

# A folyamatműszerezés érzékelői

## Érzékelők mérőkörei - 3.

Dr. Fock Károly

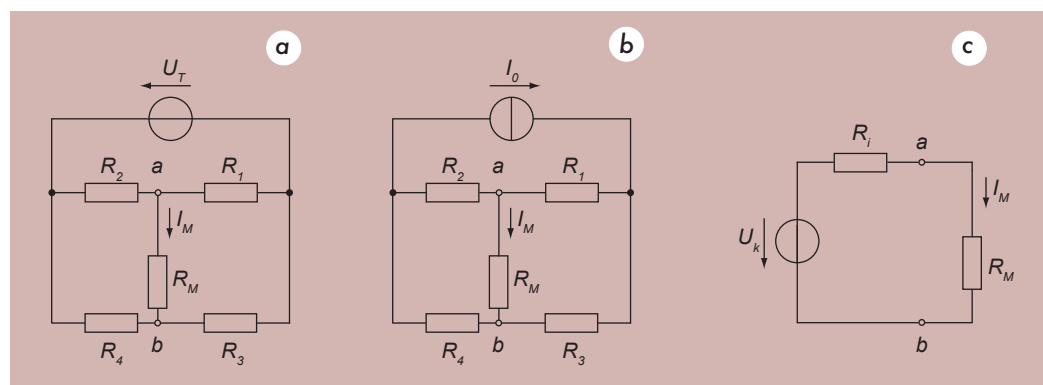
A kiegyenlített hídkapcsolások ismertetése során az alábbi részben sorra kerül néhány olyan fontos tulajdonság elemzése, mint a véges terhelő impedanciák hatása, a vezeték-ellenállások kompenzálása, a mérőhely-átkapcsolás, valamint a nullpontelnyomás és a zavarkompenzáció kérdése. A cikk második részében a hídkapcsolások erősítőit tárgyaljuk.

### Véges impedanciával terhelt, kiegyenlített hídkapcsolások

A kiegyenlített hídkapcsolások típusainak a vizsgálatokor feltételeztük, hogy a kimeneten üresjárású feszültséget vagy rövidzárási áramot mérünk. Ezekkel a peremfeltételekkel minősítettük a különböző hídkapcsolásokat. Ez azt jelentette, hogy vagy ideális, végtelen bemenő-ellenállású feszültségmérővel, vagy ideális, zérus bemenő-ellenállású árammérővel mérjük a híd kimenőjelét.

A továbbiakban azt vizsgáljuk meg, hogy mi a hatása annak, ha a hídkapcsolás kimenetét egy valódi, véges bemenő-ellenállású műszerrel zárjuk le.

A vizsgálathoz az egyszerűség kedvéért **u – u** és **i – u** típusú, ellenállásokat tartalmazó, állandó feszültséggel, ill. állandó árammal táplált, kiegyenlített hídkapcsolásokat elemzünk a 1. ábra szerint, amelyekben  $R_M$  a mérőműszer bemenő-ellenállását jelöli, amelyen a híd a-b kimenőkapcsaiból  $I_M$  nagyságú terhelőáram folyik át. A kvantitatív vizsgálathoz a hídkapcsolások *Thevenin*-helyettesítő képe szükséges (1. c ábra).



1. ábra Terhelt hídkapcsolások  
a) Feszültségtáplálás  
b) Áramtáplálás  
c) *Thevenin*-helyettesítő kép

A *Thevenin*-helyettesítő kép elemei **u – u** típusú hidaknál:

$$U_d = U_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad \text{és} \quad R_i = (R_1 \times R_2) + (R_3 \times R_4),$$

**i – u** típusú hidaknál pedig:

$$U_d = I_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad \text{és} \quad R_i = (R_2 + R_4) \times (R_1 + R_3)$$

összefüggésekkel számítható, míg a mérőműszer  $R_M$  ellenállásán átfolyó  $I_M$  áramot az

$$I_M = \frac{U_d}{R_i + R_M}$$

egyenlet adja.

A terhelés következményeként a hídkapcsolás belső ellenállásán feszültségesés jön létre, az a-b kimenőkapcsokon  $U_k$ -nál kisebb feszültség jelenik meg, tehát érzékenységsökkenés jön létre. Továbbá a műszeráramot most a híd  $R_i$  belső ellenállása – a híd minden egyes elemét tartalmazó bonyolult összefüggésen keresztül – is befolyásolja, tovább növelve ezzel a linearitási hibát.

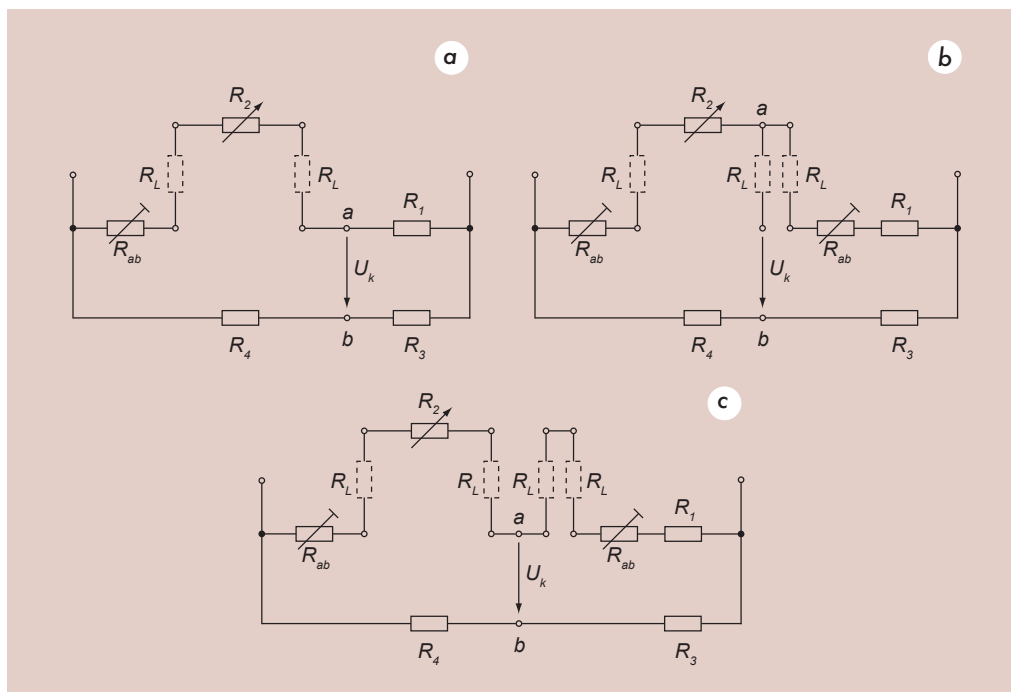
A vázolt kedvezőtlen hatások miatt általában kerüljük a terhelt kiegyenlített hídkapcsolások alkalmazását.

### Vezeték-ellenállások hatásának kompenzálása

Gyakorlati alkalmazásoknál szinte törvényszerű, hogy az impedanciakimenetű érzékelőket rövidebb, hosszabb vezeték-

ekkel kötik be a hídkapcsolásba. Az  $R_L$  vezeték-ellenállásnak többféle, a mérést befolyásoló hatása van.

Az alkalmazástól függő bizonytalan értéke egyrészt hozzáadódik az érzékelő impedanciájához, ezáltal ellenőrizhetetlen módon csökkenti annak érzékenységét. A bizonytalanság csökkentése érdekében a 2. ábrán látható módon az  $R_{ab}$  jelű ellenállással az  $R_L$  vezeték-ellenállásokat egy meghatározott (10 Ω, 20 Ω) értékre egészítik ki. Ezek után a híd többi elemét úgy kell méretezni, hogy a kívánt munkapontban a híd kiegyenlített legyen.



2. ábra Ellenállásos érzékelők csatlakoztatási lehetősége hídkapcsolásba ( $R_L$  az  $R_2$  érzékelő csatlakozó vezetékének ellenállása,  $R_{ab}$  kiegyenlítő ellenállás)  
 a) kétvezetékes bekötés  
 b) háromvezetékes bekötés  
 c) négyvezetékes bekötés

Figyelembe kell venni továbbá azt is, hogy a vezetékek  $R_L$  ellenállása (anyaga többnyire vörösréz) is hőmérsékletfüggő, ami növeli a mérés hőmérsékleti hibáját.

Ennek a hibának a csökkentésére pl. a 2. b ábrán látható, ún. háromvezetékes megoldást alkalmazzák. Az ábrán vázolt kapcsolás szerint a szomszédos hídágba is kerül egy hőmérsékletfüggő  $R_L$  ellenállás, ami a hőmérséklet hatására az előbivel megegyező módon változik. A kompenzáció nem 100%-os értékű, mert ezáltal pl. **u - u** típusú hídkapcsolásban – a 2. b ábra alapján –  $R_1 = R_0 + \Delta R$ , és  $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$  feltételezésével az

$$\frac{U_k}{U_T} = \frac{(R_{ab} + R_L + R_0 + \Delta R)R_0 - (R_{ab} + R_L + R_0)R_0}{(R_{ab} + R_L + 2R_0)(R_{ab} + R_L + 2R_0)}$$

egyenlettel felírható üresjárású kimenőfeszültség kifejezésében csak a számlálót tudjuk  $R_L$  vezeték-ellenállástól függetlenné tenni, a nevezőben az  $R_L$  megmarad. Hasonló a helyzet a többi hídkapcsolástípusnál is.  $R_L \ll (R_{ab} + 2R_0)$  esetén azonban a hatás többnyire elhanyagolható. A helyes mérés további feltétele az  $U_k$  kimenőfeszültség terhelésmentes mérése annak érdekében, hogy a kimeneten ne folyjon áram.

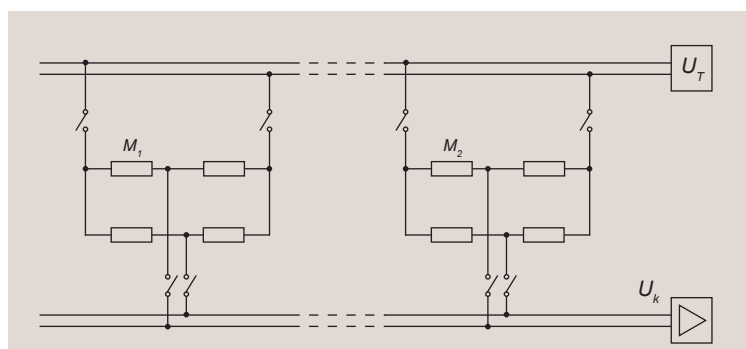
Ha a terhelésmentes mérés feltételeit nem tudjuk teljesíteni, akkor az ún. négyvezetékes megoldást (2. c ábra) kell választani. A választott megoldás szerint mindkét hídágba azonos,  $2R_L$  értékű ellenállás kerül, a híd a vezeték-ellenállás szempontjából szimmetrikus felépítésű lesz, és annak változásai nem játszanak ily módon szerepet.

**Mérőhely-átkapcsolás**

Több érzékelő alkalmazása esetén gyakori célkitűzés a mérőberendezés költségeinek minimalizálása. Kézenfekvő megoldásnak tűnhet az ellenállásos átalakítóknak egyenkénti hídba kapcsolása mechanikus kapcsolók segítségével. Ez a megoldás

dás azonban – a kapcsolók nem reprodukálható átmeneti ellenállásai miatt – nem szerencsés, mivel ezen átmeneti ellenállások gyakran a mérendő ellenállás-változások nagyságrendjébe esnek.

A fenti hiba csökkentése érdekében műszakilag az a helyes megoldás (3. ábra), amikor minden egyes érzékelőnek külön hídkapcsolása van, és a kívánt sorrendben ugyanazt az  $U_T$  tápfeszültséget és ugyanazt a nagy bemeneti ellenállású mérőerősítőt kapcsoljuk a hídra. Ezáltal az átmeneti ellenállások hatástalanok. A költségcsökkentés úgy valósul meg, hogy a több mérőhelyes mérőrendszer csak egy tápfeszültséget és csak egy erősítőt igényel.



3. ábra Azonos  $U_T$  feszültséggel táplált és azonos erősítővel ellátott hidak átkapcsolása

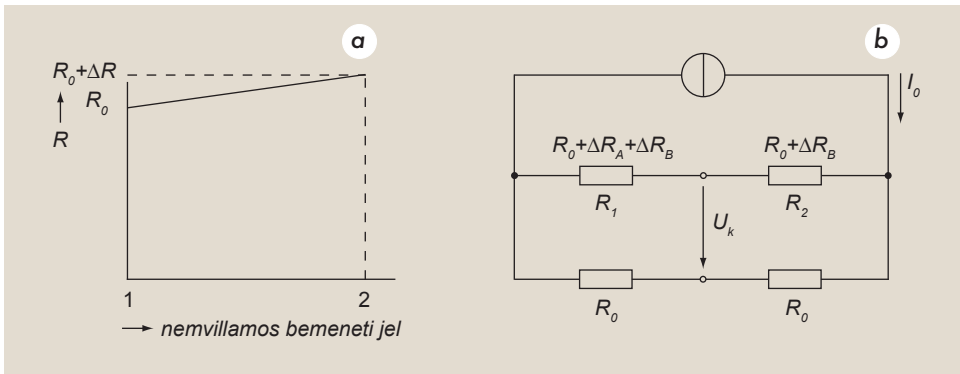
**Nullpontelnyomás és zavarkompenzáció**

A kiegyenlített hídkapcsolások tulajdonságainak vizsgálatánál nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a hídkapcsolás egy párhuzamos struktúrát valósít meg. Azok a hatások, amelyek a hídkapcsolás mindkét oldalán azonos módon hatnak, a kimeneten kioltják egymást. Ez az azonos fázisú jelelnyomás az ellenállásos és általában az impedanciakimenetű érzékelők esetében kimondottan hasznos. Tételezzük fel pl., hogy egy  $R_0$  alap-ellenállású érzékelő a mérendő bemeneti jel hatására  $R_0 + \Delta R$  értékre nő (4. a ábra). Ha ezt az érzékelőt  $R_0$  értékű ellenállásokból felépített hídkapcsolásba kötjük, akkor az  $R_0$  alapellenállást a híd kompenzálja. Az  $U_k$  kimenőfeszültség áramgenerátoros táplálás esetén  $\Delta R$ , feszültség-generátoros táplálásnál pedig  $\Delta R/R_0$  értékkel arányos.

A zavaró hatások kompenzációját részletesebben az 4. b ábra jelöléseivel áramgenerátoros táplálás esetében tárgyaljuk (**i - u** típusú híd). Tételezzük fel, hogy az  $R_1$  jelű ellenállás az **A** bemenőjel hatására  $\Delta R_A$ ; a **B**-jelű zavaró hatásra pedig  $\Delta R_B$  értékkel változik meg, míg az  $R_2$  jelű érzékelő csak a **B**-jelű zavaró hatásnak van kitéve ( $R_2 = R_0 + \Delta R_B$ ).

Az áramgenerátoros táplálású hídkapcsolás  $U_k$  kimenőfeszültsége:

$$U_k = I_0 \frac{R_0(R_0 + \Delta R_A + \Delta R_B) - R_0(R_0 + \Delta R_B)}{4R_0 + 2\Delta R_A + \Delta R_B} = I_0 \frac{R_0 \Delta R_A}{4R_0 + 2\Delta R_A + \Delta R_B} \approx \frac{1}{4} I_0 \Delta R_A$$



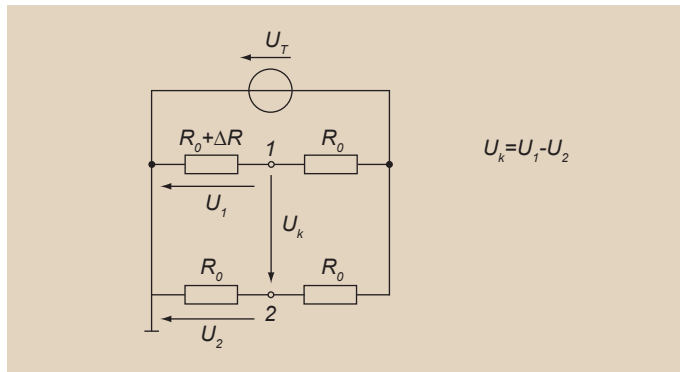
4. ábra Nullpontelnyomás és nem kívánt, zavaró hatások kompenzációja ellenállásos érzékelőkkel

- a) Ellenállásos átalakító statikus karakterisztikája (1 a méréstartomány eleje, 2 a méréstartomány vége)
- b)  $i - u$  üzemmódú, kiegyenlített hídkapcsolás

Látható, hogy a kimenőfeszültség csak az **A** mérendő mennyiségtől függ, a **B** zavaró hatástól pedig ( $\Delta R_B \ll 4R_0$  feltételezéssel jó közelítéssel) független. A hídkapcsolásoknak ezt a tulajdonságát használtuk ki a vezeték-ellenállások hatásának a kiküszöbölésére a három- és négyvezetékes megoldásokban.

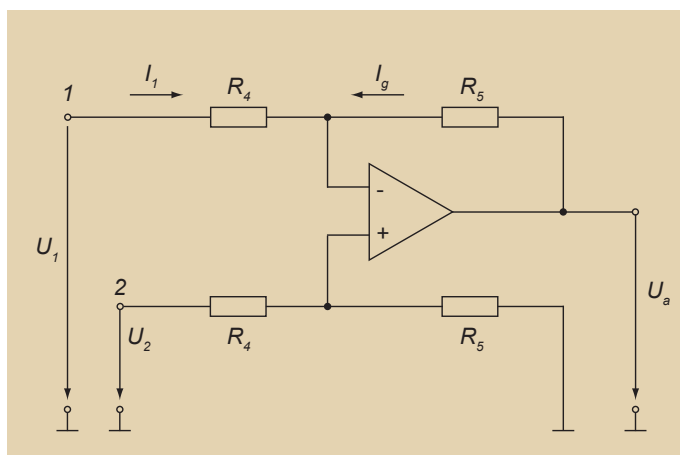
**Hídkapcsolások erősítői**

A kiegyenlített hídkapcsolások előző fejezetben részletezett számos előnye mellett nem szabad figyelmen kívül hagyni azt a tényt sem, hogy a híd  $U_k$  üresjárási kimenőfeszültsége a további jelfeldolgozás érdekében általában erősítésre szorul. A 5. ábra jelöléseivel az  $U_k$  kimenőfeszültség két – kb. azonos nagyságú –  $U_1$  és  $U_2$  részfeszültségnek az  $U_1 - U_2$  különbségéént keletkezik.



5. ábra Egy  $u - u$  üzemmódú, kiegyenlített hídkapcsolás kimenőfeszültségének mérése:  $U_k = U_1 - U_2$

6. ábra Differenciaerősítő kiegyenlített hídkapcsoláshoz



A továbbiakban a 5. ábra hídkapcsolásának **1** és **2** jelű kimenőpontjaira kapcsolódó erősítők tulajdonságait és a velük szemben támasztott követelményeket tárgyaljuk.

**Differenciaerősítő**

A különbségképzés és erősítés megvalósításának kézenfekvő eszköze a 6. ábrán látható differenciaerősítő. Mint ismeretes, az erősítő kimenetén várható  $U_a$  feszültség:

$$U_a = -\frac{R_5}{R_4}(U_1 - U_2) = -\frac{R_5}{R_4}U_k \approx -\frac{R_5}{R_4} \frac{U_T \Delta R}{4 R_0}$$

Ez a kiegyenlített hídkapcsolásból és differenciaerősítőből álló kombináció azonban csak kisellenállású érzékelő(k)höz alkalmazható. Az  $R_4$  és  $R_5$  ellenállások ugyanis elhangolhatják a hidat, és a híd kimenetén folyó áram pedig megnöveli a linearitási hibát.

**Műszererősítő**

A 6. ábrán látható differenciaerősítő hibájának kiküszöbölésére, nagyellenállású hídkapcsolások méréséhez is, előnyösen használható a 7. ábrán bemutatott műszererősítő. A megoldás lényege az, hogy az  $U_1$  és  $U_2$  feszültséget külön-külön erősíti a  $V_1$  és a  $V_2$  jelű, nem invertáló, nagy bemeneti ellenállású erősítő, megszüntetve ezzel a mérőerősítőnek a hidra gyakorolt hatását. Az

$$U_{1a} - U_{2a} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_3}\right)(U_1 - U_2)$$

nagyságú feszültségkülönbséget erősíti tovább a  $V_3$  jelű differenciaerősítő, és a kimenő  $U_a$  feszültségre végül az

$$U_a = -\frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{2R_1}{R_3}\right)(U_1 - U_2)$$

egyenletet kapjuk.

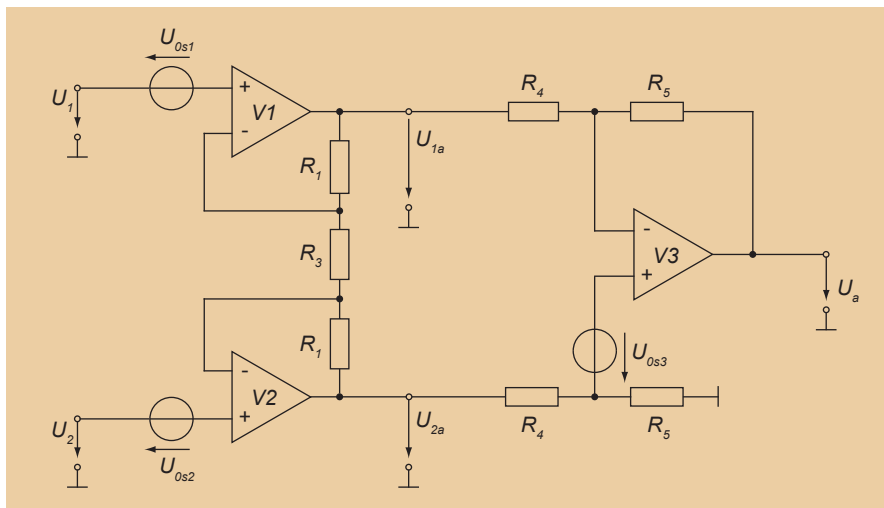
Az erősítő fokozatok helyes megválasztásával csökkenthető az  $U_{os1}$  és  $U_{os2}$  offsetfeszültségek hatása is. A 7. ábra jelöléseivel ugyanis a kimenőfeszültségben megjelenő offsetfeszültségek:

$$U_a(U_{os}) = -\frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{2R_1}{R_3}\right)(U_{os1} - U_{os2}) + \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right)U_{os3}$$

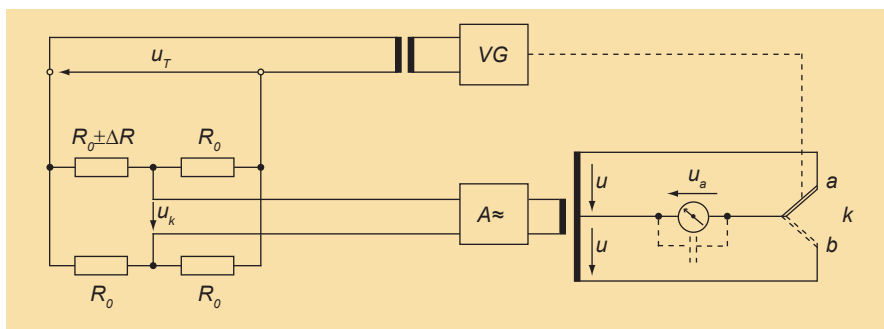
változást okoznak. A  $V1$  és  $V2$  erősítő válogatásával az  $(U_{os1} - U_{os2})$  és annak hőmérsékletfüggése is kompenzálható, ha a különbség zérus. Ezek után a bemeneti fokozat erősítésének növelésével csökkenthető a  $V3$  differenciaerősítő erősítése és az  $U_{os3}$  hatása is.

**Vivőfrekvenciás hidak és mérőerősítők**

Az eddig tárgyalt egyenfeszültséggel vagy egyenárammal táplált hídkapcsolások felbontóképességét korlátozzák részben az erősítő offset feszültségei és annak változásai, ill. azok a termofeszültségek, amelyek a hídkapcsolásokban a csatlakozási



7. ábra Műszererősítő az offsetfeszültségekkel



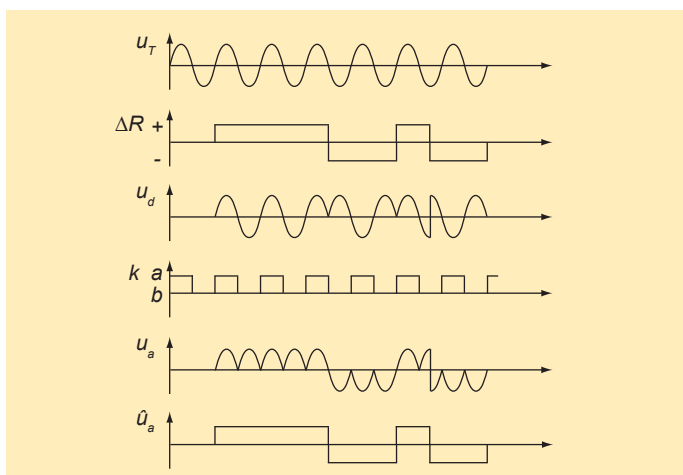
8. ábra Vivőfrekvenciás mérőhíd (VG: vivőfrekvenciás generátor, A≈: váltakozó feszültségű erősítő, k: vezérelt kapcsoló mint demodulátor)

pontokban az eltérő anyagok és hőmérsékletek esetén keletkeznek. Az offset- és termofeszültségek egyenfeszültségek, amelyeket egy váltakozó feszültségű erősítő nem visz át. Tehát az ilyen természetű egyenfeszültségű zavarokat kiküszöbölni és a felbontóképességet növelni akkor lehet, ha a hidat váltakozó feszültséggel tápláljuk, és egy váltakozó feszültségű mérést hajtunk végre.

A 8. ábrán látható hídkapcsolás négy azonos  $R_0$  értékű ellenállásból áll, amelyek közül az egyik a mérések során  $\pm\Delta R$  mértékben megváltozik. A hidat  $u_T = \hat{U}_T \sin\omega_0 t$  váltakozó feszültséggel tápláljuk. Ha a híd  $+\Delta R$  ellenállásértékkel elhangolódik, akkor az  $u_k$  kimenőfeszültség:

$$u_k \approx \frac{\hat{U}_T \sin\omega_0 t}{4R_0} \Delta R$$

9. ábra Vivőfrekvenciás mérőhíd jelalakjai



A tápfeszültséget vivőfeszültségnek fogjuk fel, amelyiket a  $\Delta R$  ellenállás-változás modulál. Ha az ellenállás  $-\Delta R$  értékkel csökken, akkor az  $u_k$  kimenőfeszültség  $-u_k$  lesz. A negatív előjel a kimenő  $u_k$  feszültségnek az  $u_T$  vivőfeszültség-hez képesti  $180^\circ$ -os fáziseltolódását jelenti.

Az  $A \approx$  erősítő ezt a feszültséget felerősíti, de ahhoz, hogy az erősítő kimenőjeléből az ellenállás-változás előjelét is kiolvashassuk, fázisérzékeny egyenirányítót kell használnunk. Ezt szemlélteti a 8. ábrán látható  $K$  jelű vezérelt kapcsoló, amelyet aluláteresztő szűrőként kiegészít a kimeneten látható elektromechanikus műszer (esetleg egy kondenzátorral együtt). A mérőkör egyes pontjain látható időfüggvényeket a 9. ábrán mutatjuk be. Az ábra 2. sorában egy aperiodikusán változó  $\pm\Delta R$  ellenállás-változást láthatunk, ami az  $u_k$  feszültséget modulálja (az ábra 3. sora). A híd tápfeszültségével azonos frekvenciával vezérelt  $K$  kapcsoló ezt a (felerősített) jelet fázisérzékenyen egyenirányítja (5. sor), amelyből a vivőfrekvencia kiszűrése után visszakapjuk a  $\Delta R$  ellenállás-változás időfüggvényét (6. sor).

Dinamikus mérésnél tételezzük fel, hogy az érzékelő  $R$  ellenállása  $R = R_0 + \Delta R \sin\omega_1 t$  időfüggvény szerint változik. Ekkor a híd  $u_k$  kimenőfeszültségére az

$$u_k = \frac{\hat{U}_T \Delta R}{4 R_0} \sin\omega_0 t \sin\omega_1 t$$

kifejezést kapjuk, ami a trigonometrikus azonosságok felhasználásával az

$$u_k \approx -\frac{\hat{U}_T \Delta R}{4 R_0} \frac{1}{2} [\cos(\omega_0 - \omega_1)t - \cos(\omega_0 + \omega_1)t]$$

alakra hozható. Az amplitúdómoduláció következményeképpen egy  $\omega_0 - \omega_1$  és egy  $\omega_0 + \omega_1$  oldalfrekvencia keletkezik, amit az erősítőnek fel kell dolgoznia. A pontosság érdekében az  $\omega_0$  vivőfrekvenciának legalább ötször nagyobbnak kell lennie az  $\omega_1$  frekvenciánál – vagyis az  $\omega_0 > 5\omega_1$  feltételt kell betartani –, ami azt jelenti, hogy az erősítőnek a vivőfrekvencia körül legalább egy  $\pm 20\%$  széles frekvenciasávot kell hibamentesen átvinnie.

A folytatásban olyan mérőkörök ismertetésére kerül sor, amelyekben az ellenállás-kimenetű érzékelőket áramgenerátorosan lehet táplálni.

**IRODALOM:**

- [1] E. Schrüfer: Elektrische Meßtechnik, 6. erweiterte Auflage. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1995
- [2] Herpy M.: Analóg integrált áramkörök. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974
- [3] Hainzmann J. - Varga S. - Zoltai J.: Elektronikus áramkörök. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1992
- [4] U. Tietze - Ch. Schenk: Analóg és digitális áramkörök. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1993
- [5] Zoltán I.: Méréstechnika. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997

(Folytatjuk!)