

Elszámolási rendszerek az áramlásmérésben - 1.

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

A cikksorozat célkitűzésével összhangban a bevezető röviden összefoglalja azokat a legfontosabb áramlástan tulajdonságokat, amelyek a későbbi tárgyalás megértéséhez szükségesek, majd sor kerül az áramlásmérés elszámolási rendszereiben alkalmazott érzékelők felsorolására. A tárgyalás a turbinás és örvénytípusú áramlásmérők ismertetésével indul.

Az áramlásmérés alapjai

Az áramlásmérés során gázok, folyadékok, szilárd halmazállapotú anyagok (porok, granulátumok) vagy ezek keverékeinek méréséről van szó. Mivel a mérési elvek a különböző esetekre eltérő pontossággal alkalmazhatók, könnyen belátható, hogy a legpontosabb mérésre egyfázisú közeg jelenléte esetén számíthatunk. Többfázisú közeg mérése speciális megfontolásokat, bonyolultabb számításokat igényel, ahogy azt a későbbiekben a gőzmérés tárgyalásánál látni fogjuk. Az áramlásmérés elméleti alapjait – a teljesség igénye nélkül – folyadékok esetére foglaljuk össze olyan részletességgel, amely a mérőeszközök működésének a megértéséhez feltétlenül szükséges.

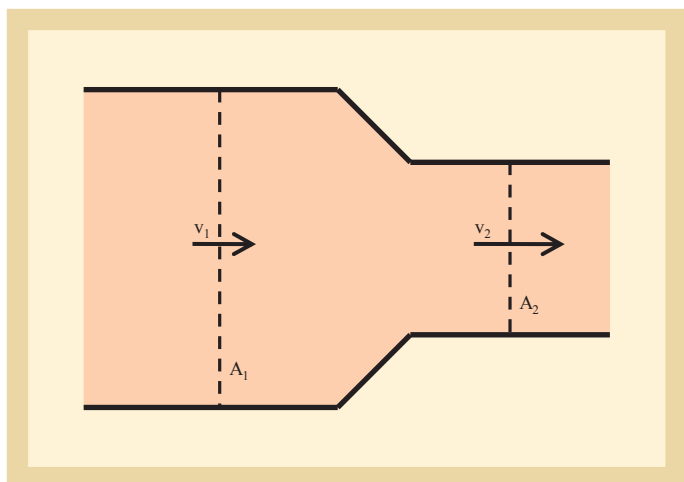
Folyadékok áramlása

Csőben áramló, összenyomhatatlan közegek áramlását a folytonossági egyenlet és a Bernoulli-egyenlet írja le. A folytonossági egyenlet – lényegében az anyagmegmaradás törvénye – azt mutatja meg, hogy a csőben áramló folyadék térfogatáramának a cső minden pontján azonosnak kell lennie, hiszen a folyadék összenyomhatatlan. A csővezeték 1- és 2-jelű keresztmetszetére tehát

$$Q_v = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad ,$$

ahol A jelöli a csőkeresztmetszetet, v pedig az áramló közeg sebességét. Az összefüggés igen jól használható sebességmérésre visszavezetett áramlásmérés esetén. Ha ugyanis ismerjük a folyadék v áramlási sebességét, az A csőkeresztmetszet segítségével egyszerűen számíthatjuk a Q_v térfogatáramot (1. ábra). A folytonossági egyenlet Q_v térfogatáram helyett Q_M tömegáramra felírt alakjából azonban látható, hogy gázok esetében bonyolultabb számításokat kell elvégezni, hiszen ott a ρ sűrűség is változik:

1. ábra Csővezeték modell a Bernoulli-egyenlethez



$$Q_M = A_1 \rho v_1 = A_2 \rho v_2 \quad .$$

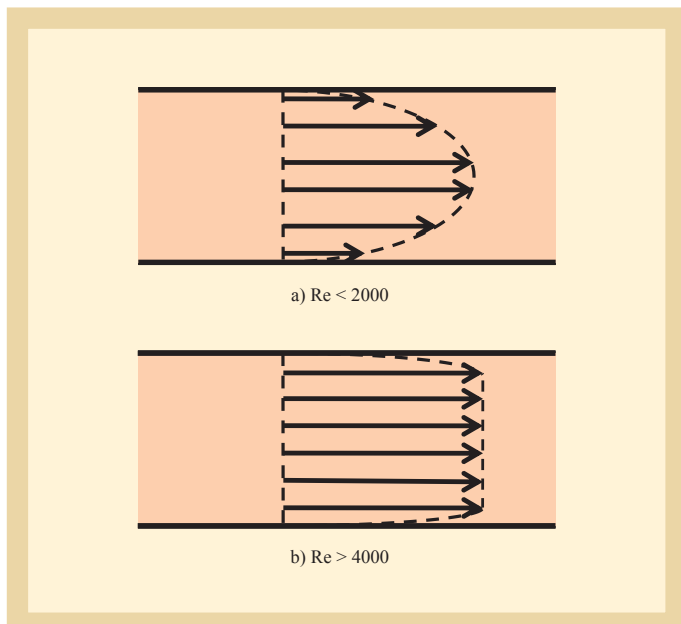
A Bernoulli-egyenlet az energia megmaradását írja le, vagyis azt, hogy a folyadék E_{pot} potenciális, E_{kin} kinetikus és E_{pre} nyomásból származó energiáinak összege a cső minden pontján azonos:

$$E_{pre1} + E_{kin1} + E_{pot1} = E_{pre2} + E_{kin2} + E_{pot2} \quad .$$

Az összefüggés ideális esetre vonatkozik, amikor a súrlódási jelenségek nem okoznak nyomáscsökkenést. A valóságban azonban mind a folyadék és a cső fala között fellépő súrlódási erők,

Mondanivalónk

Az ipari folyamatirányítás és a mérésadatgyűjtés egyik leggyakrabban előforduló és legbonyolultabb feladata az áramló közegek mérése. Ezekkel a mérésekkel szemben gyakran – az üzemi mérések pontossági igényeinél – sokkal szigorúbb követelményeket támaszt az a tény, hogy a gyűjtött adatokat pénzügyi elszámolási rendszerekben használják fel. Az áramlásmérések elvégzésére különböző, felépítésükben és működési elvükben eltérő érzékelőket alkalmaznak. Cikksorozatunkban először ezek működési elveit és a megértésükhöz szükséges elméleti alapokat foglaljuk össze. Ezután a forró víz- és gőzmérések szabványos kialakítását mutatjuk be, a pontossági igények figyelembevételével pedig megoldást adunk a tömegáram valós időben történő számítására. Ezt követően a napjainkban igen fontossá vált földgáz-energia-mérések kérdéskörét járjuk körül, hangsúlyt helyezve a mérések gyakorlati megvalósíthatóságára és egy új, nagy pontosságú mérőrendszer kialakítására. Végül – kiemelve a folyamat-gép jelkapcsolat lehetséges kialakításait – az elszámolási mérések általános rendszer-technikai kérdéseivel foglalkozunk.



2. ábra Lamináris és turbulens áramlás esetén kialakult sebességeloszlás

mind pedig a folyadék belsejében jelentkező súrlódási jelenségek befolyásolják a kialakuló áramlást. Utóbbi jelenség leírására vezették be a viszkozitás fogalmát, mely tulajdonképpen a folyadék ellenállása az őt befolyásoló mechanikai hatásokkal szemben. Minél nagyobb a folyadék viszkozitása, annál nagyobb energia szükséges az alakjának megváltoztatásához. Tehát nagyobb viszkozitású folyadék áramlásánál nagyobb cső menti nyomáseséssel számolhatunk. A viszkozitás erősen függ a hőmérséklettől. Folyadékok esetében a hőmérséklet növelésével általában csökken, de előfordulnak speciális tulajdonságokkal rendelkező anyagok is, ahol nagyságát más folyamatjellemzők is befolyásolják, és az említett tulajdonság akár időben, akár az áramlás sebességétől függően is változhat.

A Reynolds-szám

A csőben áramló anyagok kinematikájának leírásában kiemelkedő jelentőséggel bír az Osborne Reynolds brit fizikusról elnevezett, dimenzió nélküli arányszám. Kitűnően alkalmazható a különböző áramlások összehasonlítására, ugyanis hasonló értékek hasonló áramlástechnikai tulajdonságokra utalnak. A Reynolds-szám az anyagban fellépő tehetetlenségi erők és a belső súrlódási erők hányadosa:

$$Re = \frac{vD}{\nu}, \quad \nu = \frac{\mu}{\rho},$$

ahol:

- D: csőátmérő [m]
- v: áramlási sebesség [m/s]
- ρ: sűrűség [kg/m³]
- ν: kinematikai viszkozitás [m²/s]
- μ: dinamikai viszkozitás [Ns/m²]

A nagy Reynolds-számok nagy sebességgel áramló közegre, míg a kis értékek nagy viszkozitású folyadékokra, lassan mozgó közegre utalnak. A kialakuló áramlási profilra is következtethetünk a Reynolds-szám alapján. Jellemzően Re<2000 esetben lamináris (pl. nyersolaj), Re>4000 esetben turbulens (pl. tiszta víz) áramlásról beszélünk (2. ábra). Pontos mérésre

általában turbulens áramlás esetén van lehetőség, hiszen ekkor egy keskeny határfelülettől eltekintve a cső teljes keresztmetszetén közel azonos sebességgel áramlik a folyadék.

Az áramlásmérők működési elvei

A napjainkban általánosan alkalmazott áramlásmérők működési elv szerinti csoportosítása:

- mechanikus
 - nyomáskülönbségen alapuló
 - turbinás
 - örvénytípusú (vortex)
 - Coriolis
- indukciós
- ultrahangos
 - terjedési sebesség változáson alapuló
 - frekvenciaváltozáson alapuló
- termikus
 - hőelvonásos
 - termikus profil alapú

Mint a rövid áramlástechnikai bevezetőből is látható, a mérések pontosságát számos fizikai paraméter befolyásolja:

- hőmérséklet, nyomás, viszkozitás, sűrűség és ezek megváltozása,
- egyes esetekben a fajhő, valamint
- egyéb mérőeszközre gyakorolt hatások (pl. korrózió, abrázio stb.).

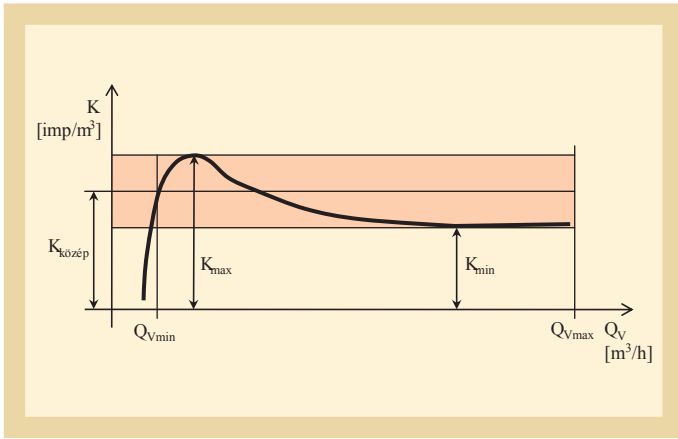
A különböző mérési elven működő mérőeszközök érzékenysége a felsorolt hatások tekintetében eltérő. Szintén eltér az egyes mérőberendezések pontossága – vagy akár alkalmazhatósága – különböző Reynolds-szám tartományokban. Ezenkívül fontos megemlíteni a mérőberendezéseknek magára az áramlásra gyakorolt visszahatását, ami tipikusan nyomásesést jelent. Ezen szempontok alapján érthető, hogy mért fejlődött ki és fejlődik párhuzamosan annyi mérési elv, és mért is állunk sokszor olyan tanácstalanul egy-egy mérési feladat előtt. A következő fejezetekben az egyes áramlásmérési módokat tekintjük át, hely hiányában a teljesség igénye nélkül.

Megjegyzés:

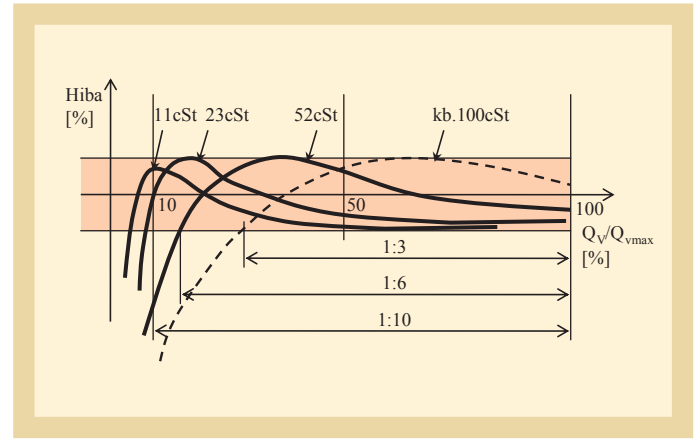
A nyomáskülönbség mérésen alapuló szűkítőelemes áramlásmérők működési elvét és szabványos kialakításait egy következő részben, a forró víz- és gőzmérés példáján keresztül mutatjuk majd be.

Turbinás áramlásmérés

Az áramlásmérő egy nem mágnesezhető anyagból készült peremes csődarabba van beépítve. Ekkor beiktatható abba a csőrendszerbe, amelyben az áramlást mérni akarjuk. A turbinás áramlásmérőnek két fő része van, a turbina és a fordulatszámoló. A finoman csapágyazott turbina tengelye a cső középvonalában fekszik. Az átáramló folyadék vagy gáz forgásba hozza a turbínát, amelynek fordulatszáma jól követi az áramlási sebesség változását. A turbina ω szögsebességét kell mérni, mert ez arányos az áramló közeg v áramlási sebességével. A turbinás áramlásmérőnek további fontos része az a forgási sebesség érzékelő, amely visszahatásmentesen villamos jellé alakítja a turbina szögsebességét. Kétféle megoldást alkalmaznak. Az egyiknél a turbina lapátjai (vagy csak az egyik lapát) mágnesezettek. A cső falába egy tekercset tartalmazó érzékelőt építenek be. Az érzékelő előtt elhaladó mágnesezett lapátok a tekercsben feszültségimpulzusokat indukálnak. Az impulzusokat számláló összegzi. A másik megoldásnál a tekercs állandó mágnesből készült vasmagot tartalmaz. A tekercs közelében elhaladó lapátok – amelyek most



3. ábra Turbinás áramlásmérők kalibrációs tényezőjének áramlásfüggése



4. ábra Turbinás áramlásmérők pontossága a mérendő közeg viszkozitásának függvényében

nem mágnesesek – megváltoztatják a tekercs körüli mágneses teret. Ez a változás szintén feszültségimpulzusokat indukál a tekercsben. Az időegység alatt mért impulzusok száma pedig arányos a térfogatsebességgel:

$$q_v = K \cdot f$$

ahol:

- q_v : a térfogatáram [m^3/s]
- f : az érzékelő kimeneti jelének frekvenciája [$1/s$]
- K : kalibrációs tényező [m^3]

A turbinás áramlásmérő tehát lényegében egy D átmérőjű csővezetékhez csatlakozó házban, a házban elhelyezett forgórészből és a ház külső részén elhelyezett indukciós vagy reluktáns érzékelőből áll. A turbinás áramlásmérő akkor működik ideálisan, ha az $M_h = K_i \cdot Q_v^2 \cdot \rho$ forgatónyomaték által létrehozott ω_i ideális szögsebesség és a forgórész ω_{ii} tényleges szögsebessége megegyezik, vagyis

$$\frac{\omega_{ii}}{\omega_i} = 1$$

Ez a kedvező eset a forgórész és a csapágy között fellépő súrlódás és a közegáramlási ellenállás miatt soha nem áll fenn. Ezek a hatások az alábbi módon vehetők figyelembe:

$$\frac{\omega_{ii}}{\omega_i} = 1 - \frac{(\Delta\omega)_s}{\omega_i} - \frac{(\Delta\omega)_e}{\omega_i}$$

ahol:

- $(\Delta\omega)_s$: a súrlódás miatt fellépő szögsebesség csökkenése
- $(\Delta\omega)_e$: az áramlási ellenállás miatt fellépő szögsebesség csökkenése

A szögsebesség-csökkenések helyébe az azokat létrehozó nyomatékokat írva és M_h értékét behelyettesítve a tényleges szögsebességarányra kapjuk az

$$\frac{\omega_{ii}}{\omega_i} = 1 - \frac{M_s}{M_h} - \frac{M_e}{M_h} = 1 - \frac{M_s}{K_i \cdot Q_v^2 \cdot \rho} - \frac{M_e}{K_i \cdot Q_v^2 \cdot \rho}$$

kifejezést.

Mivel az egyenlet jobb oldalán szereplő második és harmadik tag nevezőjében az áramló mennyiség Q_v térfogatsebességének pillanatértéke szerepel, látszik, hogy a súrlódásból, ill. az áramlási ellenállásból (viszkozitásból) eredő hiba nem állandó, hanem az áramló mennyiség függvénye. Következésképpen a kalibrációs tényező is az áramló mennyiség függvénye (3. ábra). Az áramló mennyiség csökkenésével a kalibrációs tényező egyre nagyobb mértékben változik, és kis áramlások esetén a hiba igen nagy negatív értéket ér el. A turbinával mérhető térfogatáram minimális értékét és az átfogási tartomány nagyságát befolyásolja a csapágy és a tengely között fellépő súrlódási nyomaték, ill. a mérés pontatlanságára előírt érték. Mint a legutolsó kifejezésből is látható, a turbinás áramlásmérők pontatlansága nagymértékben függ a mérendő közeg fizikai tulajdonságaitól és állapotjellemzőitől, folyadékoknál elsősorban az áramló közeg viszkozitásától (4. ábra). A görbék menetéből jól látható a növekvő viszkozitás hatására bekövetkező mérési tartomány csökkenés.

Örvény típusú áramlásmérők

Az örvénytípusú áramlásmérők családjába az örvényhagyó, örvénykeltő és oszcilláló sugarú áramlásmérőket sorolják. Ezen áramlásmérők közös tulajdonsága, hogy az áramló közeg valamilyen hidrodinamikai instabilitását használják fel mérési elvként. Ezek közül – elterjedtsége miatt – az örvényhagyó áramlásmérővel foglalkozunk. Az örvényhagyó áramlásmérő működésének elvi alapja az, hogy az áramló közeg útjába helyezett ún. torlótestről bizonyos körülmények között (turbulens áramlás, megfelelő *Reynolds*-szám tartomány stb.) periodikus örvényleválás figyelhető meg. A leválás frekvenciájára a következő összefüggés érvényes:

$$f = \frac{S}{d} \cdot v$$

ahol:

- f : a leváló örvények frekvenciája [$1/s$],
- S : *Strouhal*-szám, ahol: $S\left(\text{Re}, \frac{d}{D}\right)$ [-],
- d : a torlótest áramlásra merőleges irányú jellemző mérete (pl. szélessége) [m],
- v : a torlótest előtti áramlási sebesség [m/s].

Amennyiben a *Strouhal*-szám széles *Reynolds*-szám tartományban állandó, a leválási frekvencia egyenesen arányos az áramlási sebességgel.

A csővezetékben a közeg térfogatárama:

$$Q_v = K \cdot \frac{d \cdot A}{S\left(\text{Re}, \frac{d}{D}\right)} \cdot f$$

ahol:

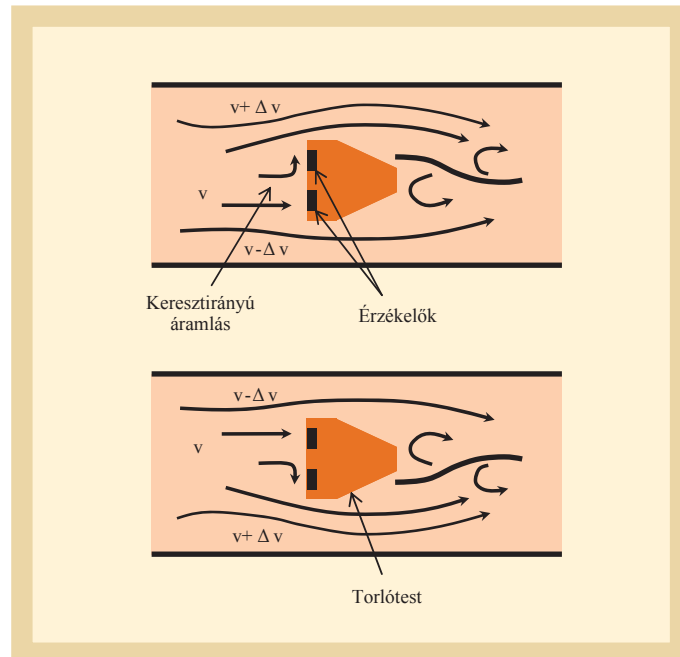
- Q_v : a térfogatáram [m^3/s],
- A : a cső keresztmetszete [m^2],
- D : a cső átmérője [m],
- K : kalibrációs tényező [-].

Az örvényhagyó áramlásmérők fejlesztésének egyik fő iránya a minél jobb tulajdonságokkal rendelkező torlótést kifejlesztése. A folyadékok mechanikájával foglalkozó szakirodalomban a testek körüli áramlások vizsgálatánál túlnyomórészt henger alakú testet vizsgálnak torlótestként, mivel matematikailag ez kezelhető legkönnyebben. A torlótést kialakításával kapcsolatos fejlesztések során azonban kiderült, hogy a nem áramvonalas kialakítású torlótések előnyösebben alkalmazhatók, ugyanis az örvényleválás ezekről sokkal szélesebb Reynolds-szám tartományban érzékelhető, a keletkezett jel pedig kevésbé zajos. Szisztematikus tervezési módszert azonban nem sikerült kifejleszteni. Kísérleti alapon alakultak ki bizonyos irányelvek, ilyen például a szögletes körvonal, az éles kontúr. A torlótést méretének megválasztásánál fontos szerepet játszik a d/D arány is. A szűkítéssel együtt nő az örvényhagyás rendszeressége és az észlelendő jel tisztasága, viszont egy határon túl a torlótesten fellépő nyomásvesztés kezd jelentőssé válni. Ezen elvek mellett azonban a tervezés egyik legfőbb segédeszköze továbbra is az ötletesség és az elgondolások minél több kísérlettel történő ellenőrzése.

A fejlesztések másik fontos területe a keletkezett örvények érzékelése és a jelek feldolgozása. Az érzékelés többnyire az örvényleválás okozta szekunder hatáson alapul. Az impulzusmegmaradás tétele értelmében minden örvénnyel egyidejűleg egy ellentétesen forgó örvény is képződik. Ez a torlótést körül forgó ellenörvény hat az áramló közeg sebességére, ami az egyik oldalon sebességnövekedést (5. ábra), a másikon pedig sebességsökkenést okoz. Ezáltal a torlótést homlokfelületén egy keresztirányú áramlás keletkezik, ami periodikusan változtatja irányát. Ennek a keresztirányú áramlásnak a frekvenciáját általában termikus, nyomáskülönbség mérésén alapuló vagy ultrahangos érzékelővel érzékelik. Az elektronikus jelfeldolgozó egység megtervezése is nagy gondosságot igényel. Az áramlási sebesség változásával az észlelendő jelnek nemcsak a frekvenciája, hanem az igen magas és változó szintű zajjal együtt annak amplitúdója is változik. Ezen okok miatt a jelfeldolgozáshoz szelektív és precíz szűrő, valamint automatikus erősítésszabályozás szükséges.

Az örvényhagyó áramlásmérők előnyei:

- Nem tartalmaz mozgó alkatrészt, következésképpen jó a hosszúidejű stabilitása és nagy az élettartama.
- Statikus karakterisztikája lineáris. Az örvényleválások vilamos impulzusokká alakíthatók, és ezek számlálásával a pillanatnyi térfogatsebesség és az átáramlott összmennyiség is egyszerűen meghatározható. A kimeneti jel könnyen digitalizálható, a jel galvanikus leválasztása egyszerűen megoldható.
- Jelentős árcsökkenést eredményez, hogy a mérők nem igényelnek egyedi kalibrálást. Ha egy csoportjukat kalibrálták, akkor a hasonló típusú, de más méretű készülék kalibrációs állandója nagy pontossággal megadható.



5. ábra Örvények keletkezése az örvényhagyó áramlásmérő torlótestje körül

- Széles mérési tartományban használható, a pontosság és az ismétlőképesség meglehetősen jó.

Az örvényhagyó áramlásmérő hátrányai:

- A kalibrációs tényező a Reynolds-szám függvénye. $\text{Re} > 10\,000$ esetén meglehetősen pontatlanná válik. Ez nagy viszkozitású folyadékok mérésénél komoly alkalmazástechnikai korlát.
- Növekvő csőátmérővel a keletkezett impulzusok frekvenciája csökken. Emiatt nagy átmérőjű mérőknél nagyon alacsony a frekvencia. Ezt összevetve még azzal a ténnyel, hogy két egymást követő impulzus közötti időtartam $\pm 20\%$ -kal eltérhet az átlagos periódusidőtől, azt jelenti, hogy a mérőt nehéz kalibrálni.
- Működése érzékeny a mechanikai vibrációra, valamint a pontosságra komoly hatása van az örvénylésnek és a torzult sebességprofilnak.
- Jelentős nyomásvesztéget okoz.

A folytatásban a Coriolis-tömegárammérők, valamint az indukciós, ultrahangos és termikus áramlásmérők működési elvének, elvi szerkezeti felépítésének, alkalmazási lehetőségeinek és mérés technikai tulajdonságainak az ismertetésére kerül sor.

(Folytatjuk!)

IRODALOM

[1.] A.T.J. Hayward: Experiences with modern methods' of Flow measurement. Mess- und Automatisierungstechnik INTERKAMA Kongress 1988. pp. 2-14.
 [2.] V.G.Kochen: Genauigkeitsgrenzen der Durchflußmessung mit Drosselgeräten. Technisches Messen 5 1989. pp. 189-202.
 [3.] T. Strauss (szerk.): Flow Handbook, 3rd Edition, 2006.