

# Elszámolási rendszerek az áramlásmérésben - 5.

## A földgázenergia mérése

Barta Gergely, Dr. Csubák Tibor – Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Napjaink egyik legfontosabb energiahordozójának kereskedelmi, elszámolási célú mérése speciális feladat, ugyanis a földgáz összetétele és ennek következtében sűrűsége, és fűtőértéke változik. Az elszámolási mérésekben tehát nem elegendő a mért fizikai mennyiségek (nyomás, hőmérséklet, térfogatáram) figyelembevétele, az átadott energia pontos méréséhez a gázkeverék összetételével is számolni kell. A szűkítőelemes áramlásmérést tehát ki kell egészíteni a gázösszetétel mérésével, a számítómű programját pedig egy korrekciós algoritmussal. Ily módon lehetőség nyílik a tényleges energiaáram mérésére és elszámolására.

### A korrekciós mennyiségmérés háttere

Az egyetlen, minden részletében szabványosított mennyiségmérési módszer az egyszerű, furatos mérőperemmel történő, nyomáskülönbség mérésen alapuló szűkítőelemes mérés. A szabványos eljárás nagy előnye, hogy a mérés elve indirekt, és a kimeneti jel meghatározásához a mechanikai méretek ismeretében elméleti úton juthatunk el. Így betartva a konstrukcióra vonatkozó előírásokat, egyszerű hőmérséklet-, nyomás- és nyomáskülönbség-mérő eszközök kalibrálásával biztosítható az egész rendszer pontossága.

A Bernoulli-egyenletből és folytonossági egyenletből levezethető

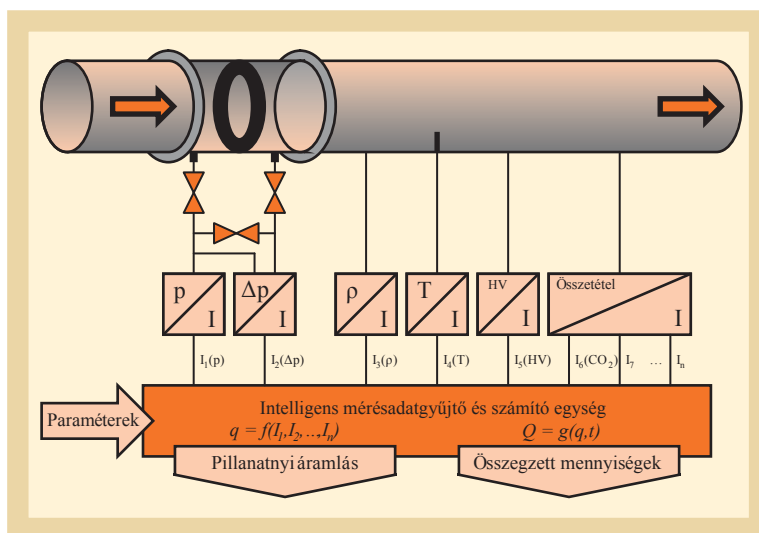
$$q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}$$

összefüggés segítségével határozható meg a  $q_v$  térfogatáram, ahol az  $\alpha$  átfolyási szám a cső és a mérőperem geometriáját jellemzi, az  $\varepsilon$  expanziós tényező pedig a mérőperemen való áthaladás során elszorított sebesség-, térfogat- és sűrűségváltozás figyelembevételére szolgál. Az expanziós tényező függ a nyomáskülönbség és a mérőperem előtt mérhető abszolút nyomás  $\Delta p/p_1$  arányától. Emiatt, bár az expanziós tényező üzemi méréseknél konstansként definiálható, az elszámolási mérésekre vonatkozó szigorúbb pontossági előírások miatt ezekben a rendszerekben minden mérési ciklusban meg kell határozni az értékét. A térfogatáram meghatározásához szükség van a gázkeverék  $\rho$  sűrűségére is, amelynek direkt mérése gyakran nem végezhető el, de meghatározására több módszer is ismeretes. A sűrűség ismeretében értelemszerűen meghatározható a gázkeverék

$$q_M = \alpha \cdot \varepsilon \cdot A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}$$

tömegárama is.

Az 1. ábra egy teljesen kiépített földgázenergiamérő-rendszer felépítését szemlélteti. A tömegáram számításához feltétlenül szükség van a gáz hőmérsékletének, nyomásának és sűrűségének, valamint a mérőperemen eső nyomáskülönbségnek (a mérőnyomásnak) az ismeretére. A nyomás- és hőmérséklet-érzéke-



1. ábra A földgázenergia-mérő rendszer felépítése

lők egyszerű elven működnek, nagy pontossággal és viszonylag olcsón valósíthatók meg. A direkt sűrűségmérést gazdaságossági okokból ritkábban építik ki, emiatt a sűrűséget a gáz nyomásának, hőmérsékletének és összetételének ismeretében számítással célszerű meghatározni.

Az összetétel mérése lehet teljes vagy részleges. Az előbbi esetben a gázban lévő mindegyik összetevő mennyiségét mérjük (hozzávetőlegesen mintegy 20 komponens), míg az utóbbiban csak néhány (3-5 komponens) jellemzőről szerzünk méréssel információt, és ezekből az adatokból következtetünk a gáz összetételére. Mivel a teljes gázösszetétel meghatározására szolgáló gáz-kromatográfias mérések ára szintén igen magas, a gyakorlatban sokszor csak részleges mérést valósítanak meg. A gázösszetétel ismerete lehetővé teszi a fűtőérték meghatározását is, így módon lehetőség nyílik a térfogat-, ill. tömegáramon kívül az energiaáram meghatározására is, vagyis az átáramlott földgáz elégetésekor felszabaduló energia kiszámítására és összegzésére.

A gázmérő rendszer annál pontosabb, minél több élő bemenettel rendelkezik, azaz ha minden – a gáz tömeg-, térfogat- és energiaáramát befolyásoló – paramétert közvetlenül méri. Ha azonban a mérőperemes földgázmérő rendszerhez nem tartozik

valamely lényegesen befolyásoló és változó fizikai jellemzőt folytonosan mérő és korrigáló műszer (pl. sűrűségátvadó), akkor ezeket az adatokat a mechanikai jellemzők, a munkaponti hőmérséklet és munkaponti nyomás függvényében, továbbá a gázkeverék komponenseire vonatkozó fizikokémiai jellemzőkből számításal kell meghatározni. Természetesen a költségcsökkentés nem mellékes szempont, és ezért a legtöbb befolyásoló mennyiséget nem közvetlenül mérjük, hanem azokat néhány mért paraméterből számítjuk, vagy a számítógységnek közvetlenül megadjuk (kezelői adatbevitel).

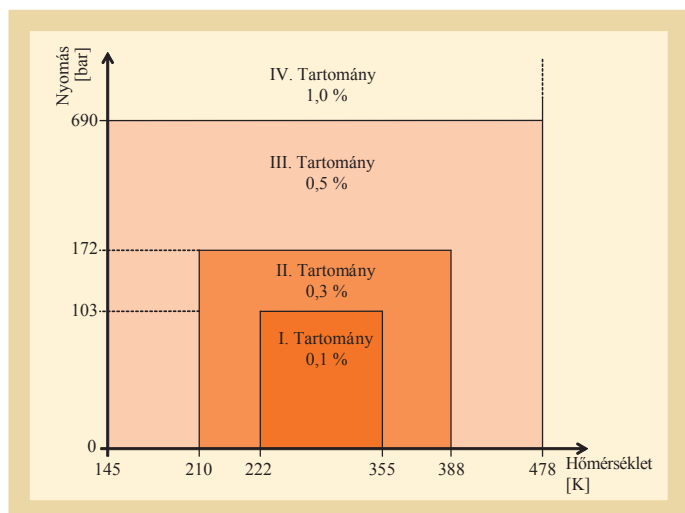
**A beágyazott rendszerben megvalósítható áramlásszámító algoritmus**

Az elszámolási célú mérésekkel szemben támasztott pontossági igény növekedése egyre részletesebb fizikai modellek alkalmazását teszi szükségessé. A bonyolultabb modellek viszont egyre több számítást igényelnek. Az energiaáram meghatározásához szükséges számításokat az intelligens mérésadatgyűjtő- és számítógység végzi. Ez egy speciálisan erre a célra tervezett mikrokontroller-alapú, beágyazott számítógép, amely a PC-architektúrákhoz képest tipikusan kisebb sebességgel, memóriával és korlátozott utasításkészlettel rendelkezik, ipari kivitele azonban nagyobb megbízhatóságot és folyamatos rendelkezésre állást garantál. Az energetikai elszámolás mint felhasználási terület azt is megköveteli, hogy a berendezés egésze hitelesíthető legyen, és valósítsa meg a használat során előforduló, külső hardveres vagy szoftveres beavatkozás elleni védelmet.

**Az áramlásszámítás menete**

1. A távadók áramjeleinek fizikai mennyiségekké történő átalakítása. A következő gázjellemzők értékére van szükség:
  - A gáz üzemi hőmérséklete,
  - A gáz abszolút üzemi nyomása,
  - A mérőperemen eső nyomás,
  - A gáz összetétele.
2. A mérőperem és a cső furatátmérőjének meghatározása az üzemi hőmérsékleten (hőtágulás figyelembevétele), ezekből az adatokból az átmérőviszony ( $\beta$ ) kiszámítása.
3. A gáz összetételének meghatározása.
4. A gáz üzemi sűrűségének ( $\rho$ ) kiszámítása az üzemi statikus nyomásból ( $P$ ), az üzemi hőmérsékletből ( $T$ ) és a gáz összetételéből.

2. ábra Az AGA-8-szabványban definiált pontossági tartományok a K kompresszibilitási tényező meghatározásához



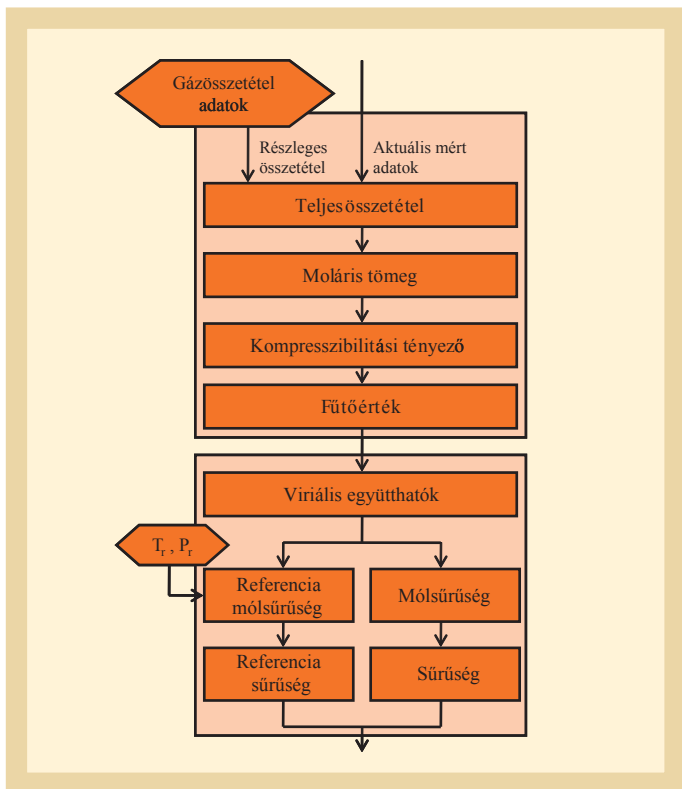
5. A gáz izentrópus kitevőjének ( $\kappa$ ) meghatározása az üzemi nyomásból és az üzemi hőmérsékletből.
6. A dinamikai viszkozitás ( $\eta$ ) kiszámítása az üzemi nyomásból, az üzemi hőmérsékletből és a referencia-hőmérsékletből.
7. Az expanziós tényező ( $\epsilon$ ) kiszámítása az átmérőviszonyból, a mérőperemen eső nyomásból, a gáz üzemi nyomásából és az izentrópus kitevőből.
8. A Reynolds-szám ( $Re$ ) kiindulási értékének felvétele. (Szükség van egy kiindulási érték megválasztására az átfolyási szám kiszámításához.)
9. Az átfolyási szám ( $\alpha$ ) kiszámítása az átmérőviszonyból, a csőátmérőből, a mérőperem és a pozitív, ill. negatív oldali nyomásmegcsapolás közötti távolságból és a Reynolds-számból.
10. A tömegáram ( $q_M$ ) kiszámítása az átfolyási számból, az expanziós tényezőből, a mérőperem furatátmérőjéből, a mérőperemen eső nyomásból és a gáz üzemi sűrűségéből.
11. A Reynolds-szám kiszámítása a tömegáramból, a csőátmérőből és a dinamikai viszkozitásból.
12. Iteráció. Mivel a Reynolds-szám és az átfolyási szám egymástól függenek, ezért a 9-11. lépések mindaddig ismétlődnek, amíg a tömegáram elegendő pontossággal kiszámított-nak nem tekinthető.
13. A térfogatáram kiszámítása referenciaviszonyoknál a tömegáramból és a sűrűségből.
14. Az energiaáram kiszámítása referenciaviszonyoknál a térfogatáramból és a fűtőértékből.
15. Az utolsó számítási ciklus óta eltelt idő kiszámítása és a tömeg-, térfogat- és energiaösszegek aktualizálása.

Az algoritmus egy mérőperemes tömegárammérés feldolgozásához hasonlít, két ponton azonban jelentősen eltér attól. Egyrészt meg kell határozni a gáz összetételét (méréssel vagy számításal) és ennek alapján szükség van a sűrűsre és a fűtőértékre. Másrészt – ezeket az adatokat felhasználva – a tömegáram kiszámítását követően az energiaáramot is számítani kell.

**A sűrűségszámítás menete**

A gáz sűrűségének kiszámítása az American Gas Association Átviteli Mérési Bizottságának 8. számú jelentésében foglaltak alapján történik. A röviden AGA-8 néven ismert szabványban leírt számítások elsősorban földgázra alkalmazhatók, ugyanis a megadott pontosságot csak abban az esetben garantálja, ha a gáz egyes összetevőinek mólszázalékos arányai a rájuk meghatározott értéktartományokon belül vannak (pl. metántartalomnál 50...100%). Amennyiben a gázösszetételre vonatkozó előírások teljesülnek, a számítások pontossága az üzemi hőmérséklettől és a nyomástól függ. A szabvány ún. pontossági tartományokat definiál (2. ábra). Pl. ha a hőmérséklet -51 és +82 °C között, az üzemi nyomás pedig 103 bar alatt van, akkor a gáznak az ideális gáztól való eltérését jellemző K kompresszibilitási tényező 0,1% pontossággal határozható meg. A gyakorlati alkalmazás során problémát jelenthet, hogy a szabvány angolszász mértékegységeket használ, és ennek megfelelően definiálja a számítási összefüggések konstans paramétereit is.

A 3. ábra a gázösszetétel és a sűrűség meghatározásának módszerét szemlélteti. Első lépésként meg kell határozni a földgáz összetételét. A legpontosabb módszer természetesen a teljes összetételbeli analízis, vagyis valamennyi összetevő mólfraekciójának mérési úton való meghatározása. Üzemi körülmények között azonban a földgáz teljes összetételi analízise általában nem oldható meg. Az összetétel becslésére öt alternatív módszer választható. Ezek a következők – ismertnek vett – mennyiségek különböző kombinációit használják fel:



3. ábra A gázösszetétel és a sűrűség számítása

- $Gr$  – a gáz relatív sűrűsége 15,56 °C hőmérsékleten és 1,015 592 bar abszolút nyomáson,
- $HV$  – a gáz térfogategységre eső, átlagos fűtőértéke 15,56 °C hőmérsékleten és 1,015 592 bar abszolút nyomáson,
- $x(CO_2)$  – a szén-dioxid mólfraekciója,
- $x(N_2)$  – a nitrogén mólfraekciója,
- $x(CH_4)$  – a metán mólfraekciója.

Az alternatív összetétel-jellemzési módszerekkel a metán, az etán, a propán, a normál bután, az izobután, a pentánok összegének, a hexánok és a magasabb rendű szénhidrogének összegének, valamint a földgázban lévő hígítóanyagok (a nitrogén és a szén-dioxid kivételével) összegének a mólfraekciója becsülhető meg. Ezeknek a módszereknek az egyik fő hátránya az, hogy nem nyújtanak információt a gázkeverékben lévő vízgőz és hidrogén-szulfid mennyiségéről.

Az összetétel ismeretében a moláris sűrűséget a

$$p_{abs} = R \cdot T \cdot d + B \cdot R \cdot T \cdot d^2 + C \cdot R \cdot T \cdot d^3 + D \cdot R \cdot T \cdot d^4 + E \cdot R \cdot T \cdot d^6 + A_1 \cdot R \cdot T \cdot d^3 (1 + A_2 \cdot d^2) e^{-A_2 \cdot d^2}$$

állapotegyenlet megoldásával határozhatjuk meg, ahol:

$d$  az ismeretlen moláris sűrűség,

$T$  az üzemi hőmérséklet,

$p_{abs}$  az abszolút üzemi nyomás,

$R$  az egyetemes gázállandó,

$B, C, D, E, A_1$  és  $A_2$  az ún. viriális együtthatók. (A gázösszetevők egymásra hatását fejezik ki. Ezek az együtthatók a moláris tömegtől, valamint a szabványban rögzített energia, méret és orientációs paraméterektől függnnek, és empirikus képletekkel határozhatók meg. Meghatározásuk számítástechnikai szempontból lebegőpontos összeadásokat és szorzásokat jelent, amely műveletek elvégzése mikrokontrolleres környezetben számottevő processzoridőt igényel, de nem jelent problémát.)

### Az állapotegyenlet megoldása

Az állapotegyenlet megoldása a  $d$  moláris sűrűsége már nehezebb feladat, és csak numerikus eljárással lehetséges. A megoldás általános módja egy olyan  $d$  értéknek a megkeresése, amely az egyenlet jobb oldalába behelyettesítve a specifikált  $p_{abs}$  nyomást eredményezi. Az állapotegyenlet jobb oldalának jelzésére használjuk az  $f(d)$  jelölést és definiáljuk az  $F(d)$  függvényt a következő módon:

$$F(d) = f(d) - p_{abs}$$

ahol:

$$f(d) = R \cdot T \cdot d + B \cdot R \cdot T \cdot d^2 + C \cdot R \cdot T \cdot d^3 + D \cdot R \cdot T \cdot d^4 + E \cdot R \cdot T \cdot d^6 + A_1 \cdot R \cdot T \cdot d^3 (1 + A_2 \cdot d^2) e^{-A_2 \cdot d^2}$$

Egy  $d_0$  próbaérték behelyettesítése egy  $f_0 = f(d_0)$  eredményt ad, azonban csak az a  $d_0$  próbaérték lesz helyes, amelyik az  $F(d_0) = 0$  egyenlőséghez vezet. Ez lesz az  $f(d) = p_{abs}$  állapotegyenletnek egy tényleges, érvényes megoldása. Ha  $F(d_0)$  értéke nem zérus, akkor a következő próbaszámításhoz egy másik  $d_1$  próbaértéket kell felvenni. A numerikus eljárások következetes módszert nyújtanak  $d$  próbaértékeinek a kiválasztásához. Két módszer alkalmazható, a helytelennek bizonyuló pozíciós módszer és az egymást követő felezés módszere. A helytelen pozíciós módszer számítástechnikailag gyors, azonban téves megoldást is eredményezhet. Az egymást követő felezés módszere lassabb, viszont lényegében tévedéstől mentes. Hatékonysága nagymértékben függ a kezdőintervallum megfelelő kiválasztásától. Akkor mondható ésszerűen gyorsnak, ha elegendően kicsi intervallumra indítjuk a keresést. Alkalmazása előtt tehát meg kell keresni ezt a tartományt. Ez úgy történhet, hogy az  $F(d)$  függvényt kiszámítjuk a  $d$  egymást követő értékeinél,  $d$  értékét lépésenként egy  $\Delta d$  értékkel növelve. Ily módon  $d_0 = 0, d_1 = \Delta d, d_2 = 2\Delta d, \dots$  Az egymás után felezéssel történő keresést azon a  $[d_k \dots d_{k+1}]$  értéktartományon kell elindítani, amelyhez a legkisebb  $F(d)$  értékek kötődnek.

### IRODALOM

- [1.] Dr. T. Csubák: High-accuracy heat-flow measurement by using a quick approximate algorithm, Periodica Polytechnica Ser. El. Eng. Vol. 42, No. 2, pp. 233-250, Budapest, 1998
- [2.] American Gas Association: Transmission Measurement Committee Report No. 8 - Compressibility and supercompressibility for natural gas and other hydrocarbon gases, Arlington VA, USA, 1985
- [3.] Barta Gergely - Dr. Csubák Tibor: Új lehetőségek a földgáz elszámolási mérőrendszerek hálózati kialakításában, in proc. XV. FMTÜ Fialat Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2010
- [4.] G. Barta - T. Csubák: Real heating-value based cost-accounting method with networking capabilities in natural gas distribution systems, in proc ICREPQ'11 International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Las Palmas, Spanyolország, 2011, paper 572
- [5.] G. Barta, T. Csubák: Development of an intelligent data logging and computing device for heat flow measurement and integrate it into a supervisory acquisition system, in proc. IYCE'09 2nd International Youth Conference on Energetics, Budapest, 2009, paper 33

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu