

5. Műveleti erősítők alkalmazása a mérés technikában

A műveleti erősítőket kiemelkedő tulajdonságaik miatt az elektronikus mérőműszerek alapvető alkatrészei közé tartoznak. Felhasználásuk nagyon gyakori a különböző mérés technikai alkalmazásokban.

Általában egy elektronikus mérőműszer a következő részekből épül fel:

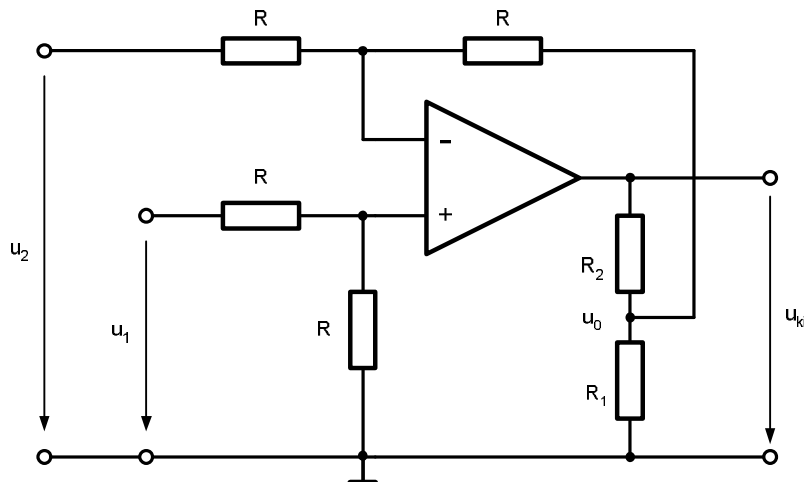
- bemeneti mérőátalakító: a mért mennyiséget elektromos jellé alakítja
- elektronikus áramkör: a mérőátalakító által szolgáltatott elektromos jelet feldolgozza: erősíti, szűri, bizonyos összefüggések szerint átalakítja és illeszti a fokozatokat egymás között
- kimenet: a mért mennyiséget megjeleníti, továbbítja, tárolja

5.1 Precíziós mérőerősítők

Nagy pontosságú mérések esetén, ahol szükség van mérőhidak, hőmérséklet érzékelők, vagy más átalakítók által szolgáltatott nagyon kis jelszinttel rendelkező (10uV-1mV) villamos jelek erősítésére - nagy közös módusú feszültségnyomási tényező mellett - különleges erősítő áramkörök alkalmazása indokolt.

A precíziós mérőerősítők olyan differenciálerősítő kapcsolások, amelyek A_{uv} erősítése nagyon pontosan beállítható, nagy bemeneti ellenállással és nagy értékű közös módusú feszültségnyomási tényezővel rendelkeznek. Paramétereik kiváló jellemzőkkel rendelkeznek az erősítés széles tartományában: $A_{uv}=1-10^4$, offset feszültségdrift $0,5\mu V/C^\circ$, CMMR=100-120 dB, nonlinearitás 0,01% alatt, nagyon nagy közös módusú bemeneti ellenállás: $10-10^4$ Mohm.

A 3.4 ábrán bemutatott differenciaerősítő legnagyobb hibája, hogy bemeneti ellenállása (főleg az invertáló bemeneten) nagyon kicsi. Ezt a hibát igyekszik csökkenteni az 5.1 ábrán látható kapcsolás.



5.1 ábra Javított bemeneti ellenállású differenciaerősítő

A kapcsolatban szereplő R ellenállások MΩ nagyságrendűek, miközben R1 és R2 ennél két nagyságrenddel kisebbek. Ebből következően az R ellenállásokon folyó áramok elhanyagolhatóan kicsik az R1 és az R2 ellenállásokon átfolyó áramokhoz képest. Ezért:

$$u_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{ki}$$

A műveleti erősítő feltételezett végtelen nagy bemeneti ellenállása miatt a bemeneteken befolyó áramok elhanyagolásával írhatjuk, hogy:

$$u_+ = \frac{R}{R+R} \cdot u_1 = \frac{u_1}{2} \quad \text{és} \quad u_- = \frac{u_2 + u_0}{2}$$

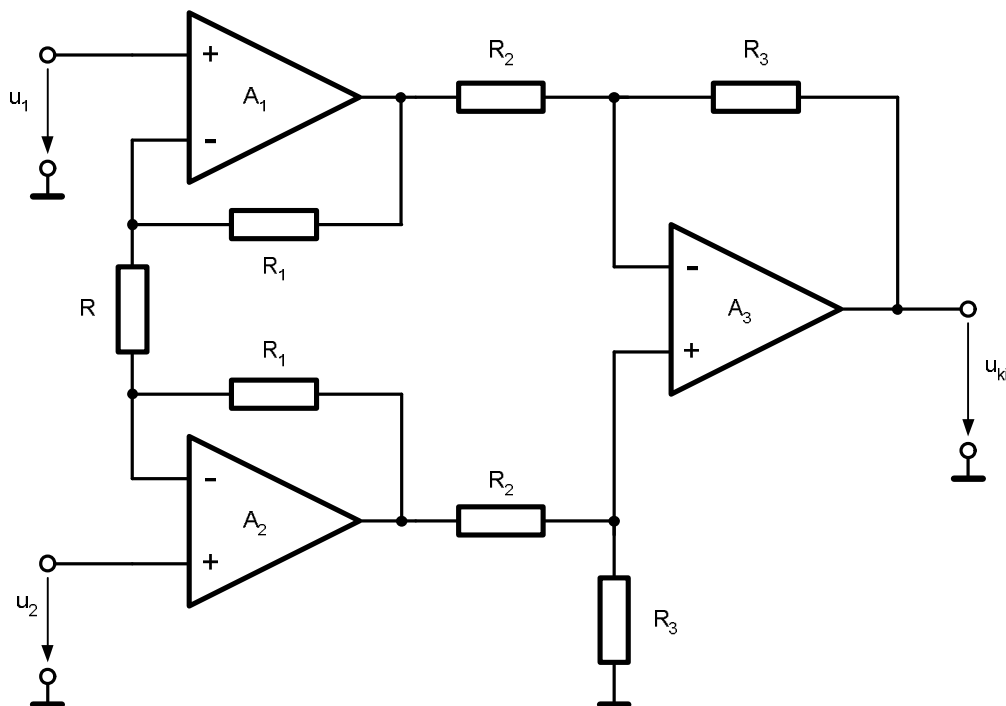
Az idealizált erősítő végtelen nagy feszültségerősítése miatt a műveleti erősítő bemenetei azonos potenciálon lesznek, tehát:

$$u_1 - u_2 = u_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{ki}$$

$$u_{ki} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot (u_1 - u_2)$$

A kapcsolás a javított kivitel ellenére sem rendelkezik azonban a precíz mérésekhez szükséges nagy bemeneti ellenállással és továbbra is érzékeny az ellenállások értékszórására.

Az előző hiányosságok három műveleti erősítő alkalmazásával jelentősen csökkenthetők. Az 5.2 ábra három műveleti erősítővel kivitelezett erősítő kapcsolási rajzát szemlélteti, amely precíziós célokra is hatékonyan felhasználható.



5.2 ábra Három műveleti erősítés precíziós mérőerősítő

A kapcsolás bemeneti ellenállása gyakorlatilag megegyezik a felhasznált műveleti erősítők közös módusú bemeneti ellenállásával. Ebben az elrendezésben az áramkör azonos fázisú elnyomása nagyon jó, így szimmetrikus és aszimmetrikus vezérléssel egyaránt jól működik. A két bemeneti erősítő kimeneti jeleinek a különbsége vezérli a második fokozatot, ezért a driftok különbsége és a különbségi zavarójelek okoznak hibát. A felhasznált műveleti erősítők összeválogatásával ezek hatását lecsökkenthetjük. Az erősítő gyakorlatilag a 0 - 100 KHz frekvenciatartományban használható. Az áramkör előnyös tulajdonságainak kihasználása érdekében a következő szempontokat kell betartani:

- a két bemeneti erősítőt lehetőleg azonos és állandó hőmérsékleten kell tartani
- a bemeneti offset feszültséget és offset áramot elhanyagolható értékűre kell beállítani

- nagyon kis jelek erősítése esetén fontos a közös módusú feszültségelnyomás megfelelő beállítása, amit az R1, R2, R3 ellenállaspárok pontos összeválogatásával érünk el
- a hatásos közös módusú feszültségelnyomás és a jó jel-zaj viszony érdekében a szükséges erősítés nagy részét a bemeneti fokozatok kell hogy adják
- a jelforrást az erősítő két bemenetével összekötő kábel külön statikus árnyékolást igényel

A kapcsolás kimeneti feszültsége a két fokozat erősítésének a szorzata. Az első műveleti erősítő kimenetén a feszültség értéke:

$$u_{k1} = \left(1 + \frac{R_1}{R}\right) \cdot u_{be1} - \frac{R1}{R} \cdot u_{be2} + u_k$$

Hasonóan, a második műveleti erősítő kimenetén:

$$u_{k2} = \left(1 + \frac{R_1}{R}\right) \cdot u_{be2} - \frac{R1}{R} \cdot u_{be1} + u_k$$

A harmadik, különbségképző műveleti erősítő kimenetén a feszültség:

$$u_{ki} = \frac{R_3}{R_2} \cdot (u_{k2} - u_{k1})$$

A fenti egyenletekből következik:

$$u_{k2} - u_{k1} = \left(1 + \frac{R_1}{R} + \frac{R_1}{R}\right) \cdot u_{be2} + \left(1 + \frac{R_1}{R} + \frac{R_1}{R}\right) \cdot u_{be1} + u_k - u_k$$

Következik:

$$u_{k2} - u_{k1} = \left(1 + \frac{2 \cdot R_1}{R}\right) \cdot (u_{be2} - u_{be1})$$

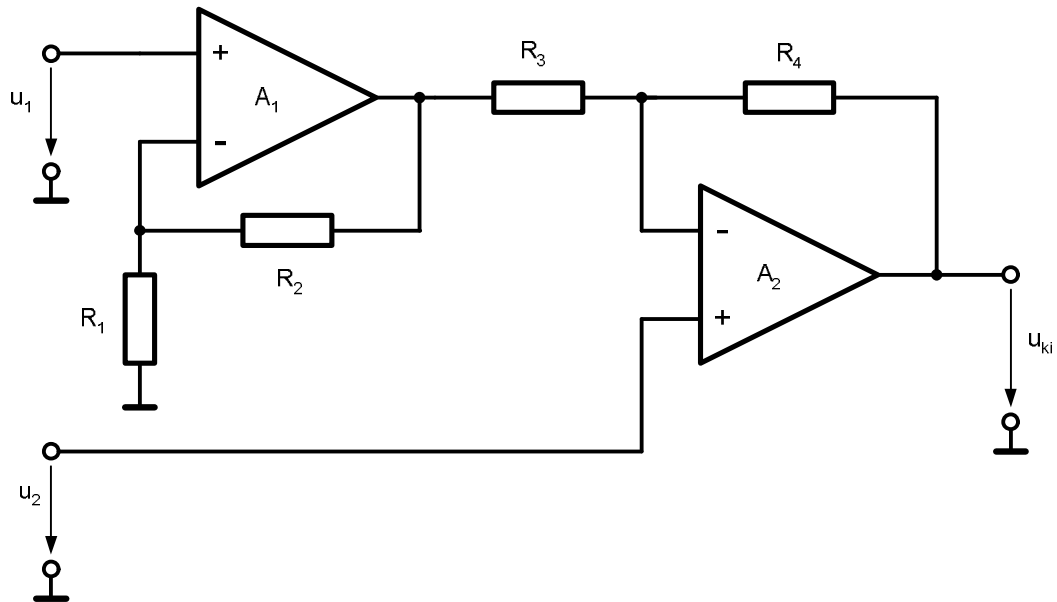
és

$$u_{ki} = \frac{R_4}{R_3} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_1}{R}\right) \cdot (u_{be2} - u_{be1})$$

Megálapítható, hogy közös jelekre az első fokozat erősítése egységnyi, míg a második fokozaté (ideális esetben) nulla. A véges közösjel-elnyomási tényező miatt azonban a közös komponensek nem tűnnek el teljesen. Az ebből eredő hiba csökkenthető, ha a második fokozat erősítését alacsonyabbra (például egységnyire), az első fokozat erősítését pedig nagyra választjuk.

A műszererősítő kialakításához használt három műveleti erősítő gyakran ugyanazon technológiai lépésben egyetlen chipre integrálva készül, és egy integrált áramköri tokozásban kerül kiszerezésre. Az erősítés változtatása az R ellenállás változtatásával érhető el, míg a kapcsolás többi jellemzője változatlan marad.

Hasonlóan jó mérőparamétereket lehet elérni az 5.3 ábrán bemutatott, két műveleti erősítővel felépített, precíziós mérőerősítővel. Látható, hogy ebben az esetben is a kapcsolás bemeneti ellenállása gyakorlatilag megegyezik a felhasznált műveleti erősítők közös módusú bemeneti ellenállásával.



5.3 ábra Két műveleti erősítő precíziós mérőerősítő

Az első műveleti erősítő kimenetén a feszültség értéke:

$$u_{k1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_{be1} + u_k$$

A második műveleti erősítő kimenetén:

$$u_{ki} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot u_{be2} - \frac{R_4}{R_3} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_{be1}$$

Abban az esetben, ha $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$, a kimeneti feszültség értéke:

$$u_{ki} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot (u_{be2} - u_{be1})$$

5.2 Feszültségmérő áramkörök

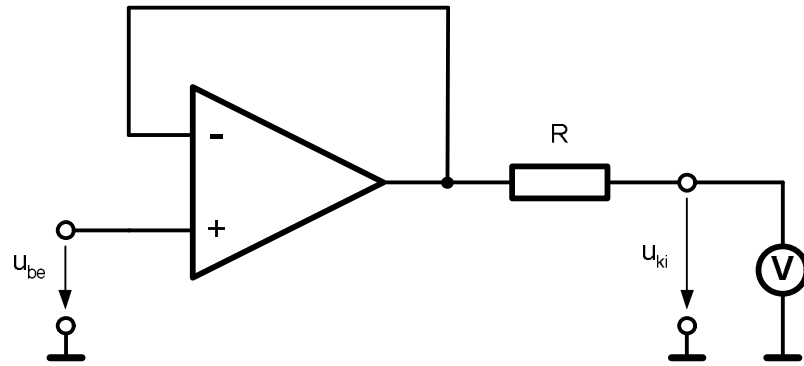
A feszültségek és áramok mérése különböző felépítésű műszerekkel lehetséges, amelyeket voltmérőknek és ampermérőknek nevezünk. Kis értékű villamos jelek mérése esetén, ezek a műszerek nagy mérési pontatlanságot eredményeznek, ha a feszültségmérők belső ellenállása nem megfelelően nagy, illetve az árammérők belső ellenállása nem megfelelően kicsi. Egy erősítőt beiktatva a mérendő mennyiség és a mérőműszer közé, a mérés érzékenysége és pontossága növelhető.

Az 5.4 ábrán látható voltmérő nagy bemeneti impedanciával rendelkezik az alkalmazott műveleti erősítő feszültségkövető kapcsolásnak köszönhetően. $U_{ki} = U_{be}$

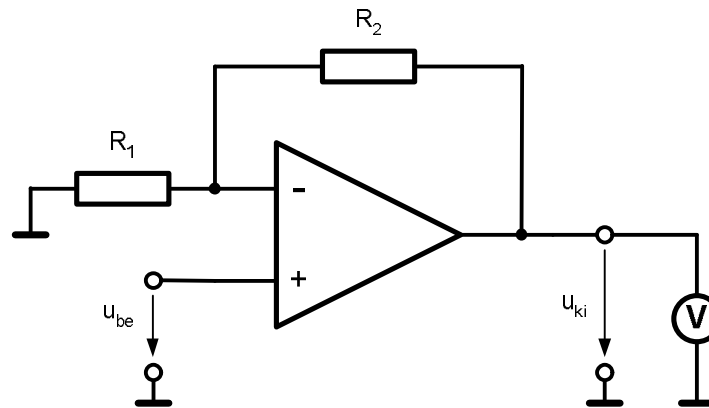
Abban az esetben, amikor a kapcsolás érzékenységét növelni szeretnénk, a műveleti erősítőt erősítőként használjuk. Az 5.5 ábra ezt a lehetőséget mutatja be. A kimeneti feszültség értékét ebben az esetben a következő összefüggés adja meg:

$$U_{ki} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{be}$$

A kapcsolat 0-10 mV közötti feszültségek mérését teszi lehetővé.



5.4 ábra Feszültségmérés műveleti erősítés feszültségkövetővel

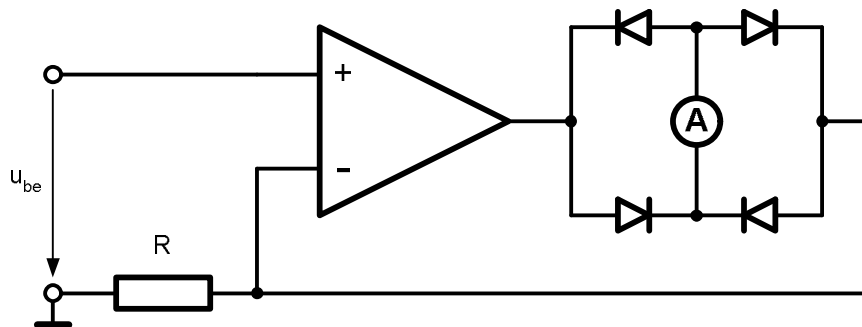


5.5 ábra Feszültségmérés nem invertáló műveleti erősítővel

Váltakozó feszültségek mérése egyenáramú elektromechanikus műszerekkel csak úgy lehetséges, ha előzőleg a mérendő feszültséget egyenirányítjuk. Az 5.6 ábra kétutas, átlagérték egyenirányító kapcsolást mutat be. A műveleti erősítő visszacsatoló ágában Graetz kapcsolású diódanegyest helyezünk el, ennek a keresztágába kötjük az árammérő műszert. A műszeren az egyenirányított kimeneti áram folyik át, amelynek értéke:

$$I \approx \frac{|U_{be}|}{R}$$

Az egyenirányító diódák feszültségigényét a műveleti erősítő fedezi.



5.6 ábra Precíziós egyenirányító kapcsolás

Mivel a kapcsolatban a diódák nyitóirányú ellenállása, valamint a mérőműszer belső ellenállása a visszacsatoló ágban van, értékük nem befolyásolja az I áram értékét, tehát a skála nagyon lineáris. A műveleti erősítő sávzélessége és a kimeneti feszültség maximális változási sebessége korlátozza a mérendő jel maximális frekvenciáját (jellemzően 20 kHz).

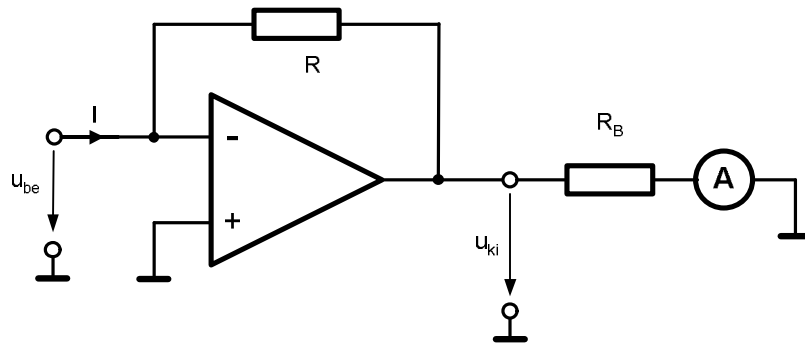
5.3 Árammérő áramkörök

Az áramok mérése elektromechanikus műszerek segítségével, csak viszonylag nagy értékű áramok esetén ad kielégítő eredményt. Az elektronikus erősítők alkalmazása növeli a mérések érzékenységét és megfelelő impedanciaillesztést biztosít a mérendő jelforrás és a mérőműszer között. Gyakran alkalmazunk műveleti erősítő áram-feszültség átalakítókat (5.7 ábra), vagy a mérendő árammal egyenesen arányos feszültségek erősítése elvén működő kapcsolásokat (5.8 ábra). Az első esetben:

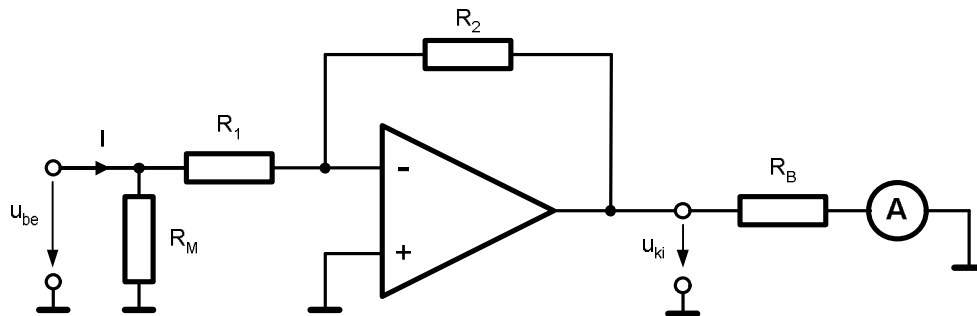
$$U_{ki} = -R_1 \cdot I$$

a második esetben pedig:

$$U_{ki} = -\frac{R_M \cdot R_2}{R_1} \cdot I$$



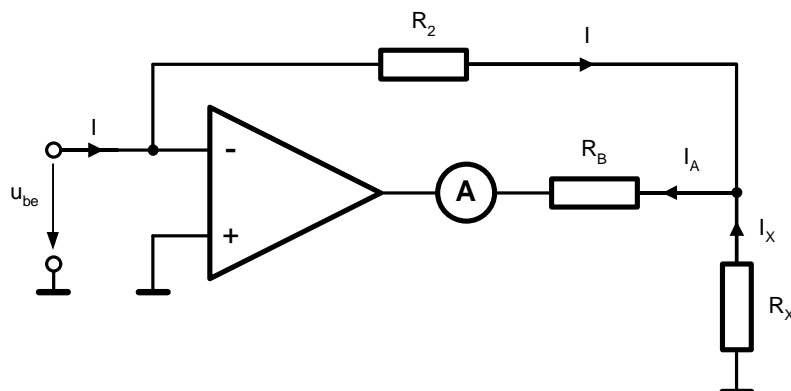
5.7 ábra Árammérés áramerősítő kapcsolással



5.8 ábra Árammérés feszültségerősítő kapcsolással

Nagyon kis értékű áramok mérésére alkalmas az 5.9 ábrán látható kapcsolás, amely biztosítja a méréstartomány függetlenségét a mérőműszer belső ellenállásától. A műszeren folyó áram erőssége:

$$I_A = I + I_x = I + I \cdot \frac{R_2}{R_x} = I \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_x}\right)$$



5.9 ábra Kis értékű áramok mérése

5.4 Ellenállásmérő áramkörök

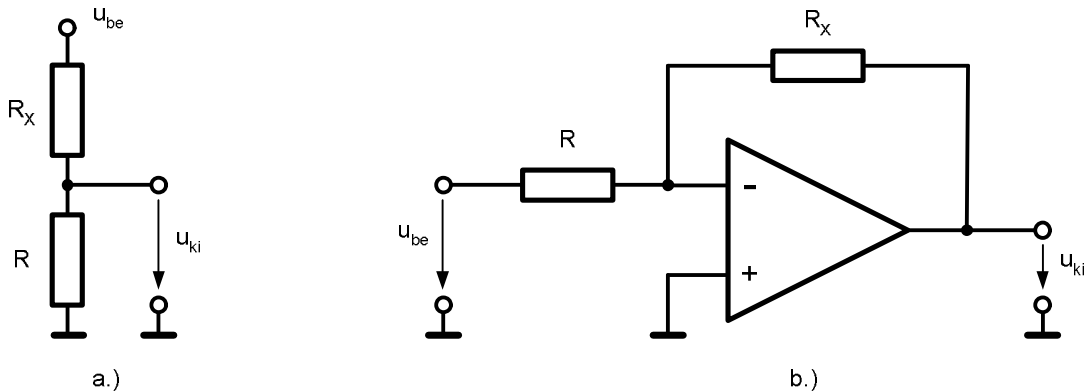
A mérés és szabályozástechnikában nagyon gyakran a mérőátalakítók kimeneti mennyisége egy villamos ellenállás: hőellenállás, fotóellenállás, termisztor, nyúlásmérő bélyeg, potencióméter, stb. Néha ezek egyszerű kapcsolásban használhatók (5.10.a ábra), és az R_x ellenállás értékének változása, közvetlen módon mérhető feszültség- vagy áramváltozásra vezethető vissza. Ha a kimeneti feszültség értéke:

$$U_{ki} = U_0 \cdot \frac{R}{R + R_x},$$

x a mért mennyiség és $R_x=f(x)$, akkor a kimeneti feszültség változása a mért mennyiség függvényében

$$\frac{\Delta U_{ki}}{\Delta x} = -\frac{U_0 \cdot R}{R + R_x} \cdot \frac{\Delta R_x}{\Delta x} \approx -U_0 \cdot \frac{\Delta R_x}{\Delta x}, \text{ ha } R \gg R_x,$$

ami egy elektronikus feszültségmérővel mérhető. A kapcsolás nem előnyös a mért mennyiség kis értékű változásai esetén és olyan esetekben amikor a mért ellenállás nagy távolságban található. Ilyenkor a differenciális erősítő kapcsolások alkalmazhatók eredményesen.



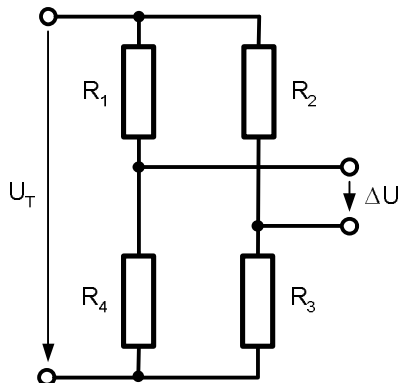
5.10 ábra Ellenállásváltozás átalakítása feszültségváltozássá

Az 5.10.b ábrán látható megoldás alkalmazása esetén a kimeneti feszültség egyenesen arányos az R_x ellenállással:

$$U_{ki} = -\frac{U_{be}}{R} \cdot R_x$$

Ez a kapcsolás nagyobb érzékenységet biztosít szélesebb értéktartományban mint az előző megoldás.

Nagy érzékenységu és pontosságú mérések esetén hídkapcsolásokat használunk. A legegyszerűbb elrendezés az 5.11 ábrán bemutatott Wheastone mérőhíd.

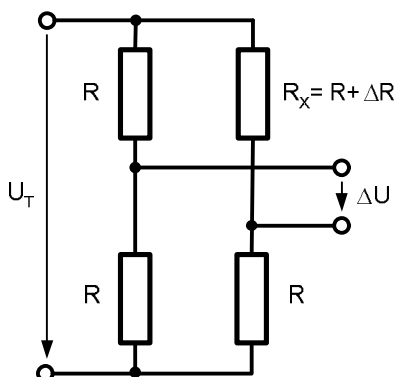


5.11 ábra Wheastone mérőhíd

A mérőhíd akkor tekinthető kiegyenlítettnek, ha oldalainak ellenállása egymással arányosak:

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

Ebben az esetben a kimeneti feszültség értéke $U=0$, függetlenül az U_T tápfeszültség értékétől. A kimeneti feszültség nullától különböző értéke a híd kiegyenlítettségi fokát mutatja. Ilyenkor az ellenállásokra vonatkozó fenti összefüggés nem teljesül. A mérőhíd tulajdonságai megmaradnak váltakozó áram esetén is és ekkor a híd elemei különböző R , L , C elemek lehetnek.



5.12 ábra Kiegyenlített Wheastone mérőhíd

Amikor a névleges R ellenállással rendelkező R_x mérőátalakító a híd egyik elemét alkotja (az 5.12 ábrán látható módon), az $r = \frac{\Delta R}{R}$ változások a névleges érték körül egy ΔU kimeneti feszültséget hoznak létre. Ebben az esetben:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = U_T \cdot \frac{R}{R+R} - U_T \cdot \frac{R}{R_x+R} = U_T \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{R_x+R} \right) = \frac{U_T}{2} \cdot \frac{R_x - R}{R_x + R}$$

mivel $\Delta R = R_x - R$ és $R_x \approx R$, következik:

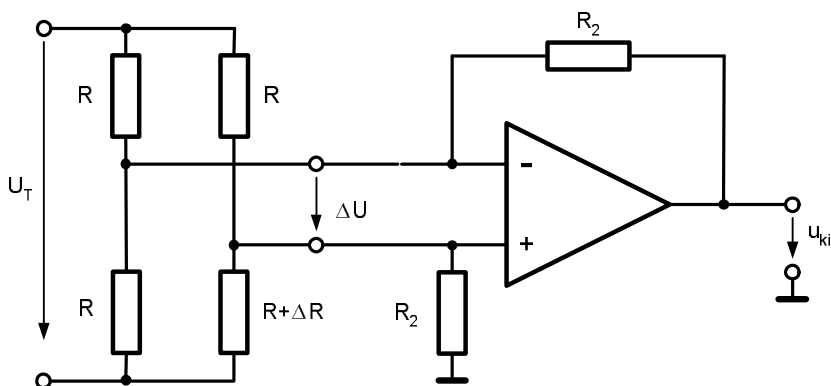
$$\Delta U \approx \frac{U_T}{4} \cdot r, \text{ ha } r \ll 1$$

Az összefüggés linearitása csak nagyon kis értékű r , illetve ennek megfelelő ΔU változások esetén marad érvényes. Ezért kell a mérőhíd kiegyenlítettségi feszültségét egy műveleti erősítő differenciálerősítővel erősíteni, amely a bemenetek földfüggetlen csatlakozását teszi lehetővé és megfelelően nagy érzékenységet biztosít.

Az 5.13 ábrán látható nagy érzékenységű aktív mérőhídkapcsolás kimeneti feszültsége:

$$U_{ki} = \frac{R_2}{R} \cdot \frac{U_T}{2 \cdot \left(1 + \frac{R}{2 \cdot R_2} \right)} \cdot \frac{\Delta R}{R}, \text{ ha } \Delta R \ll R + R_2$$

Ez az áramkör az adott célra egyszerű megoldásnak tekinthető, de nagy pontosságú ellenállások használata szükséges. Ha az erősítés változtatására van szükség, az R_2 ellenállások pontos beállítást igényelnek.



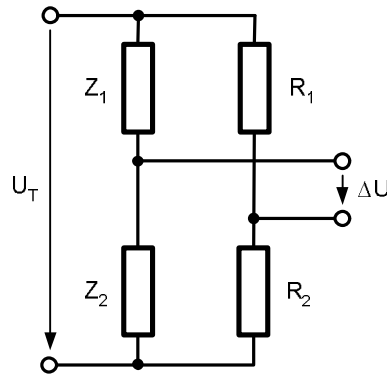
5.13 ábra Hídáram erősítő

Kapacitások, induktivitások, vagy induktív és kapacitív mérőátalakítók paramétereinek mérésére különböző váltakozó feszültségű mérőhidakat alkalmazunk (5.14 ábra). Amikor a Z_1 és Z_2 impedanciák kondenzátorokat képviselnek, a mérőhíd egyensúlyi feltétele:

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{R_1}{R_2}$$

Abban az esetben, ha Z_1 és Z_2 tekercsek impedanciáját képviselik, a híd kiegyenlítettnek tekinthető, ha:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

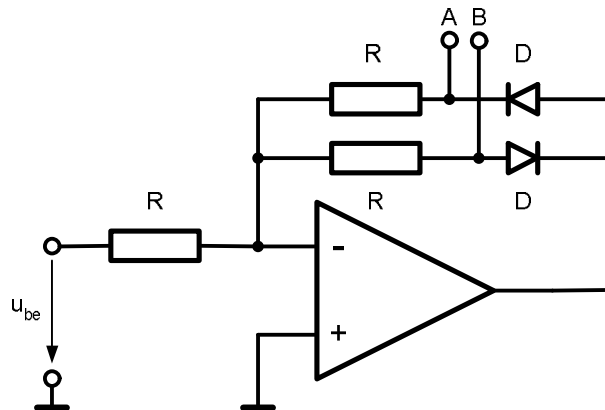


5.14 ábra Váltakozó feszültségű mérőhíd

Megállapítható, hogy hasonlóan az előző esetekhez, ezekben az esetekben is a mérőhíd kiegyenlítetlensége lineáris összefüggésben van a mérőhíd valamelyik elemének a változásával.

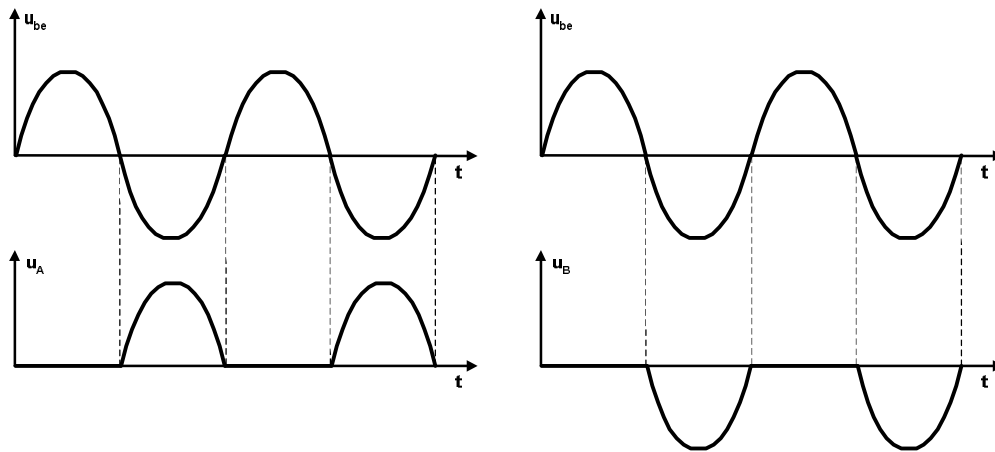
5.5 Precíziós egyenirányítók

Az 5.15 ábra egy olyan kapcsolást mutat amely a bemeneti jel pozitív, vagy negatív félperiódusát egyenirányítja.



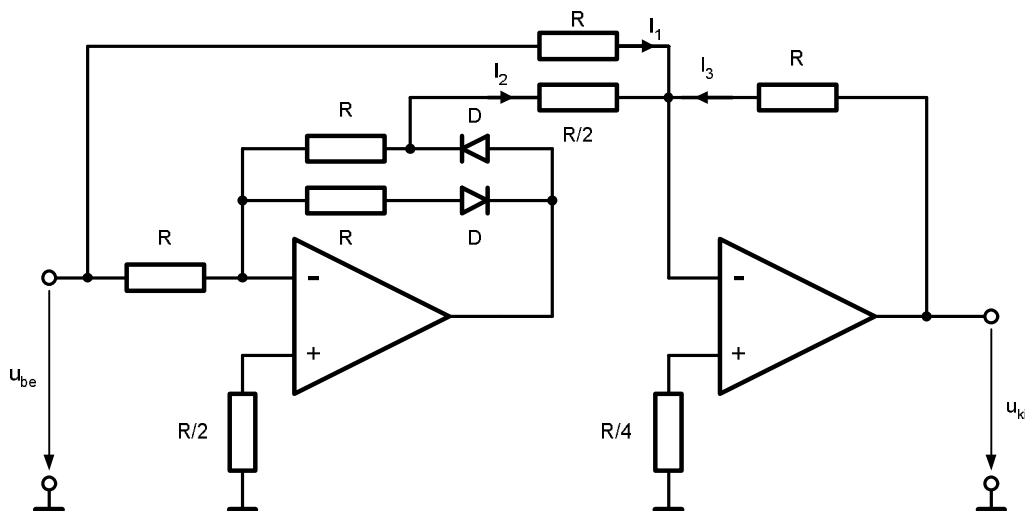
5.15 ábra Invertáló félhullámú egyenirányító kapcsolás

Amíg a műveleti erősítő kimeneti jele nem éri el a diódák egyikének a nyitófeszültségét ($U_{D0} \approx 0,6V$), addig az erősítő nyílthurkú feszültségérsítéssel dolgozik, ezért a kimenete nagyon meredeken követi a bemeneti jel változását. Ha az erősítő kimenete már meghaladta a $\pm U_{D0}$ -t, akkor a visszacsatolásnak megfelelően U_{D0} feszültségkülönbséggel és egységnyi meredekséggel követi a bemeneti jel invertáltját. Pozitív bemeneti jeleknél az erősítő kimenete negatív és az A oldali diódája zárt és az A pont feszültsége nulla. Negatív bemeneti jeleknél az A oldali dióda kinyit, mert az erősítő kimenete pozitív. Ekkor az A pont feszültsége az erősítő kimeneti feszültsége alatt marad, U_{D0} értékkel. Tehát pozitív bemeneti jelekre az A pont feszültsége nulla, negatív bemeneti jelekre pedig a bemeneti jelt invertálja, azaz pozitív lesz. A B pont feszültsége, hasonló megfontolásokból pozitív bemeneti jelekre invertálja azokat és negatív lesz, míg negatív bemeneti jelekre nullát ad (5.16 ábra).



5.16 ábra Félhullámú egyenirányító feszültségdiagramjai

Az invertáló félhullámú egyenirányító kapcsolás csekély kiegészítésével nagypontosságú kétutas egyenirányítót, azaz abszolútérték-képző áramkört hozhatunk létre. Felépítését az 5.17 ábra mutatja.



5.17 ábra Precíziós abszolútérték-képző kapcsolás

A kapcsolás első műveleti erősítője egy félhullámú egyenirányító kapcsolás, mely a pozitív bemeneti jelekre nem reagál, míg negatív bemeneti jel esetén a kimenetén előállítja annak invertáltját.

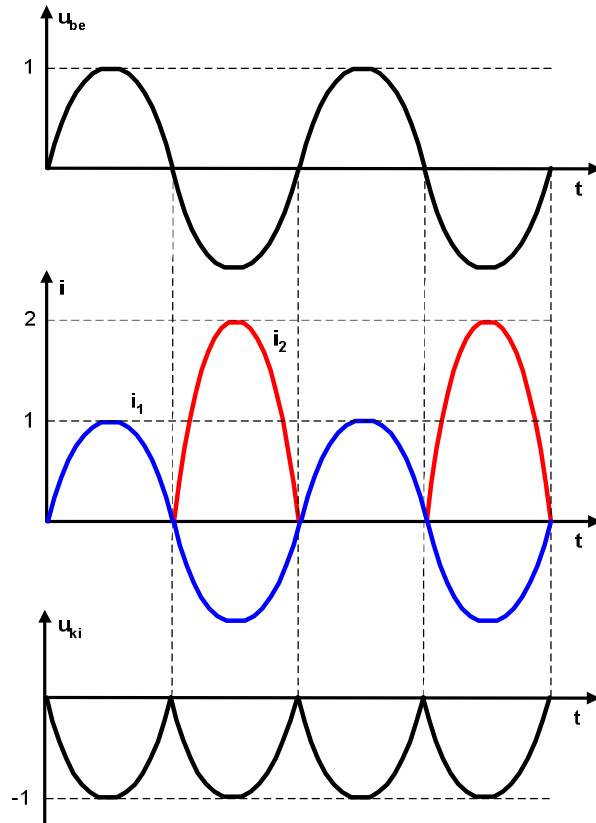
A második műveleti erősítő súlyozott összegzőként viselkedik. Invertáló bemenetén az i_3 árammal ellensúlyozza i_1 és i_2 összegét. Az i_1 áram értéke mindegyik félperiódusban

$$i_1 = \frac{u_{be}}{R}$$

Az i_2 áram a pozitív bemeneti jelekre 0, míg a negatív fél-periódusban

$$i_2 = -\frac{u_{be}}{R} = -2 \cdot \frac{u_{be}}{R} > 0$$

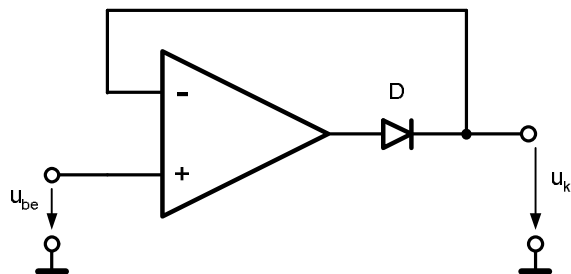
A két áram összege csak pozitív félperiódusokból áll, ezért a kimeneti feszültségjelet csak negatív félperiódusok alkotják, ahogy azt a 5.18 ábra szemlélteti.



5.18 ábra Abszolútérték képző kapcsolás feszültségdiagramja

5.6 Precíziós csúcsértékmérők

Az 5.19 ábrán egy diódával kiegészített követő erősítőt látunk, melynek kimeneti jele negatív bemenet esetén nulla, pozitív bemeneti jelre pedig nagy linearitással megegyezik azzal.



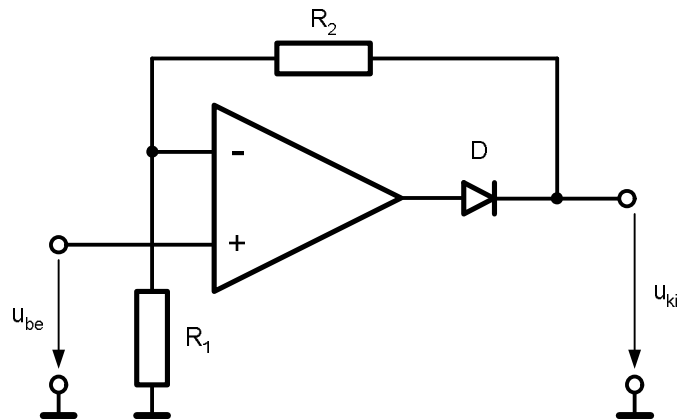
5.19 ábra Diódás követő erősítő

Pozitív bemeneti feszültségek esetén a kapcsolás valóban követő erősítőként viselkedik. Negatív bemeneti jelek mellett azonban a műveleti erősítő kimeneti feszültsége a lehető legalacsonyabb értékét veszi fel, azaz a negatív tápfeszültség felé közelít. Ekkor a dióda lezárt állapotba kerül. A kapcsolás kimeneti feszültsége nulla lesz.

A dióda lezárt állapotában a visszacsatolás megszűnik, ezért a műveleti erősítő a nyílthurkú feszültségerősítésnek megfelelően – nagyon meredeken – követi a bemeneti jelet. Amikor a bemeneti jel negatívról pozitívrá vált a dióda nem nyit ki azonnal. Csak amikor már a műveleti erősítő kimeneti jele elérte a dióda nyitófeszültségét, akkor kezd a kapcsolás kimeneti feszültsége emelkedni. Ez U_{D0}/A_{u0} nagyságú bemeneti jelnél következik be, mely mikrovolt nagyságrendű. Ekkora lesz az így előállt kapcsolás „nyitófeszültsége”. A dióda r_D differenciális ellenállása is kb. A_{u0} részére csökken. A kapcsolás egyik hátránya, hogy a nyitótartományban a kimeneti feszültség

nem emelkedik meredekebben, ahogy azt ideális esetben egy kapcsolótól várnánk.

Az 5.20 ábrán látható megoldással az áramkör visszacsatolt állapotában tetszőlegesen beállítható emelkedést érhetünk el.



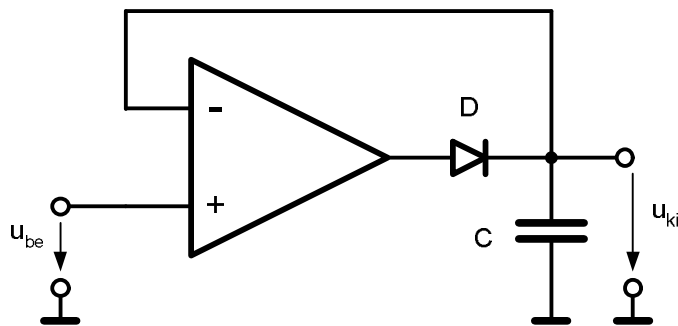
5.20 ábra Az ideális dióda közelítése műveleti erősítővel

U_{D0}/A_{u0} -nál nagyobb bemeneti feszültségek esetén az $u_{be}-u_{ki}$ kapcsolatot az A_{uv} visszacsatolt erősítés határozza meg, melyet az R_1 és R_2 ellenállásokkal változtathatunk.

$$A_{uv} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Az így megvalósított kapcsolás az alacsonyfrekvenciás tartományban jól közelíti az ideális dióda karakterisztikáját.

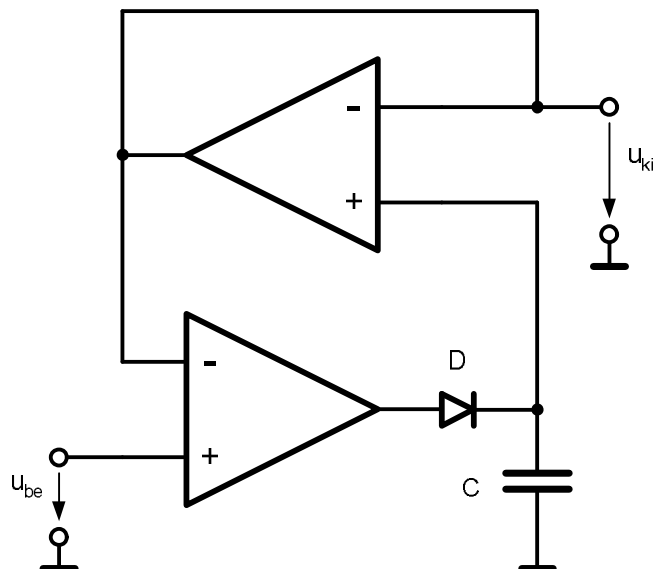
Ezek a kapcsolások további áramköri megoldások alapja lehet. Az 5.21 ábrán egy, a bemeneti jel csúcsértékét mérő kapcsolást láthatunk.



5.21 ábra Csúcsértékmérő

A kapcsolás kimeneti kondenzátorán a bemeneti jel csúcsértéke jelenik meg. Ideális esetben ezt a feszültséget a kondenzátor meg is őrzi, mert a lezárt dióda, illetve a műveleti erősítő invertáló bemenete felé nem folyik áram. Valódi áramkörök esetén ezek nem hanyagolhatók el és nem szabad figyelmen kívül hagyni a következő fokozat bemeneti ellenállását és a kondenzátor önkisülését sem.

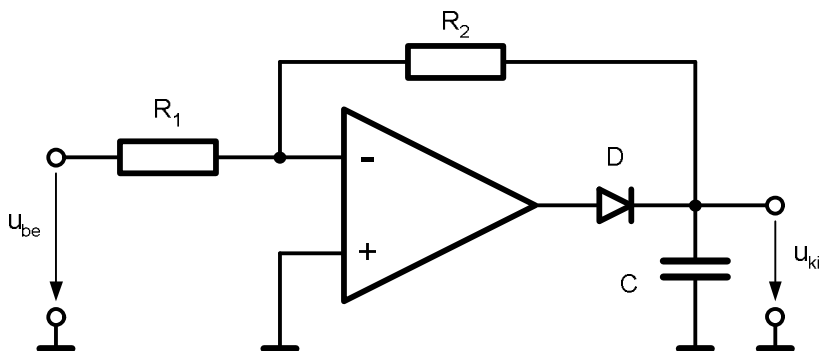
Korlátozást jelent még a műveleti erősítő véges maximális kimeneti árama, mely főleg rövid impulzusok esetén nem képes kellő sebességgel tölteni a kondenzátort. A fenti nehézségeket egy újabb műveleti erősítő beiktatásával csökkenteni lehet. Ezt szemlélteti az 5.22 ábra.



5.22 ábra Gyors működésű csúcsértékmérő kapcsolás

Ennél a megoldásnál a C kondenzátort a következő fokozat felé egy követő kapcsolás illeszti, ezért kisebb értékű lehet, ezáltal a kondenzátor töltődése és a kapcsolás működése felgyorsul.

Végül, a bemeneti jel negatív csúcsfeszültségének érzékelésére alkalmas megoldást láthatunk az 5.23 ábrán.



5.23 ábra Mérőkapcsolás negatív csúcsfeszültségek érzékelésére

Pozitív bemeneti jelek esetén a műveleti erősítő kimenete a negatív tápfeszültség közelébe kerül és a dióda lezár. Negatív bemeneti jelek mellett a műveleti erősítő kimenete pozitívrá vált és a visszacsatolásnak megfelelően a kimeneten előállított jel:

$$u_{ki} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_{be} , \text{ ha } u_{be} < 0$$

Ennek a csúcsértékét őrzi meg a kondenzátor, ami tehát a bemeneti jel minimális értékének $-\frac{R_2}{R_1}$ szerese lesz.

A kapcsolás hiányossága a műveleti erősítő nem ideális tulajdonságain túl, hogy az R_2 -es ellenálláson keresztül el nem hanyagolható áram folyhat, mely a kondenzátor feszültségét módosítja. Feltételezve egy, a kondenzátoron már kialakult u_C feszültséget, ennél nagyobb pozitív bemeneti jelek esetén tölti a kondenzátort, kisebb pozitív és negatív jelek esetén kisüti azt. A kondenzátor töltődése – a műveleti erősítő által – csak az újabb negatív bemeneti csúcsoknál következik be.