

# A folyamatműszerezés érzékelői

## Érzékelők mérőkörei - 5.

Dr. Fock Károly

A folyamatműszerezés érzékelőivel foglalkozó sorozatunkban ezúttal bemutatjuk az érzékelők villamos kimeneti jelének közvetlen feldolgozására kialakított áramköröket és tulajdonságaikat, ezen belül a hőelemek alapkapsolásait és a piezoelektromos érzékelőkhöz használható speciális erősítő alapkapsolásokat tekintjük át.

### Hőelemek mérőkörei

Az ellenállás-hőmérőkön kívül az érintkezéssel hőmérséklet-mérés másik igen elterjedt érzékelőjét a hőelemek képviselik. Ebben a részben nem célunk a hőelemek fizikai működési elvét bemutatni, itt csak azokra a lényeges méréstechnikai tulajdonságaira szeretnénk a figyelmet felhívni, amelyek a mérőkörök kialakítására vannak befolyással.

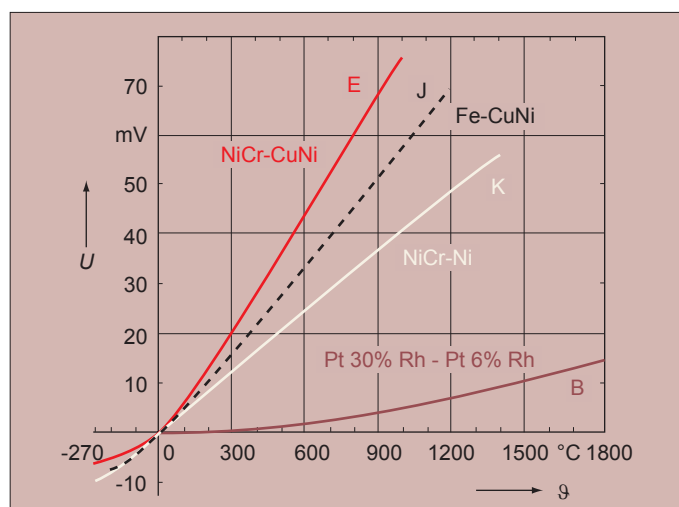
Ezek közül a legfontosabb, hogy a hőelem hőmérséklet-különbséget mér, tehát az alkalmazás során a mérés pontossága érdekében a vonatkoztatási (vagy más néven az ún. hidegponti) hőmérsékletet ismerni kell, és annak értékét stabilizálják vagy értékével a mérést korrigálják. A hőelem aktív érzékelő, működéséhez nincs szükség segédenergiára.

Az érzékelő belsejében lejátszódó termoelektromos folyamatnak létezik az inverze is: az elektrotermikus hatás, ami a Peltier-elemek működési elvét írja le. A Peltier-hatás során két különböző anyagi minőségű fém csatlakozásán az áramiránytól függően felmelegedés vagy lehűlés megy végbe, aminek mértéke az áram nagyságától függ. A hőelemmel történő hőmérsékletmérés során ebből az a lényeges, hogy a hőelemen átfolyó áramot korlátozni, leginkább megszüntetni kell.

A mérőkör kialakítása szempontjából további lényeges alkalmazástechnikai kérdés a csatlakozási hőmérsékleti pontok kialakítása és elhelyezése a technológiai folyamatban. Nem szabad ugyanis elfelejteni, hogy a hőelemekkel – elsősorban a környezethez képest – magas hőmérsékletet mérnek. A mérési tartományokat és a statikus karakterisztikákat a leggyakrabban alkalmazott hőelemeknél a 1. ábrán láthatjuk. (Felhívjuk a figyelmet arra, hogy a vezetékek elnevezésénél a CuNi-ötvözetre hazánkban a konstantán név terjedt el.)

A 1. ábra statikus karakterisztikáiból látható, hogy a hőelemeknél az elérhető maximális termofeszültségek 13 és 70 mV közötti tartományban vannak. Az érzékenységek értéke 3,5...70  $\mu\text{VK}^{-1}$  között változik, és a szabványok által megkövetelt hibafeszültségek nem léphetik át a 10...150  $\mu\text{V}$  értéket.

Mivel az így meghatározott felbontóképességet az érzékelőt követő jelfeldolgozásnak nem szabad elrontania, ezért azokra a megengedhető maximális abszolút hibahatár kb. 2...30  $\mu\text{V}$ . Ez speciális műveleti erősítők alkalmazását jelenti, amelyeket nemcsak az offsetfeszültség kis hőmérsékleti driftje, hanem az erősítőkapcsolás automatikus hibakorrekciója is jellemez. Ilyen eszközök ma már a kereskedelemben beszerezhetők, a továbbiakban ezekkel nem kívánunk foglalkozni.



1. ábra Hőelemek statikus karakterisztikái

Közbevetőleg jegyezzük meg, hogy a hőelemek az első villamos kimenőjelű érzékelők közé tartoznak, és még napjainkban is számtalan helyen találkozunk olyan villamos hőmérséklet-mérési megoldással, amikor a hőelemre közvetlenül egy Deprez-műszer csatlakozik, amelyet hőmérsékletre skáláztak. Miután mi elsősorban a távadási lehetőségek ismertetésére kívánjuk a hangsúlyt fektetni, ezért ezen egyszerű mérőkörökkel nem foglalkozunk, bár az érzékelők alapkapsolásaira vonatkozó szabályok itt is érvényesek.

A hőelemek működését leíró szilárdtestfizikai összefüggések a hőmérséklet-különbség–termofeszültség statikus karakterisztikára lineáris egyenletet adnak, a 1. ábrán viszont azt láthatjuk, hogy ezek a statikus karakterisztikák kisebb-nagyobb linearitási hibával rendelkeznek. Ha a statikus karakterisztika analitikus kifejezésére van szükségünk, akkor csak magasabb fokú polinomokkal tudjuk megfelelően közelíteni a méréssel felvett eredményeket. Pl. a DIN 43710-szabvány szerint a NiCr-Ni (K-jelű)-hőelemre, a 0...1372 °C hőmérséklet-tartományra az

$$U = \sum_{i=1}^8 b_i \theta^i + 125e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\theta - 127}{65} \right)^2} \mu\text{V}$$

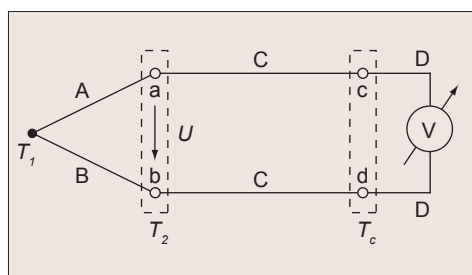
polinom érvényes, ahol a  $b_i$  együtthatókat 11 értékes jegy pontossággal adják meg, és a  $\theta$  hőmérsékletet °C-ban kell behelyettesíteni.

A statikus karakterisztikák linearizálására az analóg jelfeldolgozásban a szokásos diódás – akár 10-30 szakaszból álló – törtvonalas közelítés lehetséges, de ma már sokkal elterjedtebb és pontosabb a készülékek digitális jelfeldolgozó részében végrehajtott linearizálás, ami pl. a frekvencia vagy az impulzus-időtartam nemlineáris kódolásainak alapján valósul meg.

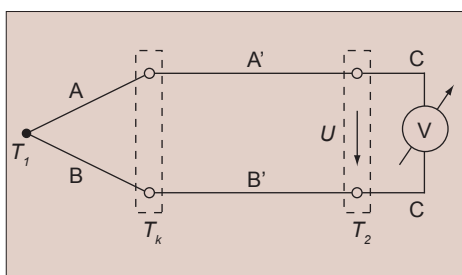
### Hőelemek alkapcsolásai

Az alkalmazott jelfeldolgozás módjától függetlenül a hőelemes mérések kialakításánál van néhány olyan megkerülhetetlen szabály, amelyet viszont célszerű itt is megemlíteni, ugyanis alapvetően befolyásolják nemcsak a mérés pontosságát, hanem annak elvégezhetőségét is. A soron következő ábrákban a mérőműszert vagy az erősítőt egyaránt egy V jelű feszültségmérő szimbolizálja.

A 2. ábrán egy hőelemes mérőkör alkapcsolása látható. Az  $U$  termofeszültség mérésére a műszer csatlakoztatása miatt a hőelem **A-B** anyagán kívül elkerülhetetlen egy harmadik **C** anyag alkalmazása is. Általánosságban tételezzük fel, hogy a mérőműszer vagy az erősítő egy **D** anyagi minőségű huzallal csatlakozik a mérőkörhöz.



2. ábra Hőelemes mérőkör gyakorlati megvalósítása ( $U=k_{AB}(T_1-T_2)$ )



3. ábra Hőelemes mérőkör **A' - B'** kompenzáló vezetékkel ( $U=k_{AB}(T_1-T_2)$ )

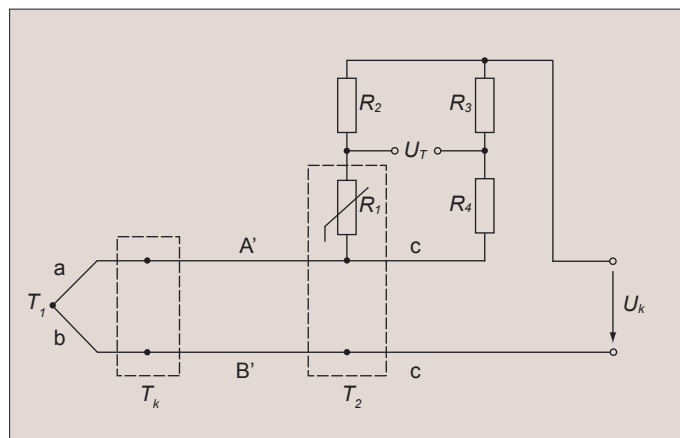
A termikus rövidzár fogalmának felhasználásával bebizonyítható, hogy a 2. ábrán látható kapcsolásban az  $U$  üresjárású feszültség (termofeszültség) csak a  $T_1-T_2$  hőmérséklet-különbségtől függ, ha biztosítjuk az **a** és **b** csatlakozási pontok azonos  $T_2$ , valamint a **c** és **d** pontok azonos  $T_c$  hőmérsékletét. A 2. ábra  $T_2$  és  $T_c$  hőmérsékletű helyein látható, szaggatott vonallal rajzolt keretek ezt szimbolizálják. Egyértelmű, hogy  $T_1$  méréséhez a  $T_2$  hőmérsékletet is ismerni kell.

A megoldás hátránya nyilvánvaló. Megoldott ugyan a jelfeldolgozás magas környezeti hőmérséklettől való eltávolítása a tetszőlegesen hosszú, azonos anyagú **C** vezetékpár segítségével, de a mérés változatlanul a  $T_2$ -től függ, amit a klasszikus megoldás szerint stabilizálni kell (termosztát szükséges). Természetesen a pontosság nem függ a  $T_c$ -től, ennek stabilizálása (pl. a műszerszobában) már nem szükséges (de a **c** és **d** csatlakozási pontok hőmérsékletének azonosságát biztosítani kell).

Ha azért kell az **A-B** hőelemet meghosszabbítanunk, hogy hidegponti (stabilizált hőmérsékletű)  $T_2$  csatlakozás távolabbra kerüljön, akkor a 3. ábrán látható megoldást szokás alkalmazni. A helyes mérés feltétele az, hogy a meghosszabbításként felhasznált **A'-B'** vezetékpár – mint hőelem – a  $T_k-T_2$  hőmérséklet-tartományban termoelektromos szempontból az **A-B** hőelemmel azonos módon viselkedjen. Az **A'-B'** vezetékpár elnevezése: (a magyar terminológiában kissé félreérthető módon) kompenzálóvezeték.

A kompenzálóvezetékkel szemben támasztott egyéb követelmények lazábbak. Mérési tartományuk általában  $200\text{ °C}$  körüli és olcsóbbak az **A-B** hőelemnél.

A mérés a  $T_k$  hőmérséklettől független, a termosztálásra a  $T_2$  helyen van szükség. Modernebb hőmérőknél és egyedi hőmérő-



4. ábra Termosztát nélküli, korrekciós hőelemes mérőkör (a vonatkoztatási hőmérsékletet a hídkapcsolás ellenállásai határozzák meg)

sékletmérőkör azonban elhagyják a termosztátot, és  $T_2$  mérésével a 4. ábrán látható korrekciós mérést valósítják meg. Ezzel a korrekcióval  $0...50\text{ °C}$  hőmérsékleti tartományban az abszolút hiba  $0,5...1\text{ °C}$  értékre szorítható le. A hibát a hőelem és a híd-

kapcsolás linearitási hibái okozzák. Ez utóbbi csökkenthető  $R_4 \gg R_1$  és  $R_3 \gg R_2$  ellenállás-választással.

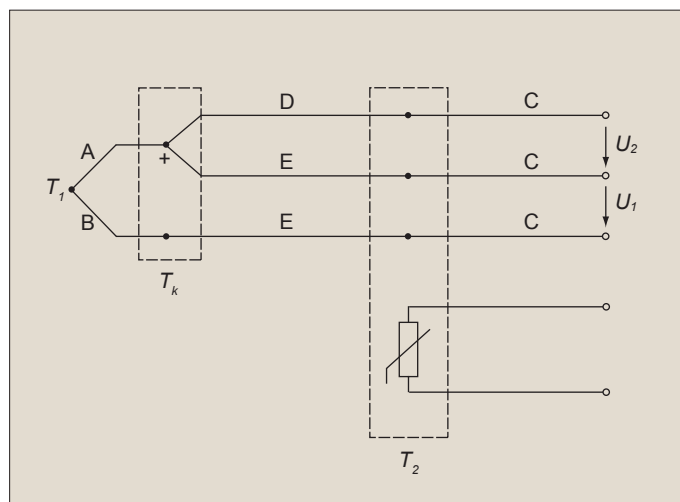
Igen magas hőmérsékletek mérésekor gyakran nem biztosítható a hőelem-csatlakozás  $T_k$  hőmérsékletének a max.  $200\text{ °C}$  körüli értéke, és ilyenkor a kompenzálóvezeték már nem működik megfelelően. Ilyenkor lehetséges a 5. ábrán látható megoldás, amikor is a  $T_k$  hőmérsékletet egy külön **D-E** hőelemmel mérjük, amelynek hideg-

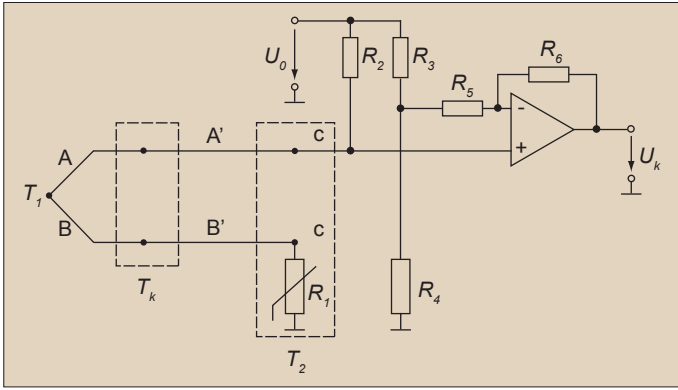
ponti hőmérséklete a nem stabilizált  $T_2$ , és a hőmérsékletfüggő ellenállással a 4. ábrán látható korrekciót hajtjuk végre.

A gyakorlati kivitelezés során pl. a PtRh-hőelemhez (mérés-határ  $1800\text{ °C}$ ) CrAl-CuNi-hőelemet felhasználva (mérés-határ  $800\text{ °C}$ ) mérjük a  $T_k$  hőmérsékletet. Az  $U_1$  feszültség az **A-B** hőelem  $T_1-T_k$ , az  $U_2$  pedig **D-E** hőelem  $T_k-T_2$  hőmérséklet-különbségtől függ. A hőelemek eltérő érzékenységét a hídkapcsolásban kell figyelembe venni.

A 4. ábra hatékony korrekciós mérőköre azzal a hátrányos tulajdonsággal rendelkezik, hogy a hídkapcsolás  $U_T$  tápfeszültségének az utána következő jelfeldolgozó áramkörtől galvanikusan függetlennek kell lennie. Differenciaerősítő alkalmazásával,

5. ábra Hőmérsékletmérés két hőelemmel és hidegponti korrekcióval





6. ábra Korrekciós, hőelemes mérőkör differenciaerősítővel

a 6. ábrán látható módon, ez a feltétel kiküszöbölhető. Az ábra egy olyan kompenzációs kapcsolást mutat, amelyben a hőmérséklet-érzékeny híd földelt tápfeszültséggel rendelkezik. Többnyire  $R_4 \ll R_3$ , és emiatt az erősítőfokozat erősítése  $1+R_6/R_5$ .

A mérőkör kiegészítő szolgáltatása, hogy az  $R_2$  ellenállás a hőelem kiesését, törését is jelzi. Ha  $R_2$  sokkal nagyobb, mint  $R_1$  és a hőelemvezetékek ellenállásának az összege, akkor az erősítő neminvertáló bemenetére jutó  $U_0$ -ból származó – feszültséghányad elhanyagolható. A hőelem törésekor azonban ez a feszültség gyorsan növekszik és az erősítőt telítésbe viszi.

**Piezoelektromos érzékelők mérőkörei**

A piezoelektromos hatás során a dielektrikumok egy meghatározott csoportjában, a mechanikai deformáció hatására, a mérőelem felületein villamos töltések keletkeznek. A deformációt erő hozza létre, ennélfogva a piezoelektromos érzékelők tipikus felhasználási területe az erőmérés, ill. a nyomásmérőkben és a gyorsulásmérőkben való alkalmazás.

A piezoelektromos érzékelők az aktív eszközök családjába tartoznak, ami azt is jelenti, hogy a piezoelektromos hatásnak létezik az inverze is, az elektrostrikció (vagy más néven az inverz piezoelektromos hatás), ami ugyanezen anyagoknál a villamos feszültség hatására bekövetkező mechanikai méretváltozást írja le. Ennek tipikus alkalmazási területe az ultrahang előállítás vagy az elektromechanikus oszcillátorokban való felhasználás frekvenciameghatározó elemként.

A piezoelektromos érzékelők működési mechanizmusának részletezésétől eltekintünk, de a mérőkörök működésének a megértéséhez szükséges ezen érzékelők villamos helyettesítő képének megismerése és az ebből levonandó tanulságok felderítése.

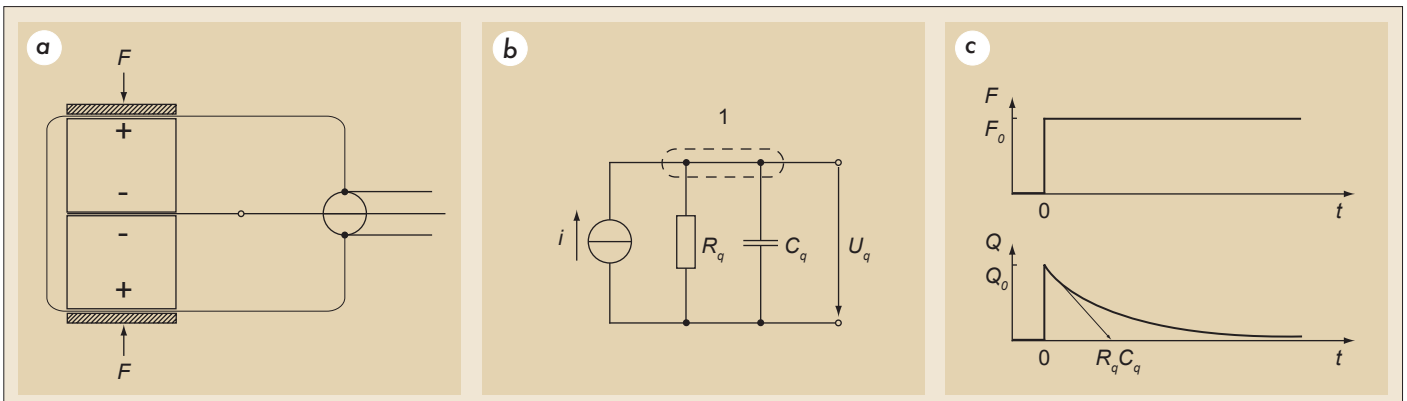
A 7. ábrán egy piezoelektromos erőmérő elvi szerkezeti vázlat látható. Két érzékelő szembefordításával könnyűszerrel megoldható az érzékelő villamos árnyékolása és a kimenőjel földelt

7. ábra Piezoelektromos erőmérő működése

a) Elvi szerkezeti felépítés

b) Villamos helyettesítő kép

c) Ugrásjelre adott válasz



árnyékolású, koaxiális kábelen történő továbbítása. A 7. b ábra villamos helyettesítő képén látható áramforrás

$$i = \frac{dQ}{dt} = k \frac{dF}{dt}$$

nagyságú árama az  $F$  erő hatására keletkező  $Q$  töltésből származik,  $R_q$  az érzékelő belső ellenállása,  $C_q$  pedig az érzékelő kapacitása. Az ellenállás a mechanikai méretekből és a fajlagos ellenállásból, a kapacitás pedig a mechanikai méretekből és a dielektromos állandóból számítható. Az érzékelő – mint kondenzátor – az  $F$  erő hatására feltöltődik, és rajta  $U_q = Q/C_q$  feszültség mérhető.

A helyettesítő képből látható, hogy a magára hagyott érzékelő  $Q$  töltése nem marad állandó, a töltés az  $R_q$  belső ellenálláson kisül. Az 1 jelű csomópontra felírva a Kirchhoff-féle csomóponti egyenletet, a jelváltozásokra az alábbi differenciálegyenlet érvényes:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{U_q}{R_q} - C_q \frac{dU_q}{dt} = 0.$$

A megoldást az  $U_q$  feszültségre az

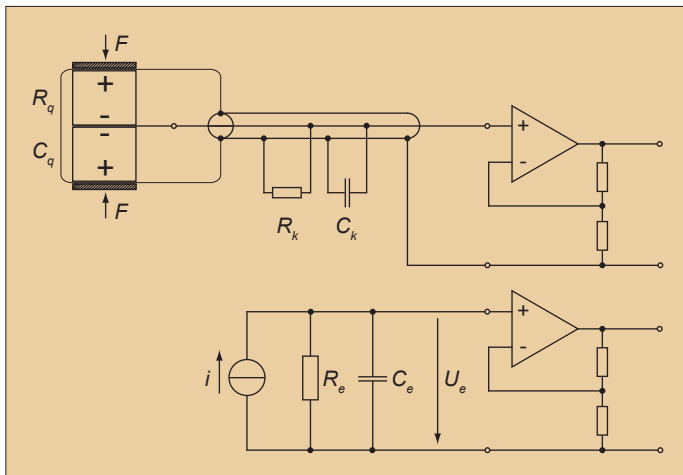
$$U_q = \frac{Q_0}{C_q} e^{-\frac{t}{R_q C_q}} \quad t > 0$$

alakban kapjuk, ahol a  $T = R_q C_q$  időállandó értéke kerekítve 40 s. Ennek leglényegesebb mérés technikai következménye az, hogy a piezoelektromos érzékelő statikus mérésre nem alkalmas, a jelek időbeli változásait a 7. c ábra szemlélteti.

**Feszültség erősítő alkalmazása**

Számítási és kísérleti eredmények is azt mutatják, hogy a piezoelektromos érzékelő nagyon érzékeny, műszakilag realizálható esetekben a mérhető feszültség 10 V nagyságrendű. Ez azonban az érzékelő nagy belső ellenállása miatt közvetlenül egy elektromechanikus feszültségmérővel nem mérhető, mivel a kisellenállású mérőmű az érzékelőt rövidre zárná, és így semmiféle feszültséget nem mérhetnénk. Emiatt egy olyan erősítő alkalmazása szükséges, aminek a bemenő ellenállása sokkal nagyobb, mint az érzékelő belső ellenállása.

A 8. ábra szerint az érzékelőt koaxiális kábelrel egy neminvertáló bemenetű erősítőre csatlakoztatjuk. A kábel  $R_k$  szigetelési ellenállása és  $C_k$  kábelkapacitása most párhuzamo-



8. ábra Feszültség-erősítő csatlakoztatása piezoelektromos erőmérőhöz

san kapcsolódik a kristály  $R_q$  és  $C_q$  elemeivel:  $R_e = R_q \times R_k$  és  $C_e = C_q + C_k$ .

A hatásos kapacitás tehát  $C_q$ -ről  $C_e$ -re növekedett, emiatt az erősítőre jutó bemeneti feszültség  $U_e = Q/C_e$ -re csökkent, az időfüggvényt most a  $T = R_e C_e$  időállandó határozza meg, a mérőrendszer statikus mérésekre továbbra sem alkalmas.

Az érzékelőből, az összekötő kábelből és a feszültség-erősítőből álló rendszer nem egészen problémamentes. Annak érdekében, hogy a kábel és a csatlakozó szigetelési ellenállása a mérési pontosságot ne befolyásolja, nagyon jó minőségű kábelt és csatlakozót kell választani, amelyeknek a szigetelési ellenállása az érzékelő ellenállásához képest sokkal nagyobb. A kábel kapacitása azonban mindig befolyásolja az érzékenységet, ami azzal a hátránnyal jár, hogy a mérőrendszert minden kábelhez egyedileg kell kalibrálni. További nehézséget jelent, hogy a nagy bemenő ellenállású erősítő az elektromágneses zavarokra érzékeny.

Ezek a hátrányok túlnyomórészt kiküszöbölhetők, ha a feszültség-erősítőt az érzékelővel egybeépítik.

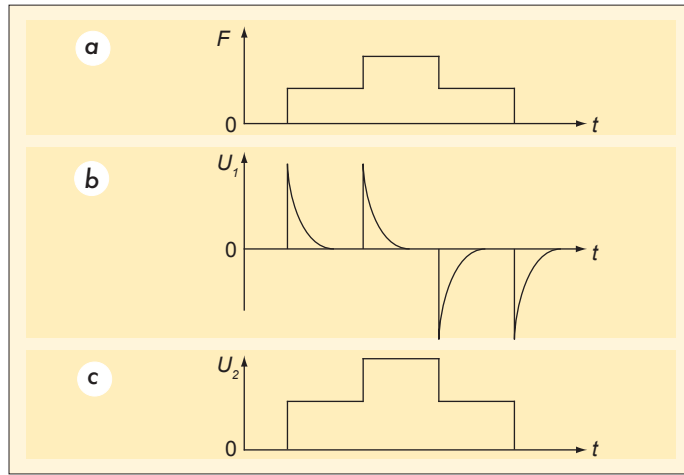
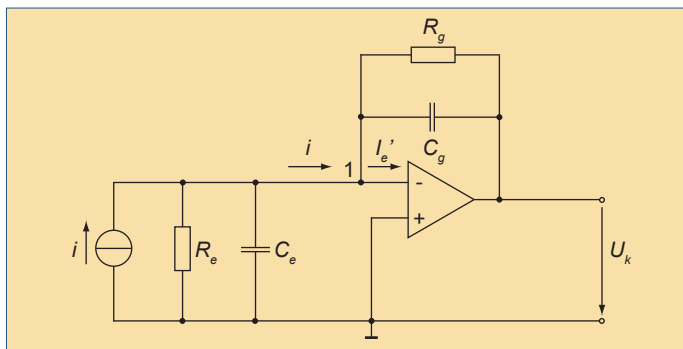
Egy másik gyakran használt alternatíva az, ha a feszültség-erősítő helyett töltés-erősítőt használunk.

**Töltés-erősítő alkalmazása**

A 9. ábrán a piezoelektromos erőmérő egy töltés-erősítőre kapcsolódik. Az  $R_e$  és  $C_e$  elemek most is az érzékelő és a kábel ellenállásának és kapacitásának párhuzamos eredői. Az integráló erősítő elméleti alapkiosztásához képest a  $C_g$  visszacsatoló kapacitással most párhuzamosan kapcsolódik az  $R_g$  ellenállás is, amelyen keresztül a  $C_g$  kapacitás folyamatosan kisülhet. Ideálisnak feltételezett műveti erősítő esetén  $I_e' = 0$  és az 1 jelű csomópont virtuális földponton van. Az  $R_e$  és  $C_e$  elemeken emiatt nincs feszültség, és áram sem folyik rajtuk.

Az 1 jelű csomópontra a csomóponti egyenlet  $i = dQ/dt$  helyettesítéssel

9. ábra Töltés-erősítő csatlakoztatása piezoelektromos érzékelőhöz



10. ábra Feszültség-erősítővel és töltés-erősítővel kialakított piezoelektromos mérőrendszer összehasonlítása

- a) A mérendő  $F$  erő időfüggvénye
- b) Feszültség-erősítő kimenőjelének időfüggvénye (8. ábra)
- c) Töltés-erősítő kimenőjelének időfüggvénye (9. ábra,  $R_g$ )

$$i + \frac{u_a}{R_g} + C_g \frac{du_a}{dt} = 0$$

alakban írható fel, amiből az látszik, hogy az egyensúlyt nem befolyásolják az  $R_q$ ,  $C_q$ ,  $R_k$  és  $C_k$  elemek, csupán a visszacsatolásban szereplő  $R_g$  és  $C_g$  elemek fontosak, és ezek határozzák meg a mérőberendezés statikus és dinamikus tulajdonságait. A kimeneten mérhető  $u_a$  feszültség most az

$$u_a = -\frac{Q_0}{C_g} e^{-\frac{t}{R_g C_g}} \quad t > 0$$

egyenlet szerint változik. Az elméleti Miller-integrátorban ( $R_g \rightarrow \infty$ ) a kapacitás töltése nem változik meg, és az  $u_a = -Q_0/C_g$  nagyságú kimenőfeszültség tetszőlegesen hosszú ideig megmarad. A valóságban a jelkövetés miatt  $R_g$ -nek véges értéke van, és ennek megfelelően a töltés-erősítővel összekapcsolt piezoelektromos érzékelő már legfeljebb csak lassan változó erők mérésére alkalmas. A 10. ábra alapján összehasonlíthatjuk a feszültség-erősítővel, ill. a töltés-erősítővel kialakított piezoelektromos mérőrendszer kimenőjelének időfüggvényeit ugrás alakú  $F$  erő esetén.

A folytatásban a pH-mérő elektródák mérőkörével, valamint a pn-átmenet hőmérsékletmérésre alkalmas megoldásaival foglalkozunk.

**IRODALOMJEGYZÉK**

- E. Schrüfer: Elektrische Meßtechnik, 6. erweiterte Auflage. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1995
- S. Gutnikov - A. Lenk - U. Mende: Sensorelektronik (Primerelektronik von Meßumformer). VEB Verlag Technik, Berlin, 1984
- Folyamatszabályozási Tanszék Munkaközössége, szerkesztő: Bársony A. - Megyeri J.: Ipari folyamatok mérés-technikája és műszerei I/1 (Jelátalakítók), egyetemi jegyzet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1968

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu