

A folyamatműszerezés érzékelői

Érzékelők mérőkörei - 6.

Dr. Fock Károly

A folyamatműszerezés érzékelői villamos kimeneti jeleinek közvetlen feldolgozására kialakított mérőkörök ismertetését összefoglaló cikksorozatunk befejező részében a pH-mérők és a bázis-emitter feszültségkülönbségek hőmérsékletfüggésén alapuló érzékelők speciális alkapcsolásait tekintjük át.

pH-mérők mérőkörei

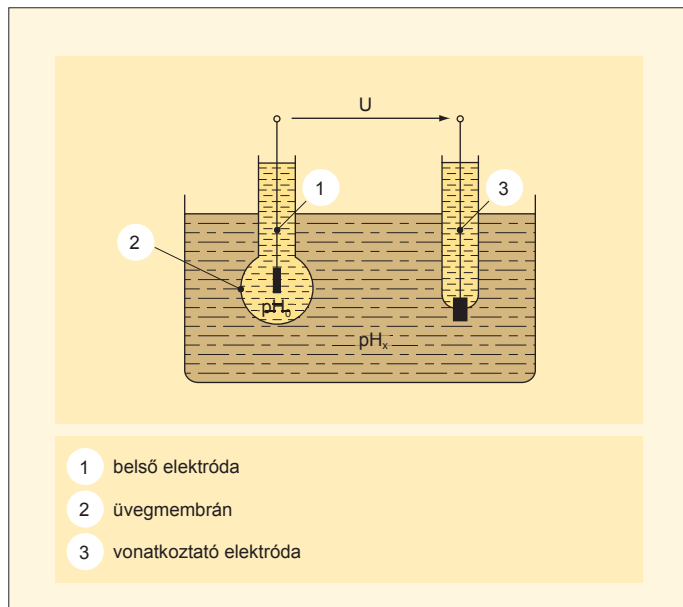
A pH-érték a vizes oldatokban egymással reagáló anyagok reakciójának irányát és sebességét határozza meg. Emiatt mérése nagy jelentőségű a vegyiparban, az élelmiszeriparban, a fémfeldolgozásban (korrózióvédelem, galvanikus felületnemesítés) és nem utolsósorban a környezetvédelemben, ahol pl. a szennyvizek biológiai és kémiai tisztításában van kiemelkedő szerepe.

Mivel a cikksorozatnak változatlanul a mérőkörök bemutatása és elemzése a célja, ezért a pH-mérő érzékelőket is csak olyan részletességgel tárgyaljuk, ami alapján indokolható a mérőkörök felépítése.

Üvegelektrodák mérőkörei

Az 1. ábrán látható, hogy a keresett c_x hidrogénion-koncentráció két elektródával mérhető. Az ábra bal oldalán látható a mérő, a jobb oldalán pedig a vonatkoztató elektróda, mindkettő a mérendő elektrolitba merül. A mérőelektroda érzékelő eleme a 2 jelű üvegmembrán, amelynek két oldalán a mérendő c_x és a membrán belsejében lévő pufferoldat állandó, c_0 hidrogénion-koncentrációtól függő elektródpotenciál keletkezik. A vonatkoztató elektróda potenciálja a c_x -től független.

1. ábra pH-mérés üvegelektrodával



Az U feszültségkülönbség és a c_x hidrogénion-koncentráció között a Nernst-egyenlet írja le a kapcsolatot:

$$U = \frac{RT}{F} \ln \frac{c_x}{c_0} = 0,2T(pH_0 - pH_x) \text{ mV},$$

ahol:

R az egyetemes gázállandó ($8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$),
 F a Faraday-féle állandó ($9,648 \cdot 10^4 \text{ Cmol}^{-1}$),
 T az abszolút hőmérséklet (K).

Az egyenletekből látható, hogy egyrészt a mérés érzékenysége hőmérsékletfüggő, másrészt ez az érzékenység viszonylag nagy, hiszen $0 \text{ }^\circ\text{C}$ -on ($T=273 \text{ K}$) a Nernst-egyenlet

$$U = 54,2(pH_0 - pH_x) \text{ mV}$$

alakú, vagyis pH-értékenként a mérhető feszültség $54,2 \text{ mV}$ -ot, a teljes pH-tartományban pedig közel 700 mV -ot változik.

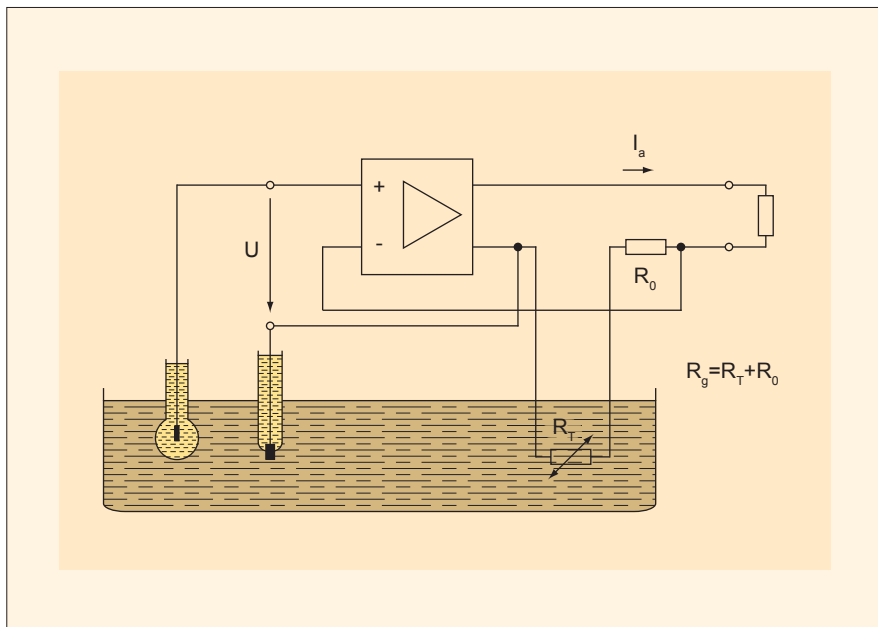
Ez a feszültség önmagában könnyen mérhető lenne, a nehézség azonban az, hogy az üvegelektrodás érzékelő rendszernek a generátor-ellenállása $1000 \text{ M}\Omega$ nagyságrendű, és elektrokémiai okok miatt az elektródarendszer által szolgáltatott feszültséget terhelésmentesen kell mérni.

Ennek a méréstechnikai következménye az, hogy egy igen nagy bemenő ellenállású erősítőre van szükség, a mérőveze-tékeket igen gondosan kell árnyékolni, mivel a nagy ellenállású mérőkör igen zavarérzékeny. A nehézséget csak fokozza, hogy a nedvesség és a piszkos környezet a mérési feltételeket tovább rontja.

A mérőkörnek a fenti követelmények között olyan kialakításúnak kell lennie, amelyben az érzékenység (lehetőleg automatikus) hőmérséklet-kompenzációja is megvalósítható.

A megoldást pl. a 2. ábrán látható, hőmérsékletfüggő visz-szacsatolással rendelkező, feszültség-áram típusú erősítő-kapcsolás jelentheti. Az erősítő I_a kimenőárama az

$$I_a = \frac{U}{R_g} = \frac{U}{R_T + R_0} = \frac{0,2T(pH_0 - pH_x)}{R_T + R_0}$$



2. ábra Üvegelektrodás pH-mérő automatikus érzékenységekompenzációval

összefüggéssel számítható. Látható, hogy a visszacsatolást befolyásoló R_T hőmérsékletfüggő ellenállás megfelelő méretezés esetén kompenzálni tudja a tört számlálójának a hőmérsékletfüggését. Az R_T méretezése egyben meghatározza az erősítő átviteli tényezőjének az értékét is. Ha ezen módosítani kell, akkor egy második erősítőfokozat beiktatása is szükséges.

Ionszelektív térvezérlésű tranzisztorok

Az üvegelektrodák a pH-értékkel arányos feszültséget szolgáltatnak, más szóval ez az érzékelő H^+ -ionokra szelektív. Ez a hatás fémoxid térvezérlésű tranzisztorban (MOSFET) is kihasználha-

tó, és létrehozható az ún. ionszelektív térvezérlésű tranzisztor (ISFET). Az ISFET jelenleg még nem annyira elterjedt és kipróbált, mint az üvegelektroda. Mégis az prognosztizálható, hogy egy kisméretű, gyors és olcsó érzékelő válik belőle folyadékok különböző ionjai koncentrációjának a meghatározására.

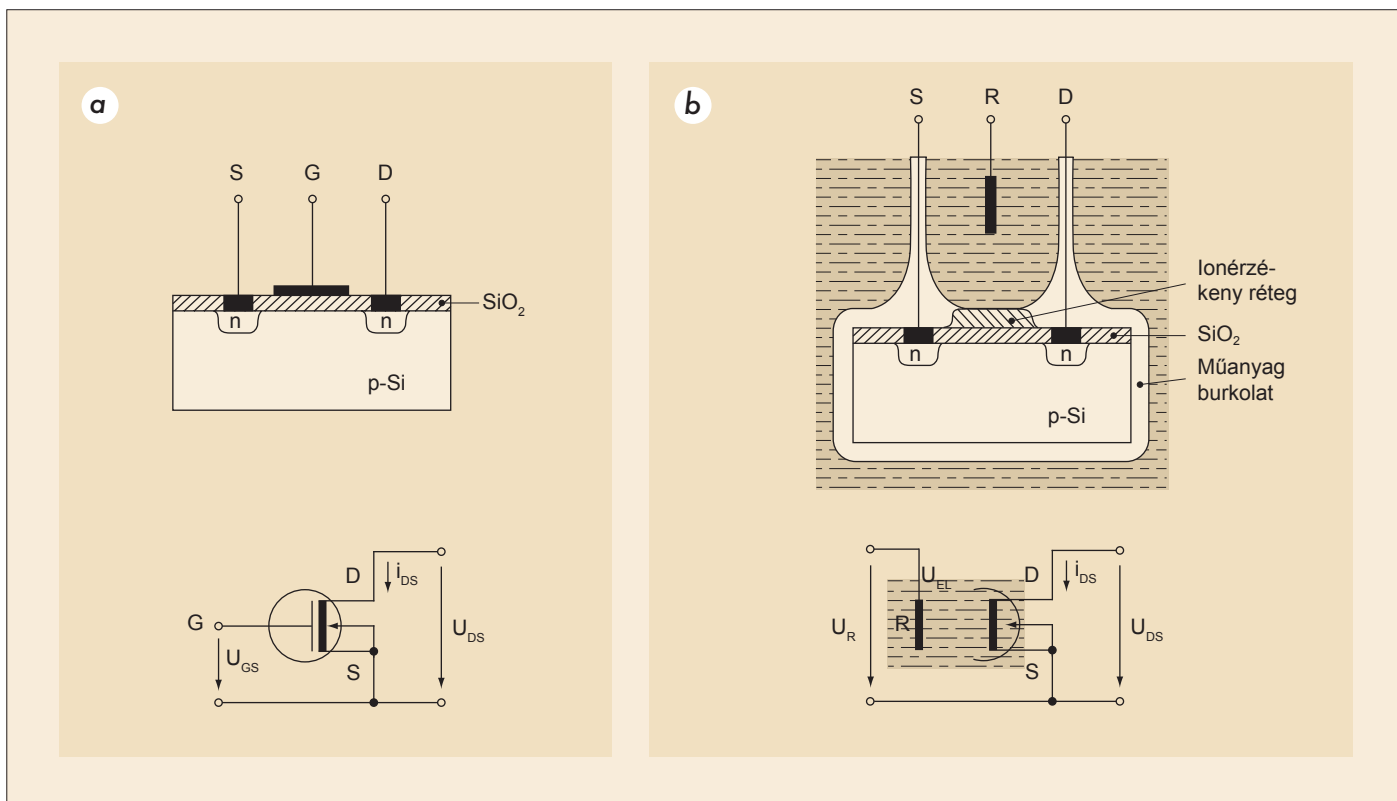
Az ISFET működésének a megértéséhez célszerű a 3. ábra alapján a MOSFET felépítéséből kiindulni. Mint ismeretes, ennek Drain-Source-árama a Gate-vezérlőelektrodára kapcsolt feszültséggel vezérelhető (3. a ábra). Az ISFET-nél hiányzik a fém Gate-elektroda, ezt egy ionszelektív szigetelőréteg helyettesíti (3. b ábra). Ez a réteg áll közvetlen kapcsolatban az elektrolittal, amelyben a kiválasztott ionkoncentrációt kívánjuk mérni. Az R -jelű vonatkoztató elektróda a munkapont definiált beállításához szükséges.

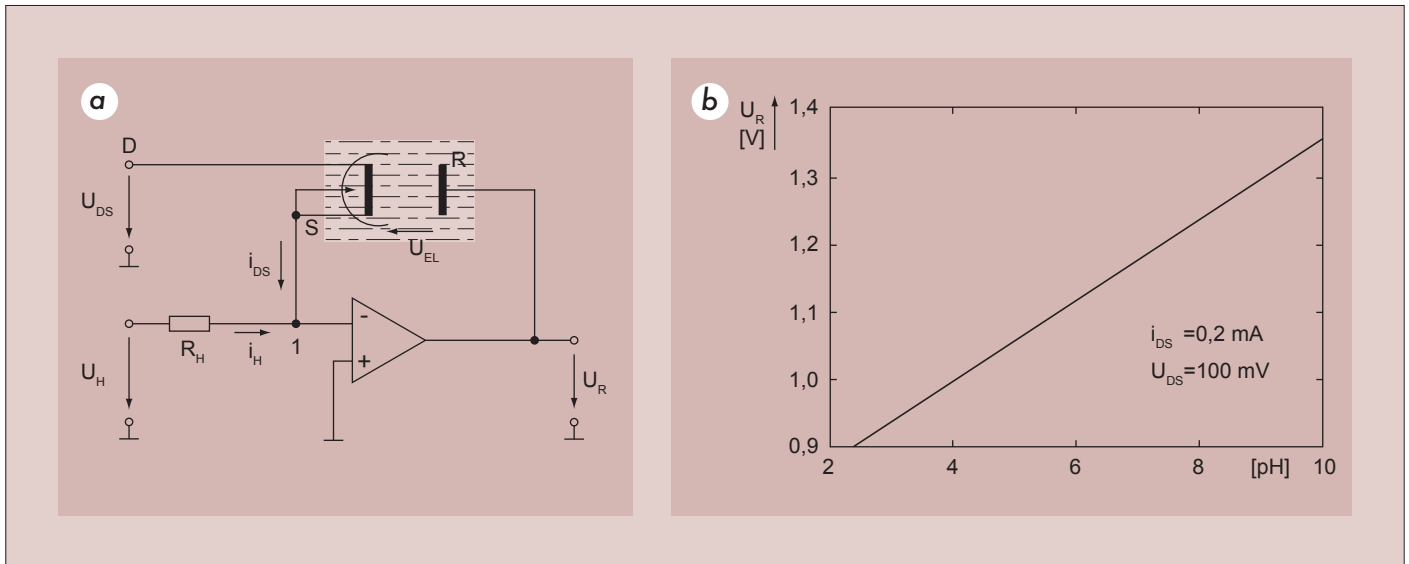
A vonatkoztató elektróda–elektrolit réteg és az elektrolit–ionszelektív réteg között elektrokémiai potenciálok keletkeznek. Ebből jön létre az U_{EL} feszültség, ami a Nernst-egyenletnek

megfelelően a c_x ionkoncentrációtól függ. Ez az U_{EL} feszültség olyan hatású, mint a Gate-elektrodára kapcsolt vezérlőfeszültség, sorba kapcsolódik az U_R referenciasfeszültséggel, és együtt vezérlik az ISFET Drain-Source-áramát, ami ezáltal a keresett ionkoncentráció függvénye.

Az ionszelektív réteg anyagai a SiO_2 és Si_3N_4 vegyületeken kívül speciális üvegek, szerves és szerves vegyületek lehetnek. Egy tantál-pentoxidból (Ta_2O_5) készült réteg pl. a H^+ -ionok koncentrációjára reagál, és ezzel az eszköz pH-érték meghatározására alkalmas. Na^+ -ionokhoz nátrium-alumínium-szilikát rétegre, K^+ -ionokhoz valinomycinre, Ca^{++} -ionokhoz pedig koronaéterre van szükség.

3. ábra MOSFET és ISFET felépítésének és működésének összehasonlítása





4. ábra ISFET-típusú pH-mérő
 a) Működés állandó áramú üzemmódban
 b) Ta_2O_5 -ISFET mérőkörének karakterisztikája 25 °C hőmérsékleten

A lineáris mérési karakterisztika elérése érdekében célszerű a 4. ábrán látható mérőkapcsolást választani, amelyben az i_{DS} Drain-Source-áram állandó (ami az ISFET hőmérsékletének és teljesítményfelvételének az állandóságát is jelenti). Ennél a választásnál a 4.b ábrán látható lineáris pH- U_R mérési karakterisztikát kapunk. (Látható, hogy a pH-mérési tartomány ennél az ISFET-eszköznél szűkebb, mint az üvegelektrodánál tapasztalt 0...14 pH-tartomány.)

A mérőkapcsolásban állandó U_{DS} Drain-Source-feszültségre és egy állandó U_H segéd feszültségre van szükség. Az U_H feszültség a konstans i_H áramot hozza létre, és ideális műveleti erősítőt feltételezve emiatt i_{DS} -nek is állandónak kell lennie. Ha változik az elektrolit ionkoncentrációjától függő U_{EL} feszültség, az egy más nagyságú i_{DS} áramot generálna, de az erősítő miatt ez nem lehetséges. Emiatt az erősítő kimenetén mérhető U_R feszültség mindig akkora lesz, hogy az áram állandó maradjon. Így az U_R feszültség az ionkoncentráció függvénye lesz.

Bázis-emitter-feszültségek különbségének hőmérsékletfüggésén alapuló érzékelők mérőkörei

A hőmérsékletmérés egyik újabb megoldását jelenti a $p-n$ -átmenet nyitóirányú feszültsége hőmérsékletfüggésének a kihasználása. A csereszabotosság és a pontosság érdekében ezeket az eszközöket tranzisztorokból alakítják ki, biztosítják a kollektor áramok állandóságát, és mérésre a bázis-emitter diódát használják. A kereskedelemben is kapható, ilyen típusú, Si-alapanyagú érzékelők két tranzisztorból állnak, és kimenő-jelként mérik a tranzisztorok bázis-emitter-feszültségének a különbségét, ami a hőmérséklet lineáris függvénye.

A működés megértéséhez abból kell kiindulni, hogy két azonos tranzisztoron átfolyó áramok nagysága eltérő, arányuk legyen a . A $p-n$ -átmenet nyitóirányú feszültségének kifejezését felhasználva kiszámítható a tranzisztorok bázis-emitter-feszültségének ΔU_{BE} különbsége:

$$\Delta U_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{aI}{I_0} - \frac{kT}{q} \ln \frac{I}{I_0} = \frac{kT}{q} \ln a ,$$

ahol

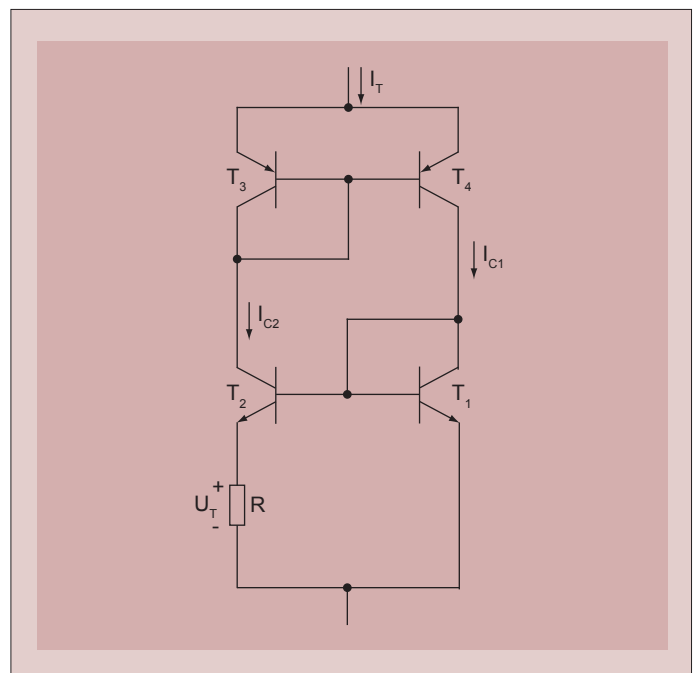
- k a Boltzmann-állandó ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$),
- T az abszolút hőmérséklet (K),
- q az elemi töltés ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$),
- I_0 a tranzisztor záróirányú árama (A).

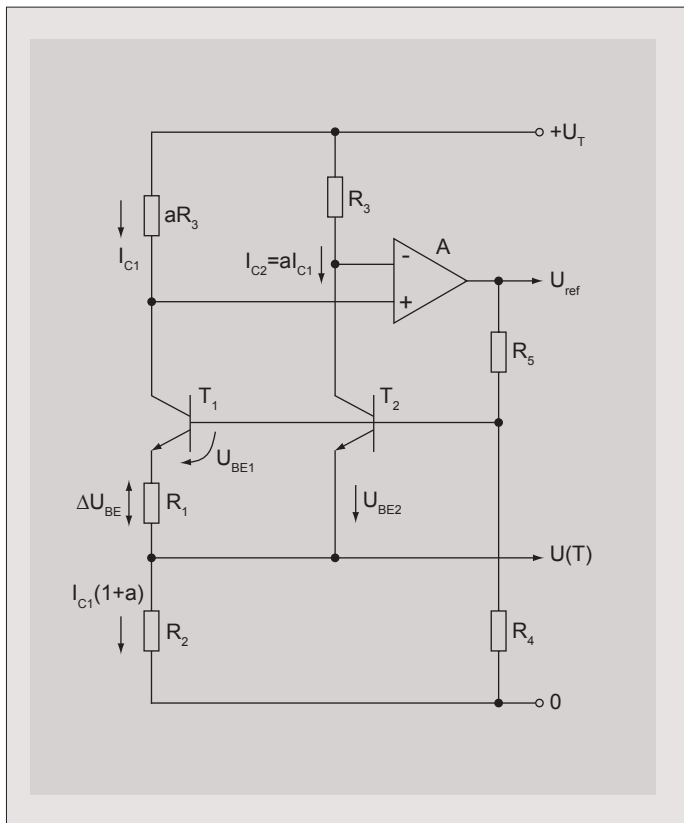
Látható, hogy a ΔU_{BE} feszültségekülönbség egyenesen arányos a T abszolút hőmérséklettel, és független az I_0 áramtól. A tranzisztorok azonos tulajdonsága az integrált áramköri technológiával biztosítható.

Áramtükörrel kombinált hőmérséklet-érzékelő

A lehetséges áramköri megoldások egyike lehet az 5. ábra szerint bemutatott áramtükörrel kombinált hőmérséklet-érzékelő. Az ábrán látható áramkörben T_1 és T_2 az érzékelő és I_T a kimenőjel, ami a hőmérséklet lineáris függvénye.

5. ábra Áramtükörrel kombinált, integrált hőmérséklet-érzékelő (érzékelő a T_1 és T_2 tranzisztor)





6. ábra Referencia-feszültségforrással kombinált, integrált hőmérséklet-érzékelő (érzékelő a T_1 és T_2 tranzisztor)

A működés megértéséhez szükséges szempontok az alábbiak:

- a T_3 és T_4 tranzisztor áramtükörként működik, miszerint $I_{c1} = I_{c2}$ mindig megvalósul, és így I_T két egyenlő nagyságú áramra válik szét.
- a T_2 mérőtranzisztor 8 db T_1 nagyságú, párhuzamosan kapcsolt tranzisztorból épül fel, így a kollektor áramának sűrűsége a T_1 tranzisztor áramsűrűségének 1/8 része.
- Az R ellenálláson keletkező ΔU_{BE} feszültségkülönbségből I_{c2} számítható, azaz $I_{c2} = \Delta U_{BE} / R$.
- $I_{c1} = I_{c2}$ kényszer miatt I_T a T hőmérséklet lineáris függvénye.
- Az R ellenállás lézersugaras jusztróizálásával az érzékenység beállítható (pl. 1 $\mu A/K$).

Referenciafeszültség előállításával kombinált hőmérséklet-érzékelő

A 6. ábrán látható mérőkörben is T_1 és T_2 a hőmérséklet-érzékelő, ami most két egyforma tranzisztor. A rajtuk átfolyó eltérő, de állandó I_{c1} és $I_{c2} = aI_{c1}$ kollektor áramokat az A erősítő és az R_3 , ill. az aR_3 ellenállások biztosítják. Létrejön az $I_{c2}/I_{c1} = a$ arány.

A tranzisztorok $\Delta U_{BE} = U_{BE2} - U_{BE1}$ bázis-emitter-feszültségének különbségéből I_{c1} számítható ($I_{c1} = \Delta U_{BE} / R_1$). Az R_2 ellenálláson a teljes $I_{c1}(1+a)$ áram folyik át, és ennek figyelembevételével az $U(T)$ kimenőfeszültségre az

$$U(T) = \left[(1+a) \frac{R_2}{R_1} \frac{k}{q} \ln a \right] T$$

eredményt kapjuk.

Az áramkör U_{ref} kimenete egy hőmérséklettől független feszültség, amelyet áramkörökben referenciafeszültség előállítására használnak fel. Az U_{ref} állandóságát azzal érik el, hogy az $U(T)$ feszültség pozitív hőmérséklet-érzékenységet azonos nagyságúra választják U_{BE2} negatív hőmérséklet-érzékenységgel. Ez R_1 és R_2 megfelelő megválasztásával megvalósítható.

Ezzel a feltétellel levezethető, hogy

$$U_{ref} = \frac{R_4 + R_5}{R_4} U_{ti} ,$$

ahol az U_{ti} a Si $p-n$ átmenetére vonatkozó tiltott sáv feszültsége, ami a hőmérséklettől független és állandó.

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

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu