

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.

Princip Coriolisova průtokoměru

Projev Coriolisovy síly (vysvětlena v rámečku) při proudění tekutiny je znázorněn na obr. 2. Proudí-li tekutina rychlostí v potrubím rotujícím úhlovou rychlostí ω , na prvek tekutiny o hmotnosti Δm působí Coriolisova síla

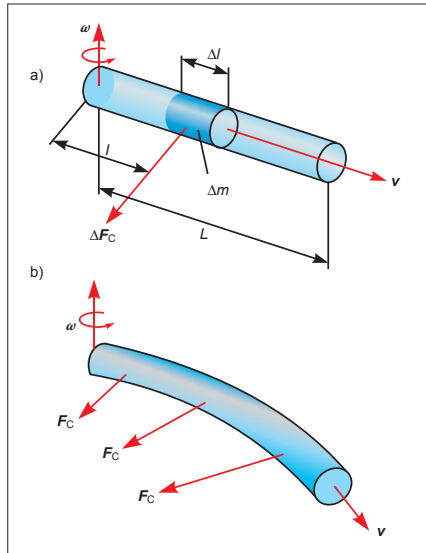
$$\Delta F_C = 2\Delta m(v \times \omega) \quad (1)$$

ve směru kolmém na rovinu vektorů v a ω . Výraz $2(v \times \omega)$ vyjadřuje tzv. Coriolisovo zrychlení. Orientace vektoru síly ΔF_C je dána pravidly vektorového součinu. Vektory v a ω jsou navzájem kolmé, takže po dosazení $v = \Delta l / \Delta t$ se získá rovnice

$$\Delta F_C = 2 \frac{\Delta m}{\Delta t} \omega \Delta l = 2Q_m \omega \Delta l \quad (2)$$

kde Q_m je hmotnostní průtok.

Z rovnice (2) je patrná souvislost mezi hmotnostním průtokem a Coriolisovou silou – Coriolisova síla působící na každý prvek tekutiny je úměrná hmotnostnímu průtoku. Vyhodnotit průtok z velikosti síly ΔF_C by bylo obtížné, a proto se využívá působení momentu síly na prvek Δm o délce Δl ,



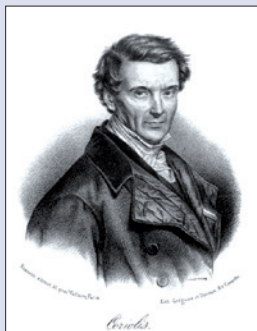
Obr. 2. Princip Coriolisova průtokoměru: a) vyznačení veličin na rotující trubce, b) deformace trubky Coriolisovými silami

vzdálený o délku l od osy rotace. Pro moment síly platí

$$\Delta M = \Delta F_C l = l 2Q_m \omega \Delta l \quad (3)$$

Objev Coriolisovy síly

Coriolisova síla byla pojmenována po francouzském matematikovi a fyzikovi Coriolisovi (obr. 1), 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 soustavě¹⁾ 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



Obr. 1. Gaspard-Gustave de Coriolis (*1792, †1843)

poledníku. Coriolisova síla způsobuje např. stáčení proudění severních a jižních větrů, jednostranné opotřebování železničních kolejnic položených severojižním směrem, podemílání břehů řek, silové namáhání plynovodů a ropovodů, 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 [1].

¹⁾ 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.

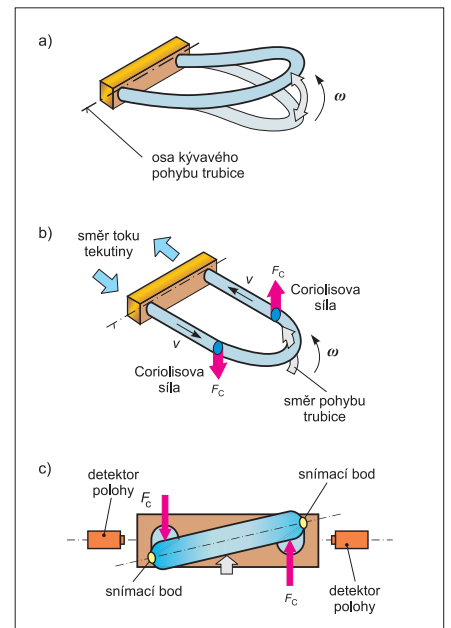
Celkový moment působící na potrubí o délce L se získá integrací

$$M = 2 \omega Q_m \int_0^L dl = L^2 \omega Q_m \quad (4)$$

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 trubice nebo i trubice přímé. Otáčivý pohyb trubice je nahrazen kývavým pohybem nebo harmonickým kmitáním, takže vektor ω i vektor ΔF_C mají periodicky proměnnou orientaci.

Na obr. 3 a obr. 4 je ukázáno působení Coriolisovy síly na dva základní typy měřicích trubice, a to na kmitající trubici ve tvaru U a na vibrující přímou trubku.

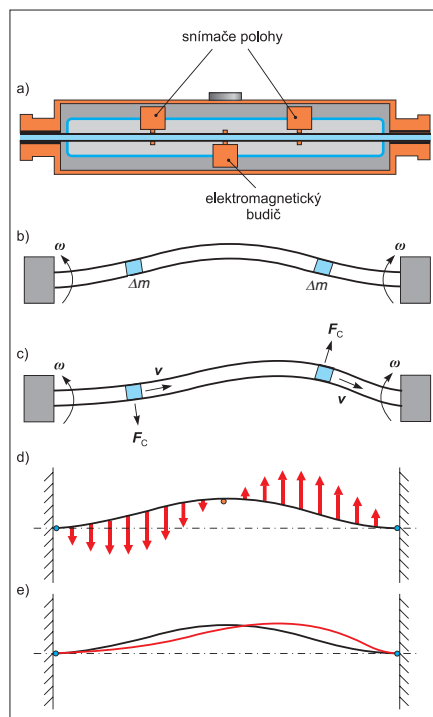
V obrázcích je vždy vyznačen směr rotace a směr Coriolisovy síly, která při průtoku média deformuje tvar trubice. Podle velikos-



Obr. 3. Účinek Coriolisovy síly na měřicí trubici tvaru U: a) kmitající senzor tvaru U s nulovým průtokem, b) působení Coriolisových sil při průtoku média, c) čelní pohled na deformovanou trubici tvaru U

ti 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. 3a a obr. 4b je vyznačen tvar odpovídající nulovému průtoku média. Na obr. 3b a obr. 4c je vyznačeno působení Coriolisovy síly při nenulovém průtoku média. Deformace měřicí trubice se snímá vhodnými senzory polohy, jejichž umístění na obou stranách měřicí trubice je vyznačeno na obr. 3c a obr. 4a.

Pomocí akčního členu složeného z elektromagnetické cívky a magnetu jsou měřicí trubice rozkmitávány sinusovými kmity s rezonanční frekvencí. Deformace způsobená Coriolisovou silou je velmi malá a vyhodnocuje se za použití snímačů polohy jako fázový posun snímaných kmitů (obr. 5). Při nulovém průtoku je fázový posun roven nule a naměřené průběhy splývají (obr. 5a); fázový posun



Obr. 4. Účinek Coriolisovy síly na přímou kmitající trubici: a) schéma senzoru s přímou kmitající trubicí, b) kmitající trubice při nulovém průtoku, c) deformace kmitající trubice působením Coriolisových sil, d) vyznačení účinku Coriolisových sil, e) porovnání tvaru trubice při nulovém a nenulovém průtoku

v závislosti na hmotnostním průtoku ukazují průběh na obr. 5b. Při měření se tedy nezjišťuje velikost Coriolisovy síly, ale vliv této síly na fázový posun snímaných kmitů.

Měřicí trubice

Materiál a tvar měřicí trubice se volí tak, aby byly odolné proti měřenému médiu a ne citlivé na vnější vibrace, mechanické napětí, namáhání vlivem teplotní roztažnosti apod. Tvar trubice má vliv na vlastnosti průtokoměru. Neexistuje jednoduché pravidlo pro volbu vhodného tvaru měřicí trubice. Zakřivené trubice vykazují větší citlivost i přesnost a větší odolnost proti 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 plno průtokový profil, odolnost proti zanášení, snadná čistitelnost a sanitovatelnost, malá trvalá tlaková ztráta a samovypouštění měřeného média. Nevýhodou přímé měřicí trubice je ne-

bezpečí přenosu rušivých kmitů mezi průtokoměrem a potrubním systémem. Jednou z možností potlačení účinku rušivých kmitů je použití diferenčního uspořádání se dvěma kmitajícími trubicemi.

Obvykle používané zakřivené i přímé měřicí trubice jsou namáhány v ohybu, což může u tenkých trubic při delším provozu vést k porušení materiálu a vzniku prasklin. Některé průtokoměry proto používají měřicí trubice s torzními kmity (dvě paralelní měřicí trubice tvaru S nebo trubice tvaru Ω). U torzně kmitajících systémů lze lépe potlačit nepříznivý vliv přítomnosti plynových bublin či jiných nehomogenit v kapalném médiu.

Rezonanční frekvence trubice je závislá na jejím tvaru a materiálu a dále na hustotě měřeného média. U zakřivených trubic činí frekvence asi 100 až 250 Hz, amplituda kmitání bývá přibližně 0,8 mm, u přímých trubic bývá frekvence 500 až 700 Hz a amplituda asi 0,1 mm. Citlivost vyjádřená jako fázový posun činí u zakřivených trubic asi 120 až 160 $\mu\text{s}/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$, pro rovné trubice pouze 5 $\mu\text{s}/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$ [2].

K měření deformace trubice se používají velmi citlivé bezdotykové snímače polohy, nejčastěji indukční a dále kapacitní nebo optické.

Materiál trubice musí odolávat agresivním i abrazivním účinkům média. Nejčastěji se používají korozivzdorné oceli, tantal, titanové nebo zirkoniové slitiny, slitiny Hastelloy, Inconel aj. Důležitým parametrem je tloušťka stěny měřicí trubice a její průměr. U trubice s tenkými stěnami a malým vnitřním průměrem jsou větší požadavky na použité konstrukční materiály.

Předností Coriolisových průtokoměrů je skutečnost, že nevyžadují ustálený rychlostní profil proudění, a není tedy nutné zařazovat rovné úseky potrubí před průtokoměrem a za něj. Při instalaci průtokoměru je třeba dbát na správnou montáž snímače s ohledem na přenos chvění z konstrukce, které může nepříznivě ovlivnit přesnost měření. Průtočný průřez měřicí trubice má vliv na velikost tlakové ztráty, která je důležitým parametrem každého průtokoměru. Tlaková ztráta závisí i na tvaru a počtu měřicích trubic.

Elektronické řídicí a vyhodnocovací obvody

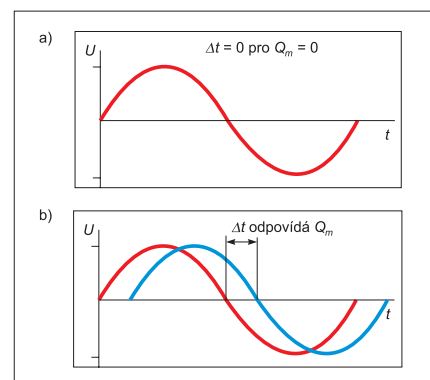
Elektronické obvody Coriolisových průtokoměrů obsahují obvody pro buzení kmitů a obvody pro vyhodnocení kmitů měřicí trubice. Kromě hmotnostního průtoku může elektronika vyhodnocovat také hustotu, objemový průtok, teplotu a proteklé množství. Měrosonnou veličinou pro zjištění hustoty proudícího média je rezonanční frekvence měřicí trubice; ze známé hustoty lze vypočítat z hmotnostního průtoku průtok objemový.

Pro zpracování signálu u inteligentních přístrojů se využívá technologie MVD (*Multi Variable Digital*). Při jejím použití se zá-

kladní signál senzoru převádí do digitální formy a všechny výpočty se provádějí v obvodech, které jsou integrální součástí senzoru. Digitální komunikace je zajišťována prostřednictvím komunikačních protokolů HART, Foundation Fieldbus, Profibus-DP aj. Některé typy průtokoměrů jsou vybaveny automatickou diagnostikou správné funkce a kontrolou platnosti kalibrační závislosti. Elektronická vyhodnocovací jednotka je u kompaktních provedení integrální součástí průtokoměru, při odděleném provedení je propojena kabelem.

Použití Coriolisových průtokoměrů

Průtokoměry nacházejí uplatnění v chemickém, petrochemickém, farmaceutickém a potravinářském průmyslu a v dalších odvětvích při měření mnoha různých látek, od čistých plynů a kapalin až po suspenze a kaly. Lze je využít k měření průtoku zkapalněných plynů i k měření viskózních kapalin a pastovitých hmot. Výstupní signál, který je přímo úměrný hmotnostnímu průtoku, není ovlivněn změnami vlastností proudícího média, jako je hustota, viskozita, tlak a teplota. Při měření plynu je



Obr. 5. Fázový posun signálů detektorů polohy: a) při nulovém průtoku, b) při určitém průtoku média

nutné počítat se skutečností, že při nízkých tlacích má plyn menší hustotu a k dosažení efektivní Coriolisovy síly musí plyn proudit měřidlem velkou rychlostí (desítky až stovky metrů za sekundu), a to je příčinou velké ztráty tlaku. Průtokoměr se využívá jako bilanční měřidlo, jako senzor v regulačním obvodu a je vhodný i pro dávkování přesného množství kapalin. Obtíže nastávají při měření kapalných médií s obsahem plynných látek.

Coriolisovy průtokoměry jsou k dispozici pro trubky o průměru od několika milimetrů až pro potrubí o průměru 100 mm. Laboratorní průtokoměry jsou schopny měřit v rozsazích 0,05 až 5 kg/h, provozní přístroje až do 400 t/h. Při měření průtoku kapalin se dosahuje přesnosti až $\pm 0,1\%$, u plynů až $\pm 0,35\%$ z měřené hodnoty; opakovatelnost bývá u kapalin $\pm 0,05\%$, zatímco u plynů $\pm 0,2\%$ z měřené hodnoty. Vlastní senzor může pracovat v prostředí teplot od -240 do $+400$ °C při tlaku měřené tek-

tiny až do $3 \cdot 10^7$ Pa v závislosti na konkrétním provedení. Chyba měření hustoty bývá $\pm 2 \text{ kg/m}^3$, u některých typů i menší než $\pm 1 \text{ kg/m}^3$. Pro kalibraci Coriolisových průtokoměrů se používá voda, i když je průtokoměr určen pro měření s jinou tekutinou.

Závěr

Na závěr shrňme hlavní přednosti a nevýhody Coriolisových průtokoměrů. Mezi jejich předností patří:

- měření průtoků plynů a kapalin i s velkou viskozitou,

- široký rozsah měřených průtoků za různých provozních podmínek,
- velká přesnost měření,
- velmi dobrá opakovatelnost a reprodukovatelnost,
- nepotřebnost usměrňovacího potrubí,
- možnost měřit v obou směrech,
- možnost kalibrace vodou pro všechna měřená média, včetně měření plynu.

Coriolisovy průtokoměry mají tyto nevýhody:

- poměrně velká tlaková ztráta u některých provedení,
- nutnost ochrany proti vibracím a pnutím,
- vysoké pořizovací náklady.

Literatura:

- [1] STRNAD, R.: *Trendy měření průtoků*. GAS s. r. o., Říčany u Prahy, 2004.
- [2] ĎAĎO, S. – BEJČEK, L. – PLATIL, A.: *Měření průtoků a výšky hladiny*. BEN Praha, 2005.
- [3] MIKAN, J.: *Měření plynu*. GAS s. r. o., Říčany u Prahy, 2003.
- [4] KADLEC, K.: *Snímače průtoků*. Automa, 2006, roč. 12, č. 12, s. 68–70.

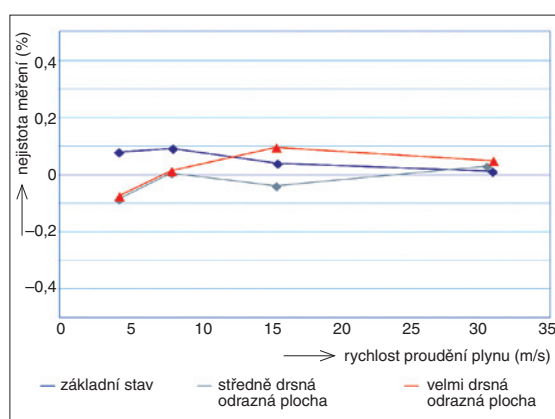
doc. Ing. Karel Kadlec, CSc.,
ústav fyziky a měřicí techniky,
VŠCHT Praha

Jaký je vliv znečištění na přesnost ultrazvukových průtokoměrů?

Ultrazvukové průtokoměry pracující na principu měření doby průchodu signálu s reflektorem, používané jako stanovená měřidla pro měření průtoků zemního plynu, jsou náchylné na znečištění. Je-li reflexní plocha průtokoměru kontaminována, zvyšuje to nejistotu měření. To je všeobecně uznávaná skutečnost, avšak dosud neexistovala žádná měření, která by se daným jevem podrobně zabývala.

Důkladné zkoumání vlivu znečištění, jež byly ultrazvukové průtokoměry podrobeny firmou EON Ruhrgas na vysokotlaké zkušební trati v Lintorfu (SRN), nezvratně prokázalo, že princip měření ultrazvukového průtokoměru nemá na jeho přesnost žádný vliv. Zkoumání odhalila nezanedbatelnou výhodu reflexní metody: z vlastností odraženého ultrazvukového signálu lze usuzovat na stupeň znečištění průtokoměru.

Část měření se zabývala vlivem drsnosti odrazné plochy. Do měřicí trati byly instalovány průtokoměry s různě drsnými odraznými plochami reflektorů. Drsnost může simulovat znečištění plochy reflektoru. Pro to, aby byly vyloučeny další vlivy působící na přesnost mě-



Obr. 1. Vliv drsnosti reflexní plochy na nejistotu měření

ření, se měnila skutečně jen drsnost plochy reflektorů, nikoliv drsnost vnitřní plochy průtokoměru. S drsností se měnila pouze amplituda odraženého signálu, ne jeho tvar. Některé průtokoměry, jako např. Altosonic V12 od firmy Krohne, jsou vybaveny automatickou kompenzací síly signálu (AGC, Automatic Gain Control) a s tímto jevem si bez problémů poradí.

Pro nejdřsnější povrch reflektoru byla ztráta síly signálu jen 6 dB.

Navíc je možné porovnávat změnu zesílení signálu po namontování průtokoměru, kdy jsou plochy reflektoru čisté, s aktuálním stavem, a detekovat tak i malé znečištění nebo korozi v průtokoměru. To je velká výhoda reflexního měřicího principu.

Na obr. 2 je ukázána nejistota měření před kontaminací reflektoru a po jeho znečištění. Je překvapivé, že z výsledků zmíněného měření není patrný žádný významný nepříznivý vliv.

Zde uvedené výsledky jsou jen částí studie, publikované na konferenci Flomeko, jež se konala 13. až 16. října 2010 na Tchaj-wanu. Další výsledky hodnotí vliv usazenin na dně průtokoměru, vliv drsnosti celého průtokoměru a drsnosti uklidňovacího potrubí.

[Tisková informace Krohne Messtechnik, říjen 2010.]

(Bk)

► Seminář Informační systémy výroby

Dne 5. října 2010 se v Jihlavě uskutečnil seminář *Informační systémy výroby*, organizovaný agenturou AD&M – konferenční servis. Své aktivity představilo sedm významných firem, šest dodavatelských a jedna uživatelská, se značnými zkušenostmi v daném oboru v ČR. Protože téma informačních systémů výroby je velmi rozsáhlé, věnovali se přednášející především vybraným aktuálním stěžejním tématům.

Na semináři byly předneseny příspěvky *Výrobní informační systém Comes® a jeho aplikace* (Compas automatizace, spol. s r. o.), *Justification and Application of Manufacturing Operations Management Systems* (Důvody k zavedení používání systémů pro správu výroby; Emerson Process Management, s. r. o.), *Měření KPI se zaměřením na manuální pracoviště* (Merz s. r. o.), *Přirozeně chytrá řešení pro výrobu* (společně Flores s. r. o. a Linet spol. s r. o.) a *Spolupráce aplikací MES a WMS k efektivnímu sledování a řízení výrobních a logistických procesů* (ICZ a. s.).

V doprovodném programu se obecně představila společnost Ipesoft s. r. o. Součástí semináře byla stolní výstava produktů zúčastněných firem.

Celkem 35 posluchačů z různých odvětví průmyslu si ze semináře odneslo zajímavé a inspirativní poznatky z oboru moderního řízení výroby. Další informace lze získat u organizátora akce (Ing. Petra Adamová, tel.: +420 596 919 977, e-mail: petra.adamova@adam-ova.cz, www.adam-ova.cz), popř. přímo u zúčastněných firem.

(pa)