  sokszorosa.)

Ekkor:  $\bar{I}_3(t) \cong \bar{I}_1(t)$ .

és a kondenzátoron és az ohmikus ellenálláson eső feszültségek összege:

$$\bar{U}_{be}(t) = \bar{I}_1(t) \cdot \left[ \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} + R \right]$$

Innen az  $\bar{I}_1(t)$  áram:

$$\bar{I}_1(t) = \frac{\bar{U}_{be}(t)}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} + R}$$

A kimenő feszültség:

$$\bar{U}_{ki}(t) = \bar{I}_3(t) \cdot R = \frac{\bar{U}_{be}(t) \cdot R}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} + R}$$

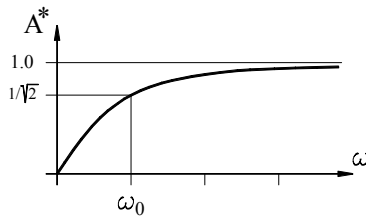
A frekvencia-átviteli függvény:

$$\bar{A}(j \cdot \omega) = \frac{\bar{U}_{ki}(t)}{\bar{U}_{be}(t)} = \frac{R}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} + R}$$

Ennek az abszolút értékére van szükségünk:

$$\begin{aligned}
 |\bar{A}(j.\omega)| = A^*(\omega) &= \left| \frac{R}{\frac{1}{j.\omega.C} + R} \right| = \left| \frac{R}{R - \frac{j}{\omega.C}} \right| = \left| \frac{R.(R + \frac{j}{\omega.C})}{R^2 + \frac{1}{\omega^2.C^2}} \right| = \\
 &= \frac{R}{R^2 + \frac{1}{\omega^2.C^2}} \cdot \left| (R + \frac{j}{\omega.C}) \right| = \frac{R \cdot \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2.C^2}}}{R^2 + \frac{1}{\omega^2.C^2}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2.C^2}}}
 \end{aligned}$$

Ha  $\omega$  értéke minden határon túl csökken ( $\omega \rightarrow 0$ ),  $A^*(\omega)$  értéke is 0-hoz tart; ha pedig  $\omega$  értéke minden határon túl nő,  $A^*(\omega)$  értéke 1,0-hoz tart (63. ábra):



63. ábra

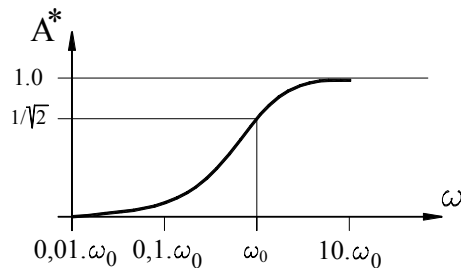
Az  $1/\sqrt{2}$  . átviteli értékhez tartozó  $\omega_0$  határfrekvencia értéke:

$$\frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega_0^2.C^2}}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Innen a körfrekvencia:

$$\omega_0 = \frac{1}{R.C}$$

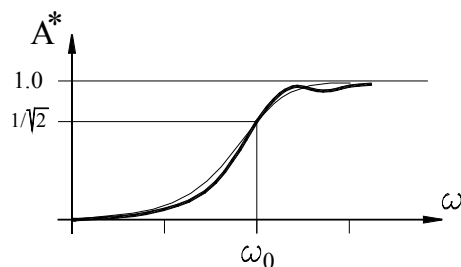
A gyakorlatban elterjedt módszer, hogy logaritmikus léptéket alkalmaznak abból a célból, hogy főleg a kis frekvencia-értékeknél pontosabban szemléltessék a frekvencia-átviteli görbe menetét. Így például az előbb bemutatott jelleggörbe a következő alakú lesz, ha a frekvencia-tengely léptéke logaritmikus:



64. ábra

Természetesen a gyakorlatban megvalósított felüláteresztő szűrők jóval összetettebb felépítésűek, hogy az idealizált átviteli jelleggörbét jobban megközelítsék. Ugyanakkor előfor-

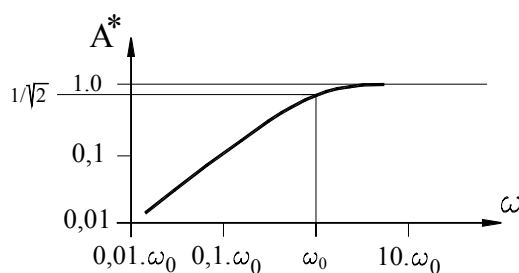
dul, hogy az  $\omega_0$  környezetében meredekebben emelkedő görbére kismértékű járulékos, hullámszerűen változó görbe adódik hozzá:



65. ábra

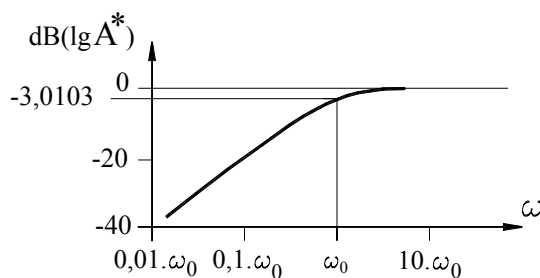
Végül említést kell tennünk a **decibel-skáláról** és annak használatáról. A frekvencia-átviteli jelleggörbék ábrázolása során szokásos módszer, hogy az ordináta-tengelyt (az átviteli hányados értékét) is logaritmikus léptékű skálával ábrázolják. Az  $A^*$  átviteli hányados értékeit szokásos úgy is feltüntetni, hogy az **1,0** értékű alapszinthez **0-t** rendelve, a többi érték logaritmusát, illetve annak 20-szorosát tüntetik fel. Így például  $A^* = 0,1$  érték esetén a decibel érték **-20** lesz:

$$\text{dB}(\lg A^*) = 20 \cdot \lg A^*$$



66. ábra

Ilyenmódon az előbbi átviteli függvény skálázása az alábbi lesz:



67. ábra

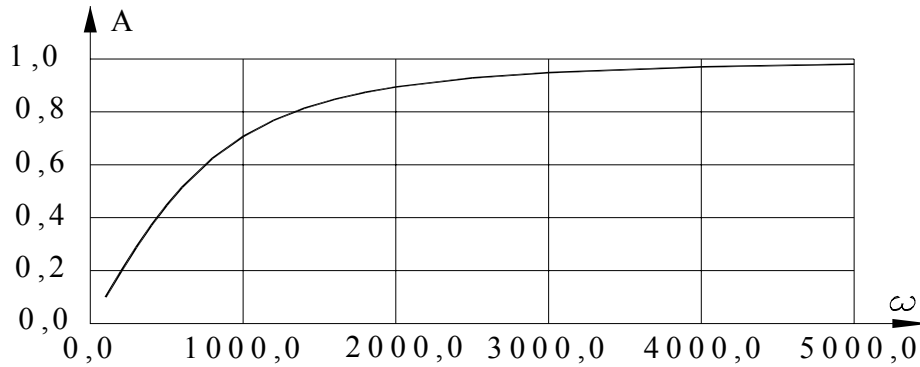
**Szám példa.** Határozzuk meg annak a felüláteresztő szűrőnek az  $A$  erősítését az  $\omega$  körfrekvencia függvényében, amelynek az adatai:  $R = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 100 \text{ nF}$ .

Alapegységekre átszámítva az adatokat:  $R = 10 \text{ k}\Omega = 10000 \text{ }\Omega$

$$C = 100 \text{ nF} = 0,1 \text{ }\mu\text{F} = 0,0000001 \text{ F}$$

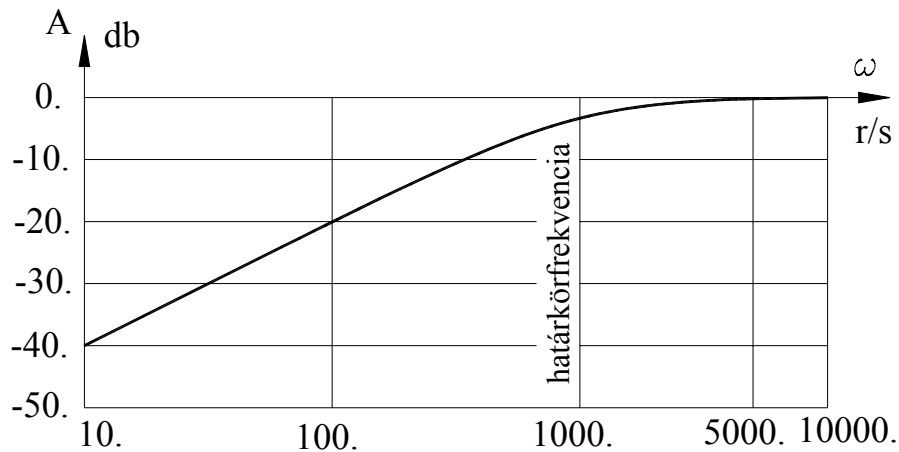
A határfrekvencia:  $\omega_0 = \frac{1}{R.C} = \frac{1}{10000 \cdot 0,0000001} = 1000 \text{ r/s}$

Kiszámítva az erősítést  $0 < \omega \leq 5000 \text{ r/s}$  intervallumban, a 68. ábrán látható az erősítés diagramja lineáris léptékekben:



68. ábra

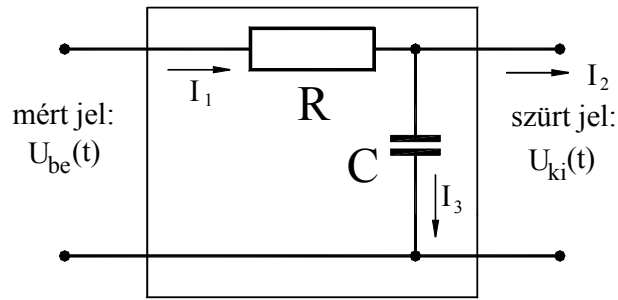
Ugyanez a diagram logaritmikus körfrekvencia-skálával ( $10 \leq \omega \leq 10000$ ) és decibelben mért erősítési skálával ( $0 \leq A \leq -50$ ) a 69. ábrán látható:



69. ábra

### 2.3.3.2 Passzív aluláteresztő szűrő

Az összehasonlítás kedvéért most vizsgáljuk meg a passzív aluláteresztő szűrőknek is a lehető legegyszerűbb változatát, amely szintén csak egy **C** kondenzátorból és **R** ohmikus ellenállásból áll (70. ábra):



70. ábra A legegyszerűbb passzív felülvágó szűrő

Határozzuk meg a feszültségek arányát és az erősítést, ahogyan azt az alulvágó szűrő esetében is tettük. A bemeneti feszültség:

$$\bar{U}_{be}(t) = \bar{I}_1(t) \cdot \left[ R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \right]$$

ahonnan:

$$\bar{I}_1(t) = \frac{\bar{U}_{be}(t)}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} \cong \bar{I}_3(t)$$

Ezzel a kimeneti feszültség:

$$\bar{U}_{ki}(t) = \bar{I}_3(t) \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{\bar{U}_{be}(t)}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \bar{U}_{be}(t) \cdot \frac{1}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}$$

A feszültségek aránya:

$$\frac{\bar{U}_{ki}(t)}{\bar{U}_{be}(t)} = \frac{\bar{U}_{be}(t) \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}{\bar{U}_{be}(t) \cdot \left[ R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \right]} = \frac{1}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} = \frac{1}{1 + j \cdot R \cdot \omega \cdot C}$$

illetve átalakítva az Euler-formula szerint:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{U}_{ki}(t)}{\bar{U}_{be}(t)} &= \frac{1}{1 + j \cdot R \cdot \omega \cdot C} = \frac{1 - j \cdot R \cdot \omega \cdot C}{1 + R^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2} = \\ &= \sqrt{\left[ \frac{1}{1 + R^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2} \right]^2 + \left[ \frac{R \cdot \omega \cdot C}{1 + R^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2} \right]^2} \cdot e^{j \cdot \varphi} = \sqrt{\frac{1 + R^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2}{[1 + R^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2]^2}} \cdot e^{j \cdot \varphi} = \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2}} \cdot e^{j \cdot \varphi}$$

És az erősítés:

$$A = \frac{|\bar{U}_{ki}(t)|}{|\bar{U}_{be}(t)|} = \frac{\left| \bar{I}_3(t) \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \right|}{\left| \bar{I}_1(t) \cdot \left[ R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \right] \right|} \cong \frac{\left| \bar{I}_3(t) \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \right|}{\left| \bar{I}_3(t) \cdot \left[ R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \right] \right|} = \frac{\left| \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \right|}{\left| \left[ R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \right] \right|} =$$

$$= \frac{\left| \frac{-j}{\omega \cdot C} \right|}{\left| R - \frac{j}{\omega \cdot C} \right|} = \frac{\frac{1}{\omega \cdot C}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C^2}}} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2}}$$

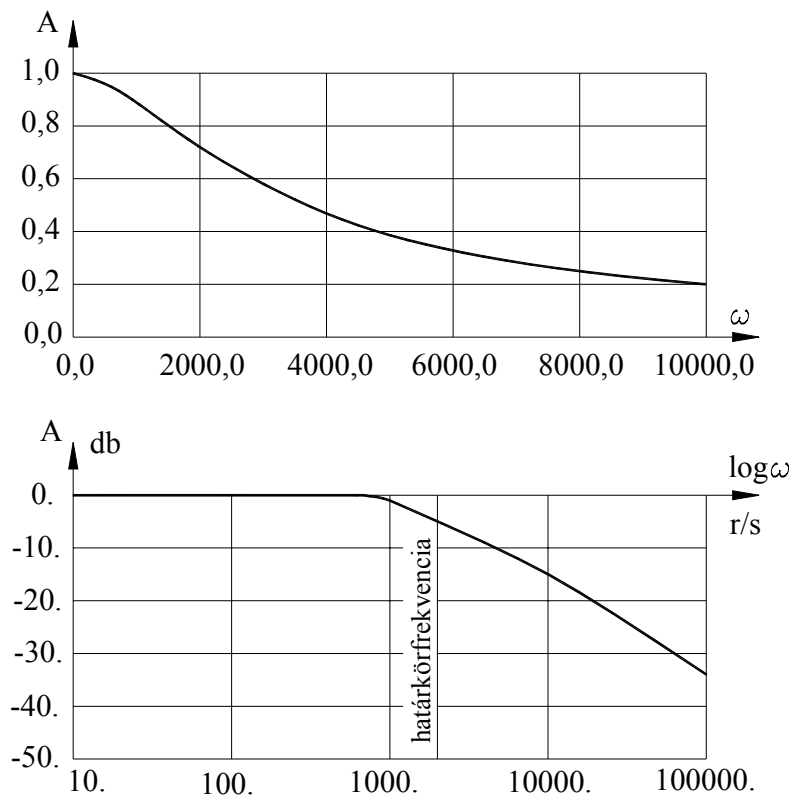
**Szám példa.** Hasonlóan az előbb tárgyalt felüláteresztő szűrőhöz, határozzuk meg annak az aluláteresztő szűrőnek az **A** erősítését az  $\omega$  körfrekvencia függvényében, amelynek az adatai:  $R = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 50 \text{ nF}$ .

Alapegységekre átszámítva az adatokat:  $R = 10 \text{ k}\Omega = 10000 \text{ }\Omega$

$$C = 50 \text{ nF} = 0,05 \text{ }\mu\text{F} = 0,00000005 \text{ F}$$

$$\text{A határfrekvencia: } \omega_0 = \frac{1}{R \cdot C} = \frac{1}{10000 \cdot 0,00000005} = 2000 \text{ r/s}$$

Kiszámítva az erősítést  $0 < \omega \leq 10000 \text{ r/s}$  intervallumban, az 58. ábra felső részén látható az erősítés diagramja lineáris léptékekben, valamint alul  $0 < \omega \leq 100000 \text{ r/s}$  tartományban logaritmikus, illetve decibel léptékű skálával.



71. ábra. Az erősítés lineáris, valamint logaritmikus és decibel léptékben.

Összehasonlítva a kapott frekvencia-átviteli ábrákat, megállapítható, hogy egyrészt rövid az a körfrekvencia-tartomány, amelyben az erősítés  $A \approx 1,0$ , másrészt nagyon hosszú az erősítés lecsökkenési intervalluma. Sokkal hosszabb körfrekvencia-tartományban volna szükséges, hogy  $A \approx 1,0$  legyen, valamint sokkal rövidebb intervallumban kellene, hogy az erősítés csökkenjen, tehát a csökkenésnek jóval meredekebbnek kellene lennie.

### 2.3.3.3 Aktív alul- és felüláteresztő szűrők.

Megfelelőbb karakterisztikájú szűrők tervezéséhez az eddig levezetett erősítés-összefüggéseket tovább kell fejleszteni. Az általánosabb tárgyalás érdekében alakítsuk át az eddig levezetett erősítési képleteket. Idézzük fel az előbb tárgyalt legegyszerűbb felülvágó szűrőnél a be- és kimeneti feszültségek arányára levezetett képletet:

$$\frac{\bar{U}_{ki}(t)}{\bar{U}_{be}(t)} = \frac{1}{1 + j.R.\omega.C}$$

Vezessük be a következő új változót:

$$p = j.\omega$$

Ezzel a feszültségarány:



$$\frac{\bar{U}_{ki}(t)}{\bar{U}_{be}(t)} = \frac{1}{1 + p.R.C}$$

Az általánosabb felhasználhatóság érdekében normaljuk a  $p$  új változót az  $\omega_0$  határfrekvenciával:

$$P = \frac{p}{\omega_0} = \frac{j \cdot \omega}{\omega_0} = j \cdot \Omega$$

Mivel a vizsgált szűrő határfrekvenciája a következő:

$$\omega_0 = \frac{1}{R.C}$$

így ezt behelyettesítve kapjuk:

$$P = \frac{p}{\omega_0} = \frac{p}{\frac{1}{R.C}} = p.R.C$$

Így végül a feszültségek aránya:

$$\frac{\bar{U}_{ki}(t)}{\bar{U}_{be}(t)} = \frac{1}{1 + p.R.C} = \frac{1}{1 + P}$$

[15]-11.13 fejezetében a szerzők azt javasolják, hogy ha a tárgyalt felülvágó szűrő erősítés-csökkenésénél nagyobb mértékű csökkenésre van szükség, több ( $n$  darab) felülvágó szűrő sorbakapcsolása jöhet szóba. Ekkor az erősítésnek a körfrekvenciától való függése ([15]-11.25 képlete szerint) a következő alakú lesz:

$$A = \frac{1}{(1 + a.P).(1 + b.P).(1 + c.P).....}$$

A nevezőt polinómmá átalakítva kapjuk a felülvágó szűrő erősítésének általánosságban használt alakját:

$$A = \frac{A_0}{1 + c_1.P + c_2.P^2 + c_3.P^3 + \dots + c_n.P^n}$$

ahol  $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$  pozitív valós együtthatók. Ezek megfelelő megválasztásával lehet a szűrőkkel szemben támasztott követelményeket kielégíteni.

A tapasztalat szerint nincs olyan  $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$  együttható-csoport, amely egyszerre lenne képes minden követelménynek egyenlő mértékben megfelelni. Így ezeket a követelményeket csak külön-külön lehet megfelelően kielégíteni. Tekintsük át ezeket a követelményeket ([15]-11.13 fejezet):

a/ **Az erősítési karakterisztika lapossága.** Ez azt jelenti, hogy az erősítés csökkenése csak röviddel a határfrekvencia előtt kezdődjék (felülvágó szűrőknél), és az átmenet az áteresztő tartományból a zárótartományba lehetőleg rövid legyen.

b/ **A karakterisztika monoton jellege.** Az áteresztő tartományban a karakterisztikán ne legyenek hullámosságok.

c/ **A négyszögjel átvitelének minősége.** A négyszögjel értéke lehetőleg állandó legyen.

E három feltétel mindegyikére külön-külön meg lehet határozni a  $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$  együtthatók optimális értékeit és ezzel az erősítő nevezőjének polinómját. Ilyen módon a gyakorlatban három fontosabb polinóm-típus terjedt el: a **Butterworth**, a **Bessel** és a **Chebisev** féle polinóm, illetve szűrő-típus. Mindhárom fajta polinómnak kidolgozták az első-, másod-, harmad- és negyedfokú változatát, így beszélhetünk első-, másod-, harmad- és negyedrendű Butterworth-, Bessel- és Chebisev-szűrőről. E szűrőtípusok legfontosabb tulajdonságai a következők:

**Butterworth-típusú szűrők.** E szűrőtípus erősítési képlete általános alakban a következő:

$$|A^2| = \frac{A_0^2}{1 + A_2 \cdot \Omega^2 + A_4 \cdot \Omega^4 + \dots + A_{2n} \cdot \Omega^{2n}}$$

Ennek a használt négyféle változata a következő:

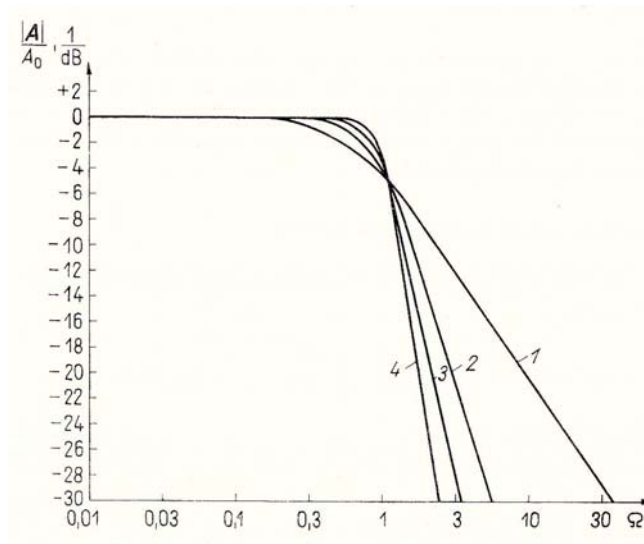
1:  $1 + P$

2:  $1 + \sqrt{2} \cdot P + P^2$

3:  $1 + 2 \cdot P + 2 \cdot P^2 + P^3 = (1+P) \cdot (1+P+P^2)$

4:  $1 + 2,613 \cdot P + 3,413 \cdot P^2 + 2,613 \cdot P^3 + P^4 = (1+1,848 \cdot P+P^2) \cdot (1+0,765 \cdot P+P^2)$

A négyféle Butterworth-típusú felülvágó szűrő erősítének jelleggörbéit a 72. ábrán láthatjuk:



72. ábra. Butterworth-típusú szűrők erősítése.

Az ábra számindexeinek jelentése: 1 – elsőrendű, 2 – másodrendű, 3 – harmadrendű, 4 – negyedrendű. Látható, hogy a negyedrendű változatban az áteresztő tartományban (a  $0,01 \leq \Omega \leq 1,0$  tartományban) az erősítés gyakorlatilag állandó, a zárótartományban ( $1,0 \leq \Omega$ ) merede-

ken csökken. Az ábrán nincs feltüntetve, de a szűrőnek az egységugrásra adott válasza jelentős mértékű túlemelkedést mutat.

A szűrő RC-tagokkal (ohmikus ellenállással és kondenzátorral) nem valósítható meg, csak LRC áramkörökkel, vagy aktív, műveleti erősítőt is tartalmazó RC áramkörökkel.

**Bessel-típusú szűrők.** E szűrőtípus erősítési képletének lehetséges nevezői az alábbiak lehetnek:

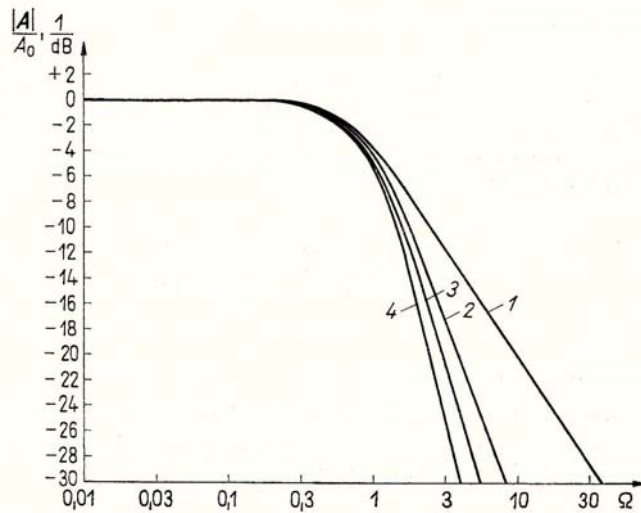
$$1: 1 + P$$

$$2: 1 + 1,362.P + 0,618.P^2$$

$$3: 1 + 1,756.P + 1,233.P^2 + 0,361.P^3 = (1+0,756.P).(1+1,000.P+0,477.P^2)$$

$$4: 1 + 2,114.P + 1,915.P^2 + 0,900.P^3 + 0,190.P^4 = \\ = (1+0,340.P+0,489.P^2).(1+0,774.P+0,389.P^2)$$

A négyféle Bessel-típusú felülvágó szűrő erősítési jelleggörbéi a 73. ábrán láthatók.



73. ábra. Bessel-típusú szűrők erősítése

Az ábra számindexeinek jelentése: 1 – elsőrendű, 2 – másodrendű, 3 – harmadrendű, 4 – negyedrendű. Látható, hogy az áteresztő- és a záró-tartományok közötti átmeneti szakasz jóval hosszabb, mint a Butterworth szűrőké, viszont az ugrásfüggvény adott válaszban a túlemelkedés minimális. [15] szerint mindig ilyen típusú szűrőt célszerű alkalmazni, ha négyszög-alakú jeleket jó minőségben kell átvinni. Az ilyen típusú szűrőt LRC áramkörökkel, vagy aktív (műveleti erősítőt is alkalmazó) RC áramkörökkel valósítható meg.

**Chebisev-típusú szűrők.** E szűrőtípus erősítési képletének lehetséges nevezői – az ún. Chebisev polinómok - az alábbiak lehetnek:

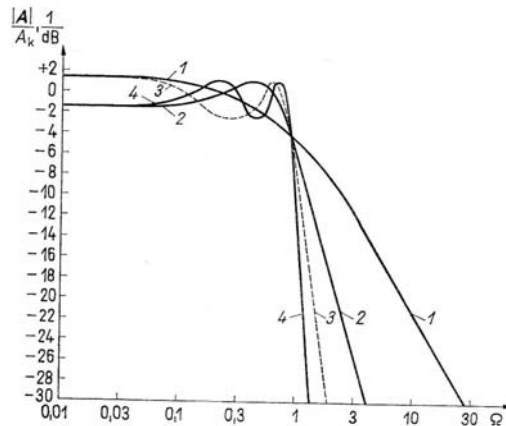
$$1: T_1(x) = x$$

$$2: T_2(x) = 2.x^2 - 1$$

$$3: T_3(x) = 4.x^3 - 3.x$$

$$4: T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 - 1$$

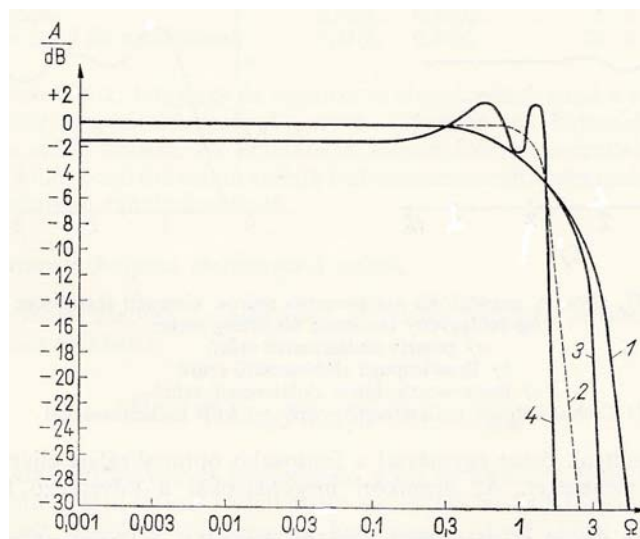
A négyféle Csebisev-típusú felülvágó szűrő erősítési jelleggörbéi a 74. ábrán láthatók.



74. ábra. Csebisev-típusú szűrők erősítése

Az ábra számindexeinek jelentése: 1 – elsőrendű, 2 – másodrendű, 3 – harmadrendű, 4 – negyedrendű. Látható, hogy a negyedrendű Csebisev-típusú szűrők zárótartománya a legmelegebb, de az átteresztő tartományban állandó amplitudójú hullámosságú. Az egységugrásra adott válaszában túlemelkedése még a Butterworth-típusú szűrőket is meghaladja.

A 75. ábra összefoglalja a negyedrendű Butterworth-, Bessel- és Csebisev-típusú szűrők erősítésének diagramját.



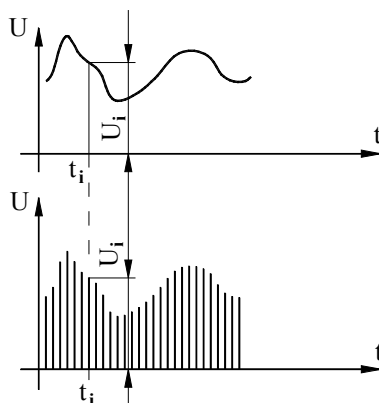
75. ábra. Negyedrendű szűrőtípusok erősítése.

Az ábra indexszámainak jelentése: 1 – passzív aluláteresztő szűrő; 2 – Butterworth-típusú aluláteresztő szűrő; 3 – Bessel-típusú aluláteresztő szűrő; 4 – Csebisev-típusú aluláteresztő szűrő.

Hasonló tulajdonságúak a felülvágó Butterworth-, Bessel- és Csebisev-szűrők is.

### 2.3.3.4 Digitális jelek szűrése

A digitális jelek diszkrét számértékek sorozatából állnak, amelyek vagy úgy keletkeznek, hogy a folytonosan változó fizikai jelet szintén folytonosan változó feszültségjel alakjában mérjük meg, majd ezt a rögzített jelet elegendő sűrű  $t_i$  időközönként ( $i = 1, N$ ) megmérjük, vagy a mérendő fizikai mennyiséget csak  $t_i$  időközönként mérjük meg. Ezeket úgy ábrázolhatjuk, hogy a folytonos görbe helyett csak a  $t_i$  időközönként meghatározott feszültségértékeket mutatjuk be (76. ábra):

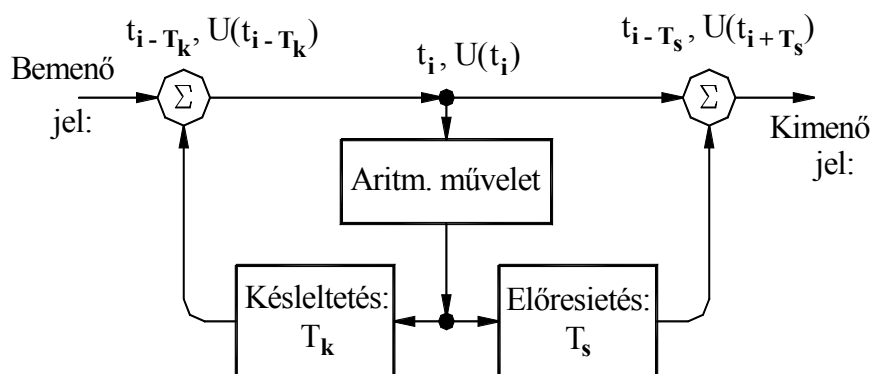


76. ábra

A folytonos jelnek digitális számértékekké történő átalakítás eredménye a  $[(t_i, U_i), i=1, N]$  számpárok halmaza, ezekkel csak aritmetikai műveletek végezhetők, így a jelsorozat szűrését is csak meghatározott aritmetikai műveletek segítségével lehet megoldani.

A gyakorlatban kialakult módszerek a szűrt jelet úgy határozzák meg, hogy végigfutva a diszkrét számértékek sorozatán, az aktuális  $t_i$  időponthoz tartozó  $U_i$  feszültségértéket (miután ezzel bizonyos aritmetikai műveleteket, pl. z-transzformáció, stb. végrehajtottak) hozzáadják a  $t_i$  időpontnál egy megfelelő  $T_k$  késleltetési idővel korábbi ( $t_i - T_k$ ) időponthoz tartozó  $U(t_i - T_k)$  jelértékhez, és/vagy egy  $T_s$  előresietési idővel későbbi  $U(t_i + T_s)$  jelhez (77. ábra).

A gyakorlatban megtervezett szűrőkapcsolások ennél sokkal összetettebbek, általában többféle késleltetési és előresietési időt alkalmaznak, különböző aritmetikai műveletekkel. A részletek ismertetése messzire vezetne, további részleteket [10] – ban és [11] – ben lehet találni.



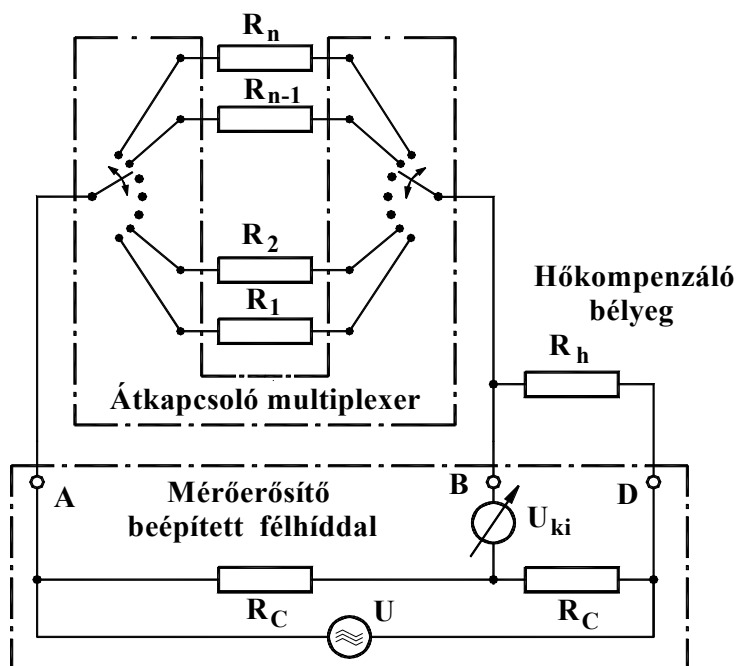
77. ábra

## 2.4 Mérési adatgyűjtő rendszerek

A mérési feladatok jelentős részében nem egyetlen érzékelő által szolgáltatott mérési jel feldolgozása és értékelése a feladat. Jellegzetes példa erre a szilárdsági mérések esete, ahol nem ritka a száznál is több nyúlásmérő bélyeg alkalmazása.

Más esetekben sok mérőhely mérési eredményeinek hosszú időn át végzett gyűjtése esetenként különleges problémákat vethet fel. Statikus, vagy csak lassan változó jelek esetén lehetőség van arra, hogy a jeleket szolgáltató csatornákra egymás után rákapcsolódva a jelekből csak meghatározott időközönként vegyünk mintát és csak ezeket regisztráljuk. Gyorsan változó jelek esetén ezt a mintavételi időközt erősen le kell csökkenteni, így egy jel esetén igen rövid idő marad a mintavételre, a regisztrálásra, stb. Ez a probléma addig volt nehezen leküzdhető, amíg a csatornák váltása (a „pollozás”) csak mechanikus berendezéssel volt végrehajtható; manapság a modern csatornaváltók elektronikusan váltják a csatornákat, így a mintavételi időközt erősen le lehet csökkenteni.

A szilárdsági mérésekre említett példát vázlatosan a 78. ábrán láthatunk:



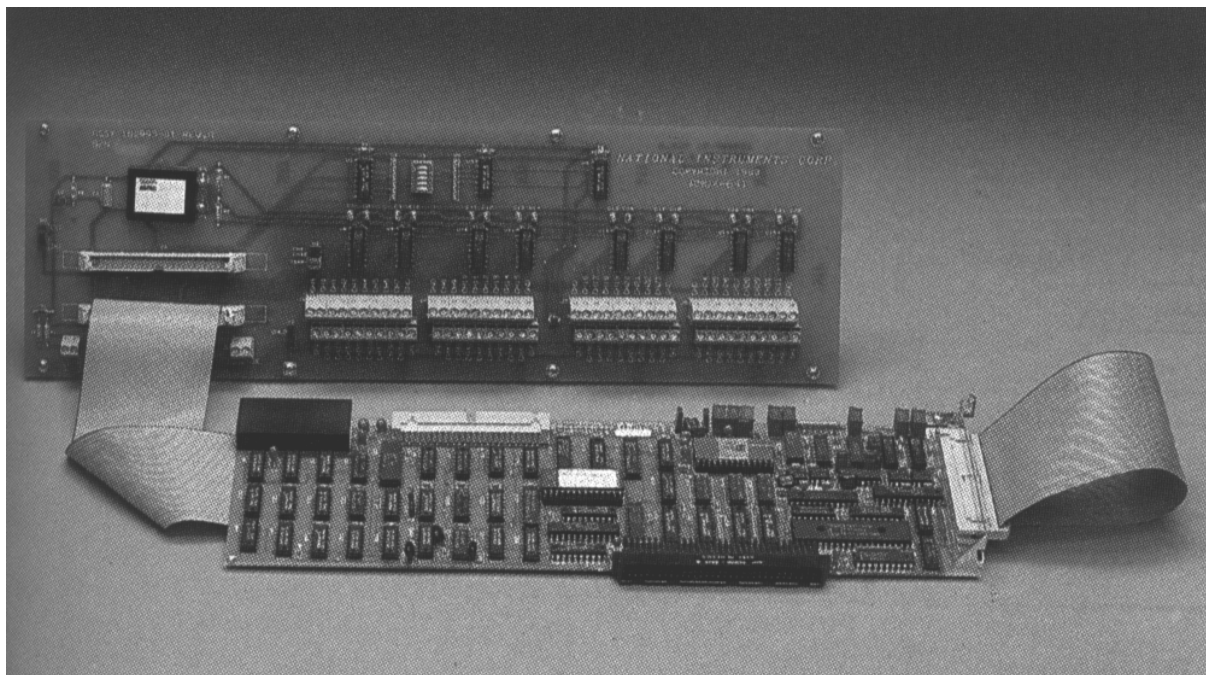
78. ábra

Az ábra az előbbi fejezetben tárgyalt problémának kibővített változata,  $n$  db nyúlásmérő bélyeggel és egyetlen hőkompenzáló bélyeggel végrehajtott szilárdsági mérés esetén. Amint azt a Mérőerősítők c. fejezetben bemutattuk, a mai mérőerősítők a Wheatstone-híd felét beépítve is tartalmazzák (a két db  $R_C$  elenállást), emellett építettek olyan mérőerősítő-típust is, amelynél lehetőség volt arra, hogy több, akár 100 db nyúlásmérő bélyeget is beköthessenek. Az ábrán feltüntetett  $n$  db nyúlásmérő bélyegnek közös az  $R_h$  hőkompenzáló bélyege.

A mérőerősítő össze van építve egy átkapcsoló multiplexerrel, amely az  $n$  db mérőbélyeg mindegyikét ciklikusan, egymás után rákapcsolja a mérőerősítőre, és az végrehajtja a mérést.

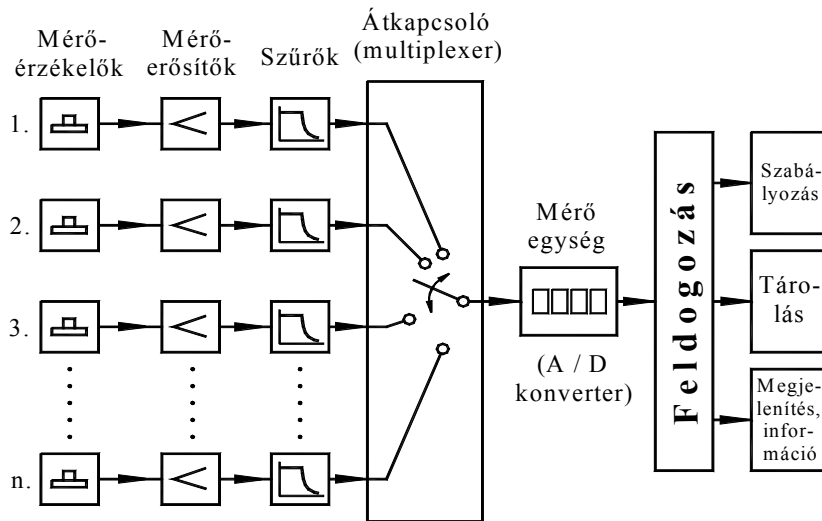
Az ábra nem tünteti fel a mért eredmények további útját, a tárolást, értékelést, stb. A mérés, vagyis az  $U_{ki}$  feszültség megmérése a mérőerősítőbe beépített félhíddal történik, amely az **A**, a **B** és a **D** pontokon át kapcsolódik az átkapcsoló multiplexerhez, tehát a nyúlásmérő bélyegek által alkotott félhíddal. A nyúlásmérő bélyegek váltásának átkapcsolási ciklusa (a „lekérdezési” ciklus) periódusidejének eléggé rövidnek kell lennie ahhoz, hogy az egyes bélyegek mérési jeléből a két, egymás utáni mintavételezés közötti idő alatt a mérési jelek ne változzanak alapvetően, meg tudják őrizni alapvető tulajdonságaikat, de a periódusidőnek eléggé hosszúnak is kell lennie ahhoz, hogy a mérőerősítő a mérést végrehajthassa, beleértve azokat a járulékos műveleteket is (pl. a minták tárolása, stb.), amelyek szükségesek a mérési adatok teljes feldolgozásához. Néhány évtizeddel ezelőtt a mechanikus szerkezetű *Hottinger UG 50/2* típusú átkapcsoló még 3 ~ 5 másodpercenként volt csak képes az átkapcsolást végrehajtani, a mai, PC-vel vezérelt mérőerősítők (pl. a Hottinger cég által gyártott *SPIDER 8*) már kHz nagyságrendű frekvenciával is képes a mérési adatgyűjtést végrehajtani.

Az analóg mérési jelek átkapcsolását végző multiplexert (mérés-pont-váltónak is nevezik) külön is gyártják, a 79. ábrán a *National Instruments (USA)* cég által gyártott *AMUX-64 T* típusú analóg multiplexert mutatja be, PC-k számára készített kártya formájában.



79. ábra

Az általános célú mérési-adatgyűjtő rendszerek vázlatát a 80. ábrán láthatjuk.



80. ábra

Az ábrán látható adatgyűjtő rendszer „n” darab, egymástól független mérőhelyet tartalmaz. A rendszer elemei mind az előzőekben bemutatott berendezések, mindegyik mérőhely és az átkapcsoló multiplexer között külön adatgyűjtő vonal van kiépítve. Egy-egy vonalban a mérő-érzékelőkön, mérőerősítőkön, stb. kívül természetesen más berendezések is használhatók, illetve bizonyos elemek elhagyhatók. A multiplexer ciklikusan, bizonyos időre rákapcsolja az egyes mérőágakat az A/D konverteren át a feladattól függően a szabályozás, a tárolás, stb. feladatát végző egységre. Egyszerűbb adatgyűjtő berendezésre példa lehet egy dízelmozdony teljesítményszabályozása, ahol a szabályozásnak a mozdony terhelése, a dízelmotor töltése, a főgenerátor gerjesztése, stb. között kell egyensúlyt tartania, tehát e mennyiségek érzékelőit, stb. kell ciklikusan a szabályozó központi egységére kapcsolni. Bonyolultabb adatgyűjtő rendszerre példa lehet akár egy teljes erőmű szabályozása.

A bemutatott vázlat alapján felépített adatgyűjtő rendszereknek fontos tulajdonsága, hogy noha az érzékelők általában analóg mérési jeleket szolgáltatnak, a multiplexer és az A/D konverter után már csak diszkrét számértékek állnak rendelkezésre a folytonos mérési jelekből. Ez meghatározza a multiplexertől és a konvertertől megkívánt működési sebességet, hogy az A/D konverzió következtében csak meghatározott időpontokhoz tartozó diszkrét számértékek sora elegendő pontossággal képviselje az eredeti, folytonos mérési jelet.

A digitális adatgyűjtők egy korszerű képviselője a HBM cég által forgalmazott **Spider8** típusú készülék, amelyről a Járműmérés Labor c. jegyzetben lehet részletesebb leírást találni.