

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření průtoku (část 5.)

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: FLOW MEASUREMENT (PART 5)

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Většina průtokoměrů je vyráběna jako objemová měřidla. Údaj objemových průtokoměrů je ovlivňován změnami teploty, tlaku a hustoty, popř. viskozity měřeného média. Hmotnostní průtok se při použití rychlostních nebo objemových průtokoměrů zjišťuje nepřímo výpočtem. Moderní hmotnostní průtokoměry však umožňují měřit hmotnostní průtok přímo.

Hmotnostní průtokoměry

V současné době se pro stanovení hmotnostního průtoku používají jednak nepřímé, jednak přímé metody. K **nepřímým metodám** patří použití mikroprocesorové techniky ve spojení s konvenčními průtokoměry a dalšími senzory. Hmotnostní průtok se vypočítá z naměřeného objemového průtoku a naměřené hustoty. Hustota čistých kapalin závisí pouze na teplotě a jsou-li změny teploty malé, lze hustotu pokládat za konstantní. Závisí-li hustota měřeného média na jeho složení a také na teplotě, musí být hustota a teplota měřena. Jako příklad lze uvést použití turbínového průtokoměru s vibračním snímačem hustoty.

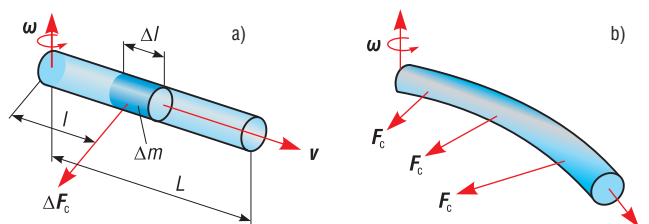
Podobně je tomu u plynů, kde další proměnnou vedle teploty a složení je tlak. Jako příklad lze uvést použití vírového průtokoměru se snímači teploty a tlaku.

U **přímých metod** je výstup ze snímače závislý na hmotnostním průtoku média protékajícího průtokoměrem. Takový průtokoměr je potenciálně přesnější než zařízení měřící hmotnostní průtok nepřímo. Jedním z nejpoužívanějších a nejúspěšnějších hmotnostních průtokoměrů je průtokoměr založený na Coriolisově jevu. Tepelné hmotnostní průtokoměry odvozují hmotnostní průtok z měření disipace (rozložení) tepla mezi dvě místa v potrubí.

Coriolisovy průtokoměry

Coriolisovy průtokoměry se velmi rychle rozšířily do mnoha oblastí provozního měření a nacházejí uplatnění i při měření velmi malých průtoků v laboratorních podmínkách. Coriolisův průtokoměr měří hmotnostní průtok média a při své funkci využívá Coriolisovu sílu*, která vzniká v kmitající měřicí trubici.

Obr. 1. Princip Coriolisova průtokoměru: a) vyznačení veličin na rotující trubce, b) deformace trubky Coriolisovými silami



Princip Coriolisova průtokoměru

Projev Coriolisovy síly při proudění tekutiny je znázorněn na obr. 1. Proudí-li tekutina rychlostí v potrubím rotujícím úhlovou rychlostí ω , pak na element tekutiny o hmotnosti Δm působí Coriolisova síla:

$$\Delta F_c = 2 \cdot \Delta m \cdot (v \times \omega) \quad (1)$$

se směrem kolmým na rovinu vektorů v a ω . Výraz $2 \cdot (v \times \omega)$ vyjadřuje tzv. Coriolisovo zrychlení. Orientace vektoru síly ΔF_c

* Coriolisova síla byla pojmenována po francouzském matematikovi a fyzikovi Coriolisovi (*Gasparde Gustave de Coriolis 1792–1843*), který se zabýval mimo jiné i výpočtem sil působících v rotujících soustavách. Coriolisova síla je setrvačná síla, která působí na těleso pohybující se v rotující neinerciální vztažné soustavě** a má největší účinek, když směr pohybu tělesa je kolmý ke směru otáčení soustavy. **Coriolisova síla** působí ve směru kolmém k rychlosti tělesa a způsobuje stáčení trajektorie tělesa proti směru otáčení soustavy. Účinek Coriolisovy síly byl zaznamenán a studován na mnoha jevech, kdy rotující vztažnou soustavou byla otáčející se zeměkoule, a předmět se pohyboval ve směru poledníku. Coriolisova síla způsobuje např. stáčení proudění severních a jižních větrů, jednostranné opotřebování železničních kolejnic položených severojižním směrem, podemílání břehů řek, silové namáhání plynodů a ropodů, ovlivňuje dráhu dělostřeleckého náboje apod. Účinek Coriolisovy síly se nejvíce projevuje na zemském pólu (směr pohybu tělesa je kolmý na směr otáčení); na rovníku je účinek nulový (směry pohybu a otáčení jsou rovnoběžné). Coriolisova síla byla k měření průtoku využita až ve druhé polovině dvacátého století, kdy J. Smith ze společnosti Micro Motion sestavil první komerční hmotnostní Coriolisův průtokoměr (3).

** Jako neinerciální vztažná soustava se ve fyzice označuje taková vztažná soustava, v níž neplatí první Newtonův pohybový zákon ani třetí Newtonův pohybový zákon, tzn., že těleso, ačkoliv na ně nepůsobí žádná síla nebo výslednice sil je nulová, mění svůj pohybový stav (rychlost), tzn., pohybuje se s nenulovým zrychlením.

je dána pravidly vektorového součinu. Vektory $\mathbf{v}$ a $\boldsymbol{\omega}$ jsou navzájem kolmé, takže po dosazení $v = \Delta l / \Delta t$ se získá rovnice:

$$|\Delta \mathbf{F}_C| = 2 \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \Delta l = 2 \cdot Q_m \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \Delta l \quad (2),$$

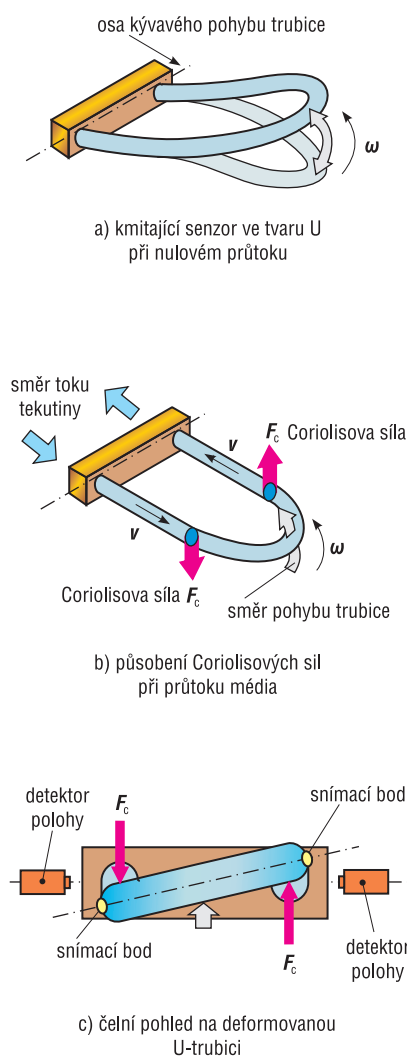
kde Q_m je hmotnostní průtok.

Pozn.: Veličiny, které mají charakter vektoru, jsou vyznačeny tučně. Absolutní hodnota vektoru určuje jeho velikost, která má charakter skaláru, jehož symbol je psán netučnou kurzivou. Jsou-li vektory vzájemně kolmé, pak absolutní hodnota vektorového součinu má charakter skaláru.

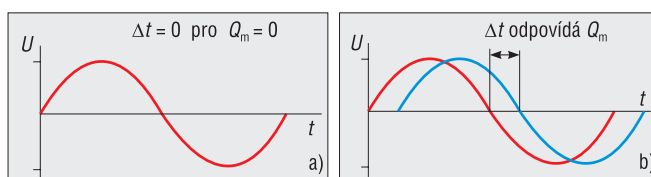
Z rovnice (2) je patrná souvislost mezi hmotnostním průtokem a Coriolisovou silou – Coriolisova síla působící na každý element tekutiny je úměrná hmotnostnímu průtoku. Vyhodnocení průtoku z velikosti síly ΔF_C by bylo obtížné, a proto se využívá působení momentu síly na element Δm o délce Δl , vzdálený o délku l od osy rotace. Pro velikost momentu síly platí:

$$\Delta M = \Delta F_C \cdot l = l \cdot 2 \cdot Q_m \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \Delta l \quad (3).$$

Obr. 2. Účinek Coriolisovy síly na základní typy měřících trubíc



Obr. 3. Fázový posun signálů detektorů polohy: a) při nulovém průtoku, b) při určitém průtoku média



Celkový moment působící na potrubí o délce L se získá integrací:

$$M = 2 \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot Q_m \cdot \int_0^L l \cdot dl = L^2 \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot Q_m \quad (4).$$

Coriolisovy průtokoměry mohou mít trubice různého tvaru a uspořádání. Původně se nejčastěji používala trubice tvaru U, současné průtokoměry využívají vedle trubice ve tvaru U i jiné typy zakřivených trubíc nebo i trubice přímé. Otáčivý pohyb trubice je nahrazen kývavým pohybem nebo harmonickým kmitáním, takže vektor $\boldsymbol{\omega}$ i vektor $\Delta \mathbf{F}_C$ mají periodicky proměnnou orientaci.

Na obr. 2. je ukázáno působení Coriolisovy síly na dva základní typy měřících trubíc, a to na kmitající trubici ve tvaru U a na vibrující přímou trubku. V obrázcích je vždy vyznačen směr rotace a směr Coriolisovy síly, která při průtoku média deformuje tvar trubice. Podle velikosti hmotnostního průtoku a tedy i Coriolisovy síly se bude měnit úhel zkroucení trubice tvaru U či deformovat levá a pravá část přímé trubice. Na obr. 2. (a + d) je vyznačen tvar odpovídající nulovému průtoku média. Na obr. 2. (b + e) je vyznačeno působení Coriolisovy síly při nenulovém průtoku média. Deformace měřící trubice se snímá vhodnými polohovými senzory, jejichž umístění na obou stranách měřící trubice je vyznačeno na obr. 2. (c + d). Obr. 2. (g + h) ukazují účinek Coriolisových sil na přímou trubici při nulovém a nenulovém průtoku.

Pomocí akčního členu složeného z elektromagnetické cívky a magnetu jsou měřící trubice rozkmitávány sinusovými kmity s rezonanční frekvencí. Deformace způsobená Coriolisovou silou je velmi malá a vyhodnocuje se pomocí snímačů polohy jako fázový posun snímáných kmitů (obr. 3.). Při nulovém průtoku je fázový posun roven nule a naměřené průběhy splývají (obr. 3.a); fázový posun v závislosti na hmotnostním průtoku ukazuje průběh na obr. 3.b. Při měření se tedy nezjišťuje velikost Coriolisovy síly, ale vliv této síly na fázový posun snímáných kmitů.

Obr. 4. Příklady Coriolisových průtokoměrů se zakřivenou a přímou měřicí trubicí



a) FCB300 – nízká tlaková ztráta, i pro hygienické aplikace (www.abb.cz/mar)



b) Optimass 3000 – měření malých průtoků, dávkování při výrobě potravin a nápojů (www.krohne.cz)



s) Proline Promass I 100 – s přímou trubicí, umožňuje měřit i viskozitu média (www.cz.endress.com)

Měřicí trubice a elektronické vyhodnocovací obvody

Materiál a tvar měřicí trubice se volí tak, aby byly odolné proti měřenému médiu a necitlivé na vnější vibrace, mechanické napětí, namáhání vlivem teplotní roztažnosti apod. Tvar trubice má vliv na vlastnosti průtokoměru. Neexistuje jednoduché pravidlo pro doporučení vhodného tvaru měřicí trubice. Zakřivené trubice vykazují větší citlivost i přesnost a větší odolnost vůči rušivým vlivům okolí jako jsou vibrace potrubí a pulzace průtoku. Složitější tvary zakřivených trubic působí však větší tlakové ztráty a obtížně se čistí. Mezi výhody přímé trubky patří plnoprůtočný profil, odolnost proti zanášení, snadná čistitelnost a sanitovatelnost, nízká trvalá tlaková ztráta a samovypouštění měřeného média.

K měření deformace trubice se používají velmi citlivé bezdotykové snímače polohy, nejčastěji indukčnostní, a dále pak

kapacitní nebo optické. Elektronické obvody Coriolisových průtokoměrů obsahují obvody pro buzení kmitů a obvody pro vyhodnocení kmitů měřicí trubice. Kromě **hmotnostního průtoku** může elektronika vyhodnocovat také **hustotu**, objemový průtok, teplotu a proteklé množství. Měronosnou veličinou pro zjištění hustoty proudícího média je rezonanční frekvence měřicí trubice; ze známé hustoty lze pak vypočítat z hmotnostního průtoku průtok objemový. Průtokoměr *Proline Promass I 100* (www.cz.endress.com) s torzně kmitajícím systémem je schopen vyhodnocovat i viskozitu měřené kapaliny.

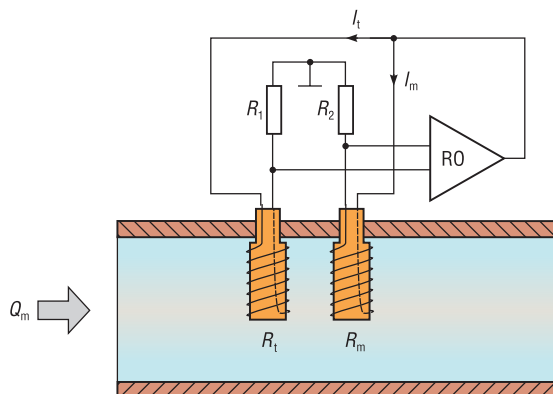
Vlastnosti a použití Coriolisových průtokoměrů

Coriolisovy průtokoměry jsou běžně používány pro trubky o průměru od několika mm až pro potrubí o průměru 100 mm.

Obr. 5. Příklady instalací Coriolisových průtokoměrů v průmyslových provozech: a) průtokoměr Siemens Sitrans (www.siemens.cz) – lihovar Dobrovice, Tereos TTD, a. s.; b) průtokoměr ABB TRIO-MASS (www.abb.cz/mar) – průtok řediny v lihovaru Dobrovice, Tereos TTD, a. s., (foto M. Kmínek); c) průtokoměr Krohne Optimass (www.krohne.cz) – průtok kakaového másla v závodě Zora Olomouc (foto Nestlé)



Obr. 6. Princip hmotnostního termoanemometru



Laboratorní průtokoměry jsou schopny měřit v rozsazích 0,05 až 5 kg·h⁻¹, provozní přístroje až do 400 t·h⁻¹. Nejnovější přístroje mají měřicí rozsah i více než 4 000 t·h⁻¹ a jsou k dispozici pro potrubí o světlosti 300 až 400 mm. Při měření průtoku kapalin se dosahuje přesnosti až ±0,1 %, u plynů až ±0,35 % z měřené hodnoty; opakovatelnost bývá u kapalin ±0,05 %, zatímco u plynů ±0,2 % z měřené hodnoty. Vlastní senzor může pracovat v prostředí teplot od -240 °C do +400 °C při tlaku měřené tekutiny až do 310⁷ Pa v závislosti na konkrétním provedení. Chyba měření hustoty bývá ±2 kg·m⁻³, u některých typů i menší než ±1 kg·m⁻³. Pro kalibraci Coriolisových průtokoměrů se používá voda, i když je průtokoměr určen pro měření s jinou tekutinou.

Coriolisovy průtokoměry nacházejí široké uplatnění při provozním měření. Lze je využít i pro měření viskózních kapalin a pastovitých hmot. Výstupní signál, který je úměrný přímo hmotnostnímu průtoku, není ovlivněn změnami vlastností proudícího média jako je hustota, viskozita, tlak a teplota. Průtokoměr se využívá jako bilanční měřidlo, jako senzor v regulačním obvodu a je vhodný i pro dávkování přesného množství kapalin. K obtížím dochází při měření kapalných médií s obsahem plynných látek. Zásady pro montáž a umístění Coriolisova průtokoměru do potrubního systému popisuje KADLEC (1). Na obr. 4. jsou ukázky Coriolisových průtokoměrů od různých výrobců se zakřivenou i s přímou měřicí trubicí spolu s uvedením některých aplikací.

Na obr. 5. jsou příklady Coriolisových průtokoměrů od různých výrobců využívané k měření hmotnostního průtoku různých provozních médií.

Tepelné průtokoměry

U tepelných hmotnostních průtokoměrů se využívá k měření průtoku média vlivu proudění tekutiny na šíření tepla. Někdy se tyto průtokoměry označují též jako termické. Princip spočívá ve vyhodnocování energetické rovnováhy při sdílení tepla z elektricky vyhřívaného topného elementu do proudící tekutiny, přičemž dochází ke změnám v rozložení teploty. Změny teploty jsou úměrné hmotnostnímu průtoku tekutiny. Tepelné hmotnostní senzory můžeme rozdělit podle charakteru tepelného působení média na čidlo a podle uspořádání měřicího systému na dva druhy:

- **kalorimetrické hmotnostní průtokoměry**, které se využívají zejména pro měření malých průtoků čistých kapalin a plynů v laboratorních podmínkách. Průtokoměry jsou často využívány ve vědeckých a vývojových laboratořích, pro přípravu směsí plynů dynamickým směřováním, v lékařské technice apod.
- **hmotnostní termoanemometry**, používané k provoznímu měření a jako hlídače průtoku.

Hmotnostní termoanemometr

U tohoto typu tepelného hmotnostního průtokoměru zasahují teplotní čidla přímo do proudící tekutiny a **vyhodnocuje se chladicí účinek** nucené konvekce na vyhřívané čidlo (2). Princip měření je znázorněn na obr. 6.

V potrubí jsou umístěny dva odporové teploměry, a to buď za sebou vzhledem ke směru toku, nebo vedle sebe. Odpor jednotlivých čidel je značně rozdílný, typicky bývá R_m/R_t v poměru 1 : 100. Čidla jsou zapojena do můstku, kde čidlem s malým odporem R_m prochází daleko větší proud a vyhřívá je na vyšší teplotu, kdežto teplota čidla s odporem R_t odpovídá teplotě tekutiny. Pokud se tekutina v potrubí nepohybuje, je z vyhřívaného čidla teplo odváděno pouze vedením a volnou konvekcí. Jestliže však plyn nebo kapalina proudí, je teplo odváděno především nucenou konvekcí, což se projeví větším ochlazením vyhřívaného čidla. „Studené“ čidlo má vždy teplotu

Obr. 7. Tepelné hmotnostní průtokoměry a hlídače průtoku: a) schéma; b) zásuvný (ponorný) snímač t-mass 65F; c) průtočný snímač t-mass 65I; d) po-norný hlídač průtoku; e) in-line snímač pro hlídání průtoku



tekutiny. V izotermním režimu udržuje teplotu vyhřívaného čidla na konstantní úrovni regulační obvod, který řídí proud procházející můstkem tak, aby bylo napětí v diagonále můstku nulové. Procházející proud I_m je potom mírou hmotnostního průtoku Q_m , přičemž závislost mezi proudem a Q_m je nelineární. V rovnovážném stavu se množství tepla dodané ohřevem elektrickým proudem $R_m I_m^2$ rovná množství odvedeného tepla. Závislost proudu I_m na Q_m je možno aproximovat rovnicí:

$$I_m = a + b \cdot \sqrt{Q_m} \quad (5),$$

kde a je konstanta respektující přestupy tepla do okolí při nulovém průtoku (vedení, záření) a b závisí na geometrii senzoru teploty a na hustotě, viskozitě, tepelné vodivosti a tepelné kapacitě měřeného média. Hodnoty konstant zahrnují také vliv Reynoldsova čísla a čísla Prandtlůva (Pr).

Na obr. 7.a je principiální schéma tepelného průtokoměru a na obr. 7. (b + c) jsou ukázky zásuvného a průtočného provedení snímačů. Snímače tohoto typu nacházejí uplatnění např. při měření průtoku stlačeného vzduchu, měření průtoku a dávkování oxidu uhličitého v pivovarnictví a při výrobě nápojů, měření průtoku bioplynu, zemního plynu apod. Zásuvné snímače lze použít i pro měření průtoku v potrubí s čtyřhranným průřezem.

Na principu tepelných anemometrů pracují i tzv. hlídače průtoku, které se využívají např. pro hlídání hydraulických soustav, chladicích a mazacích okruhů, při ochraně čerpadel při běhu naprázdno, při kontrole proudění ve vzduchových kanálech klimatizaci apod. Na obr. 7. (d + e) je ukázka dvou hlídačů průtoku ze široké nabídky od společnosti Turck. Snímač v ponorném provedení (obr. 7.d) se umísťuje prostřednictvím šroubení do potrubí, snímač *in-line* (obr. 7.e) se zařazuje přímo do potrubí s proudícím médiem.

Souhrn

V článku jsou popsány hmotnostní průtokoměry. Je vysvětlen princip Coriolisova průtokoměru a je popsáno konstrukční uspořádání snímače. Jsou uvedeny příklady aplikací Coriolisova průtokoměru při provozním měření v potravinářských výrobcích. Dále je vysvětlen

princip tepelných hmotnostních průtokoměrů a jsou popsána konstrukční uspořádání tepelných hmotnostních anemometrů a hlídačů průtoku. Ukázány jsou možnosti jejich využití při provozním měření.

Klíčová slova: hmotnostní průtokoměry, Coriolisovy průtokoměry, tepelné průtokoměry.

Literatura

1. KADLEC, K.: Měření průtoku a proteklého množství. In KADLEC, K.; KMÍNEK, M.; KADLEC, P. (EDIT.) ET AL.: *Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích*. Ostrava: Key Publishing, 2015, s. 230–290.
2. McMILLAN, G. K.; CONSIDINE, D. M.: *Process/Industrial Instruments and Controls Handbook*. McGraw/Hill, New York, 1999, s. 4.138–4.141.
3. STRNAD, R.: *Trendy měření průtoku*. Říčany u Prahy: GAS s.r.o., 2004.

Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Flow Measurement (Part 5)

The article describes mass flowmeters, it explains the principle of the Coriolis flowmeter and describes the design of a transducer. It gives examples of application of the Coriolis flowmeter in process measurements in food production. Further, it explains the principle of thermal mass flowmeters and specifies the design of thermal mass flow sensors and flow detectors. It also illustrates their possible use in process measurements.

Key words: mass flowmeters, Coriolis flow meters, thermal mass flowmeters.

Kontaktní adresa – Contact address:

doc. Ing. Karel Kadlec, CSc., Vysoká škola chemicko-technologická, Fakulta chemicko-inženýrská, Ústav fyziky a měřicí techniky, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice, Česká republika, e-mail: karel.kadlec@vscht.cz