

# A folyamatműszerezés érzékelői

## Érzékelők mérőkörei - 1.

Dr. Fock Károly

A cikksorozat a folyamatműszerezés érzékelőinek témakörén belül az érzékelők villamos kimeneti jelének közvetlen feldolgozására kialakított áramkörök bemutatásával és tulajdonságainak ismertetésével foglalkozik. Az első részben elkezdjük az impedanciakimenetű érzékelők közül az ellenállásos érzékelők mérőköreiből a tárgyalását, amelynek során számos olyan megoldással és kialakítással is találkozunk, amelyek sikerrel alkalmazhatók a kapacitív és induktív érzékelőknél is.

### Impedanciakimenetű érzékelők mérőkörei

A mérendő fizikai mennyiség okozta ellenállás-változás méréséhez első feladatként az impedancia-feszültség vagy az impedancia-áramátalakítást kell megoldani, de ezzel együtt adódik egy sor egyéb követelmény is, amelyek teljesítése mérés-technikai szempontból egyaránt fontos. Ezek közé tartozik:

- azon hibák csökkentése vagy teljes megszüntetése, amelyeket az érzékelőt a mérőkörrel összekötő vezeték okoz,
- egy olyan feszültség- vagy áramváltozás létrehozása, ami arányos az abszolút vagy relatív ellenállás-változással,
- az érzékelők földelése,
- a mérőkörök kimenő ellenállásának csökkentése,
- azonos fázisú jelelnyomás megvalósítása.

Természetesen előfordulhatnak a fentiekén túlmenő más, speciális követelmények is, amelyek elemzését esetenként vizsgálni kell.

### Kiegyenlített hídkapcsolások

Az impedanciakimenetű érzékelők egyik leggyakrabban alkalmazott mérőköre a kiegyenlített hídkapcsolás, amely lehetőséget teremt elsősorban arra, hogy az impedanciaelemet befolyásoló bemenő mennyiséget feszültség- vagy áramjellel alakítsuk át.

Ebben a részben azt vizsgáljuk meg részletesen, hogy milyen kapcsolat van az impedancia megváltozása és a hídkapcsolás kimenőjele között. A vizsgálatot az ellenállásos átalakítókra végezzük el, de ahol szükséges, kitérünk az induktív vagy a kapacitív érzékelőket tartalmazó hídkapcsolások speciális tulajdonságaira is.

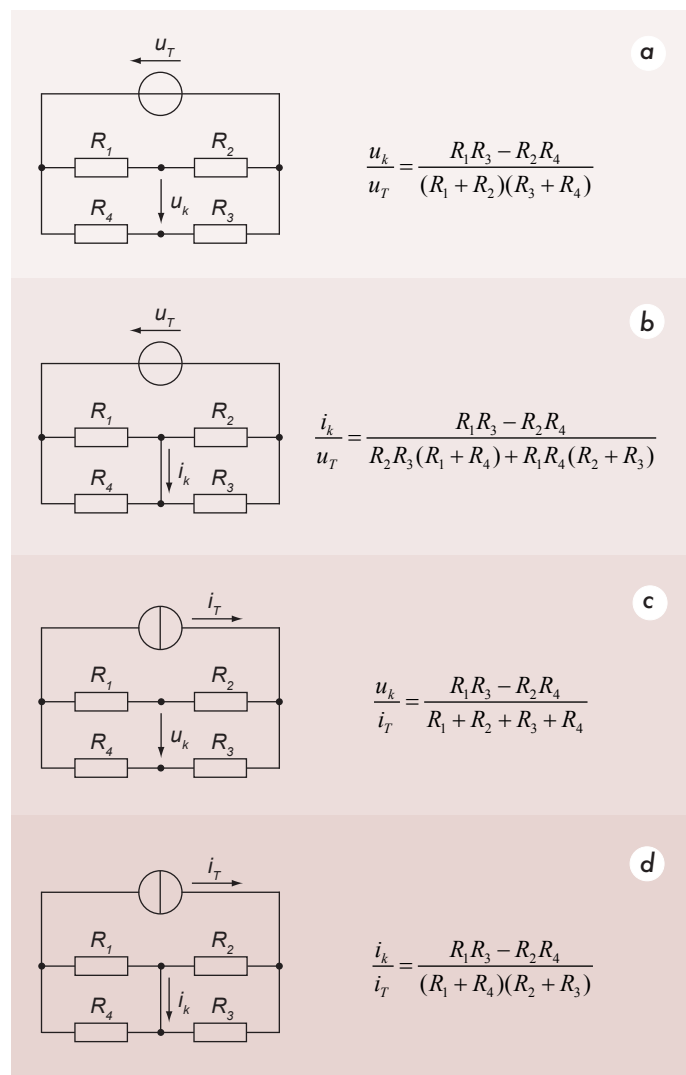
A kiegyenlített hídkapcsolásokat a táplálás módja szerint állandó feszültségű és állandó áramú csoportra osztjuk, a kimenetükön pedig üresjárású feszültséget vagy rövidzárási áramot mérhetünk. A ritkábban használt, véges ellenállással terhelt hídkapcsolással külön fejezetben foglalkozunk.

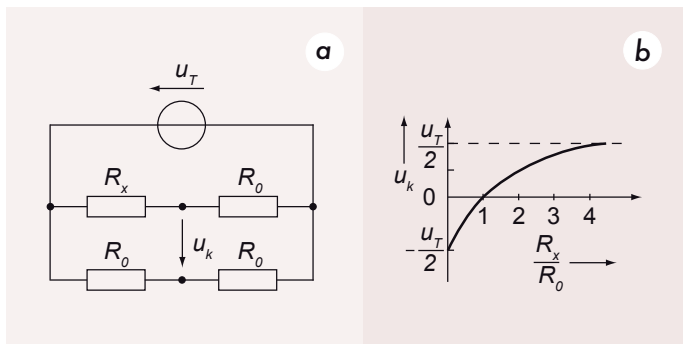
A fentiek alapján („a táplálás módja – kimenőjel” sorrend szerint) megkülönböztetünk

- állandó feszültséggel táplált feszültségkimenetű (**u – u** üzemmód),
- állandó feszültséggel táplált áramkimenetű (**u – i** üzemmód),
- állandó árammal táplált feszültségkimenetű (**i – u** üzemmód) és
- állandó árammal táplált áramkimenetű hídkapcsolásokat (**i – i** üzemmód).

Az egyes típusokat az 1. ábra foglalja össze a vonatkozó átviteli tulajdonságok feltüntetésével. A mérés során a hídkapcsolások-

1. ábra Kiegyenlített hídkapcsolások üzemmódjai
- Állandó feszültséggel táplált, feszültségkimenetű (**u – u**) híd
  - Állandó feszültséggel táplált, áramkimenetű (**u – i**) híd
  - Állandó árammal táplált, feszültségkimenetű (**i – u**) híd
  - Állandó árammal táplált, áramkimenetű (**i – i**) híd





2. a ábra Állandó feszültséggel táplált, feszültségkimenetű ( $u - u$ ), kiegyenlíthetlen hídkapcsolás 1 db érzékelővel

Hídkapcsolás

2. b ábra Kimenőfeszültség az  $R_x/R_0$  relatív ellenállás-változás függvényében

ban a mérendő mennyiségek hatására egy vagy több ellenállás értéke változhat meg. Eltekintve az érzékelők statikus karakterisztikájának tulajdonságaitól, megállapítható, hogy bármelyik üzemmódot választjuk is, a híd kimenőjele bonyolult, nemlineáris kapcsolatban van a kijelölt ellenállással. Első rátekintésre megállapítható tehát a kiegyenlíthetlen hídkapcsolásoknak az a hátrányos tulajdonsága, hogy rontja a mérési karakterisztika linearitását.

Példaként tekintsük az  $u - u$  üzemmódú hídkapcsolást, amelyben az  $R_1$  ellenállás helyére tegyük be a mérendő mennyiségtől függő  $R_x$  ellenállást. A híd többi eleme legyen azonosan  $R_0$  értékű (2. a ábra).

A híd üresjárású kimeneti feszültsége az 1. a ábra összefüggéseinek alapján (ha  $R_1=R_x$  és  $R_2=R_3=R_4=R_0$ )

1. táblázat Kiegyenlíthetlen hídkapcsolások kisjelű átviteli tulajdonságai ellenállás-kimenetű érzékelőkkel

üzemmód	$u-u$	$i-u$	$u-i$	$i-i$
a	 $u_k \approx \frac{u_T}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$u_k \approx \frac{i_T}{4} \Delta R$	$i_k \approx \frac{u_T}{4R_0} \frac{\Delta R}{R_0}$	$i_k \approx \frac{i_T}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$
b	 $u_k \approx -\frac{u_T}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$u_k \approx -\frac{i_T}{4} \Delta R$	$i_k \approx -\frac{u_T}{4R_0} \frac{\Delta R}{R_0}$	$i_k \approx -\frac{i_T}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$
c	 $u_k \approx -\frac{u_T}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$u_k \approx -\frac{i_T}{4} \Delta R$	$i_k \approx -\frac{u_T}{4R_0} \frac{\Delta R}{R_0}$	$i_k \approx -\frac{i_T}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$
d	 $u_k \approx \frac{u_T}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$	$u_k = \frac{i_T}{2} \Delta R$	$i_k \approx \frac{u_T}{2R_0} \frac{\Delta R}{R_0}$	$i_k \approx \frac{i_T}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$
e	 $u_k \approx \frac{u_T}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$	$u_k = \frac{i_T}{2} \Delta R$	$i_k \approx \frac{u_T}{2R_0} \frac{\Delta R}{R_0}$	$i_k = \frac{i_T}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$
f	 $u_k = \frac{u_T}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$	$u_k = \frac{i_T}{2} \Delta R$	$i_k \approx \frac{u_T}{2R_0} \frac{\Delta R}{R_0}$	$i_k \approx \frac{i_T}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$
g	 $u_k \approx -\frac{u_T}{4} \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2$	$u_k = -\frac{i_T}{4} \frac{\Delta R}{R_0} \Delta R$	$i_k \approx -\frac{u_T}{4R_0} \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2$	$i_k \approx \frac{i_T}{4} \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2$
h	 $u_k = u_T \frac{\Delta R}{R_0}$	$u_k = i_T \Delta R$	$i_k \approx \frac{u_T}{R_0} \frac{\Delta R}{R_0}$	$i_k = i_T \frac{\Delta R}{R_0}$

$$u_k = \frac{u_T}{2} \frac{R_x - R_0}{R_x + R_0}$$

alakú, amelyek jellegzetes pontjai:

$$R_x = 0 \text{ esetén } u_k = -\frac{u_T}{2},$$

$$R_x = R_0 \text{ esetén } u_k = 0,$$

$$R_x = \infty \text{ esetén } u_k = +\frac{u_T}{2}.$$

Látható (2. b ábra), hogy az ellenállás nagymértékű megváltozása – még lineáris statikus karakterisztika esetén is (ami pl. a Pt-ellenálláshőmérőknél közelítően igaz) – a hídkapcsolás kimenetén igen jelentős linearitási hibát okoz. Az 1. ábra egyenleteit figyelembe véve hasonlóan kedvezőtlen eredményre jutunk, ha a többi üzemmódot választjuk.

Az erős nemlinearitás mérés technikailag kedvezőtlen hatásai elhanyagolhatóak, ha az érzékelő  $R_x$  ellenállásának a megváltozása kicsi az  $R_0$  alapellenálláshoz képest. (A gyakorlatban sok ilyen érzékelő van, leggyakoribb fajtája a nyúlásmérő-ellenállás.)

Az 1. táblázat az 1. ábra összefüggéseinek a felhasználásával összefoglalja a kimenőjeleket azzal a feltételezéssel, hogy az érzékelő  $R_x = R_0 + \Delta R$  ellenállására teljesül a  $\Delta R/R_0 \ll 1$  feltétel. A függőleges oszlopok az üzemmódokat, a vízszintesek sorok pedig az érzékelők elhelyezkedését különböztetik meg egymástól.

Összehasonlítási alapként tekintsük az a sort, ahol az  $R_1$  ellenállás helyére egy  $R_x = R_0 + \Delta R$  karakterisztikájú érzékelő

kerül. (A mérendő jel hatására az érzékelő ellenállása  $\Delta R$  értékkel megnő.) Ezt szimbolizálja a hídkapcsolások oszlopában az ellenállás szimbólumában elhelyezett + jel. A nem jelölt ellenállások  $R_0$  értékűek. (A későbbiekben a – jel a  $\Delta R$  csökkenő ellenállás-változását jelöli.)

Vizsgálatunk célja annak a megállapítása, hogy a híd kimenőjele hogyan függ az ellenállás relatív vagy abszolút megváltozásától.

Érdeemes megjegyezni, hogy ebben az esetben a kimenőjel csak közelítően függ lineárisan az ellenállás-változástól, és a pozitív előjelű ellenállás-változás pozitív előjelű kimenőjel-változást okoz. A további elemzéshez az **a** sor kimenőjeleinek érzékenységet tekintjük egységnyinek.

Ha az érzékelőt a **b** sor szerint az  $R_2$  ellenállás helyére helyezzük át, akkor a híd kimenőjel-változásának csak az előjele módosul.

A kimenőjel változásának előjelét módosíthatjuk úgy is, hogy az  $R_1$  ellenállás helyébe  $R_x=R_0-\Delta R$  karakterisztikájú érzékelőt teszünk (**c** sor).

Ha a hídkapcsolásba 2 db érzékelőt helyezünk el, akkor megkétszerezhetjük az érzékenységet (**d**, **e** és **f** sorok). Attól függően, hogy az érzékelők jelváltozásai milyenek, valamint a híd milyen üzemmódban dolgozik, a linearitás lehet közelítő vagy pontos. Kiemelt jelentősége az **f** sorban az **u – u** és az **i – u** kapcsolásoknak van. Nemcsak azért, mert a linearitás megmarad, hanem azért is, mert a két ellentétes irányban változó érzékelő a szomszédos hídágakba, az  $R_1$  és  $R_2$  helyére került. Ennek a későbbiekben a zavarjel kompenzálásában lesz jelentősége. Ezen előnyös tulajdonságok miatt alkalmazzák ezt az elrendezést differenciálkialakítású érzékelőknél.

Természetesen az érzékelők „ügyetlen” elhelyezése nemhogy érzékenységnövekedést nem eredményez, hanem még igen nagy linearitási hibát is okoz. A **g** sorban látható elrendezésben az érzékelők mindkét hídágat azonos irányban hangolják el, ezért első közelítésben a kimenő feszültségre változást nem várunk. A  $(\Delta R/R_0)^2$ -értékű tag a számlálóban azonban megmarad, és emiatt négyzetes, kis érzékenységu karakterisztikát kapunk.

A megfelelően kiválasztott érzékelők számának növelésével és helyes elhelyezésével minden szempontból jó megoldást kínál a **h** sor, ahol 4 db érzékelővel négyszeres érzékenység érhető el tökéletes linearitásnál (ha nem az **u – i** üzemmódot választjuk).

Összefoglalva az előbbieket megállapítható, hogy az 1. táblázatban feltüntetett 32-féle lehetőség közül a gyakorlatban csak nagyon korlátozott azon konfigurációk száma, amelyek az egyéb megszorító követelményeket is kielégítve a gyakorlatban előnyösen alkalmazhatók és elterjedtek. Ezeket az 1. táblázatban kiemeltük.

Érdeemes megjegyezni, hogy a híd kimenőjele az **u – u** és az **i – i** üzemmódban a  $\Delta R/R_0$  relatív, míg az **i – u** esetben a  $\Delta R$  abszolút ellenállás-változástól függ. Az első eset mérés technikai szempontból akkor kedvező, ha a hídkapcsolást azonos típusú, de különböző alap-ellenállású érzékelőhöz is használni akarjuk. Ilyen esettel találkozunk pl. nyúlásmérő-ellenállások alkalmazásánál. Az **i – u** üzemmód elsősorban félvezető alapanyagú érzékelőknél előnyös, ahol a nagy alapellenállás mellett már kis bemenőjel is nagy feszültségváltozást eredményezhet, vagyis nagy érzékenységet érhetünk el.

Az elemzésből az is következik, hogy a hídkapcsolásba kötött érzékelőknek célszerűen differenciálkialakításúnak kell lenniük. Kis jelváltozások esetén (pl. nyúlásmérő-ellenállásoknál) kifejezetten előnyös a 4-érzékelős differenciálkialakítás. Az 1. táblázatból az is látható, hogy az **u – u** és az **i – u** üzemmód nyújtja a legtöbb használható megoldást. Ha a linearitási megszorítások nem túlságosan lényegesek, akkor természetesen mind a négyfaj-

ta üzemmód használható, ezek egymással közel egyenértékűek, mindig az aktuális szempontok döntenek el a kiválasztást.

A gyakorlatban elterjedt terminológiával a hídkapcsolások elnevezése az érzékelők száma szerint lehet:

- *negyed híd*, ha az érzékelők száma: 1 (az 1. táblázat **a**, **b** és **c** sora),
- *fél híd*, ha az érzékelők száma: 2 (jelentőségénél fogva elsősorban az 1. táblázat **f** sora) és
- *teljes híd*, ha az érzékelők száma: 4 (az 1. táblázat **h** sora).

### Ellenállás-kimenetű érzékelők váltakozó feszültségű (váltakozó áramú) táplálása

Ellenállásos átalakítók kiegyenlített hídkapcsolásokban egyaránt használhatók egyenfeszültségű (egyenáramú), ill. váltakozó feszültségű (váltakozó áramú) táplálással is. A dinamikus mérés, ill. jelfeldolgozás szempontjából azonban lényeges különbség van az egyen- és a váltakozó táplálási mód között.

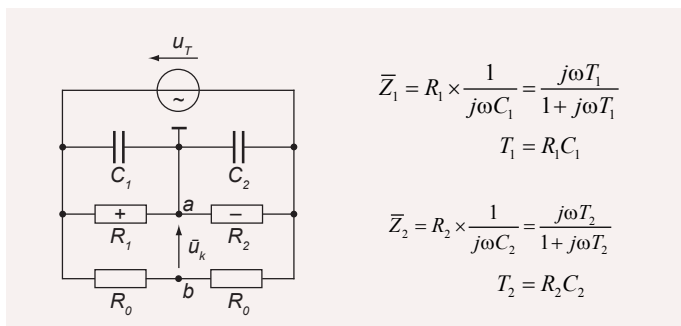
A dinamikus mérés analizálásához tételezzük fel, hogy az  $R_x$  ellenállás torzításmentesen követi a mérendő jel változását. A valóságban ez nincs mindig így. Pl. az ellenállás-hőmérsékben a termikus tulajdonságok (termikus ellenállás és termikus kapacitás) miatt a hőmérséklet-változás és az ellenállás-változás időfüggvényei között lényeges eltérés lehet. Időben állandó, stabilizált feszültségforrás vagy áramforrás felhasználásával a kimenőjel az 1. táblázat összefüggései szerint – ha a híd lineárisnak tekinthető – követi a mérendő jel változását. Természetesen biztosítani kell, hogy a villamos jelfeldolgozás jelátviteli tulajdonságai is megfelelőek legyenek. Ez a gyakorlatban általában teljesül. Nagy jelváltozások esetén a híd nemlineáris rendszer, amire a fenti megállapítások nem érvényesek, ilyenkor harmonikus torzítások és középérték-eltolódások léphetnek fel.

Váltakozó feszültségű (váltakozó áramú) táplálás esetén csak azt az esetet vizsgáljuk, amikor a hídkapcsolás a jelátvitel szempontjából lineárisnak tekinthető. További feltételezés, hogy a táplálás frekvenciája lényegesen meghaladja a mérendő jel változási frekvenciáját. Ilyen esetben az amplitúdómoduláció esetével van dolgunk, amelynek jelfeldolgozási kérdéseit a későbbiekben részletesen tárgyaljuk (vivőfrekvenciás hídkapcsolások).

Bár első közelítésben indokolatlannak tűnik, mégis az ellenállásos érzékelőket gyakran alkalmazzák váltakozó feszültségű (ritkábban váltakozó áramú) táplálású hídkapcsolásokban. Erre – mint a későbbiekben látni fogjuk – bizonyos zavarjelek kiküszöbölése vagy csökkentése miatt van szükség (hőmérséklet-függés, termofeszültségek, környezetből vagy a hálózathoz érkező harmonikus vagy impulzus alakú, villamos zavaró jelek). Az induktív vagy kapacitív érzékelők mérőköréinél a váltakozó feszültségű vagy áramú választás természetes követelmény.

A váltakozó feszültségű vagy váltakozó áramú táplálásnak a jelfeldolgozás szempontjából érdekes jellemzőit ellenállásos érzékelők esetében is fontos megvizsgálni, mivel ilyenkor elkerülhetetlen, hogy az érzékelővel ne kapcsolódjanak párhuzamosan szórt kapacitások, és ettől kezdve a jelátviteli tulajdonságok frekvenciafüggővé válnak. A szórt kapacitások eredetét és nagyságát csak konkrét példák és elrendezések esetében lehet felderíteni és analizálni.

Az összefüggések könnyebb áttekinthetősége érdekében tételezzük fel, hogy az érzékelő differenciálkialakítású, és a 3. ábra szerint egy fél hídhoz kötötték be. (A fél híd elnevezés arra is utal, hogy a híd kiegészítő  $R_3$  és  $R_4$  jelű elemei (1. ábra) konstans  $R_0$  értékű ellenállások). A hidat állandó amplitúdójú  $u_1$  váltakozó feszültséggel tápláljuk, és mérjük az **a – b** pontok között az  $\bar{u}_k$  üresjárású kimenőfeszültséget. A  $C_1$  és  $C_2$  jelű kapacitások jelentik az érzékelőkkel párhuzamosan kapcsolódó szórt kapacitá-



3. ábra Állandó váltakozó feszültséggel táplált, feszültségkimenetű ( $u - u$ ), kiegyenlített hídkapcsolás differenciálkialakítású, ellenállásos érzékélővel

sokat. Korábban nem volt jelentősége, de most már fontos – és technikailag realizálható is –, hogy a híd kimenetének az  $a$  jelű pontja földelt.

A 3. ábrán feltüntettük a fél híd mérőágaiba kötött  $\bar{Z}_1$  és  $\bar{Z}_2$  komplex impedanciákat. A híd  $\bar{u}_k$  üresjárású kimeneti feszültsége az

$$\bar{u}_k = u_T \frac{\bar{Z}_1 - \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2}$$

összefüggés felhasználásával – elemi algebrai átalakítások után – az

$$\bar{u}_k = u_T \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \frac{1}{1 + j\omega \frac{2T_1 T_2}{T_1 + T_2}}$$

alakra hozható. A  $T_1$  és  $T_2$  időállandó kifejezése a 3. ábrán látható. Az eredményből leolvasható néhány igen lényeges következtetés:

- a híd  $\bar{u}_k$  kimenőfeszültsége és az  $u_T$  tápfeszültsége között frekvenciafüggő fázistolás van,
- a híd kiegyenlítéséhez nem elegendő az  $R_1 = R_2$  feltétel biztosítása, ahhoz a  $T_1$  és  $T_2$  időállandók egyenlőségére van szükség, vagyis a hidat nemcsak az ellenállásokra, hanem a kapacitásokra is ki kell egyenlíteni. Ezzel egyenértékű megoldás az, ha nullázáskor a kiegyenlítést úgy valósítják meg, hogy az  $\bar{u}_k$  feszültséggel szembekapcsolnak egy azonos amplitúdójú, de ellentétes fázisú feszültséget. (A műszaki megvalósítások során gyakran alkalmazzák ezt a megoldást.)
- A fázistolást a tápfeszültség frekvenciáján kell vizsgálni. Visszatérve az ellenállás-változás időfüggvényeinek a problémaköréhez, megállapítható, hogy
- időben állandó ellenállás (méréndő mennyiség) a híd kimenetén a tápfeszültség (vagy áram) frekvenciájával azonos frekvenciájú, a méréndő mennyiségtől függő amplitúdójú feszültség,
- dinamikus mérés esetén amplitúdómoduláció jön létre, a méréndő jel időfüggvénye csak speciális jelfeldolgozással (fázisérzékeny egyenirányítás, aluláteresztő szűrő és vivőfrekvenciás erősítő alkalmazása) állítható vissza.

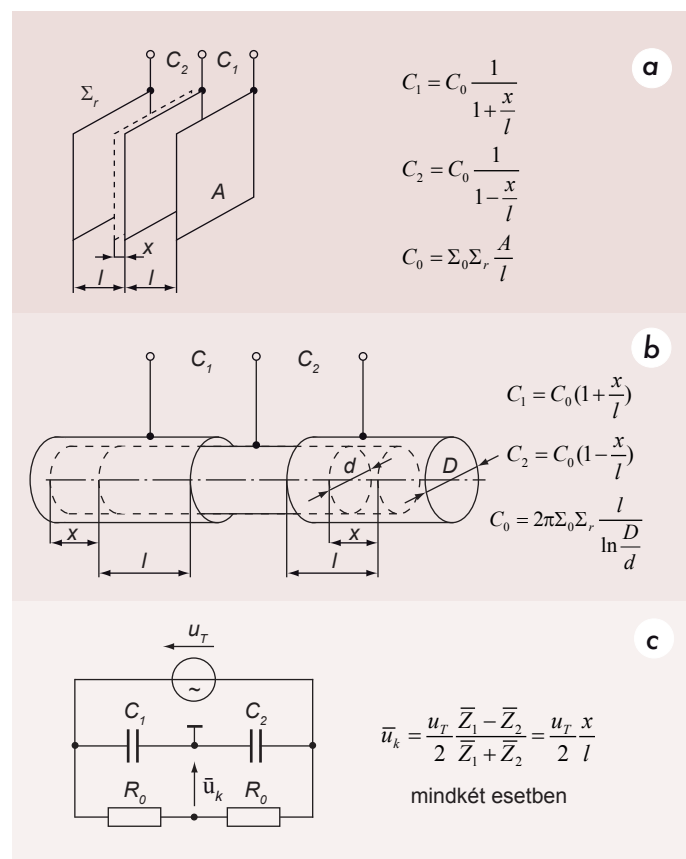
**Kapacitív érzékelők kiegyenlített hídkapcsolásban**

Érdeemes megjegyezni azokat az érdekességeket, amelyek a kapacitív és induktív érzékelők kiegyenlített hídkapcsolásai tartogatnak számunkra. Ebben a fejezetben nem cél ezen érzékelők mérés-technikai tulajdonságainak részletes elemzése, az egyes típusok ismertetése csak illusztratív jellegű, és a hídkapcsolások tulajdonságainak a jobb és könnyebb megértését szolgálja. Elsőként vizsgáljuk meg a *kapacitív érzékelőket*.

A kapacitív érzékelők közül most csak a 4. ábrán látható, elmozdulás mérésére alkalmas, változó elektródátávolságú

(4. a ábra) és változó felületű (4. b ábra), differenciálkialakítású érzékelőket vizsgáljuk. Az elvi szerkezeti vázlatok feltételezik a homogén (4. a ábra), ill. a radiálisan homogén (4. b ábra) vilamos teret, vagyis nem veszik figyelembe a valóságban létező véges mechanikai méreteket, amelyek esetenként a statikus karakterisztika lényeges, akár 3-4%-os linearitási, ill. alakhibáját is okozhatják.

A 4. c ábrán az érzékelők  $u - u$  típusú, kiegyenlített hídkapcsolása látható. Az üresjárású kimenőfeszültség mindkét esetben – tehát akár hiperbolikus, akár lineáris statikus karakterisztika esetén és a jelváltozás nagyságától függetlenül – azonos, és az elmozdulás lineáris függvénye, továbbá nincs fázistolás az  $u_T$  tápfeszültség és az  $\bar{u}_k$  kimenőfeszültség között.



4. ábra Elmozdulás mérésére alkalmas, differenciálkialakítású, kapacitív érzékelők elvi szerkezeti felépítése és hídkapcsolású mérőköre

- a) Változó elektródátávolságú kialakítás
- b) Változó felületű kialakítás
- c)  $u - u$  üzemmódú, kiegyenlített hídkapcsolás

Mindez természetesen a modellekben feltételezett elméleti szerkezeti vázlatú érzékelőkre vonatkozik. A valóságban a véges geometriai méretek mellett a mérőkapacitásokkal párhuzamosan kapcsolódó szórt kapacitásokat is számításba kell venni, amelyeknek érzékenységsökkentő és linearitási hibát növelő hatása van.

**IRODALOM:**

[1] E. Schrüfer: Elektrische Meßtechnik, 6. erweiterte Auflage. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1995  
 [2] S. Gutnikov - A. Lenk - U. Mende: Sensorelektronik (Primerelektronik von Meßumformer). VEB Verlag Technik, Berlin, 1984

(Folytatjuk!)