

A folyamatműszerezés érzékelői

Érzékelők mérőkörei - 4.

Dr. Fock Károly

Az érzékelők mérőköreiből ismertetését az ellenállás-hőmérőkkel folytatjuk az áramgenerátoros táplálást megvalósító kvázihíd-alapkapcsolások tulajdonságainak az összefoglalásával, majd rátérünk a mérési karakterisztika linearizálási lehetőségeire. Az ellenállás-kimenetű érzékelők mérőköreiből az ismertetését a piezorezisztív érzékelők mérőköreiből speciális tulajdonságaival zárjuk.

Ellenállás-kimenetű érzékelők áramgenerátoros táplálása

A fejezetcímekben jelölt feladatot a méréstechnikai gyakorlatban igen elterjedten használt ellenállás-hőmérők felhasználása jelenti.

Mint az előzőekben láttuk, az ellenállás-hőmérők kiegyenlített hídkapcsolású mérőköreiből méréstechnikai szempontból meglehetősen kedvezőtlenek, mivel a nagymértékű ΔR ellenállás-változás és a híd kimenőjele közötti kapcsolat erősen nemlineáris. Ennek az az oka, hogy akár állandó feszültségű, akár állandó áramú tápforrást is használunk, működés közben az érzékelő ellenállásán folyó áram nem lesz konstans. A megoldás módja tehát az, hogy olyan mérőkapcsolást kell választani, ami biztosítja az érzékelő állandó áramú táplálását, és kimenetén az ellenállás-változással arányos feszültségváltozást hoz létre.

További követelmény a párhuzamos struktúra megvalósítása, ami jelen esetben az ellenállás-hőmérőnek a mérési tartomány elején lévő R_{min} ellenállás értékéből származó nullponteltolás kiegyenlítését jelenti.

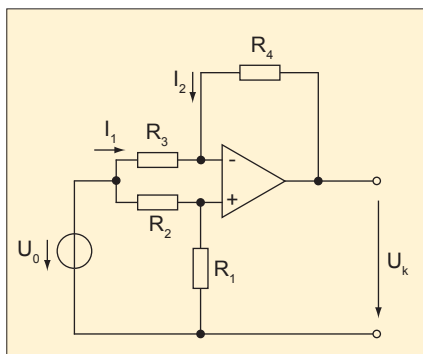
Ezek a mérőkörök műveleti erősítők felhasználását igénylik, és a szakirodalom ezeket „kvázihidaknak” hívja. Az elnevezés onnan származik, hogy ezek a mérőkörök hasonló átviteli tulajdonsággal rendelkeznek, mint a normál hídkapcsolások, de a tipikus hídstruktúra hiányzik.

A továbbiakban a teljesség igénye nélkül ismertetünk néhány, az ellenállás-különbség mérésére alkalmas kvázihíd-típust, amelyeknél megvizsgáljuk a vezeték-ellenállás hatásának a kiküszöbölhetőségét is.

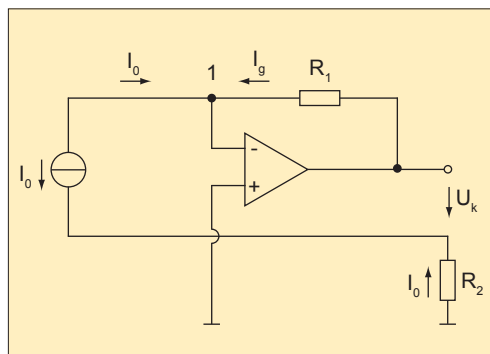
Kvázihíd-alapkapcsolások

Földelt, állandó U_0 feszültséggel táplált mérőkör látható az 1. ábrán. Abból a feltételből kiindulva, hogy a műveleti erősítő invertáló pontjába befolyó áramok összege zérus (az erősítőbe

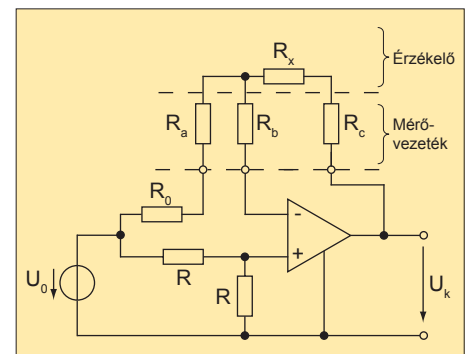
1. ábra Állandó áramú ellenálláskülönbség-mérés állandó feszültséggel táplált kvázihídkapcsolásban



2. ábra Állandó áramú ellenálláskülönbség-mérés állandó árammal táplált kvázihídkapcsolásban



3. ábra Ellenállásos érzékelő háromvezetékes bekötése állandó feszültséggel táplált kvázihídkapcsolásban



befolyó áram elhanyagolható), könnyen levezethető, hogy híd U_k kimenőfeszültségét az

$$U_k = U_0 \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_3 (R_1 + R_2)}$$

összefüggéssel számíthatjuk ki, és látható, hogy ez a feszültség az R_4 lineáris függvénye. Feltételezve pl. az $R_4 = R_0 + \Delta R$ és az $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ ellenállásértékeket, az U_k kimenőfeszültségre az egyszerű

$$U_k = -\frac{U_0}{2R_0} \Delta R$$

egyenletet kapjuk, vagyis a kvázihídkapcsolás kimenőfeszültsége a relatív ellenállás-változás lineáris függvénye. Az állandó áramú táplálást az biztosította, hogy az állandó U_0 tápfeszültségből az erősítő invertáló pontjába befolyó I_1 áram

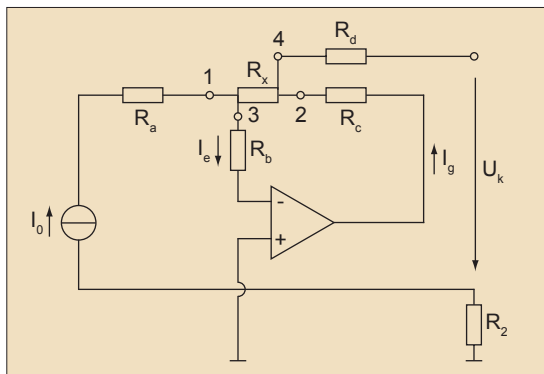
$$I_1 = \frac{U_0}{R_3} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

állandó, emiatt az I_2 áramnak is állandónak kell lennie.

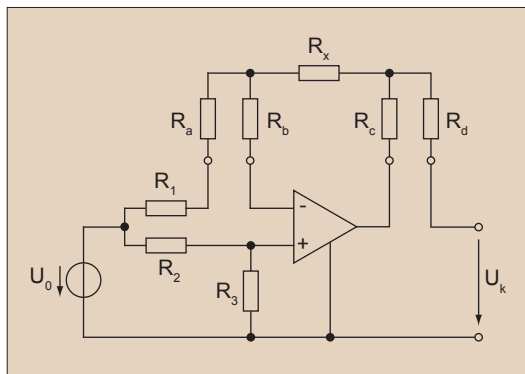
A 2. ábrán látható, földfüggetlen áramgenerátorral táplált kvázihídkapcsolásban az I_g mérőáramnak az I_0 árammal kell megegyeznie, az erősítő invertáló bemenete ebben a mérőkörben virtuális földpotenciálon van. Az U_k kimenőfeszültséget most a $-I_0 R_2$ nagyságú potenciáltól kell mérni. Könnyen kiszámítható, hogy $U_k = -I_0 (R_1 - R_2)$, vagyis a kimenőfeszültség ismét az ellenállás-különbséggel arányos.

Vezeték-ellenállások hatásának kiküszöbölése

A továbbiakban az érzékelőt a mérőkörrel összekötő vezetékeket az R_a , R_b , R_c és R_d jelű vezeték-ellenállások képviselik. Háromvezetékes bekötés esetén a 3. ábra szerint a vezeték-ellenállás hatása azáltal csökkenthető, hogy az R_b a műveleti erősítő nagy-



4. ábra Ellenállásos érzékelő négyvezetékes bekötése állandó árammal táplált kvázi-hídkapcsolásban



5. ábra Ellenállásos érzékelő négyvezetékes bekötése állandó feszültséggel táplált kvázi-hídkapcsolásban

ellenállású bemenetével, R_a az R_0 -val és R_c pedig az R_x ellenállással kapcsolódik sorba. Ha az érzékelő ellenállása $R_x = R_0 + \Delta R$ szerint változik, akkor a híd kimenetére közelítőleg az

$$\frac{U_k}{U_0} \approx -\frac{R_x + R_c}{R_0 + R_a} + \frac{1}{2} \left(\frac{R_x + R_c}{R_0 + R_a} + 1 \right) = \frac{1 - \Delta R + R_a - R_c}{2} \frac{R_0 + R_a}{R_0 + R_a}$$

kifejezést kapjuk, amelyből látható, hogy $R_a = R_c$ esetén az összekötő vezetékek additív hibát alig okoznak. A soros hiba, amit az R_a okoz a kifejezés nevezőjében, nem korrigálható.

A négyvezetékes bekötés egy állandó árammal táplált mérőkör esetén, ellenállás-különbség mérésére a 4. ábrán látható. Az R_a ellenállás az I_0 áram állandósága miatt hatástalan. Jó minőségű műveleti erősítő esetén feltételezhető, hogy $I_e \approx 0$, és R_b sincs hatással arra, hogy a 3 jelű pont virtuális földpotenciálón legyen. Emiatt I_g áram R_1 -től és R_x -től is független. Ha az U_k kimenőfeszültséget egy nagyellenállású feszültségmérővel mérjük, akkor az független lesz R_d értékétől, és eredményül nagyságára a vezeték-ellenállásoktól teljes egészében független – és a 2. ábrához tartozó gondolatmenetnél már megismert –

$$U_k = -I_0(R_x - R_2)$$

eredményt kapjuk.

Hasonló eredményre jutunk az 5. ábrán látható, állandó U_0 feszültségű táplálással működő mérőkörnél is. Az R_a ellenállástól való függetlenséget azzal érik el, hogy U_0 tápfeszültség növelésével növelik R_1 értékét, vagyis közeledik a megoldás az állandó áramú tápláláshoz. Ehhez természetesen az R_2 és R_3 ellenállásokból álló feszültségosztót is – a kívánt nullpont eléréséhez – megfelelően kell méretezni.

Mérési karakterisztika linearizálása ellenállás kimenetű érzékelőknél

Az előző fejezetben megismert – állandó áramú táplálást biztosító – mérőeszközök mindegyike azt a fontos feladatot oldotta meg, hogy az U_k üresjárású feszültség a ΔR ellenállás-változás lineáris függvénye lett, függetlenül annak nagyságától.

De a végső cél az, hogy a kimenőfeszültség a ΔR ellenállás-változást létrehozó, mérendő fizikai mennyiségtől – leggyakrabban a hőmérséklet-változástól – függjön lineárisan. Vagyis meg kell vizsgálnunk az érzékelők statikus karakterisztikáját és annak befolyását a fent megismert mérőkörökre.

NTC-ellenállás-hőmérők statikus karakterisztikájának linearizálása

Az NTC-ellenállás-hőmérők – közismertebb néven termisztorok – statikus karakterisztikája az $R(T) = R_0 e^{b/T}$ függvénnyel írható le, és láthatóan erősen nemlineáris. (Az egyenletben R_0 a $T \rightarrow \infty$ ér-

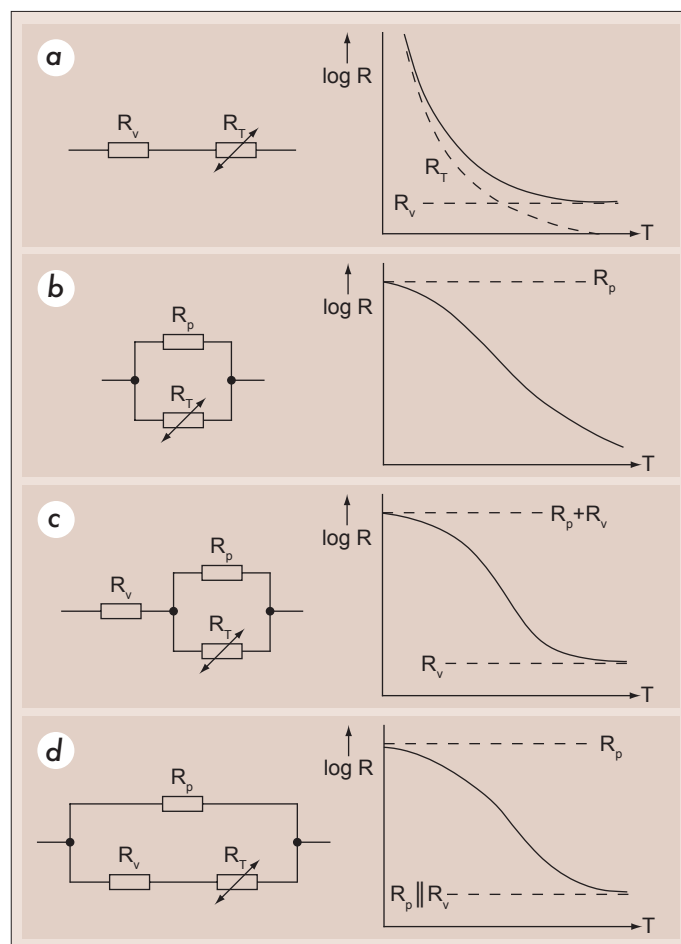
tékhez tartozó aszimptotát jelenti, b pedig az ún. energiaállandó.)

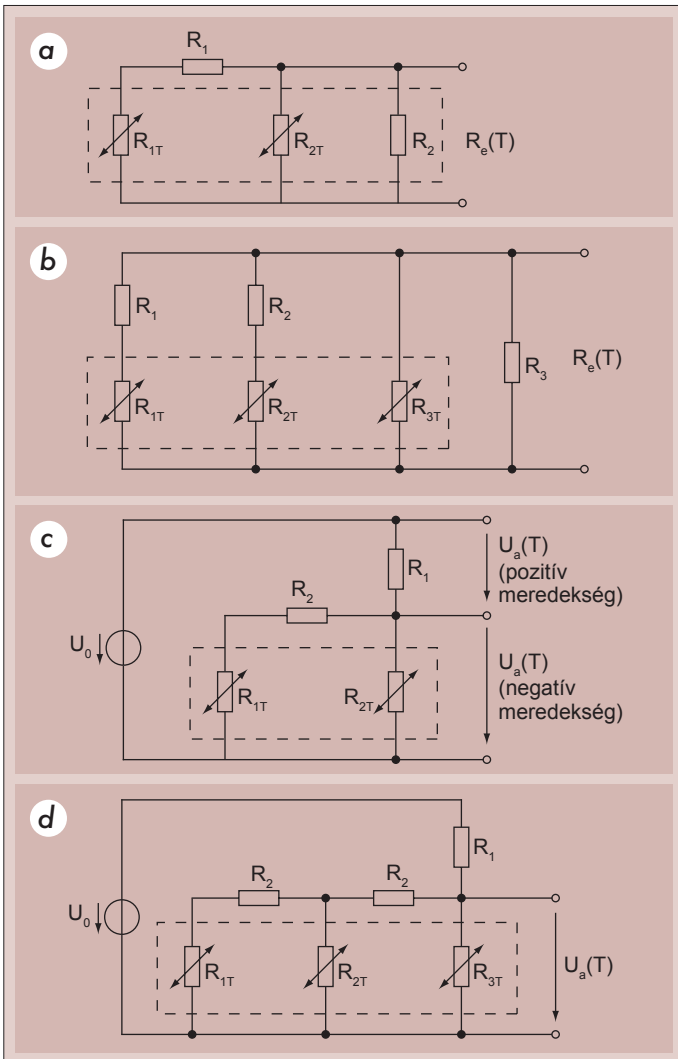
A linearizálás megvalósítása érdekében járható megoldásnak tűnik az a módszer, hogy próbáljuk a statikus karakterisztikát egy méréstartományon belül linearizálni, majd azt az előzőekben látott valamilyen mérőkörbe behelyezni, vagy – a nagy hőmérséklet-érzékenységet kihasználva – karakterisztikáját egy más mérőkapcsolás-

hoz igazítva a T hőmérséklet – U_k kimenőfeszültség mérési karakterisztikát linearizálni. A statikus karakterisztika linearizálásának lehetőségeit a 6. ábra foglalja össze.

- A 6. a ábra az R_v sorosan kapcsolt ellenállásnak a hatását mutatja. Az R_v csak a statikus karakterisztika $T \rightarrow \infty$ értékéhez tartozó aszimptotáját módosítja, a statikus karakterisztika menétét lefutásában alig változtatja.
- A 6. b ábrán az R_p parallel ellenállás lecsökkenti egy véges értékre az alacsony hőmérsékleten végtelenhez tartó ellenállást.
- A 6. c és d ábrán látható R_v soros – R_p párhuzamos ellenálláskombinációk a termisztor ellenállás-változásának a tartományát befolyásolják. A végértékekről könnyen meggyőződhetünk a $T \rightarrow \infty$ $R_T \rightarrow R_0'$ (de $R_0' < R_v$) és $T \rightarrow 0$ $R_T \rightarrow \infty$ határesetek formális helyettesítésével.

6. ábra Termisztorok statikus karakterisztikájának linearizálási lehetőségei





7. ábra Nagypontosságú, linearizált termisztorkapcsolások ($R_{1T} \dots R_{3T}$: termisztorok közös házban)
 a) – b) linearizált karakterisztikájú ellenállás – termisztorkombinációk
 c) – d) linearizált osztókapcsolások

- A 6. b, c és d variációk közös jellemzője, hogy az eredő karakterisztikának inflexiós pontja van. Ennek az inflexiós pontnak a környezetében pedig a karakterisztika linearizálható. A linearitási hiba az inflexiós ponthoz tartozó hőmérséklettől és a mérési tartomány nagyságától (a mérendő ΔT hőmérséklet-tartománytól) függ.

Semmi esetre sem szabad azonban figyelmen kívül hagynunk, hogy bármelyik ellenállás-kombinációt válasszuk is a linearizáláshoz, az érzékelő érzékenysége az eredeti értékéhez képest kisebb lesz.

A vázolt lehetőségek gyakorlati megvalósítását láthatjuk a 7. ábrán. Mindegyik összeállításra a nagyfokú linearitás jellemző.

- A 7. a és b ábrák közös tokba zárt termisztor – ellenállás-kombinációt mutatnak (szaggatott keret), amelyeket külső ellenállásokkal lehet a kívánt feladathoz igazítani, majd pl. az áramgenerátoros táplálással hídba kötni.
- A 7. c és d ábrákon osztókapcsolások láthatók. Az osztókapcsolás további linearitási hibák forrása lehet, az ábrákon látható megoldások nagy linearitású megoldások.

PTC-ellenállás-hőmérők linearizálása

A fém ellenállás-hőmérők statikus karakterisztikájának van linearitási hibája. A statikus karakterisztika analitikusan nem ír-

ható le, arra van csupán lehetőség, hogy a méréssel felvett eredményeket hatványsorral közelítsük.

A műszaki gyakorlatnak megfelelő pontossággal, a DIN4367 jelű szabvány szerint a Pt és Ni ellenállás-hőmérőkre a statikus karakterisztikák (a ϑ hőmérséklet $^{\circ}\text{C}$ -ban, az $R(\vartheta)$ ellenállás Ω -ban):

- Pt 100 ellenállás-hőmérőre $0^{\circ}\text{C} \dots 850^{\circ}\text{C}$ tartományra az $R(\vartheta) = 100(1 + 3,90802 \cdot 10^{-3} \vartheta - 0,580195 \cdot 10^{-6} \vartheta^2)$,
- Pt 100 ellenállás-hőmérőre $-200^{\circ}\text{C} \dots 0^{\circ}\text{C}$ tartományra az $R(\vartheta) = 100[1 + 3,90802 \cdot 10^{-3} \vartheta - 0,580195 \cdot 10^{-6} \vartheta^2 - 4,27350 \cdot 10^{-12} (\vartheta - 100) \vartheta^3]$,
- Ni 100 ellenállás-hőmérőre $-60^{\circ}\text{C} \dots 180^{\circ}\text{C}$ tartományra az $R(\vartheta) = 100 + 0,54859 + 0,665 \cdot 10^{-3} \vartheta^2 + 2,805 \cdot 10^{-9} \vartheta^4$

hatványfüggvénnyel közelíthető. Látható, hogy a linearitási hibát okozó együtthatók az érzékenységet meghatározó értékeknél több nagyságrenddel kisebbek. Hatásuk a 8. ábrán látható.

A műszaki gyakorlatban egyre nagyobb jelentőséggel bíró Si-ellenállás-hőmérő (terjedési ellenállású hőmérséklet-érzékelő – spreading-resistance-thermometer) statikus karakterisztikája az

$$R(\vartheta) = R_{25} [1 + 7,8 \cdot 10^{-3} (\vartheta - 25) - 18,4 \cdot 10^{-6} (\vartheta - 25)^2]$$

parabolával közelíthető $\vartheta = 25^{\circ}\text{C}$ munkapont környezetében. A linearitási hibát okozó tag a fém ellenállás-hőmérőknél most egy nagyságrenddel nagyobb. A statikus karakterisztika a 8. b ábrán látható.

A Ni- és a Si-ellenállás-hőmérő statikus karakterisztikájának linearizálása megoldható egy megfelelően választott soros ellenállással, a Pt-ellenállás-hőmérőhöz (telítődő jellegénél fogva) elektronikus műkapcsolás szükséges, amelynek részleteit terjedelmi okok miatt itt nem áll módunkban elemezni, helyette a szakirodalomra utalunk.

Mágnestérérzékelő ellenállás-érzékelő karakterisztikájának linearizálása

Az általánosan használható módszereken és szabályokon kívül mindig vannak egyedi megoldások is (lásd pl. a korábban tárgyalt merülő-vasmagos differenciálanduktívitás esetét). Ezekre azért érdemes felhívni a figyelmet, mert kritikus esetben a leleményesség sokat segít. Példaként szolgáljon most a mágnestérfüggő, ellenállás-kimenetű érzékelő felhasználása elmozdulásmérés céljára a 9. ábrán látható elrendezésben.

Az érzékelők egy permanens mágnes légrésében helyezkednek el, és mérik a mágnestér irányára merőleges Δs elmozdulást. A differenciálkialakítás miatt az ellenállás-változások rendre az statikus karakterisztikával írhatók le.

$$R_1 = R_0 + k(s_0 + \Delta s)^2 \quad \text{és}$$

$$R_2 = R_0 + k(s_0 - \Delta s)^2$$

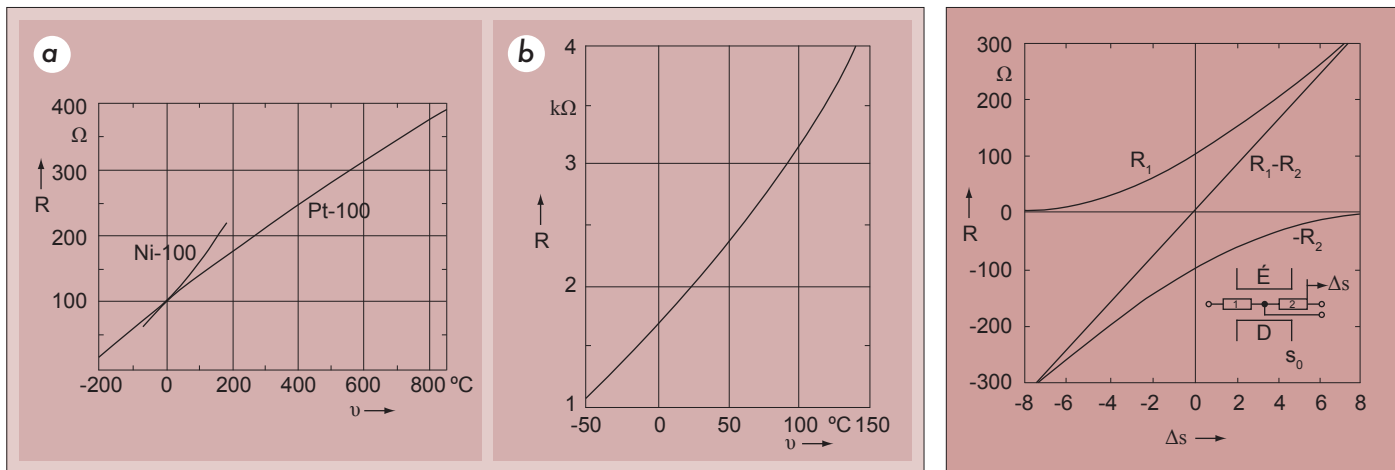
Ha az érzékelőket pl. a 2. ábra mérőkörébe helyezzük, akkor az U_k kimenőfeszültség a Δs elmozdulás lineáris függvénye lesz az alábbi egyszerű levezetés szerint:

$$U_{k=0} I_0 (R_1 - R_2) = I_0 [R_0 + k(s_0 + \Delta s)^2 - R_0 - k(s_0 - \Delta s)^2] = 4I_0 k s_0 \Delta s.$$

Természetesen nem minden esetben érhető el egzakt lineáris mérési karakterisztika, de az megállapítható, hogy különbségi kialakítással mindig jobb eredményt lehet elérni, mint egyetlen érzékelővel. Ha egyetlen érzékelő hídkapcsolású mérőkörét kell linearizálnunk, akkor célszerű a statikus karakterisztikát úgy módosítani, hogy azon inflexiós pont keletkezzék, mert ennek környezetében már viszonylag könnyű a linearizálás.

Piezorezisztív érzékelők mérőköreinek speciális tulajdonságai

Mechanikai mennyiségek méréséhez igen gyakran alkalmazzák a piezorezisztív érzékelőket. A hazai műszaki nyelv ezeknek az érzékelőknek a „nyúlásmérő-ellenállás” elnevezést adta, de leginkább a fém alapanyagú érzékelők felhasználása során – a



8. ábra PTC-ellenállás-hőmérők statikus karakterisztikái

a) Szabványos Pt- és Ni-ellenállás-hőmérő ($R_0 = 100 \Omega$) b) Si-ellenállás-hőmérő ($R_{25} = 2 \text{ k}\Omega$)

ragasztásos technológia miatt – főleg a „nyúlásmérő bélyeg” elnevezés terjedt el. A primer érzékelők diszkrét huzal, fólia, félvezető vagy vékonyréteg fém nyúlásmérő-ellenállásokat jelentenek rugalmas fém mérőtestre felragasztva, vagy planár félvezető ellenállásokat, amelyeket szilícium-egy kristályból készült mérőtestre integrálnak.

A fém nyúlásmérő-ellenállások relatív ellenállás-változása a maximálisan megengedhető deformációknál az ezrelék törtrészében mérhető, a félvezető ellenállásoknál – lényegesen nagyobb érzékenységük miatt – azonos feltételek esetén ez néhány százalék is lehet. Mivel a két vezetési mechanizmusnál a hőmérsékleti együtthatók is kb. két nagyságrenddel különböznek egymástól, megállapítható, hogy a hőmérséklet-változásból eredő ekvivalens zavarnyúlások mindkét esetben azonos nagyságrendűek. A piezorezisztív érzékelőkhöz leggyakrabban a kiegyenlített hídkapcsolásokat, azon belül is a bevezető részben megismert $u - u$ típusú változatot használják. Ezeknek a hidaknak előnye, hogy az üresjárású kimenő feszültség a relatív és nem az abszolút ellenállás-változással arányos. Ez akkor kedvező, ha a kiértékelő mérőműszereket különböző névleges ellenállás-értékű nyúlásmérő-ellenállásokhoz kell alkalmazni.

Jelenleg egyre gyakrabban alkalmazzák az $i - u$ és az $i - i$ típusú hídkapcsolásokat is. Ezeknek az előnye az előzőhöz képest, hogy a tápáram hozzávezetése kétvezetékes összeköttetéssel lehetséges, és annak paraméterei az átviteli tulajdonságokat nem befolyásolják. Az $i - i$ hidak további előnye abban nyilvánul meg, hogy a vezetékcapacitások az érzékelők dinamikus tulajdonságait alig befolyásolják, és ezeknél a hidaknál is a kimenőjel a relatív ellenállás-változással arányos.

A piezorezisztív érzékelőkkel működő hídkapcsolások kiválasztásánál – a többi azonos feltétel mellett – további igen lényeges szempont, hogy a legnagyobb mértékű, azonos fázisú jelelnyomás valósuljon meg.

Az előzőekben már említettük, hogy a hasznos jel ezeknél a hidaknál nagyon kicsi, a tápfeszültség $10^{-3} \dots 10^{-2}$ -szorososa. Emiatt a tápfeszültség nagyságrendjébe eső, azonos fázisú jel a differenciaerősítő kimenetén akkora zavarófeszültséghez vezethet, ami a felerősített, hasznos jellel azonos nagyságrendű. Ennek az elkerülésére speciális, nagy bemenő ellenállású és nagy azonos fázisú jelelnyomású erősítőkapcsolásokat fejlesztettek ki (lásd pl. a műszererősítőt).

A piezorezisztív hídkapcsolások egyen- és váltakozó feszültséggel, ill. árammal is táplálhatók.

Az egyenáramú, ill. az egyenfeszültségű táplálás a nyúlásmérés-

9. ábra Differenciálkialakítású,

mágnestérzékeny ellenállás-érzékelő elmozdulás mérésére

R_1 az 1 jelű érzékelő statikus karakterisztikája

R_2 a 2 jelű érzékelő statikus karakterisztikája

$R_1 - R_2$ ellenállás-különbség az elmozdulás

függvényében

nél 0 Hz-től 5...10 kHz-ig terjedő széles frekvenciatartományt fog át, de a táplálás ezen formájánál figyelembe kell venni, hogy az egyenfeszültségű erősítő hőmérsékleti hibái, ill. a parazita termofeszültségek hibát okoznak. Ezen hibakomponensekből az erősítők területén végbement és a jövőben is várható műszaki fejlődés az offset- és driftproblémákat jelentősen csökkenti, a termofeszültségek azonban változatlanul gondot jelentenek.

Váltakozó áramú, ill. váltakozó feszültségű híd táplálásnál megszűnnek azok a nehézségek, amelyek a műveleti erősítők additív hibáiból, ill. a parazita termofeszültségekből származnak. A mérőerősítő egyszerűbb lehet. Ezzel szemben a kimenő egyenfeszültség elérése érdekében egy fázisérzékeny egyenirányítóra is szükség van, valamint egy aluláteresztő szűrőre, ami ezt a feszültséget simítja. Ez a megoldás viszont a frekvenciatartományt korlátozza. Váltakozó feszültségű híd táplálásánál a mérő jel felső határfrekvenciájának a tápfeszültség frekvenciájánál legalább egy nagyságrenddel kisebbnek kell lennie. Emiatt a váltakozó feszültséggel táplált készülékek frekvenciatartománya az egyenfeszültséggel táplált hidaknál általában kisebb.

A váltakozó feszültségű hidak további hátránya a szórt kapacitásokkal – pl. a vezetékcapacitásokkal – szembeni érzékenység. Ez gyakorlatilag megszüntethető a fázisérzékeny egyenirányítók vezérlőfeszültségének megfelelő fázistolásával.

Ismeretesek a fentiekől eltérő, pl. impulzusjellel táplált hídkapcsolások is, amelyek működésének ismertetésétől itt eltekintünk, és részletesebb megismerésére a szakirodalmat ajánljuk.

A megfelelő mérőkapcsolás kiválasztása minden esetben kompromisszumot igényel, amihez a fenti műszaki elemzésen túl még komolyan figyelembe veendő a gazdaságossági tényezők is.

IRODALOM

- [1] E. Schrüfer: Elektrische Meßtechnik, 6. erweiterte Auflage. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1995
- [2] Zoltán I.: Méréstechnika. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997
- [3] S. Gutnikov - A. Lenk - U. Mende: Sensorelektronik (Primer-elektronik von Meßumformer). VEB Verlag Technik, Berlin, 1984

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu