

A folyamatműszerezés érzékelői

Az érzékelők statikus és dinamikus tulajdonságai – 1.

Dr. Fock Károly

A folyamatműszerezés érzékelőivel foglalkozó cikksorozat soron következő részeiben az érzékelők statikus és dinamikus tulajdonságát leíró karakterisztikák tárgyalására kerül sor. Elsőként a statikus karakterisztikával, annak tipikus hibáival foglalkozunk, majd sorra vesszük a környezeti hatások közül a hőmérséklet zavaró hatásának vizsgálatát.

Statikus karakterisztika

A mérési folyamatban felhasznált érzékelők mindegyikének kimeneti jele több bemeneti mennyiségnek a (többváltozós) függvénye. A bemeneti mennyiségek közül a mérendőt kiválasztva a többi zavaró jelnek tekintjük, amelyeknek a hatását a mérés során igyekszünk kiküszöbölni vagy csökkenteni.

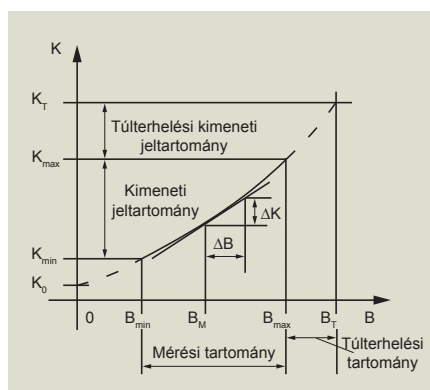
Speciális esetnek kell tekinteni azt a megoldást, amikor a mérést befolyásoló, zavaró paramétereket a vizsgálat során állandó értéken tartjuk (referenciakörülmények). A referenciafeltételeket megegyezés alapján határozzák meg, vagy azok szabványok előírásaiban szerepelnek.

A statikus karakterisztika definíciójához egy ilyen referencia-feltételrendszerből indulunk ki.

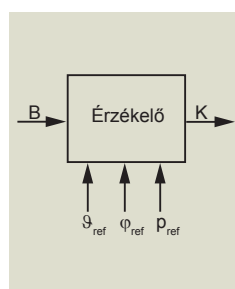
Feltételezzük, hogy az érzékelőre ható bemeneti mennyiség időben állandó. Ekkor a bemeneti mennyiség különböző értékeinél meghatározhatjuk a kimeneti mennyiség állandósult értékeit. A kimeneti és bemeneti mennyiségek között így nyerhető összefüggés (az összetartozó bemeneti és kimeneti mennyiségek sorozata) a statikus karakterisztika.

A statikus karakterisztika analitikusan, képlet formájában is meghatározható, ha ismerjük azokat az összefüggéseket, amelyek a bemeneti-kimeneti jelkapcsolatot helyesen leírják.

A statikus karakterisztikát meghatározhatjuk azonban méréssel is. Ilyenkor összetartozó pontsorozatot kapunk, amelyet megadhatunk táblázatosan, de ábrázolhatjuk diagramon, a pontokra görbéket illeszthetünk, és ezáltal megkapjuk a vizuálisan igen szemléletes statikus karakterisztikát (1. ábra). (Megjegyezzük, hogy a diagramról leolvasható bármely jellemző az analitikus vagy táblázatos függvényt megadási mód esetén is definiálható.)



1. ábra A statikus karakterisztika jellemzői



A statikus karakterisztikának a mérés szempontjából legfontosabb részlete a B_{\min} - B_{\max} mérési tartomány és a K_{\min} - K_{\max} kimeneti jeltartomány által behatárolt (az 1. ábrán folytonos vonallal kihúzott) szakasza. Ebben a tartományban teljesülnek az érzékelőre megadott specifikációk.

A B_{\max} - B_T túlterhelési tartomány és a hozzá tartozó K_{\max} - K_T túlterhelési kimeneti jeltartomány közötti függvényre az jellemző, hogy az érzékelő még működőképes, de a specifikációs előírásokat már nem teljesíti. Nagyon fontos, hogy ha a túlterhelési tartományból visszatérünk a mérési tartományba, akkor egy feléledési idő után a specifikált működés visszaáll, az érzékelő az eredeti statikus karakterisztika alapján működik.

Ez nem történik meg akkor, ha az érzékelőre a B_T -nél nagyobb jelet adunk. Irreverzibilis változások következnek be, az érzékelő működésképtelenné válik. A B_T -t törési határnak hívjuk.

A statikus karakterisztika legfontosabb jellemzője az érzékenység (szabályozástechnikai megfogalmazásban a statikus átviteli tényező), ami a definíció szerint a B_M munkapontban kiszámított differenciálhányados (analitikusan megadott statikus karakterisztikánál) vagy a differenciahányados (diagramos ábrázolás esetén). Az érzékenység dimenziós mennyiség, és nemlineáris statikus karakterisztika esetén értéke munkapont függő:

$$\dot{E} = \left. \frac{\partial K}{\partial B} \right|_{B_M} \approx \frac{\Delta K}{\Delta B} \Big|_{B_M} \left[\frac{\text{dim} K}{\text{dim} B} \right]$$

A mérési tartomány lehetséges típusait az 1. táblázat foglalja össze, az elnevezéseket néhány érzékelő tipikus értékei szemléltetik.

Az elektronikából kölcsönzött kifejezéssel egyre gyakrabban használják a $B=0$ értékhez tartozó K_0 értékre az ofszet elnevezést. (Ennek természetesen csak akkor van értelme, ha elméletileg $B=0$ értékhez $K=0$ kimeneti jel tartozna). Ellenpélda: egy Pt-ellenállás-hőmérő 0°C -hoz tartozó $R_0=100\ \Omega$ -os (szabványos) ellenállása nem ofszet.

A statikus karakterisztika tipikus hibái

Minden érzékelőnek van egy ideális vagy elméleti statikus karakterisztikája. Hogyan kell ezt értelmezni? Ha az érzékelő ideális tervezők által ideálisan lenne megtervezve, ideális anyagokból, ideális módszerekkel és gyártástechnológiával lenne legyártva,

Mérési tartomány típusa	Lehetséges érzékelő		
	Fajta	B_{min}	B_{max}
Egyirányú	Induktív elmozdulás érzékelő	0 mm	10 mm
Kétirányú	Szimmetrikus	Piezorezisztív nyomáskülönbségmérő	-45 mbar +45 mbar
	Aszimmetrikus	Platina ellenálláshőmérő	-200 °C +800 °C
Eltolt nullpontú	Mérőperem	+2 m ³ /s	+10 m ³ /s

1. táblázat A statikus karakterisztika jellemzői

akkor ez az érzékelő a mérendő mennyiségnek mindig az igazi értékét mutatná. A kimenet egzaktul követné azt az előírt vagy ismert elméleti görbét, amelyik specifikálja a kimenet és bemenet közötti kapcsolatot a teljes mérési tartományban.

A valódi (nem ideális) érzékelő mért statikus karakterisztikája az ideálistól eltér.

A mért és a pontos értékek különbsége az érzékelő hibája. A hibák – a metrológiában kialakult definícióknak megfelelően – abszolút vagy relatív hibaként is megadhatók. A relatív hibák speciális esetei a mért értékre, a végpontra (osztálypontosság) vagy a mérési tartományra vonatkoztatott hibák.

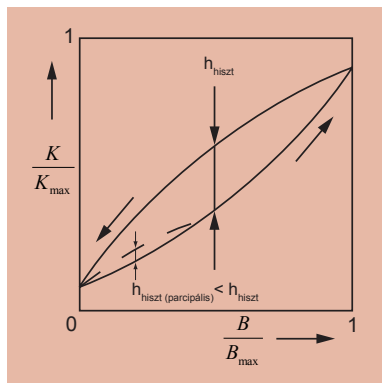
A hibakarakterisztika az érzékelő kalibrálásával határozható meg. A kalibrálás során az érzékelő működését befolyásoló környezeti paramétereket referenciaértéken kell tartani (lásd az 1. ábrán: ϑ_{ref} , φ_{ref} , P_{ref}), és általában a mérést több ciklusban is végre kell hajtani.

Az alábbiakban a statikus karakterisztika néhány tipikus hibáját tekintjük át. A statikus karakterisztikákat a $B/B_{max} - K/K_{max}$ relatív egységekben ábrázoljuk, és feltételezzük, hogy a teljes 0...1 tartományban az érzékelő működőképes.

Hiszterézishiba

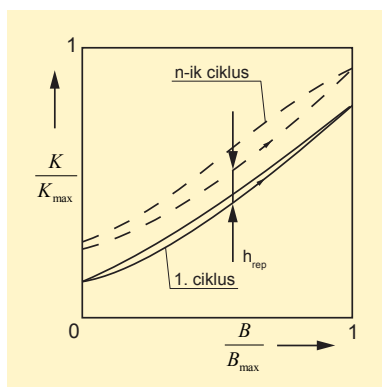
A hiszterézishiba egy mérési ciklusban az azonos B bemeneti mennyiséghez tartozó kimeneti értékek különbsége, amelyet monoton növekvő és monoton csökkenő bemeneti jeleknél mérünk (2. ábra). A hiszterézishibát a teljes mérési ciklusban mérhető maximális eltéréssel jellemezzük. Ez azért fontos, mert a parciális hiszterézishiba ennél mindig kisebb.

Ha a hiszterézishiba okozója a súrlódás (pl. potenciométer esetében a csúszka elmozdulása az ellenálláson), akkor a kalibrációt célszerű a bemeneti mennyiség rezgésével lefolytatni (súrlódásmentes kalibráció).



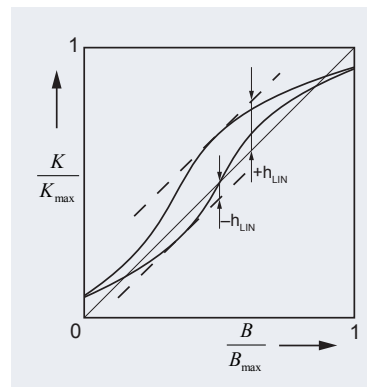
2. ábra Hiszterézishiba

3. ábra Ismétlőképességi hiba

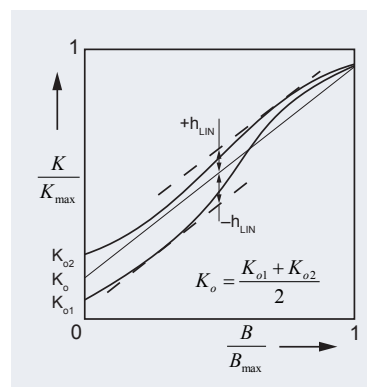


Ismétlőképesség (reprodukálóképesség)

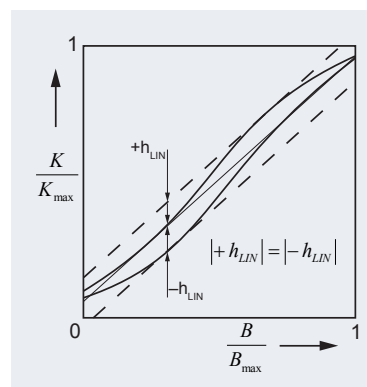
Azonos referenciafeltételek mellett azonos irányban változó bemeneti mennyiségek azonos értékénél a különböző mérési ciklusok közötti kimeneti jelek különbsége, ill. annak maximális értéke (3. ábra).



4. a ábra Elméleti lineáris hiba

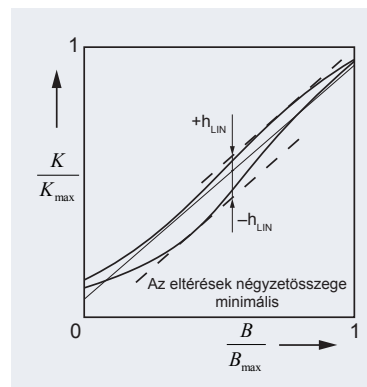


4. b ábra Végpontokra vonatkozó lineáris hiba



4. c ábra Független lineáris hiba

4. d ábra Regressziós lineáris hiba



Linearitási hibák

Az általános definíció alapján a linearitási hiba a mért statikus karakterisztikának az ideális (lineáris) statikus karakterisztikától való eltérése.

A nehézséget az jelenti, hogy az ideális lineáris statikus karakterisztika többféle módon definiálható, emiatt többféle linearitási hiba is létezik. Az egyértelműség érdekében mindig meg kell adni a definícióból eredő elnevezést is.

A gyakrabban előforduló linearitási hiba definíciók (4. a-d. ábrák):

- Elméleti linearitási hiba: a statikus karakterisztika [0,0]-[1,1] pontjait összekötő egyenestől mért maximális eltérés (4. a ábra).
- Végpontokra vonatkozó linearitási hiba: a kalibrációs ciklussal felvett statikus karakterisztika kezdeti és végpontját összekötő egyenestől mért maximális eltérés (4. b ábra). Hiszterézis esetén (lásd ábra) K_o a K_{o1} és K_{o2} aritmetikai átlaga.
- Független linearitási hiba: az ideális lineáris statikus karakterisztika megszerkesztésének feltétele az, hogy feltétel teljesüljön (4. c ábra).

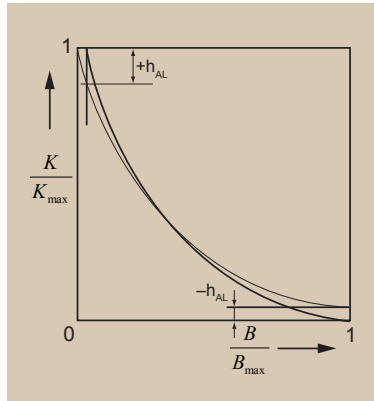
$$|h_{LIN}| = |-h_{LIN}|$$

- Regressziós linearitási hiba: az ideális lineáris statikus karakterisztikát a legkisebb négyzetek módszerével határozzuk meg (4. d ábra).

Az elnevezések nem szabványosítottak, a felsoroltakon kívül más definíciók is léteznek, ezért a gyakorlatban rendkívül fontos a pontos és szabatos linearitási-hibamegadási mód.

Alakhiba

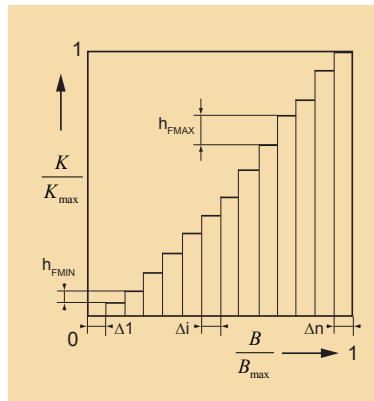
Abban az esetben, ha az érzékelő statikus karakterisztikája elméletileg nemlineáris, akkor az ettől való eltérés az alakhiba (5. ábra).



5. ábra Alakhiba

Felbontóképesség

A folyamatosan változó bemeneti jel hatására előfordul, hogy a kimeneti jelben csak diszkrét értékek jelennek meg (6. ábra). A statikus karakterisztikában ugrások vannak. Az ugrások mind szélességben, mind amplitúdóban különbözőek lehetnek. Ez könnyen elképzelhető pl. egy nem teljesen egyenletes tekerccselésű huzalpotenciométernél. Az ugrásokat a csúszka egyik menetről a másikra való átmenete okozza. Ez a tipikus karakterisztika hiba a vezető műanyagokból készült potenciométereknél megszűnt.



6. ábra Felbontóképesség

A felbontóképességi hiba jellemezhető az ugrások maximális h_{Fmax} , ill. minimális h_{Fmin} értékével, vagy az ugrások átlagával.

Küszöbérték

A mérendő mennyiség azon legkisebb megváltozása, amely a kimeneti jelben mérhető változást eredményez.

Kúszás

A kimeneti jel megváltozása a bemeneti jel és a referenciafeltételek állandósága esetén egy meghatározott idő alatt.

Nullponteltolódás

Zérus bemeneti jel és állandó referenciafeltételek esetén meghatározott idő alatt a kimeneti jel megváltozása (a statikus karakterisztika párhuzamos eltolódása).

Érzékenységváltozás

A referenciafeltételek állandósága esetén adott idő alatt az érzékenység megváltozása.

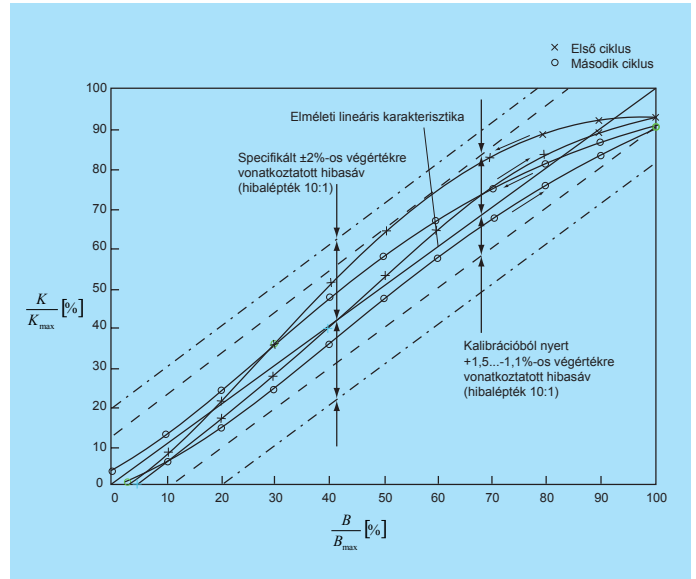
Hibasáv-koncepció¹

Áttekintve az érzékelők statikus karakterisztikáinak hibáit, fel kell tételeznünk, hogy ezek – és esetleg újabb, a felsorolásban nem szereplő – hibák együttesen is felléphetnek, és együttesen hozzák létre a jelátalakítás (mérés) bizonytalanságát.

Célszerűnek tűnt a statikus karakterisztikának egy olyan hibamegadási módja, amikor az egész mérési tartományra megadunk egy maximális hibát, amelyet úgy jelölünk ki, hogy a mért hibával terhelt karakterisztika ezen belül maradjon.

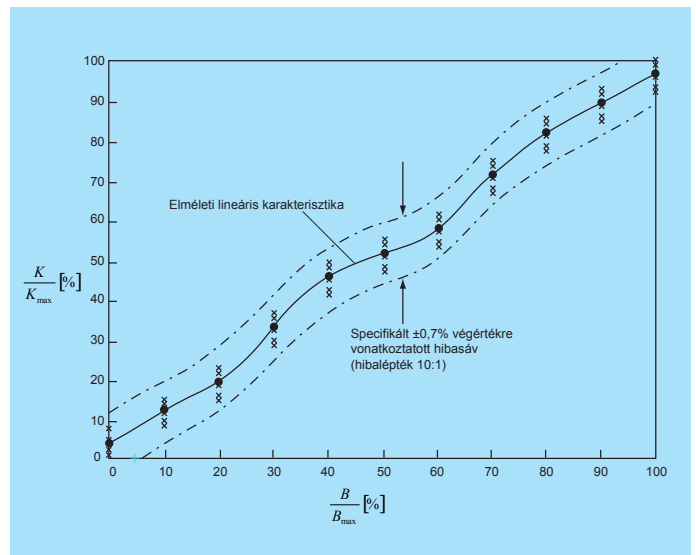
A vázolt megoldás a hibasáv-koncepció. Definíciójára többfajta megoldás is létezik, amelyeket az 7. a-c ábra foglalja össze:

- Az 7. a ábrán az elméleti lineáris karakterisztikára vonatkoztatott statikus hibasáv látható. A statikus karakterisztikának az ábra szerint linearitási, hiszterézis- és ismétlődésképeségi hibája is van. A kalibráció során +1,5...-1,1%-os végértékre vonatkozó hibasáv határozható meg. Az érzékelő specifikációjában – az ábra szerinti példában – ezt $\pm 2\%$ -ra választották.



7. a ábra Elméleti lineáris karakterisztikára vonatkoztatott statikus hibasáv

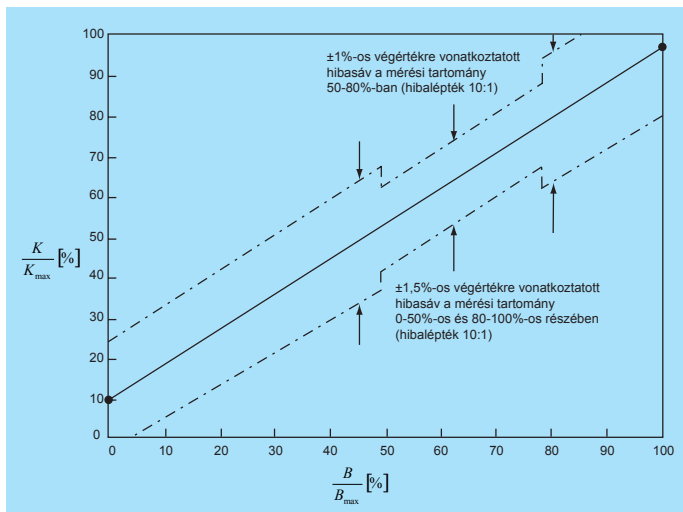
- Az 7. b ábrán egy nemlineáris, statikus karakterisztika és annak hibasávja látható. Az elméleti karakterisztikát a több ciklusban felvett kimeneti jelek átlagából határozták meg, és ettől mérve egyenlő sáv szélességű (a példában $\pm 0,7\%$ -os) hibasávot jelöltek ki. A mért adatokból hiszterézis és ismétlődésképeségi hibára lehet következtetni.



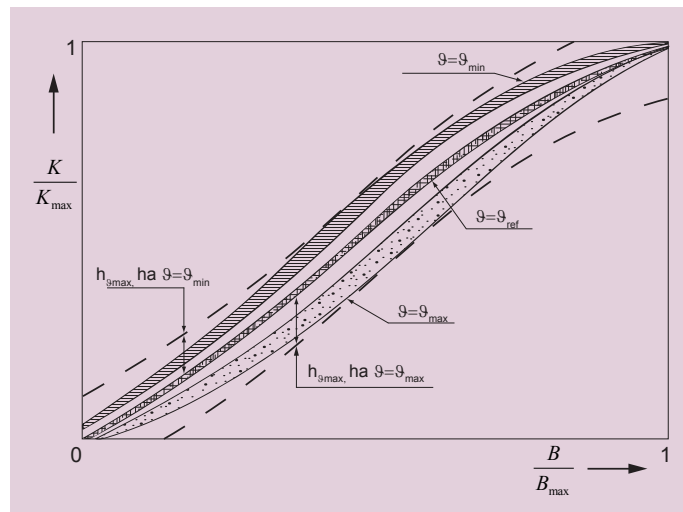
7. b ábra Nemlineáris statikus karakterisztika és hibasávja

- Az 7. c ábrán látható hibasáv fő jellegzetessége az, hogy a mérési tartomány különböző szakaszaiban a hibasáv szélessége különböző értékű. Az elméleti karakterisztika a végpontokat összekötő egyenes. A mérési gyakorlatban pl. a mérlegelési feladatok elvégzésére használt nyúlásmérő ellenállás-érzékelőkkel felszerelt mérlegcellákra írnak elő lépcsős hibasávot.

¹ H. N. Norton: Sensor and Analyser Handbook, Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ 07632



7. c ábra Lépcsős hibaszámítás módja



8. ábra Hőmérsékleti hibaszámítás definíciója

Környezeti hatások a statikus karakterisztikára

Az érzékelők működését leíró statikus karakterisztika módosulni fog, ha a mérési körülmények megváltoznak, vagyis azok a paraméterek, amelyek az érzékelők kimeneti jelének megváltozásában a bemeneti jel mellett még szerepet játszanak, nem állandóak. Ezzel a valóságos viszonyok között számolnunk kell.

Az érzékelő konkrét felépítése és működési elve határozza meg a zavaró mennyiségekre vonatkozó érzékenységet. Pl. egy nyúlásmérő ellenállás a hőmérséklet-változásra és a rezgésre, egy induktív elmozdulásmérő a külső mágneses térre és a hőmérsékletre, egy kapacitív szintmérő a levegő nedvességtartalmára és a villamos térre lehet érzékeny stb.

A környezeti feltételek megváltozása hatással lehet az érzékelőkre a működésük során, de nem szabad figyelmen kívül hagyni befolyásukat a működésen kívüli állapotokban sem (pl. szállítás, raktározás stb.).

Működési környezeti feltételek

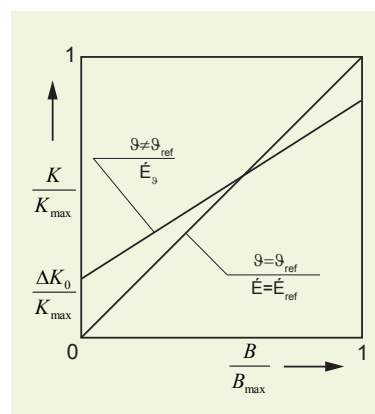
Az érzékelő működését befolyásoló hatások azon tartománya, amelyen belül az érzékelő működőképességét még megtartja. Az alábbiakban néhány – a mérési gyakorlatban gyakran előforduló – hatást vizsgálunk meg a konkrét működés figyelembevétele nélkül abból a célból, hogy ezeket hogyan kell, hogyan lehet figyelembe venni, ábrázolni.

Környezeti hőmérséklet megváltozásának hatása

A hőmérséklet hatása lehet időben állandó és időben változó is, létrehozva a statikus, ill. a tranziens hőmérsékleti hibát.

A statikus hőmérsékleti hiba legáltalánosabb megadási módja a hőmérsékleti hibaszámítás (8. ábra), amelyet úgy határozhatunk meg, hogy a statikus karakterisztikát felvesszük referencia-hőmérsékleten, valamint a működési hőmérsékleti tartomány alsó és felső határán, kijelöljük a referencia-karakterisztikától mért maximális eltéréseket, és ezeket állandónak tekintjük a teljes mérési tartományban.

A statikus hőmérsékleti hiba megadásának egy másik módja is ismeretes, ha a statikus karakterisztika gyakorlatilag lineáris, és nem kell a hiszterézishibával számolnunk (9. ábra). Ilyenkor a referencia- hőmérsékleten és a működési hőmérsékleti tartomány szélső értékénél felvett statikus karakterisztikának az összehasonlítása során külön vizsgáljuk a nullpont



9. ábra Hőmérséklet-változás hatása a lineáris statikus karakterisztikára

és külön az érzékenységek hőmérsékletfüggését. Tekintettel arra, hogy ezek a hőmérsékleti hibák nem túl nagyok (a konstrukció során azok lehető leghatékonyabb kompenzálásáról gondoskodnak), ezért a szokásos definíciók a statikus karakterisztikák jellemzőinek megváltozását általában $\Delta v = 10^\circ\text{C}$ megváltozásra adják meg. A 9. ábra alapján:

$$h_{0\theta} = \frac{\Delta K_0}{K_{\max}} \left[\frac{\%}{10^\circ\text{C}} \right]$$

$$h_{E\theta} = \frac{\dot{E}_\theta - \dot{E}_{ref}}{\dot{E}_{ref}} \left[\frac{\%}{10^\circ\text{C}} \right]$$

A tranziens hőmérsékleti hiba akkor keletkezik, amikor a hőmérséklet ugrásszerű megváltozása időlegesen a kimeneti jel nagymértékű megváltozását eredményezi (pl. egy érzékelő a kemenceajtó kinyitása miatt intenzív

10. ábra Tranziens hőmérsékleti hiba tipikus időfüggvénye

hősugárzásnak lesz kitéve, és a belsejében egy inhomogén hőmérséklet-eloszlás alakul ki). Ha a hőmérséklet hatása nem szűnik meg, akkor általában a hiba egy idő után csökkenni kezd, és a statikus hőmérsékleti hiba szintjén állandósul (10. ábra).

A hőmérsékleti hiba leggyakoribb oka az érzékelőt alkotó szerkezeti anyagok anyagi tulajdonságainak a hőmérsékletfüggése (pl. a fajlagos villamos ellenállás, a nyúlásmérő ellenállás g-faktora, a rugóállandó stb.), ill. a szerkezetben lévő alkatrészek hőtágulása.

A következő részben folytatjuk a környezeti hatások vizsgálatát és áttekintjük azok csökkentési, kiküszöbölési lehetőségeit.

(Folytatjuk!)