



**A** hőmérsékletérzékelés a szenzortechnika egyik legszerteágazóbb tudományos területe és egyben az IoT világ megkerülhetetlen része. A különböző működési elven működő hőmérsékletérzékelők, melyek között léteznek érintésmentes és kontaktkivitelek is, majd minden környezeti paramétereket érzékelő kombinált szenzor részét képezik. Jelen írásunkban a fém ellenállás detektorok (RTD) és a félvezető alapú negatív termikus karakterisztikájú NTC termisztorok működési alapelveit tekintjük át és kitérünk a szenzor mikrokontrolleres rendszerhez való illesztési kérdéseire is.

## A hőmérsékletérzékelés fizikai alapjai

Az elektronikus áramköri hőmérsékletérzékelés során alkalmazott szenzor a hőt, mint fizikai mennyiséget elektronikus jellé, feszültséggé vagy elektromos ellenállássá alakítja, melyet aztán a kiértékelő elektronika képes feldolgozni. Számos technológia és ezek használatára kifejlesztett érzékelő eszköz áll a fejlesztők rendelkezésére hőmérsékletmérési funkciók integrálására.

A legnépszerűbb és az elektronikában legfontosabb hőmérsékletszenzorok a **hőmérsékletfüggő ellenállások**.

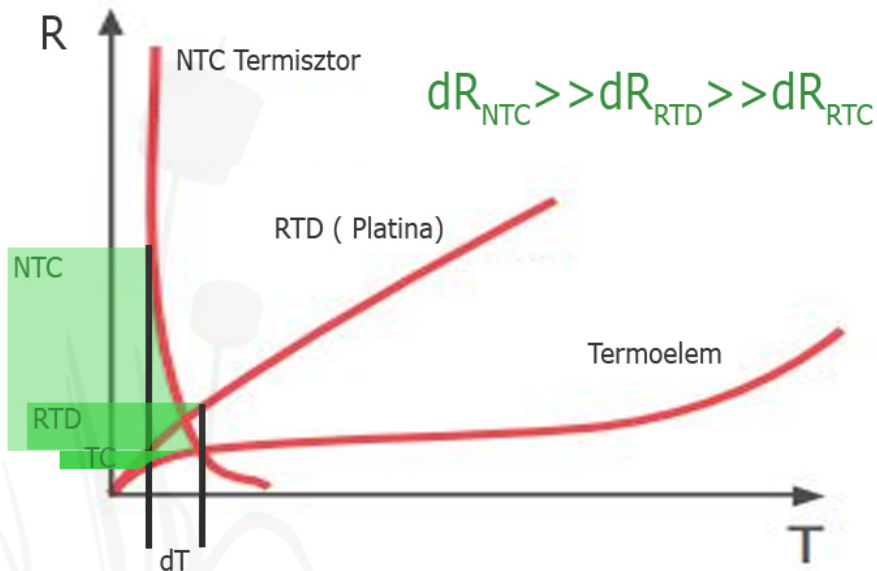
Ezeknek az érzékelőknek a működése az alapanyaguk hőmérséklettel arányosan változó elektromos ellenállásán alapszik. Két legfontosabb csoportjuk a fém és a félvezető alapú hőmérséklet szenzorok. Előbbiek összefoglaló neve **ellenállásos hőmérséklet detektor** (RTD – resistive temperature detector), míg az utóbbiakat **termisztor**nak hívjuk.

A fém ellenállásos hőmérséklet szenzorok (RTD) hőmérséklet-ellenállás karakterisztikája pozitív hőmérsékleti együtthatójú, azaz a hőmérséklet növekedésével lineárisan növekszik ellenállásuk is. Ez a linearitás előnyös

tulajdonság, mert rendkívül pontos hőmérsékletmérést tesz lehetővé, azonban termikus érzékenységük nagyon gyenge, hiszen a hőmérséklet változása csak nagyon kis, kb.  $1\Omega/^\circ\text{C}$  mértékű ellenállásváltozást eredményez. Ez a jelenség a fémes RTD, a termoelem és a félvezető alapanyagú NTC termisztor jelleggörbéit összehasonlító ábrán is látható.

A könnyű érzékelhetőségben a lineáris karakterisztika mellett a meredekségnek is nagy szerepe van, ez adja a szenzor érzékenységét. A meredek jelleggörbe sajátossága, hogy kis hőmérsékletváltozásra is nagy elektromos válaszjel, esetünkben az ellenállásváltozás jelentkezik. Az RTD szenzorok általában nagy tisztaságú, jól

vezető fémekből készülnek, mint a réz, a nikkel vagy a platina. Ez utóbbi az alapanyaga az úgynevezett „platina hőmérőknek” (RTD - Platinum Temperature Detector), mint a jól ismert Pt100 szenzor, melynek  $0^\circ\text{C}$ -on az ellenállása  $100\Omega$ . Mivel a platina nagyon drága fém, az RTD érzékenységi problémája mellett a költségtényező is jelentős hátrány lehet, azonban nagyon magas hőmérsékleten más érintkezési technológia nem jöhet számításba. A tipikus ellenállásos hőmérsékletérzékelő ellenállása kb.  $100\Omega$   $0^\circ\text{C}$ -on, ami egészen  $140\Omega$ -ig növekedhet a hőmérséklet  $100^\circ\text{C}$ -ra történő emelkedésekor,  $-200^\circ\text{C}$  és  $+600^\circ\text{C}$  közötti működési hőmérséklet tartományon.



1| Különböző hőmérsékletszenzorok érzékenysége

Az ellenállásos hőmérsékletmérés elengedhetetlen feltétele az, hogy mérőáramot folyassunk át a komponensen, mert csak a szenzoron eső feszültséget lehet könnyen elektromos jelként feldolgozni. Természetesen bármekkora is a pillanatnyi ellenállás, a mérőáram okozta  $I^2R$  fűtőtéljesítmény mindenképpen hibát okoz a mérésben. Ez a hiba az áramerősség négyzetével arányos, tehát minimalizálásához mindenképpen kis mérőáramra van szükség, vagy érdemes a hőmérsékletszenzort Wheatstone híd elemeként használni a hiba kiküszöböléséhez.

## Termisztorok

Az ellenállás hő függésén alapuló szenzorok másik nagy csoportját a termisztorok alkotják. Ezeket a félvezető kerámia alapanyagú alkatrészeket nemlineáris ellenállás-hőmérséklet karakterisztika jellemzi. Ha a hőmérséklet emelkedésének hatására jobb áramvezetőkké válnak, akkor NTC-nek, fordított esetben PTC-nek hívjuk az ilyen típusú termisztorot. Ha ismét az összehasonlító ábrát tekintjük, a PTC jellegű RTD szenzorok lineáris R-T karakterisztikával szemben az NTC erősen nemlineáris viselkedést mutat, azonban az NTC-k előnye a nagyobb érzékenység, hiszen ugyanakkora hőmérsékletváltozás jelentősebb mértékben változtatja meg az ellenállás

értékét, ezáltal a kiértékelő elektronika könnyebben dolgozhatja fel a nagyobb elektronikus válaszeletet. További előnye az NTC szenzoroknak az alacsony ár is. Az NTC ellenállás – hőfüggés karakterisztikája első közelítésben exponenciális függvénynek tekinthető, mely az alábbi képlettel közelíthető:

$$R = R_{25} \cdot e^{\frac{B}{T} - \frac{B}{T_{25}}} \quad (1)$$

$T_{25} = 298,15$  [K] ( $25^\circ\text{C}$ ), T: hőmérséklet [K]

Az  $R_{25}$  a  $+25^\circ\text{C}$  referencia hőmérsékleten felvett ellenállás értéket jelenti, az ún. B-érték [K] pedig a következő (1)-ből adódó logaritmikus összefüggéssel jellemezhető módon teremt összefüggést az ellenállás és a hőmérséklet között:

$$B = \frac{T \cdot T_{25}}{T_{25} - T} \ln \frac{R}{R_{25}} \quad (2)$$

A legtöbb alkalmazásban (1) elégséges matematikai korrelációt ad az ellenállás hőmérsékletfüggésének egy széles hőmérséklettartományon ( $0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$ ) való  $\pm 1^\circ\text{C}$  pontosságú leírásához, azonban, ha ennél akkurátusabb

összefüggésre van szükség, akkor bonyolultabb képlet alkalmazása válik szükségessé. A ma ismert és leginkább elfogadott közelítést a Steinhart-Hart féle egyenlet adja:

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3 \quad (3)$$

Az  $R$  a  $T$  hőmérsékleten mért ellenállás értéke a (3) összefüggésben, az  $A$ ,  $B$  és  $C$  együtthatók pedig a kísérleti mérésekből származó Steinhart-Hart koefficienssek, melyeket az NTC chip gyártója tesz közzé. Ez a formula kb.  $\pm 0.15^\circ$  pontosságot ad a  $-50^\circ\text{C}$   $+150^\circ\text{C}$  hőmérséklettartományon, ami a legtöbb alkalmazásban messzemenőig megfelelő.

Ha elegendő csak a  $0^\circ\text{C}$  –  $+100^\circ\text{C}$  tartományon közelíteni a függvényértékeket, akkor elérhető vele a  $\pm 0.01^\circ\text{C}$  pontosság is.

Amikor NTC szenzort használunk, nagy figyelmet kell fordítani a mérőáram erősségének megfelelő megválasztására, ha az túl nagy, akkor a termisztor melege (I<sup>2</sup>R) hibát okozhat a mérésben. A gyártói adatlap tartalmazza a disszipációs faktor értékét, ami megmutatja, hogy mekkora elektromos teljesítményre van szükség a termisztor a környezeti hőmérséklet fölé  $1^\circ\text{C}$ -al való

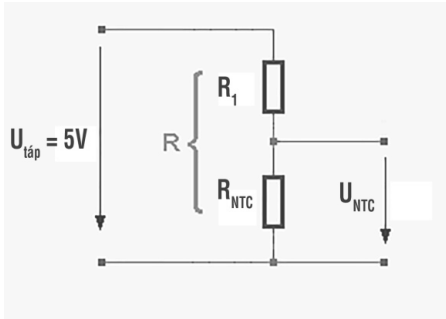
felmelegedéséhez. A gyakorlatban érdemes ezen érték alatt maradni. Végezetül tervezéskor szem előtt kell tartani az NTC hő tehetetlenségét is, hiszen a hőmérsékletváltozást az elektronikus válaszelj (az ellenállás változása) némi késleltetéssel követi csak, minél kisebb az NTC chip, annál gyorsabban.

A termikus időállandó „T” definíció szerint az az idő, mely alatt egységnyi hőmérsékletlépcsőt véve alapul, az ellenállás az új hőmérséklethez tartozó végértékének 63.2%-át eléri.

## Termisztor illesztése mikrokontrolleres rendszerhez

A hőmérsékletet a termisztor ellenállásának közvetett mérésével határozhatjuk meg. Ehhez az azon eső feszültség értékének detektálásával az ellenállás számításával a mikrokontrollert kell segítségül hívni, majd az ellenállás ismeretében a hőmérséklet számítható.

A következő ábrán látható elvi kapcsolási rajz nem más, mint egy feszültségosztó, ahol az  $R_1$  ellenállás egy ismert ellenállásérték (célszerűen megegyezik az NTC  $25^\circ\text{C}$ -on vett ellenállásértékével), ezzel sorba kötve helyezkedik el az NTC. Az  $R_1$  célszerűen az MCU tápfeszültségére van felhúzva, még az NTC másik lába 0 potenciálon van.



## 2) Ellenállásos osztó áramkör

Az  $R_{NTC}$  ellenállás értéke az alábbi képlettel számítható: (4)

$$R_{NTC} = R_1 * \left( \frac{U_{tap}}{U_{tap} - U_{NTC}} - 1 \right)$$

Ahol  $R_1$  és  $U_{tap}$  ismert adatok, az  $U_{NTC}$  pedig a mikrokontroller A/D átalakítóján mért feszültség értéke.

Amennyiben az  $R_{NTC}$  számított értéke rendelkezésre áll több lehetőség van a kívánt hőmérsékletérték meghatározására.

### 1. módszer:

A legtöbb alkalmazásban az (1) egyenletből származtatott képlettel közelítően számított hőmérsékletérték elégséges matematikai korrelációt ad az hőmérséklet ellenállásfüggésének egy

széles hőmérséklettartományon ( $0^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$ ) való  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  pontosságú leírásához [ $^{\circ}\text{C}$ ] (5)

$$T_{NTC} = \frac{B}{\ln\left(\frac{R_{NTC}}{R_1 * e^{-\frac{B}{273+25}}}\right)}$$

### 2. módszer:

Ha az 1. módszernél akkurátusabb összefüggésre van szükség, akkor bonyolultabb képlet alkalmazása válik szükségessé.

A ma ismert és leginkább elfogadott közelítést a korábban elmondottak alapján a Steinhart-Hart féle egyenlet adja, ebből a hőmérséklet az alábbi módon számolható: [ $^{\circ}\text{K}$ ] (6)

$$T_{NTC} = \frac{1}{A + B * \ln(R_{NTC}) + C * \ln(R_{NTC})^3}$$

### 3. módszer:

Gyártói katalógusadat a diszkrét adatpárokból álló NTC R-T táblázat, ahol az egyes szomszédos adatok között a jelleggörbe lineárisnak tekinthető. Egy a táblázatban nem szereplő  $R_{NTC}$  mért ellenállás esetén a legközelebbi létező szomszédos  $R_1$  és  $R_3$  értékekhez tartozó

$T_1$  és  $T_3$  hőmérsékletadatokból a  $T_{NTC}$  a következőképp számítható: [°C] (7)

$$T_{NTC} = T_3 - \frac{(R_{NTC} - R_3) * (T_3 - T_1)}{(R_1 - R_3)}$$

Maga a kapcsolás a 3. ábrán látható. A tápfeszültségnek nevezett feszültség természetesen bármilyen ismert, a mikrokontrolleres rendszerben elérhető fix DC feszültség lehet, de célszerű értékét és az  $R_1$  ellenállás értékét is úgy megválasztani, hogy az MCU ADC bemenetének felbontását maximálisan ki tudjuk használni.

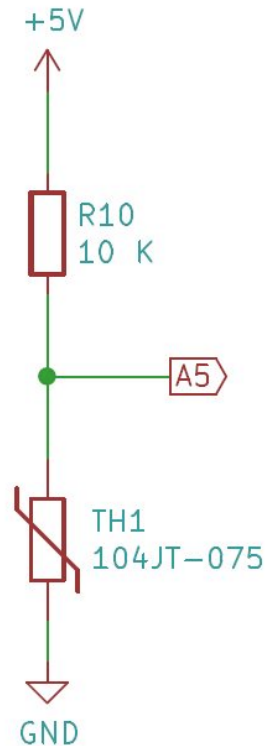
Egy 12 bites ADC az MCU tápfeszültségét  $2^{12}$  részre osztja fel, azaz a 0V-hoz 0, a tápfeszültséghez 4096 érték tartozik.

5V tápfeszültség esetén a felbontás 0,00122V. Ha az NTC 25°C -on vett ellenállásával megegyező értékű  $R_1$  ellenállást választunk, akkor 25 °C-on a mért feszültség éppen a tápfeszültség fele lesz. (8)

$$U_{NTC} = U_{tap} \left(1 - \frac{R_1}{R_{NTC} + R_1}\right)$$

Abban az esetben, ha  $R_{NTC} \gg R_1$  (nagyon alacsony hőmérsékleten) a mért

feszültség tart a tápfeszültség értékéhez, míg magas hőmérsékleten, ahol  $R_{NTC} \ll R_1$   $U_{NTC}$  tart a nullához. Az ADC teljes felbontását kihasználtuk ezzel az elrendezéssel 0 -  $U_{tap}$  tartományon (az alábbi ábrán 5 V-os MCU tápfesz. esetén):



3| NTC illesztése az MCU ADC (analóg) bemenetére

A hőmérséklet meghatározása az 1. módszert használva a következő C kódrészlettel valósítható meg:

```
// Voltage dividers
const float ref_voltage = 5;           // voltage on pullup resistors in the design [V]
const long pullup_resistor = 10000;   // pullup resistor value [Ohm]
const int beta_value = 4390;         // NTC beta value [K]
const int resistance_25 = 10000;     // NTC R25 value [Ohm]
float resistance_value;               // NTC resistance @ T [Ohm]
float temperature_value;             // NTC temperature T [decC]
float measured_voltage;              // NTC voltage drop [V]

// NTC sensor part:
ain_NTC_value = analogRead(ain_NTC_pin);
measured_voltage = ain_NTC_value * ref_voltage / 1023;
resistance_value = (pullup_resistor*ref_voltage / (ref_voltage-measured_voltage))-pullup_resistor;
temperature_value = beta_value / log(resistance_value / (resistance_25*exp(-1*beta_value/298))) - 273;
printf(sensordata, "T%06d", (long)(temperature_value*100));
```

## Egyedi kivitelű NTC

Ha vevő-, vagy alkalmazás specifikus jellemzők egyedi beállítására van szükség az NTC tervezésekor, akkor feltétlenül olyan gyártópartnerre van szükség, aki eléggé flexibilis ahhoz, hogy az akár gyakran változó vevői igényekre is gyorsan reagáljon. Ehhez saját komponensfejlesztésre és saját NTC chipgyártásra van leginkább szükség.

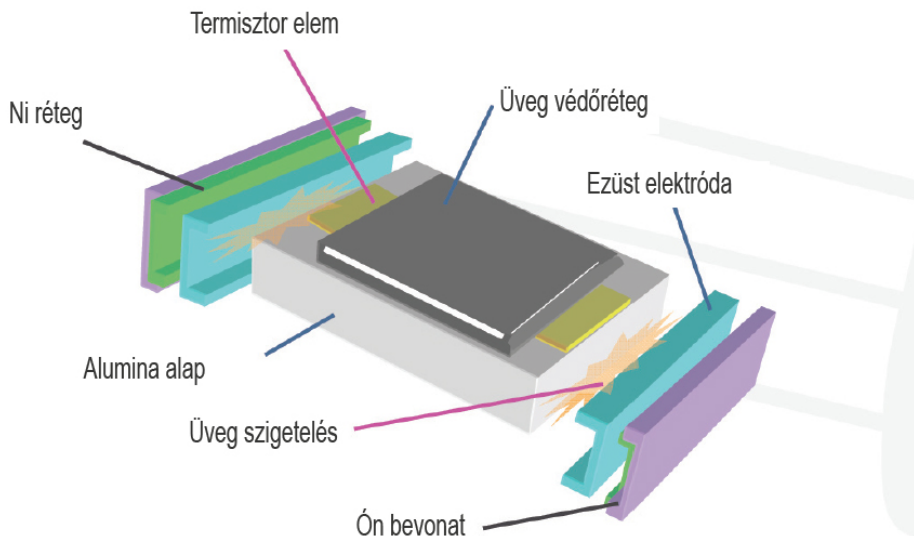
Az  $R_{25}$  és a B értéket a félvezető anyagösszetétele és a szinterezési folyamat előtt hozzáadott nanorészecskék határozzák meg. Ezután történik meg a wafer szeletelése (chipekre való szétvágása). A precíz gyártástechnológiával válogatás nélkül is el lehet érni a  $\pm 0.05\%$  toleranciát.

## Kivételesen nagy pontosság

Nagy méréspontosságot igénylő feladatok esetén nem csak az ellenállásérték kezdeti alacsony toleranciája lényeges, hanem annak hosszú távú időbeni stabilitása is. A kezdeti szűk tolerancia és ezzel együtt járó kis hiba szokásos elvárás az NTC-vel szemben, de mi történik, ha az ellenállásérték az idő előrehaladtával változik?

Ennek a fő oka a levegő nedvességtartalmának esetleges behatolása a porózus kerámia félvezető anyagba, melynek negatív hatását üveg passzivációs védőréteg kialakításával lehet csökkenteni. Vezető Japán gyártónk, a **Tateyama** vastagréteg SMD termisztorai kerámia szubsztrátra (96%  $Al_2O_3$ ) kerülnek, és az NTC anyagát

#### 4) Tateyama NTC felépítése



üveg védőréteg borítja a pára és a jelenlévő egyéb káros gázok behatolásának megelőzésére (lásd. ábra).

Ez a felépítés továbbá kellőképpen ellenállóvá teszi a komponenst a hő tágulás okozta mechanikai stresszhatásokkal szemben is, gyártói és vevői tesztek is bizonyítják, hogy az NTC nem sérül még többszöri nagy hőmérséklet különbségnek való kitettség esetén sem. Ez kiváló forraszthatóságot és nagyfokú megbízhatóságot biztosít az alkatrész számára. Az alkalmazott üvegborítás miatt sem a páratartalomra sem az olyan agresszív korrodáló gázok jelenlétére, mint a például a kéndioxid sem érzékeny.

További előnye a Tateyama szabadalmaztatott vastag-réteg gyártástechnológiájának, hogy tetszőlegesen beállítható  $R_{25}$  - (100  $\Omega$  - 2 M $\Omega$ ) és B (2700 - 5000 K) értékek valósíthatók meg, és ezek toleranciája is megfelelő ( $\pm 1.. \pm 10$ ). SMD termisztoraik mindegyike rendelkezik az autóipar számára fontos TS16949 / AEC-Q tanúsítvánnyal és 0201... 0805 méretekben rendelhetők. Kedvező árak és hosszú távú stabilitásuk miatt eredményesen integrálhatóak klímavezérlőkbe, háztartási gépek elektronikájába, hőmennyiség mérőkbe, vagy éppen akkumulátoros késziszerszámok töltőelektronikájába.



A vastagréteg termisztor technológia egészen 150 °C-ig használható. Minél kisebb a komponens, annál kisebb a hő tehetetlensége, azaz válaszideje is, alacsony termikus időállandóval rendelkeznek. Az olyan alkalmazásban, ahol a hőmérséklet gyors változásait kell követni, a lehető legkisebb, 0201 méretű szenzor használata javasolt.

A másik Japán NTC beszállítónk a **Semitec** nem vastagréteg technológiát használ, az ő termisztoraik kerámia félvezető anyagból készülnek. Jellemzőjük a B és az  $R_{25}$  értékre vonatkoztatott alacsony tolerancia ( $\pm 1\%$ ). Az „AP” sorozat a legpontosabb NTC család ( $\pm 0.5\%$  B érték /  $R_{25}$ ), a  $-50 - +70^\circ\text{C}$  hőmérséklettartományon, rendszerkalibrálás nélkül lehetővé téve a 0.5 K-nél is pontosabb mérést. A vékony, mindössze 0.5mm vastag kapton szalag NTC-k elsősorban a tölthető elem technikában használatosak.

A "KT" család a Semitec SMD NTC sorozata, kiváló ára mellett legnagyobb előnye az üveg védőréteg biztosította hosszú távú stabilitás, melyet a hőmennység mérőórák számára elengedhetetlenül szükséges, mert azok kalibrálás nélkül is minimum 10 évig pontosan kell, hogy működjenek. Az "AT-4" sorozat elsősorban kéziszerszámokban való használatra lett kifejlesztve, különösen a 6.8 k $\Omega$ -os típus, mely ajánlott felhasználási területe

az akkumulátor töltőelektronika hőmérséklet monitorozása.

Az NTC, vagy a Platina RTD (Pt100-PT1000) chipek, melyek a fent leírt technológiák valamelyikével készülnek nem csak önállóan, hanem valamilyen konfekcionált, egyedi kialakítású hőmérsékletszenzorba építve is használhatók.

Speciális kábelkivezetéssel (PVC, Teflon, hidegkötéses huzal, halogénmentes, IP68 védett, élelmiszerkonform stb.) és egyedi alkalmazás specifikus csatlakozókkal szerelve, rozsdamentes acél, réz, bronz vagy műanyag házban is rendelhetők a vevő igénye szerint. Ezeket a szerelt szenzorokat európai beszállítónk a **TEWA** gyártja.

A hőmérsékletszenzorok felhasználási terület szerint is nagy változatosságot mutatnak. Bizonyos alkalmazások nagy mérési pontosságot és kis szórást igényelnek, másoknál az a fontos elvárás, hogy zord környezeti feltételek mellett is működjenek, ahol a környezeti hőmérséklet elérheti az akár  $+1000^\circ\text{C}$ -t is. Egyes orvosi elektronikai alkalmazásokban a miniatűr kivitel az elvárás, mert például katéter részeként a vénában áramló vér hőmérsékletének mérése a feladat, máshol, ahol csak egyszerű hőmérsékletkompenzálást kell végezni, az ár lehet kritikus tényező.

Mi, az Endrich Bauelemente Vertriebs GmbH-nál készek vagyunk arra, hogy technikai és kereskedelmi oldalról is támogassuk vevőink egyedi vagy sztenderd hőmérséklet szenzort igénylő alkalmazásfejlesztését. Évtizedes tapasztalatunk a területen és a mögöttünk álló beszállítók professzionalitása a biztosíték, hogy sikeresen tudjunk együttműködni akár orvos elektronikai, általános ipari, háztartási elektronikai vagy autóiipari területen is.

