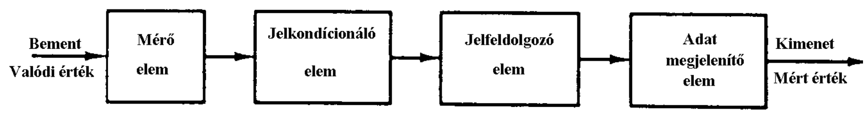
1. A folyamatműszerek általános jellemzése

A mérőrendszerek célja, hogy létrehozzon egy numerikus értéket előállító megfigyelőt, amely érték megfelel annak a változó jelnek, amelyet mérni kívánunk. Általában ez a numerikus vagy mért érték nem azonos a valódi mennyiséggel. A mérés alapvető célja az, hogy minél jobban megközelítsük a valódi értéket. Ezért azt mondjuk, hogy a valódi érték a mérőrendszer bemenőjele, a mért érték pedig a kimenőjele.

1.1. A műszerezési rendszerek struktúrája és elemei

A mérőrendszer számos elemet és blokkot tartalmaz. Négy általános elemet fedezhetünk fel bennük, amelyből egy vagy több hiányozhat egy-egy adott folyamatműszer esetén. Az 1.1. ábra mutatja a mérőrendszer általános felépítését, struktúráját. A négy elemtípus a következő (1.2. ábra):



- szenzor (érzékelő) elem

  ez áll kapcsolatban a folyamattal, amelyből az információt nyerni kívánjuk, és kimenetén kapjuk azt a változó értéket, amelyet aztán megmérünk (például nyúlásmérő bélyeg),

- jelkondícionáló

  ez fogadja a szenzor a szenzor kimenőjelét és átkonvertálja egy jobban feldolgozható jelhordozóvá (például mérőhíd, mérőerősítő),

- jelfeldolgozó elem

  ez az elem dolgozza fel a jelkondícionáló elem kimeneti jelét és átalakítja egy jól szemléltethető, megjeleníthető formában (például mikroszámítógép analóg-digitális átalakítóval),

- adat megjelenítő elem

  ez állítja elő a megfelelő, érzékelhető és a megfigyelő számára könnyen felismerhető formában a mért értéket (például alfanumerikus kijelző, grafikus terminál).

1.2. A műszerezési rendszerek elemeinek statikus és dinamikus karakterisztikái

Az előző fejezetben láttuk, hogy a műszerezési rendszerek különböző típusú elemeket tartalmaznak. E fejezetben megtárgyaljuk a tipikus elemek karakterisztikáit és azok szerepét és hatását az egész rendszer működésére nézve. Ez a fejezet foglalkozik az ún. statikus vagy állandósult állapotbeli karakterisztikával. Ez a karakterisztika teremt kapcsolatot - állandósult állapotban - a mérőelem be- és kimeneti jele között.

1.2.1. Szisztematikus jellemzők

A szisztematikus jellemzők azok, amelyeket pontosan minősíthetünk matematikai vagy grafikus eszközökkel. Ezek különböznek a statisztikus jellemzőktől, amelyek nem alkalmasak a pontos minősítésre.

- Méréshatár

  Egy elem bemenőjele megadható annak minimum és maximum értékeivel, például így B_{max} jelenti a megmérhető maximális, míg B_{min} jelenti a minimális értéket. A kimenőjel méréshatára (K) szintén megadható ennek maximum (K_{max}) és minimum (K_{min}) értékével. Például egy termoelem bemenő jelének minimuma 100 celsius fok, maximuma 250 celsius fok, kimenete pedig 4 mV- és 10 mV-os határok által definiált.

- Tartomány

  A mérési tartomány az előbb meghatározott maximum és minimum közötti összes értéket jelenti, vagyis a bemenőjel tartománya $B_{max} - B_{min}$, kimenő jeltartománya $K_{max} - K_{min}$. Ez előbbi példa esetén a bemenő jeltartomány 150 celsius fok, míg a kimenő jeltartomány 6 mV.

- Linearitás

  Egy elemet akkor mondunk lineárisnak, ha a be- és a kimenőjele közötti függvénykapcsolat egy egyenessel szemléltethető. Ideális lineáris elem esetén a minimum P_1 (B_{min} , K_{min}) pontot a maximális P_2 (B_{max} , K_{max}) ponttal egy egyenes köti össze az alábbi egyenlet szerint:

$$K - K_{min} = \left[\frac{K_{max} - K_{min}}{B_{max} - B_{min}}\right](B - B_{min})\,. \tag{1.1}$$

  Tehát egy ideális lineáris elem karakterisztikája a következő:

$K_{ideál} = AB + b$, ahol $A = \left[\dfrac{K_{\max} - K_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}}\right]$ jelenti az ideális linearitás meredekségét és $b = O_{\min} - KB_{\min}$ az koordinátakülönbségét.

1.1. Feladat

Határozzuk meg az előbbiekben ismertetett hőelem esetére, ennek a szenzor elemnek az ideális statikus karakterisztika egyenletét és ábrázoljuk több pontban a függvénykapcsolatot.

- Nemlinearitás

  Sok esetben az (1.1) egyenlet által meghatározott ideális, lineáris statikus karakterisztika nem teljesül és ilyenkor nemlineáris elemről beszélünk. A nemlinearitást definiálhatjuk egy általános, bemenőjeltől függő függvénykapcsolattal:

$$F(B) = K(B) - (AB + b) \text{ illetve } K(B) = AB + b + F(B). \qquad (1.2)$$

A nemlinearitás mérétékét gyakran a nemlinearitás maximális F vagy ennek az értéknek a kimenő jeltartományra vonatkoztatott relatív számértékével jellemezzük:

$$f_n = \frac{F}{K_{\max} - K_{\min}} 100\ \%.$$

Sok esetben a K(B) illetve az F(B) nemlineáris függvénykapcsolatot közelítő hatványsorral írjuk le (ld. még az 5.1. fejezetet is):

$$K(B) = c_0 + c_1 B + c_2 B^2 + \cdots + c_q B^q + \cdots + c_m B^m = \sum_{q=0}^{q=m} c_q B^q . \qquad (1.3)$$

1.2. Feladat

Készítsük el a réz-konstantán hőelem statikus karakterisztikáját negyedfokú hatvány sorral közelítő függvényt, amely a 0-400 celsius fok bemenő jeltartományban írja le a nemlineáris görbét. Határozzuk meg az ideális, lineáris statikus karakterisztikát leíró függvénykapcsolatot is.

- Érzékenység

  A fentiek alapján egy elem érzékenységét a kimenőjelet leíró statikus karakterisztika bemenőjel szerinti differenciálhányadosával definiáljuk:

$$dK / dB = A + dF(B) / dB , \qquad (1.4)$$

így egy ideális, lineáris esetben kapjuk, hogy

$$dK / dB = A . \qquad (1.5)$$

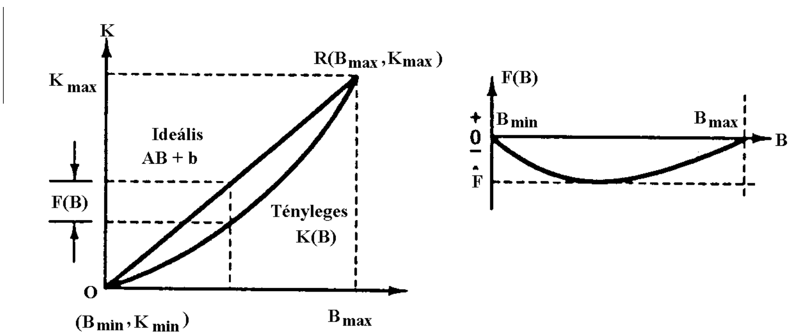
1.3. Feladat

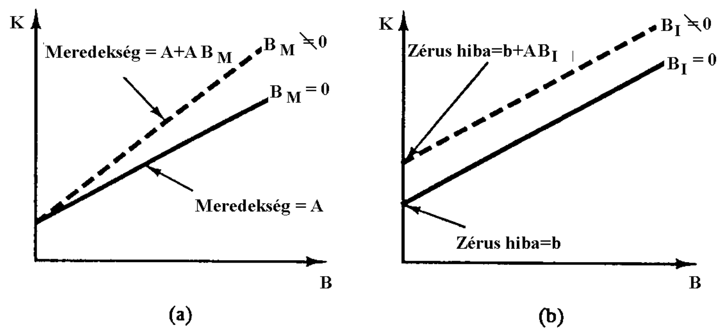
Határozzuk meg a réz-konstatán hőelem érzékenységét a 200 celsius fokos munkapontban.

- Környezeti hatások

  Általában a K kimenőjel nemcsak a B bemenőjeltől függ, hanem más hatásoktól is, például a környezeti hőmérséklettől, az atmoszférikus nyomástól, a relatív páratartalomtól, tápfeszültségtől stb. Ezért az (1.2) egyenlet az ún. referencia feltételek melett (például 25 celsius fok, 1000 mbar, 50 % RH és 10 V tápfeszültség) írja le a statikus karakterisztikát. Ezt az egyenletet tehát módosítanunk kell, figyelembe véve a környezeti hatások referencia feltételtől való eltérését is. Két fő típusa van a környezeti hatásoknak:

  a) az első az elem érzékenységét (1.4. a. ábra),
  b) a második az elem nullapontját (1.4. b. ábra)



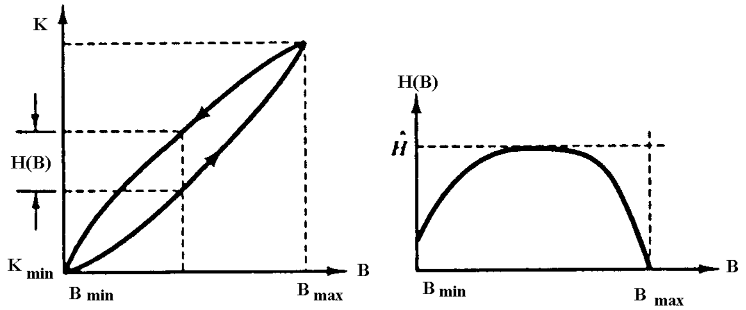


változtatja meg. Ezeket a hatásokat a statikus karakterisztikánál járulékos, parazita bemenőjelként (B_M illetve B_I) vesszük figyelembe az alábbiak szerint:

$$K = AB + b + F(B) + A_M B_M B + A_I B_I , \qquad (1.6)$$

ahol A_M és A_I a járulékos bemenetekre vonatkozó átviteli tényezőket jelentik.

- Hiszterézis (1.5. ábra).



A hiszterézis egy adott B bemenőjel esetén más-más K kimenőjelet szolgáltat attól függően, hogy a bemenőjel növekszik vagy csökken. A hiszterézis e két eltérő érték különbsége:

$$H(B) = K(B)_{B\downarrow} - K(B)_{B\uparrow} \,. \tag{1.7}$$

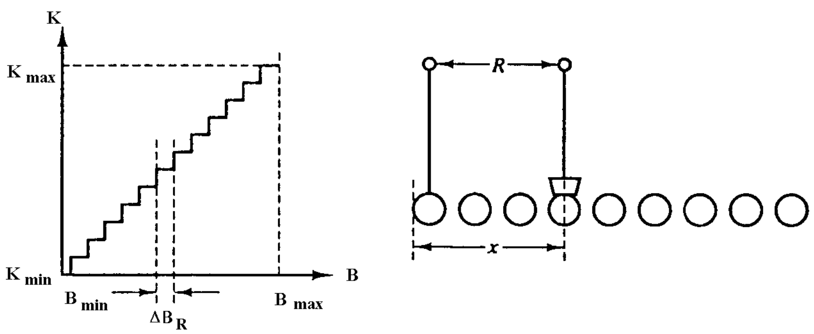
A hiszterézist a nemlinearitás mértékének jellemzésére használt kifejezés mintájára a következőképpen is megadhatjuk:

$$h = \frac{\hat{H}}{K_{\max} - K_{\min}}, \tag{1.8}$$

ahol $\hat{H}$ a maximális hiszterézis értéket jelenti.
Az egyszerű fogaskerékhajtás rendkívül jól szemlélteti a hiszterézis kialakulását.

- Felbontás

Néhány elemet jellemezhetünk olyan statikus karakterisztikával, amelyeknél a kimenőjel lépcsőfüggvény szerűen változik egy folytonosan növekvő bemenőjel esetén vagyis csak diszkrét értékeket vehet fel (1.6. ábra).



Ebben az esetben a felbontást azzal a legnagyobb bemenőjel változással (ΔB_f) írjuk le, amelynél még nem következik be kimenőjel módosulás. Természetesen a felbontást is megadhatjuk relatív értékkel:

$$f_f = \frac{\Delta B_f}{B_{\max} - B_{\min}}.$$

A felbontás szemléltetésére igen jó egy huzal-potenciométeres jelátalakító.

- Elhasználódás és öregedés

Ez a hatás például egy ideális, lineáris statikus karakterisztika A és b tényezőjének az idő múlásával arányos lassú, de szisztematikus változásában jelentkezik. Két példát is hozhatunk e jelenség szemléltetésére:

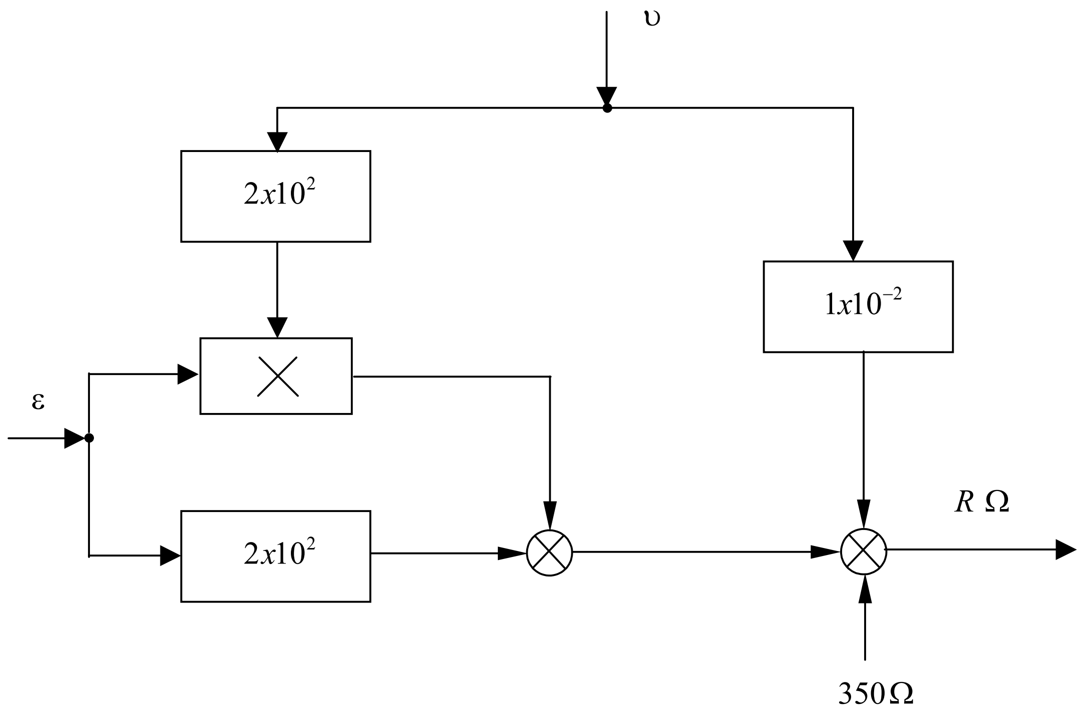
a) egy mérőrugó rugalmassági modulusa az öregedés folyamán állandóan változik,
b) a termoelem statikus karakterisztikáját leíró hatványsor koefficienseinek (c_i) értéke a fémpár anyagának kémiai átalakulása miatt változik.

- Bizonytalansági

A korszerű szenzorok esetén a nemlinearitás, a hiszterézis és a felbontás által okozott mérési hiba olyan kicsi mértékű, hogy az érzékelő által szolgáltatott jel bizonytalanságának leírására statisztikai jellemzőket vezetünk be. A statisztikai jellemzők megadásával és kiszámításával más tantárgyak foglalkoznak, ezért itt részletezésüktől eltekintünk.

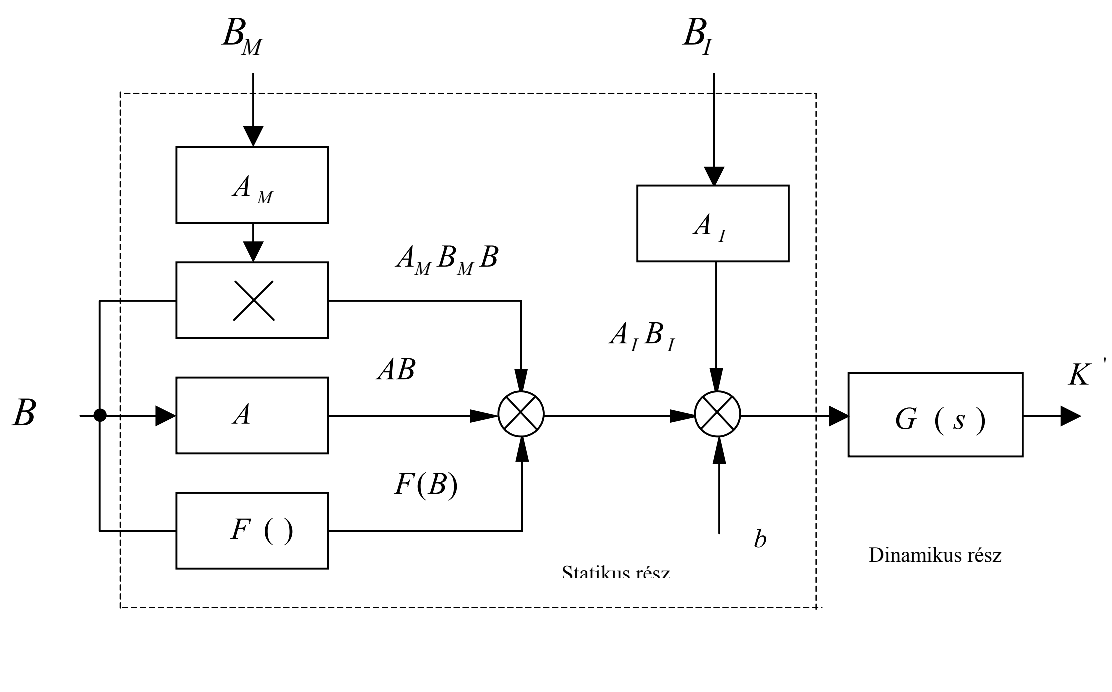
1.2.2. A rendszer elem általános modellje

Amennyiben a hiszterézist és a felbontás hatását figyelmen kívül hagyjuk, de a környezeti hatásokat és a nemlinearitást a statikus karakterisztikában leírjuk, akkor állandósult állapotban az (1.6) egyenletet kapjuk. Ennek az egyenletnek a grafikus szemléltetésének érdekében – a szabályozástechnikában jól bevált blokkvázlat jelölések felhasználásával – az 1.7. ábrán látható általános modell struktúrát rajzolhatjuk fel egy elem általános modelljére. Az ábrán jól látszik, hogy ez a modell kiegészül az elem dinamikáját leíró G(s) általános átviteli függvénnyel, amelynek részletes magyarázatát az 1.2.4. fejezetben adjuk meg.



1.1. Példa

A rendszer elem általános modelljének szemléltetésére először egy nyúlásmérő szenzor blokk vázlatát rajzoljuk meg. Legyen a bélyeg alapellenállása 350 ohm, a gauge faktora (ld. a 2.1.fejezetet) 2,0, a nemlinearitását és dinamikáját elhanyagoljuk, de az ellenállás változáson alapuló eszközök jól ismert környezeti hőmérséklet függését azonban figyelembe vesszük. Itt mindkét környezeti hatást (erősítés (gauge faktor) és nullapont változást) a hőmérséklet okozza. Ennek megfelelően szerkesztettük meg a nyúlásmérő érzékelő blokkvázlatos modelljét az 1.8. ábrán.



1.2. Példa

Az 1.1. példa alapján most elkészítjük a vas-konstantán hőelem nemlineáris (hatványsorral közelített) és dinamikus modelljét 0-400 celsius fok közötti bemenő jeltartományban. A modell megalkotásánál (ld. az 1.9. ábrát) felhasználtuk az 1.2. feladat megoldását is. Egy hőelemnek tulajdonképpen két csatlakozási pontja (két bemenőjele) van: az egyik a mérendő (υ_1), a másik a referencia vagy hidegpont ($\upsilon_2 \approx 10\ {}^0C$) hőmérséklet. E két hőmérséklet különbségével arányos a kimeneten megjelenő termofeszültség, amint azt az átviteli tényezők előjele is mutatja. (A referencia hőmérséklet hatását lineáris összefüggéssel írjuk le, mivel a nullaponthoz közeli értékről van szó, így a hőelem nemlinearitása itt még nem okoz hibát.) A hőelem dinamikus jellegét egytárolós arányos átviteli taggal vesszük figyelembe, amelynek az időállandója 10 s.

1.2.3. A statikus karakterisztika meghatározása – kalibrálás

Egy elem statikus karakterisztikáját kísérletileg méréssel határozhatjuk meg. A következő értékeket kell meghatároznunk: a K kimenőjelet akkor, amikor az B, I_M, B_I bemenőjelek állandóak vagy lassan változnak. Amennyiben az előbb felsorolt ki- és bemenőjeleket kalibrált vagy hiteles műszerekkel mérjük, az eljárást kalibrációnak nevezzük. Egy elem kalibrálását rendszertechnikailag az 1.10. ábra szemlélteti. A kalibráló műszerek leolvasása mérnöki és SI mértékegységben kell történjen [3]. A kalibrálási eljárás három fő részre osztható:

- a $K(B)$ karakterisztika felvétele $B_M = B_I = 0$ feltétel mellett (a mérést a bemenőjel minimumától a mximumáig, lassú, 10 %-os lésekkel kell elvégezni, növekvő és csökkenő irányú bemenőjelekre egyaránt, regresszió analízis segítségével meghatározzuk a statikus karakterisztikát leíró függvényeket és jellemzőket az 1.2.1 pont szerint),
- a $K(B_I)$ illetve a $K(B_M)$ jelleggörbe felvétele $B = áll. = B_{MIN}$ feltétel mellett és meghatározzuk a jellemző átviteli tényezőket úgy, mint $A_I = \dfrac{\Delta K}{\Delta B_I}$, $A_M = \dfrac{1}{B}\dfrac{\Delta K}{\Delta B_M} = \dfrac{2}{(B_{MIN} + B_{MAX})}\dfrac{\Delta K}{\Delta B_M}$, így rendelkezésünkre áll az összes paraméter, amely a statikus elem (rendszer) modellt leírja,
- az előző két pont megfelelő számú ismétlésével meghatározzuk a statisztikai jellemzőket a [11] irodalom alapján.

Több elemből álló rendszer eredő statikus karakterisztikája a fentiek alapján mérhető és kiértékelhető. Az eredő meteorológiai jellemzők meghatározására szintén a [11] irodalom alapján kerülhet sor.

1.2.4. Hibaredukálási technikák

Az előző fejezetekben láttuk, hogy a mérési hibákat a rendszerekben elsősorban az elemek nem ideális viselkedése, karakterisztikája okozza. Az 1.2.3. pontban vázolt

kalibrálási eljárással meghatározható, mely elem a dominál a nem ideális jellemzők előállításában. Ekkor lehetőségünk van ún. kompenzációs stratégiákat tervezni ezen elem nem ideális hatásainak csökkentésére, amely majd az egész rendszer hibájának redukálásához vezet.
A nemlinearitás korrekciójára a szokásos eljárás egy kompenzáló nemlineáris elem rendszerbe integrálása. A módszer lényegét az 1.11. ábra és az 1.3. példa illusztrálja.

1.3. Példa

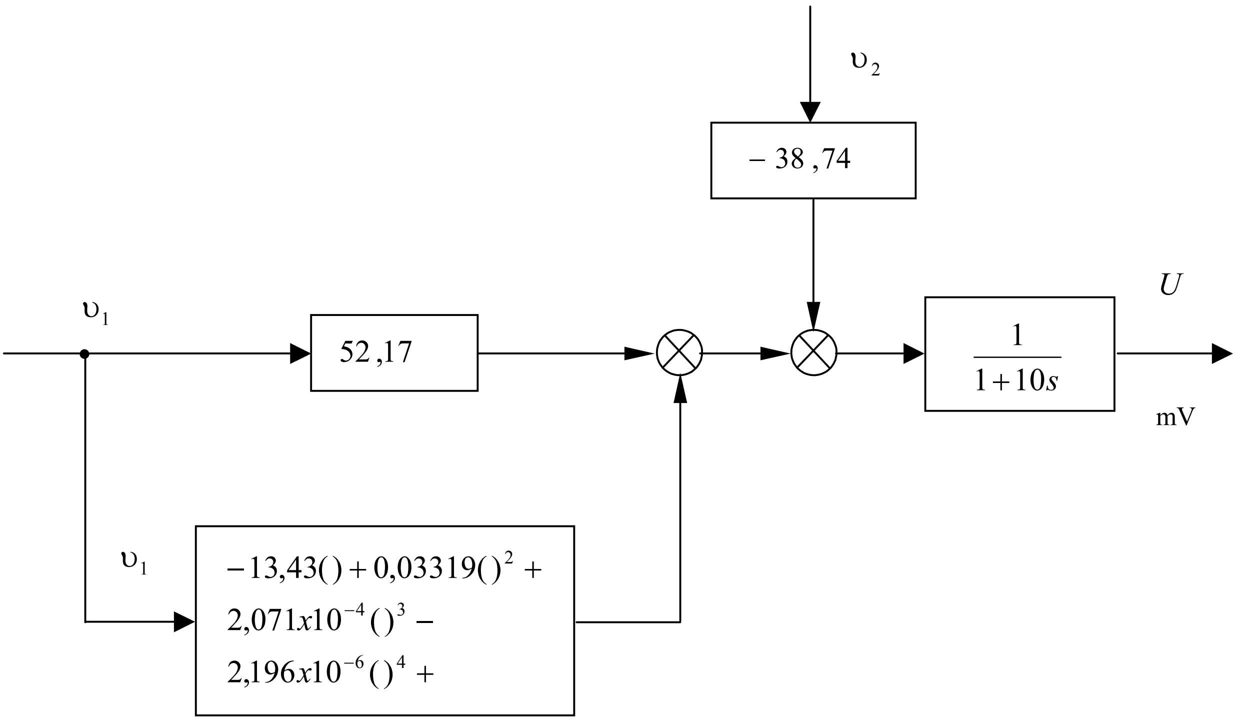
Egy erősen nemlineáris hőmérséklet szenzorral (termisztorral) szeretnénk melegvízhez lineáris mérőeszközt tervezni. Az érzékkelő ellenállás változáson alapuló villamos jelet szolgáltat, bemenő jeltartománya 298-348 K, kimenő jeltartománya 12-2 kohm. A tervezési cél, hogy a bemenő hőmérséklet tartománnyal arányos, normalizált (0-1 V; 0-100 %) és nagyon jó közelítéssel lineáris egyenfeszültéget kapjunk a mérőeszköz végső kimenőjeleként. A nemlinearitás korrekciójára egy kompenzáló nemlinearitást iktatunk a mérőkörbe. A termisztor statikus karakterisztikáját leíró egyenlet:

$$R(T) = 547384{,}44\, e^{-0{,}036T}$$

A szenzor nemlinearitását egy sorosan kötött kompenzáló elemmel korrigáljuk:

$$U(R) = -\,0{,}56 \ln\left(\frac{R}{12}\right).$$

Látjuk, hogy a kompenzáló elem statikus karakterisztikája is nemlineáris és jellegére nézve az érzékelőt leíró függvény inverze. Ezt az elemet célszerű egy kiegyenlítetlen hídkapcsolásban elhelyezni. A nemlineritás kompenzálásának eredményét a mérőeszköz eredő statikus karakterisztikája (1.11. ábra) mutatja, amelyen az ideális, lineáris karakterisztikát szaggatott, x pont jelölésű görbével is szemléltettük.



1.3. Feladat

Határozzuk meg az abszolút, négyzetes hibáját az 1.3. példában szereplő mérőkörnek 100 pontos kalibrálás esetén.

A környezeti hibahatások (B_M, B_I) csökkentésének legnyilvánvalóbb módja a leválasztás, amelynek hatására $B_M = B_I = 0$ értékűvé válik. Példaként egy hőelem hidegpontjának termosztálását említhetjük. A másik hatékony módszer az, hogy a külső hatásokra érzéketlenné tesszük az elemet ($A_M = A_I = 0$). Például olyan fémötvözetből készítjük a nyúlásmérő szenzort, amely a hőmérsékletváltozás hatását a méretre és a villamos ellenállásra teljesen kiküszöböli. Egy sikeres megoldás a környezeti hatás által kiváltott jellel ellentétesen kapcsolt teljesen azonos jelforrás. A cél tehát, hogy az elemen belül a nem kívánatos hatással szemben egy másik elem azonos jelét kapcsolva, kiiktassuk a környezeti befolyást. Ezt a módszer illusztrálja az 1.12. ábra. Az ábrából látszik, hogy a nem kompenzált elem kimenőjele $K = AB$, a kompenzáltté pedig $K' = AB + A_I B_I - A_I' B_I$. Amennyiben a kompenzáló elem átvizeli tényezője egyenlővé tehető az erősítés változást okozó környezeti bemenőjel átviteli tényezőjével, akkor

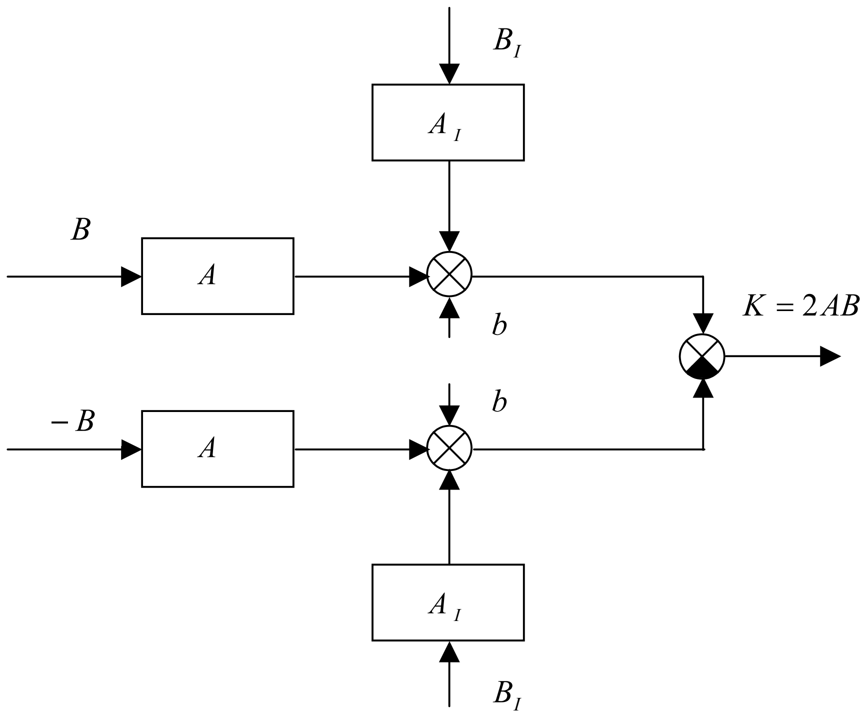
$$K' = AB \text{, ha } A_I = A_I' .$$

Példaként egy réz-konstantán hőelem hidegpont hőmérséklet változásának kompenzálását említhetjük. Itt $A_I B_I = -38{,}74\vartheta_2$ μV értékű, így a kompenzáló elemnek $+38{,}74\vartheta_2$ μV jelet kell szolgáltatnia. A hőelemek hidegpont hőmérséklet változásának kompenzálásáról az 5.1. fejezetben ejtünk szót.

A környezeti hatások kompenzálására még egy módszert említünk, ez az ún. differenciál rendszer vagy mérési mód. Ennek az eljárásnak a lényegét az 1.13. ábra szemlélteti nyúlásmérő bélyeges mérés esetén. Ez az ún. két mérőbélyeges elrendezésű hídmódszer. Az erőhatásnak kitett próbatestre két mérőbélyeget ragasztunk: az egyik bélyeg (az aktív) a mérendő erővel arányos megnyúlást ($+\varepsilon$), a másik pedig az erre merőlegesen ragasztás miatt a keresztirányú nyúlást ($-\varepsilon$) érzékeli. Természetesen mind a két bélyegnek azonos a hőmérsékleti koefficiense. A mérőhíd elvégzi a két mérőbélyeg által szolgáltatott jel különbségképzését, így az 1.13. ábra alapján levezethető összefüggés a következő:

$$AB + A_I B_I + b - (-AB) - b - A_I B_I = 2AB .$$

A környezeti hatások miatt változó bemenőjelek és a nemlinearitások együttes hatásának csökkentésére a nagy erősítésű, negatív visszacsatolás egy igen fontos módszer. Az 1.14. ábra illusztrálja ezt a technikát egy erő mérőátalakító elvi működése kapcsán. Az átalakító kimenő feszültségét a bemenő erő változtatja, amely jelet egy erősítőn keresztül ($A_u \to \infty$) vezetünk a kimenetre (U_{ki}). Az erősítő kimenőjelét, amely egyben a mérőátalakító kimenőjele is, egy visszacsatoló elemen (például merülőtekercsen) keresztül visszavezetünk, és szembe kapcsoljuk a mérendő, bemenő erővel (erő vagy nyomaték kompenzációt megvalósítva). A mérőátalakítóra vonatkozó egyenleteket az 1.4. ábra alapján felírhatjuk:



$$\Delta F = F_{be} - F_v$$

$$U_{ki} = AA_u\,\Delta F$$

$$F_v = A_v\,U_{ki}$$

$$\frac{U_{ki}}{AA_u} = F_{be} - A_v U_{ki}$$

$$U_{ki} = \frac{AA_u}{1 + AA_u A_v} F_{be}.$$

Amennyiben az erősítő átviteli tényezőjére fenn áll a $A_u \to \infty$ feltétel, akkor írható:

$$AA_u A_v >> 1$$

$$U_{ki} \approx \frac{1}{A_v} F_{be}.$$

Ez azt jelenti, hogy a mérőátalakító kimenőjele csak a visszacsatolásban lévő elem átviteli tényezőjétől (A_v) függ és független a szenzor A, az erősítő A_u átviteli tényezőjétől, vagyis az ún. előrevezető ág eredő erősítésétől. A fentiek jelenthetik azt is, hogy a nemlinearitásból és a környezeti hatásoktól való függést is csökkentettük.
Most ismételjük meg a fenti gondolatmenetet $A = A + A_M B_M$ estére:

$$U_{ki} = \frac{(A + A_M B_M) A_u}{1 + (A + A_M B_M) A_u A_v} F_{be}$$

$$U_{ki} \approx \frac{F_{be}}{A_v}, ha \ (A + A_M B_M) A_u A_v >> 1.$$

Itt, természetesen, biztosítanunk kell, hogy a visszacsatoló elem átviteli tényezője (A_v) a munkaponttól (linearitás) és a környezeti hatásoktól (erősítés ás nullapont változás) független legyen. Ennek érdekében az elektronikus erősítő szolgáltasson nagy teljesítményt, az érzékelő viszont legyen igen kicsi energiaigényű, mert ilyen kondíciók mellett kapjuk a legnagyobb linearitást és a legkisebb hatást a környezeti oldalról. Ilyen elvű berendezések részletes működését a 4.1. fejezet tárgyalja.

A hihetetlenül gyors áresés a digitális integrált áramköröknél lehetővé tette, hogy a mikroszámítógépeket széles körben használják jelfeldolgozó elemekben és rendszerekben (4.2. fejezet). Ez megnyitotta az utat olyan nagy hatékonyságú technológiák alkalmazásának, mint a számítógéppel becsült mérési eredmények felhasználása. Ez a módszer feltételezi, hogy a mérőrendszereket igen jól modellezett elemekkel írjuk le. Amint azt az előzőekben láttuk, egy elem állandósult kimenőjelét az (1.6) egyenlet írja le. Ezt a kifejezést direkt egyenletnek hívjuk, *K* jelenti a függő változót és B, B_M, B_I pedig a független változókat. Az állandósult állapotbeli karakterisztika természetesen jellemezhető az (1.6) egyenlet inverzével is: itt *B* a függő változó és *K* valamint B_M, B_I reprezentálják a független változókat. Az inverz egyenlet alakja a következő:

$$B = A' K + F'(K) + b' + A'_M B_M K + A'_I B_I, \text{ ahol} \tag{1.9}$$

$A', F'(), b'$ stb. egészen különböző koefficienseket jelentenek, mint a direkt egyenletben lévő hasonló tényezők.

1.4. Példa

Határozzuk meg a réz-konstatán hőelem inverz karakterisztikáját hatványsor közelítéssel, nulla celsius fokos hidegpont hőmérséklet esetén. A statikus karakterisztika direkt alakja a következő:

$$U = 3{,}845\,10^{-2} \vartheta + 4{,}682\,10^{-5} \vartheta^2 - 3{,}789 10^{-8} \vartheta^3 + 1{,}652 10^{-11} \vartheta^4 \quad mV, \text{ az}$$

inverz alak pedig:

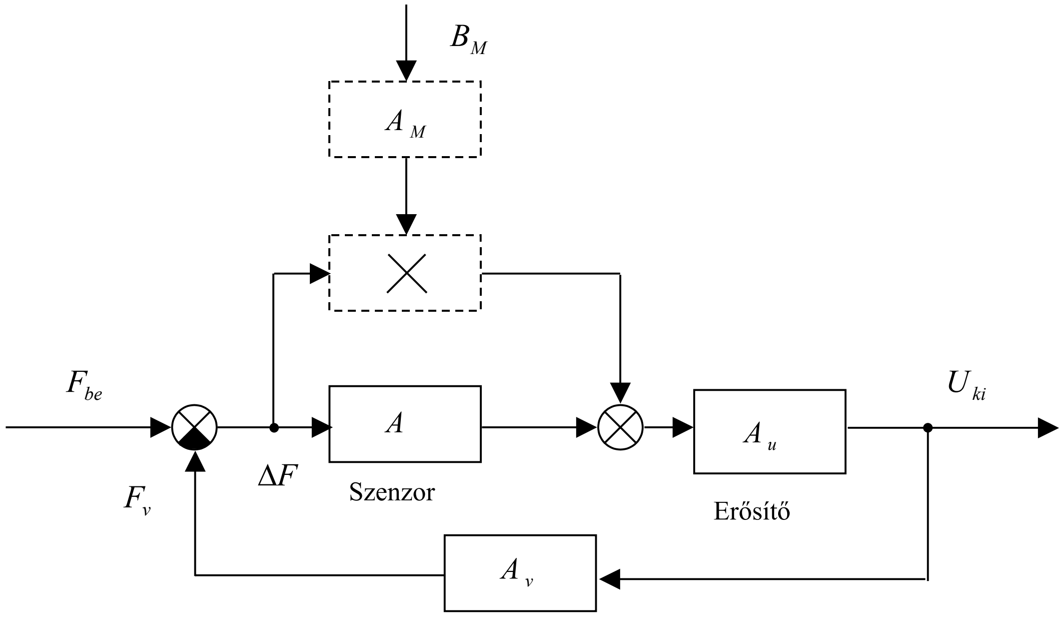
$$\vartheta = 25{,}55 U - 0{,}5973 U^2 + 2{,}064\,10^{-2} U^3 - 3{,}205\,10^{-4} U^4 \quad {}^0C,$$

ahol *U* a termoelem által leadott termofeszültség és ϑ a melegpont 0...400 celsius fok között változó hőmérséklete.

Az 1.4. példában a direkt és inverz karakterisztikát közelítő hatványsor együtthatóit a BS 4937 szabvány által közölt értékekre a legkisebb négyzetek módszerével illesztettük.

Míg a direkt egyenlet a hibabecslésre, addig az inverz kifejezés a hiba redukcióra alkalmazható.

Az inverz forma alkalmazása a számítógépes mérési érték becslésére az alábbi következményekkel jár (ld. az 1.15. ábrát).



- A nem kompenzált rendszert egyszerű elemként kezeli. Ezáltal a nem kompenzált rendszer kalibrálásakor az $A', F'(), b'$ koefficiensek, amelyek az egész hatásmechanizmust reprezentálják, kiszámíthatók és a környezeti hatásokat leíró (modellező) bemenetek mindegyikéből egyszerre több is figyelembe vehető.
- A nem kompenzált rendszert a becslőhöz kell csatlakoztatni. Ez a becslő elsődlegesen egy számítógépet tartalmaz, amely tárolja a $A', F'(), b'$ stb. modell paramétereket. Amennyiben egy környezeti hatást, mint bemenőjelet, szignifikánsnak észlelünk, akkor erre illeszthetünk egy külön szenzort, amely biztosítja a számítógép számára (vagyis az 1.4. példában a hidegpont hőmérsékletét is külön érzékelővel mérjük) a mért (becsült) B'_M, B'_I értékeket. A nem kompenzált rendszer K' kimenőjelét is a számítógépbe visszük.
- Ezután a számítógép képes egy elsődleges becslést (B') adni B-re az ... egyenlet alapján.
- Megjelenítjük a becsült B' mért értéket, amely nagyon közel fog esni K-hoz. Ipari alkalmazások és kisebb pontossági elvárások esetén ennél az elsődleges becslésnél tovább nem kell lépni.
- Amennyiben nagy pontosság szükséges, tökéletesíteni kell a becslőnket az egész rendszer kalibrálásával. A szokásos bemenőjelekre adott a K kimenőjel tartománya, így kiszámolható e rendszer $H = K - B$ hibája. Sajnos ez a hiba véletlen hatásokból adódó komponensekkel is terhelt, ezért a kalibrálást mérési sorozat felvételével kell korrigálni.

- A mérési sorozattal kapott adathalmazra ($K_i, B_i \; i=1,2,\ldots \; n,$) a legkisebb négyzetek módszerével egy egyenest illesztünk, amelynek az alakja:

  $$H=\alpha K+\beta \text{ , ahol}$$

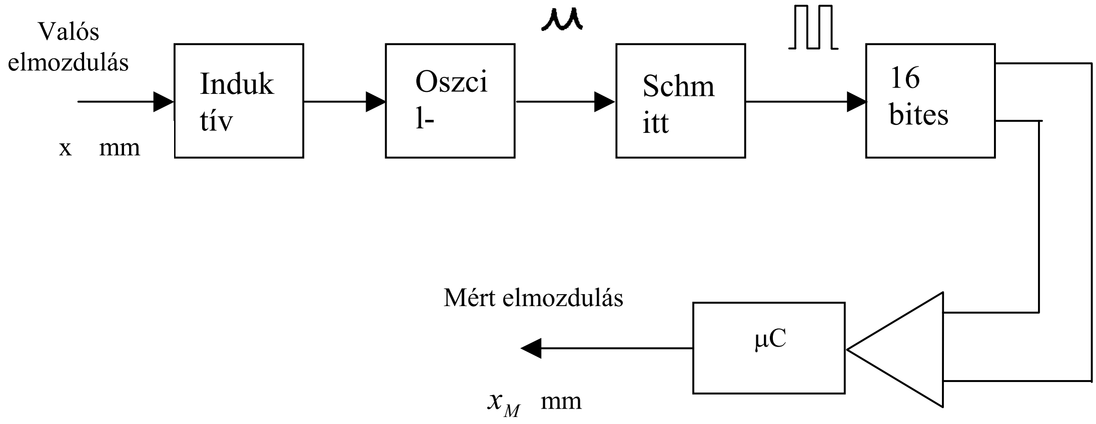
  β a maradó zérus hibaként és α a maradó skála hibaként értelmezhető.
- A korrelációs koefficiens a következőképpen nyerhető:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{i=n} K_i H_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} K_i^2 \, x \sum_{i=1}^{i=n} H_i^2}} \,. \qquad (1.10)$$

  Amennyiben r értéke nagyobb, mint 0,5, akkor egy erős korreláció van a H és a K adathalmaz között. Ha r értéke kisebb, mint 0,5, akkor nincs korreláció H és K között, ami azt jelenti, hogy H teljesen véletlen eloszlású.
- Amennyiben a megfelelő egyenletet felírtuk, akkor ezt felhasználjuk a mért érték tökéletesítésére:

  $$K^{*}=K-H=K-(\alpha K+\beta)\,.$$

Az 1.16. ábra mutatja be a módszer alkalmazását elmozdulás mérés kapcsán. A nem kompenzált rendszer egy elmozdulás érzékelő, induktív szenzort, egy oszcillátort és egy Schmitt triggert tartalmaz. Az érzékelő (L(x)) nemlinearitása közismert. Ennek egyenes következménye, hogy az inverz modell (az x elmozdulás és a Schmitt trigger kimenő f frekvenciája közötti) karakterisztika is nemlineáris. A becslő egy 16 bites impulzus számlálóból és egy mikroszámítógépből áll. A számítógép beolvassa állandó időközönként a számláló kezdő- és végállapotát, így képes meghatározni az f frekvenciát. Ezután az ismert (megmért) frekvencia segítségével az inverz modell karakterisztikából kiszámolható és a memóriában eltárolható a keresett x elmozdulás.

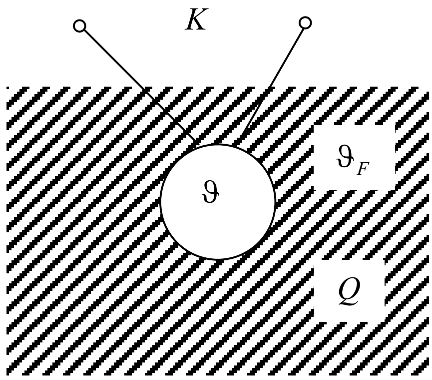


1.4. Elemek dinamikus karakterisztikája

Amennyiben egy elem B bemenőjele hirtelen változik egyik értékről a másikra (egyik munkapontból a másikba kerül), akkor a K kimenőjel nem képes ezt egyidejűleg követni. Például egy hőmérséklet szenzor bemenetén a jel hirtelen 25 $^{o}\ C$-ról 100 $^{o}\ C$-ra változik, jó néhány másodperc el fog telni, amíg a termofeszültség 1 mV-ról 4 mV-ra beáll. Ennek a viselkedésnek a jellemzésére használjuk a dinamikus karakterisztikát és ennek általános leírására használjuk az elem (a tag) $G(s)$ átviteli függvényét. Ebben a fejezetben a tipikus elemek dinamikus karakterisztikáját vizsgáljuk és megadjuk ezek átviteli függvényeit is. Az átviteli függvény meghatározásánál a szabályozástechnikából ismert vizsgáló jeleket és paraméter identifikációs módszereket alkalmazzák. Amennyiben egy több elemből álló folyamat műszerezési rendszer bemenőjele változik hirtelen meg, akkor az eredő kimenőjel nem követi a bemenőjel változásait. Ilyenkor ún. dinamikus hiba keletkezik és szükséges ennek a dinamikus kompenzálása, hogy ezt a hibát minimalizálhassuk.
Tipikus elemek átviteli függvényei

Első rendű elemek

Az első rendű késleltetéssel rendelkező elemre igen jó példa a hőelem vagy egy termisztor érzékelő. A tokozatlan elemet egy folyékony közegbe mártjuk (1.17. ábra). Tegyük fel, hogy kezdetben (t = -0) a bemerülő része a szenzornak azonos hőmérsékleten van a folyadékkal. A t = 0 időpillanatban a folyadék hőmérséklete hirtelen megváltozik (emelkedik), így a szenzor állandósult állapotból tranziens állapotba kerül, amelyet a hőegyensúlyi egyenlet írja le:



a bemenő hőáram - a kimenő hőáram = a szenzor hőtartalmának megváltozása

Feltesszük, hogy $\vartheta_F > \vartheta$ és a kimenő hőáram változás zérus, a bemenő hőáram Q pedig arányos a $(\vartheta_F - \vartheta)$ hőmérséklet különbséggel:

$$Q = \gamma\ \Phi\,(\vartheta_F - \vartheta)\,.$$

A szenzor hőtartalmának emelését az $mc_f[\vartheta - \vartheta(-0)]$, ennek változási sebességét az $mc_f \dfrac{d}{dt}[\vartheta - \vartheta(-0)]$ összefüggés írja le, amelyeket figyelembe véve kapjuk a jelenség dinamikáját leíró differenciálegyenletet:

$$\gamma\Phi(\Delta\vartheta_F - \Delta\vartheta) = mc_f \frac{d\Delta\vartheta}{dt},$$

$$\frac{mc_f}{\gamma\Phi}\frac{d\Delta\vartheta}{dt} + \Delta\vartheta = \Delta\vartheta_F,$$

$$\tau\frac{d\Delta\vartheta}{dt} + \Delta\vartheta = \Delta\vartheta_F.$$

Amint az látható az elem dinamikus karakterisztikáját egy lineáris, állandó együtthatós (a fajhőt és a felületi hőátadási koefficienst állandónak véve), elsőrendű differenciál egyenlet írja le. A Laplace-transzformációs szabályok felhasználásával megkapjuk az elem általános dinamikus modelljét és átviteli függvényét, amelyet az 1.18. ábrán szemléltettünk.