

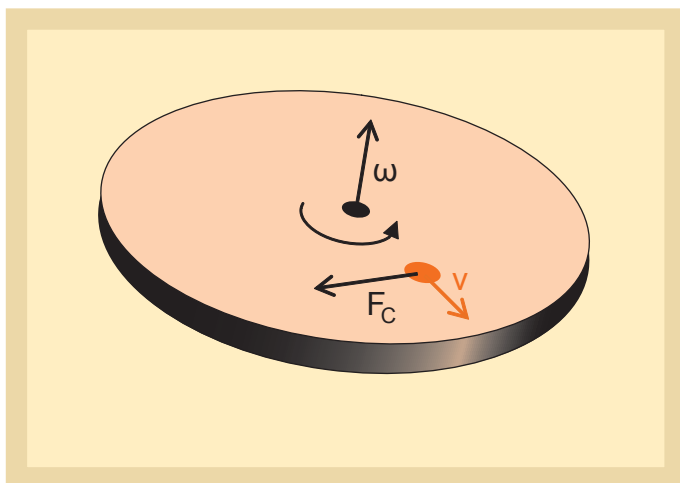
# Elszámolási rendszerek az áramlásmérésben - 2.

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

Folytatjuk az áramlásmérések érzékelőinek bemutatását. Az anyagbemérő, adagoló rendszerekben széles körben alkalmazott Coriolis, a nyomásvesztés mentes indukciós és ultrahangos valamint a légtechnikai rendszerekben használt termikus áramlásmérők működésével és felépítésével foglalkozunk. Célunk az érzékelés módszereinek minél teljesebb áttekintése.

## Coriolis-tömegárammérők

A Coriolis-áramlásmérők működése egy forgó rendszerben fellépő tehetetlenségi erőhatáson alapul, amely nevét a jelenséget először leíró *Gaspar Gustave de Coriolis* francia matematikusról kapta. Ez az erő a forgó rendszerben mozgó testekre hat, és nem tévesztendő össze a centrifugális erővel. Lényegében arról van szó, hogy a forgó rendszerben egyenes vonalban mozgó testnek folyamatosan változik a távolsága a forgás középpontjától, ezért pályájának megtartásához kerületi sebességének is folyamatosan változni kell, ami egy kerületirányú gyorsulást jelent. Ez a gyorsulás tulajdonképpen az  $F_c$  Coriolis-erő hatása ellen dolgozik. Más oldalról megközelítve: a Coriolis-erő hatására a forgó rendszerben mozgó testek pályája elhajlik. Ez magyarázza például a ciklonok spirális pályájának kialakulását. A Coriolis-erő a 1. ábra jelöléseivel az alábbi képlettel számítható:



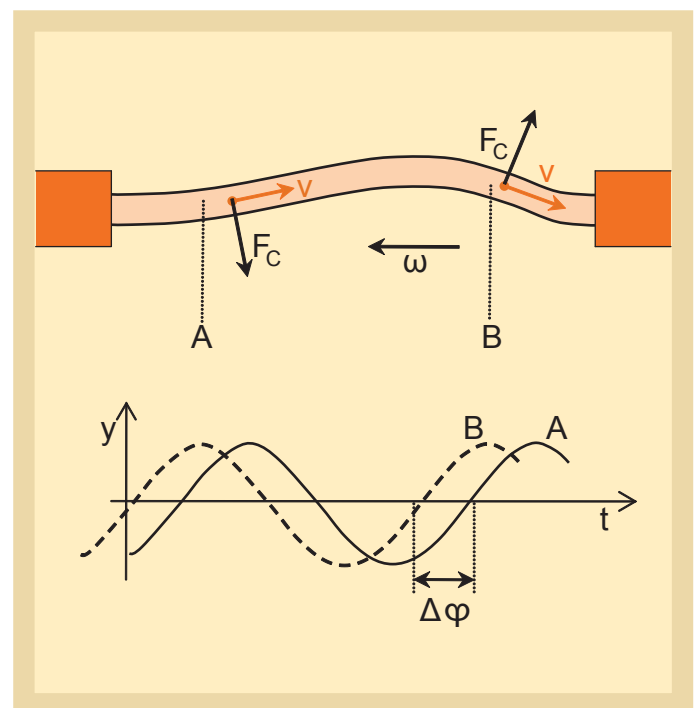
1. ábra A Coriolis erő

$$\vec{F}_c = -2m\vec{\omega} \times \vec{v} \quad ,$$

ahol:  $m$  a körpályán mozgó test tömege [kg],  
 $\omega$  a szögsebesség [1/s],  
 $v$  a test kerületi sebessége [m/s].

De hogyan is használható mindez áramlásmérésre? Tekintsük az áramló folyadék részecskéit mozgó testeknek, a forgás

helyett pedig hozunk létre oszcilláló mozgást a csővezeték egy szakaszában. A tipikusan saját frekvenciájával rezgetett csőszakasz lengéseit két ponton mérve álló folyadék esetében azonos fázisú, jeleket kapunk. A csőben áramló részecskék azonban a Coriolis-erő hatására fáziseltérésbe kerülnek a két pont között, a fáziseltérés pedig egyenesen arányos a tömegárammal (2. ábra).



2. ábra A Coriolis tömegárammérő működése

Az áramló közeg sűrűségének megváltozása a rezgőrendszer tömegének és ezzel saját frekvenciájának megváltozását is okozza. A frekvenciaváltozásból közvetlenül számítható a sűrűség, amely napjaink intelligens mérőiben általában – mint másodlagos kimeneti jel – áll rendelkezésre.

A gyártók eltérő geometriájú csőszakaszokat, egycsöves és ikercsöves kivitelű mérőket fejlesztettek ki, amelyek közül a mérési feladathoz legmegfelelőbbet valamilyen szempontból előnyös tulajdonság alapján választhatjuk ki. Az egycsöves mérők például jellemzően kisebb nyomásesést okoznak, és

könnyebb a tisztításuk is; az ikercsöves – ellenütemben rezgő – kivitelek viszont kevésbé zavarérzékenyek. Általánosságban elmondható, hogy szigorúan be kell tartani a beépítéshez javasolt geometriai kialakításokat, és minimalizálni kell a mérőkre ható mechanikai feszültségeket, valamint a vibrációt.

A *Coriolis*-tömegárammérők előnyei:

- A közvetlen tömegárammérés kifejezetten alkalmasá teszi őket vegyipari, élelmiszer-ipari bemérő rendszerekben történő alkalmazásra,
- Univerzális mérési elv, amely gázokra és folyadékokra egyaránt alkalmazható, sűrűségtől, viszkozitástól és áramlási profiltól függetlenül,
- Közvetlen sűrűségmérési lehetőség a tömegárammal egyidejűleg.

A *Coriolis*-tömegárammérők hátrányai:

- Viszonylag magas ár,
- Többfázisú közeg esetén pontatlan mérés.

### Indukciós áramlásmérés

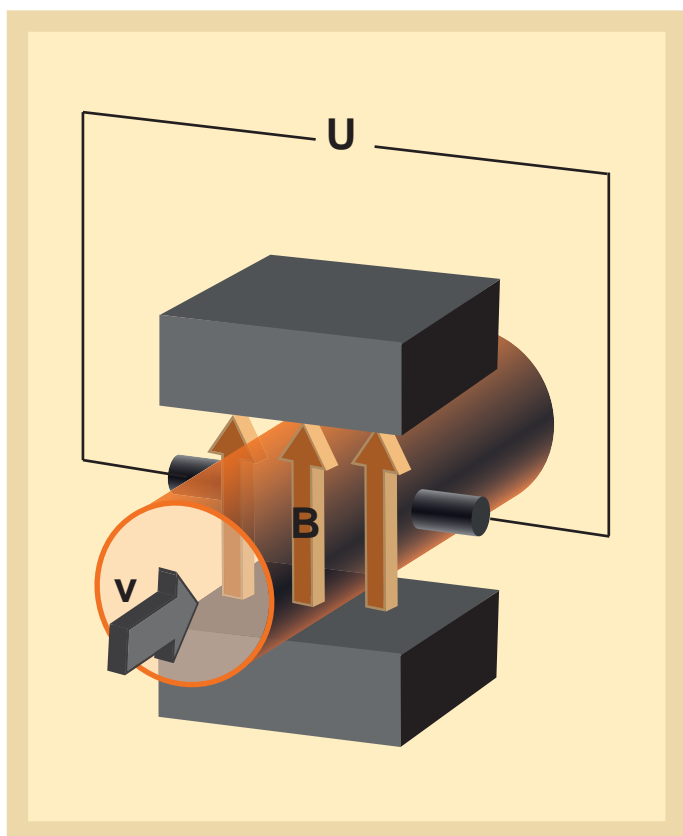
A mérés (3. ábra) a *Faraday*-féle indukciótörvényen alapszik, amely szerint, ha egy  $B$  indukciójú mágneses térben – arra merőlegesen – villamosan vezető közeg áramlik, akkor abban  $U$  feszültség indukálódik, amelyet egy – az áramlási sebességre merőlegesen, a csőfalba szigetelten beépített – elektródapáron mérhetünk:

$$U = B \cdot v \cdot D$$

ahol:

- $U$  : az elektródákon mért feszültség [V],
- $B$  : a mágneses indukció [ $Vs/m^2$ ],
- $v$  : az áramló közeg átlagsebessége [m/s],
- $D$  : a cső átmérője [m].

3. ábra Indukciós áramlásmérés



Az indukált feszültség arányos tehát az átlagos áramlási sebességgel, viszont a mérés villamosan vezető folyadékot feltételez. A villamos vezetőképességnek alsó határértéke van. Emiatt általában víz, szennyvíz áramlásának mérésére használják. A fejlesztőknek alapvetően két méréstechnikai problémával kell megküzdeniük.

Egyrészt – mivel a mágneses teret általában hálózati váltakozó feszültséggel hozzák létre – a hasznos feszültség mellett létrejön egy transzformátoros zavarfeszültség is. A hasznos és a zavaró feszültség között a fáziskülönbség ideális esetben  $90^\circ$ , ezért a zavarfeszültség kiszűrésére elterjedten alkalmazzák a fázisérzékeny egyenirányítós kompenzációt. A gyakorlatban azonban bebizonyosodott, hogy a fáziseltérés nem pontosan  $90^\circ$ . A gerjesztő frekvencia változása, valamint a hőmérséklet-változás következtében a cső anyagában bekövetkező vezetőképesség-változás hatással van a fáziskülönbségre és ezáltal a mérés nullpontstabilitására. A gyártók eltérő technikával, de alapvetően kétféle elven igyekeznek csökkenteni a zavarfeszültségek hatását. Egyes mérőkben a gerjesztés – bizonyos ideig történő – konstans értéken tartása (aszimmetrikus vagy szimmetrikus, alacsony frekvenciájú feszültség), másoknál a már létrejött zavarfeszültség ötletes mintavételezéssel történő kiszűrése a megoldás.

Az indukciós áramlásmérés másik jelentős problémája az elektródák tisztítása. Az áramló közegben levő zsradékok és egyéb szennyeződés az elektróda felületén szigetelő filmet képeznek, ezáltal meghamisítják a mérést. Az elektródák tisztítására is eltérő módszerek léteznek. A legrégebben alkalmazott kézi tisztítás egyszerűsége egyben óriási hátrány is, ugyanis azt a mérés leállításával és az elektródák kiszerelésével kell elvégezni. Ennek egy továbbfejlesztett változatánál az elektródák kiszerelése és tisztítása a közegáramlás leállítása nélkül történik. Egy újabb megoldás a motoros működtetésű mechanikai tisztítás, de megjelentek elektrolízises és ultrahangos eljárások is.

Általában elmondható, hogy az indukciós áramlásmérés kb. kétszer olyan költséges, mint egy mérőperemes megoldás, ezért elsősorban olyan területen alkalmazzák, ahol fennáll a veszélye annak, hogy a folyadék tönkretesz az érzékelőelemet (pl. korrozív közeg), ill. ahol nem tudnak eleget tenni a legtöbb áramlásmérőre előírt, szigorú alkalmazástechnikai követelményeknek (pl. beépítési hossz, áramlási kép stb.).

Az indukciós áramlásmérők nem tartalmaznak mozgó alkatrészeket és nyomásvesztésük is minimális. Elsősorban a vízgazdálkodásban és vízkezelési technológiákban, nagy mennyiségek mérésénél terjedtek el.

### Ultrahangos áramlásmérők

Az áramlásmérők működése azon az akusztikus jelenségen alapszik, hogy a hanghullám az áramló közegen áthaladva terjedési sebességváltozást, irányváltozást és frekvenciaváltozást (*Doppler*-hatás) szenved. Elsősorban a terjedési sebességváltozáson és a frekvenciaváltozáson alapuló áramlásmérők terjedtek el.

A terjedési sebességváltozáson alapuló ultrahangos áramlásmérőkben az áramlás irányával ellentétes irányban terjedő hanghullám sebessége csökken, az áramlással egyező irányban kibocsájtott hanghullám sebessége pedig nagyobb lesz.

Egy ultrahangos áramlásmérő elvi kialakítása a 4. ábrán látható. Az ultrahang adók és vevők a cső szemben lévő oldalain vannak elhelyezve úgy, hogy az őket összekötő egyenes  $\varphi$  szöget zár be a cső középvonalával. Mivel a hangsebesség igen nagy a közeg sebességéhez viszonyítva, ezért a mérés

során célszerű azt kiküszöbölni. Ez két hangsugár összehasonlításával történik, amelyek közül az egyik az áramlási sebességgel együtt, a másik azzal ellentétesen halad. A terjedési idők a két esetben:

$$t_1 = \frac{L}{c+v \cdot \cos\varphi} = \frac{D}{\sin\varphi} \frac{1}{c+v \cdot \cos\varphi} \quad \text{és}$$

$$t_2 = \frac{L}{c-v \cdot \cos\varphi} = \frac{D}{\sin\varphi} \frac{1}{c-v \cdot \cos\varphi}$$

ahol:

- $t_1, t_2$  : a terjedési idő [s],
- $D$  : a cső átmérője [m],
- $c$  : a hang terjedési sebessége [m/s],
- $v$  : a közeg sebessége [m/s],
- $\varphi$  : az ultrahang adók és vevők tengelye és a cső középvonala által bezárt szög [rad],
- $L$  : az ultrahang adók és vevők közötti távolság [m].

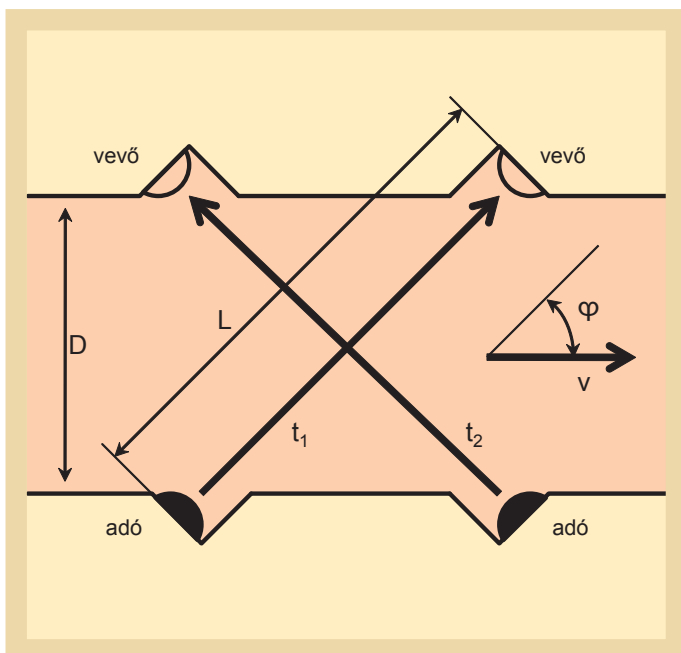
Az egyenletekből kifejezhető a  $v$  közegsebesség:

$$v = \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \frac{D}{\sin 2\varphi}$$

A  $t_1$  és  $t_2$  hangterjedési idők (melyek a nagy hangsebesség miatt néhányszor  $10^{-6}$  s-ben különböznek csak egymástól) közvetlen mérésének elkerülése érdekében rövid idejű hangimpulzusokkal dolgoznak. A módszernek az a lényege, hogy az adó akkor küld újabb impulzust, ha az előző megérkezett a vevőhöz. Ezen impulzussorozatok frekvenciái:

$$f_1 = \frac{1}{t_1}, \quad f_2 = \frac{1}{t_2}$$

4. ábra Ultrahangos áramlásmérő működési elv



amellyel a mérési eljárás visszavezethető egy  $\Delta f = f_1 - f_2$  nagyságú frekvenciakülönbség mérésére. A  $D$  átmérőjű csővezetékben áramló közeg térfogatárama ily módon  $\Delta f$  mérésével az alábbi összefüggésből határozható meg:

$$Q_v = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{D}{\sin 2\varphi} \cdot \Delta f$$

Az eljárás nagy előnye, hogy a mérés független a közeg anyagi minőségétől, és a mérőeszköz nem jelent akadályt az áramló közeg útjában. Hátránya viszont, hogy a  $v$  sebességet csak az érzékelők átlója mentén mérik meg, pedig a sebességprofil a Reynolds-szám változása miatt változik. Ez azt jelenti, hogy az áramlásmérőnek rossz a linearitása (kb. 2%). A linearitási hiba csökkentésére irányuló fejlesztések két irányban folytak. Az egyiknél nagyszámú mérési eredmény kiértékelésével meghatározzák a kalibrációs tényező Reynolds-szám függését, és mikroprocesszoros jelfeldolgozó-berendezés segítségével folytonosan korrigálják a kalibrációs tényező értékét. Ezzel a megoldással a mérőeszköz linearitási hibáját 0,2%-ra sikerült csökkenteni. A másik megoldásnál több adó-vevő pár jelének átlagolása alapján növelik az átlagsebesség meghatározásának pontosságát. Ezzel javul a mérőeszköz linearitása, jobb az ismétlődőképessége és a mérési pontossága. Nagy csőátmérők esetén is elérhető a 0,5% alatti mérési pontosság.

Az ultrahangos áramlásmérő alkalmazásának – a korábban felsoroltakon kívül – nagy előnye, hogy mivel a mérő alkalmazása csak geometriai mennyiségektől függ, nincs szükség a költséges – és nagy mérők esetén – szinte reménytelen kalibrálásra.

### Termikus áramlásmérők

Az áramlásmérők skáláját színesítik a meglehetősen egyszerű elven működő – de közvetlenül tömegáramot mérő – termikus áramlásmérők. A hőelvonáson alapuló mérés tulajdonképpen egy fűtött hőmérséklet-érzékelő, amelyen az áramló közegbe helyezve hőmérséklet-csökkenés érzékelhető. Ezen az elven igen egyszerűen konstruálhatunk pl. áramláskapcsoló eszközöket. Sajnos a tömegáram és a hővesztesség között a nemlineáris

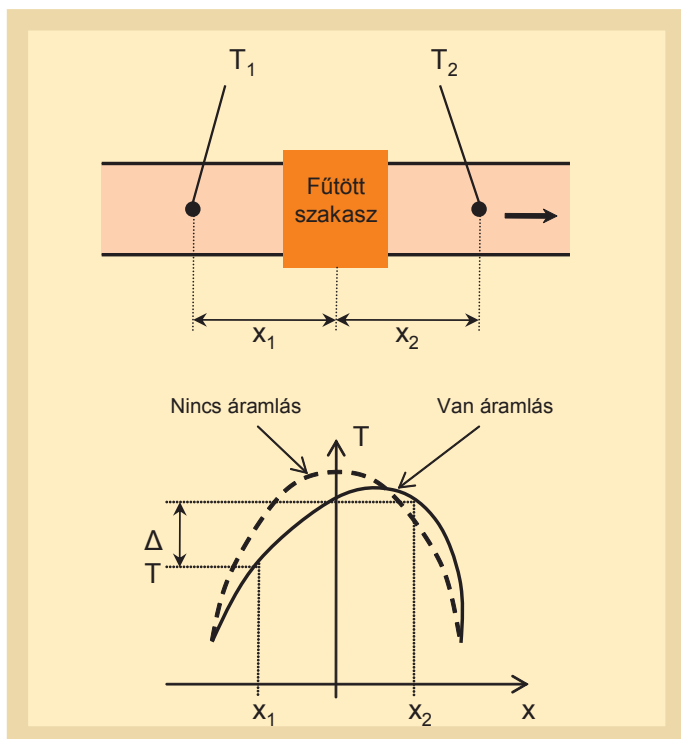
$$Q = \Delta T \sqrt{K + (2\pi K c_v \rho d v)}$$

összefüggés (King-törvény) teremt kapcsolatot, ahol:

- $Q$ : hővesztesség [J],
- $\Delta T$ : hőmérséklet-különbség az érzékelő és a közeg között [K],
- $v$ : áramlási sebesség [m/s],
- $d$ : a fűtött érzékelő jellemző mérete [m],
- $K, c_v, \rho$ : a közegre jellemző állandók.

Az intelligens távadók korában a linearizálás nem jelent problémát.

A hőmérsékletprofil alapú mérők (5. ábra) a fűtött csőszakasz legalább két pontján mérik a hőmérsékletet. Ha nincs áramlás, akkor ezek a hőmérsékletek megegyeznek. A csőben áramló közeg azonban eltolja a hőmérsékletprofil. A mérési pontok között kialakuló hőmérséklet-különbség a tömegárammal arányos, a számítás során azonban figyelembe kell venni az áramló közeg fizikai tulajdonságait, ezért pontos mérésre csak ismert összetételű anyagok esetében van lehetőség.



5. ábra Hőmérsékletprofil alapú termikus áramlásmérő

Általában elmondható, hogy széles hőmérséklet-tartományban alkalmazhatók, de a gyors hőmérséklet-változás mérési pontatlanságokhoz vezethet. Napjainkban főleg gázok áramlásának mérésére használják – például légtechnikai rendszerekben –, de más alkalmazási területekhez (folyadékok, folyékony fémek) speciális kivitelek is léteznek.

A folytatásban az elszámolási mérések szempontjából kiemelkedő jelentőséggel bíró szűkítőelemes mérésekkel foglalkozunk. Az elméleti háttérrel a forró víz- és gőzmérés példáján keresztül mutatjuk be.

*(Folytatjuk!)*

[editor@magyar-elektronika.hu](mailto:editor@magyar-elektronika.hu)

#### 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.