

Proline Promass Q - vynikající měření hustoty

Článek popisuje proces vývoje Coriolisova hmotnostního průtokoměru Promass Q 300 (Endress + Hauser) a výsledky jeho zkoušek provedených nezávislou laboratoří zvláště s přihlédnutím k jeho schopnosti přesně měřit, kromě průtoku, také hustotu.

V současné době je v mnoha případech před staršími průtokoměry pracujícími na mechanickém principu, clonovými, lopatkovými nebo turbínkovými, dávana přednost průtokoměrům Coriolisovým. Coriolisovy průtokoměry dokážou měřit kromě hmotnostního průtoku také hustotu, teplotu a v některých případech i viskozitu média. Tento článek představuje nový typ Coriolisova průtokoměru, který v sobě kombinuje výsledky technického pokroku posledních několika let. Mezi jinými vlastnostmi jsou to možnost měření velmi malého průtoku a nízká tlaková ztráta, jež vedou k rozšíření rozsahu měřených průtoků a k výraznému zlepšení použitelnosti v úlohách, kde se v kapalině vyskytují bubliny.

Tento článek se soustředí na možnosti měření hustoty kapalin. Schopnost měřit hustotu v běžných provozních podmínkách je důležitá funkce pro náročné úlohy objemových fakturačních měření, zejména v petrochemii nebo plynárenství. Jinou možností použití je měření koncentrace v potravinářském průmyslu. Tento článek představí, jak byl nový typ Coriolisova průtokoměru optimalizován už při návrhu tak, aby zajistil spolehlivé měření hustoty v provozních podmínkách. To zahrnovalo optimalizaci tvaru měřicí trubice, zdokonalení měření teploty a použití nových metod pro kompenzaci vlivu teploty, tlaku, průtoku a viskozity. Při konstrukci průtokoměru byly ve velké míře používány metody konečných prvků (FEM) a výpočetní simulace dynamiky tekutin (CFD). V interní laboratoři byl testován vliv teploty měřeného média, okolní teploty a tlaku a různých způsobů montáže. Průtokoměr byl také testován v nezávislé laboratoři při teplotě 25 °C a montáži na svislé potrubí s průtokem směrem dolů. Při tomto měření bylo ověřeno, že vyhovuje specifikované nejistotě měření $\pm 0,2 \text{ kg/m}^3$ v širokém rozsahu hustoty a viskozity.

1. Průtokoměr Proline Promass Q 300

Na obr. 1 je průtokoměr Proline Promass Q 300, vyráběný firmou Endress+Hauser. Jde o lehký kompaktní Coriolisův průtokoměr dodávaný se všemi běžnými variantami procesních připojení používaných v průmyslu. Dodáván je ve čtyřech velikostech se jmenovitou světlostí od 1" do 4" (DN25 až

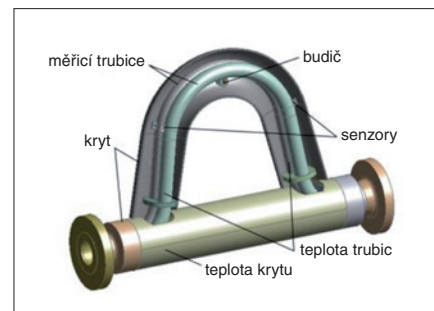


Obr. 1. Průtokoměr Proline Promass Q 300, výrobce: Endress+Hauser

DN100). Teplota média může být od -196 do $+205$ °C a tlak od 0 do 10 MPa. K dispozici jsou převodníky s různými standardními výstupy a komunikačními protokoly.

Vnitřní uspořádání průtokoměru je na obr. 2. Dvě paralelní zahnuté trubice jsou k procesnímu potrubí připojeny děličem průtoku. Připojovací prvky na vstupu a výstupu průtokoměru určují pracovní délku oscilující trubice. Stejně jako u ladičky, i zde obě trubice kmitají s opačným směrem, takže systém je vyvážený a energie je vázána v oscilátoru (obr. 3). Algoritmus řízení převodníku vytváří prostřednictvím elektrodynamického budiče umístěného uprostřed měřicí trubice

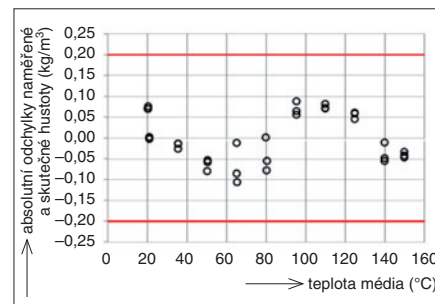
harmonické kmity na rezonanční frekvenci trubice a s konstantní amplitudou. Dva elektrodynamické senzory jsou umístěny na vstupu a výstupu průtokoměru, čímž je dosaženo kompenzace tlumení kmitů měřicí trubice.



Obr. 2. Vnitřní uspořádání průtokoměru Promass Q 300



Obr. 3. Vyvážené kmitání trubic simulované metodou FEM



Obr. 4. Naměřené odchylky a skutečné hustoty v závislosti na teplotě média za konstantní teploty okolí $+25$ °C: odchylky jsou do $\pm 0,2 \text{ kg/m}^3$

Princip činnosti Coriolisova průtokoměru je popsán v mnoha publikacích, např. [1] (poz. red.: v časopise Automa např. v [5]). Rezonanční frekvence trubice f_r závisí na její tuhosti, hmotnosti a hmotnosti kapaliny v trubici. Hustota kapaliny ρ závisí na rezonanční frekvenci podle funkce:

$$f = f_r(p, v, \gamma) \quad (1)$$

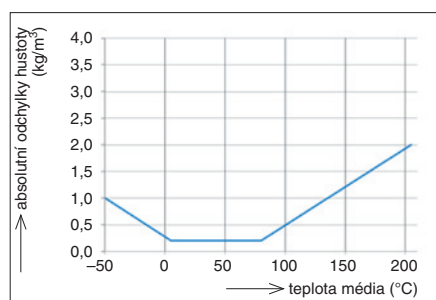
$$\rho_r = C_0(T_m) + C_1(T_m, T_h)f^2 \quad (2)$$

$$\rho = \rho_r(\eta, c) \quad (3)$$

kde f , p , v a γ jsou kompenzovaná frekvence, tlak média, rychlost proudění a úhel mezi procesním potrubím a svislicí, ρ_r , T_m , T_h , C_0 a C_1 nekompensovaná naměřená hodnota hustoty, průměrná teplota média v trubici, teplota krytu průtokoměru a dvě kalibrační konstanty, η a c viskozita kapaliny a rychlost zvuku v kapalině.

2. Citlivost na vnější vlivy a přesnost měření

V průběhu vývoje průtokoměru byly k optimalizaci konstrukce senzorů a kompenzačních algoritmů použity analytické a simulační výpočetní metody FEM a CFD v symbióze s experimentálním přístupem. Pro zvýšení přesnosti určení hustoty byla omezena citlivost měření na provozní podmínky, vlastnosti média, podmínky prostředí a instalaci.



Obr. 5. Vypočtená závislost odchylek naměřené a skutečné hustoty jako funkce teploty média

2.1 Provozní podmínky

2.1.1 Teplota média

Vzhledem k tomu, že měřicí trubice je v přímém kontaktu s médiem, měřená teplota trubice T_m je v podstatě shodná s teplotou média. Měření této teploty je pro správné určení hustoty rozhodující, protože to umožňuje kompenzovat závislost Youngova modulu pružnosti v tahu a tuhosti trubice na teplotě. Pro minimalizaci driftu naměřené teploty způsobeného připojovacími kabely se používají senzory Pt1000. V průběhu konstrukce snímače byl metodou CFD modelován vliv proudění, aby bylo možné určit nejlepší umístění dvou senzorů teploty a způsob jejich upevnění (obr. 2). Díky umístění snímačů na vstup a výstup měřicí trubice se možné určit průměrnou teplotu trubice i v případech, že je z jakéhokoliv důvodu podél trubice nehomogenní, např. vlivem velmi pomalého proudění nebo gradientu okolní teploty. Kromě toho se použitím dvou snímačů zvyšuje spolehlivost měření: při selhání jednoho z nich je stále k dispozici údaj z druhého snímače. Na obr. 4 jsou znázorněny odchylky naměřené ne-

Průtokoměr Promass Q 300 získal na veletrhu Amper 2017 v soutěži Zlatý Amper čestné uznání. Porota ocenila zejména to, že jde o Coriolisův hmotnostní průtokoměr určený pro náročné úlohy vyžadující přesnost, stabilitu a robustnost, mezi jehož klíčové vlastnosti patří:

- výjimečně přesné a stabilní měření hustoty jako standardní funkce průtokoměru,
- nejširší rozsah měření průtoků na trhu; díky minimálním hodnotám nulového bodu a tlakové ztráty je snímač možné použít v měřicím rozsahu o 20 až 60 % větším, než mají běžné konkurenční přístroje, a to při zachování přesnosti měření $\pm 0,1$ % nebo s prémiovou kalibrací $\pm 0,05$ %,
- výrazné vylepšení přesnosti a opakovatelnosti měření průtoku kapalin s bublinami, a to díky nové konstrukci průtokoměru kombinované s patentovanou multifrekvenční metodou měření (běžné Coriolisovy průtokoměry pro měření médií s bublinami nelze použít vůbec, nebo vykazují velmi špatnou přesnost),
- nejnižší citlivost na změny tlaku a teploty média na trhu – robustní a spolehlivé měření v reálném světě v proměnlivých provozních podmínkách.

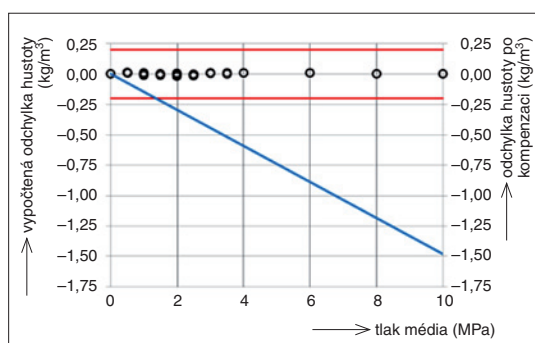


Obr. 10. Průtokoměr Promass Q 300 získal na veletrhu Amper 2017 v Brně čestné uznání

korigované a skutečné hustoty: v rozmezí od +20 do +150 °C je odchylka do $\pm 0,2$ kg/m³. Na obr. 5 je znázorněna vypočtená absolutní odchylka hustoty pro korekci v závislosti na teplotě média.

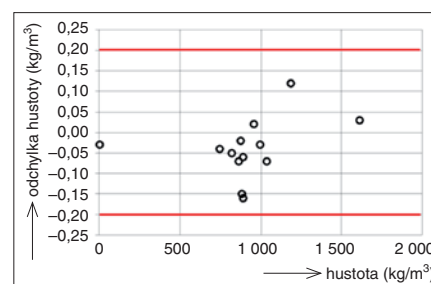
2.1.2 Provozní tlak

Prostřednictvím modelu vytvořeného metodou FEM byly pečlivě optimalizovány tvar trubice a umístění speciálních podpěr, přičemž cílem bylo minimalizovat vliv tlaku média p na přesnost měření hustoty. Vypočtené výsledky byly následně pečlivě prověřeny v praxi. Malý zbytkový vliv tlaku na měření má velmi dobrou opakovatelnost. Je žádoucí, aby tlak měl na měření co nejmenší vliv, ovšem je-li zbytkový efekt opakovatelný a navíc s lineárním průběhem, jak je ukázáno na obr. 6, lze jej velmi snadno vykompenzovat. Malé závislosti naměřené hodnoty na tlaku se dosahuje použitím trubíc vyrábě-



Obr. 6. Vypočtená odchylka hustoty a odchylka hustoty po kompenzaci jako funkce tlaku média při měření hustoty vody o pokojové teplotě

ných technologií tváření kapalinou – hydroformingu. Tato technologie zaručuje velmi přesnou kruhovitost trubíc a velkou opakovatelnost výroby. Pro online kompenzaci zadává tlak média operátor manuálně nebo lze použít hodnotu získanou z externího snímače. Na



Obr. 7. Odchylka naměřené a skutečné hustoty jako funkce hustoty média při 25 °C podle certifikátů 15215 a nn15217R, vydaných laboratoří H&D Fitzgerald Ltd.; odchylky leží v pásmu $\pm 0,2$ kg/m³ [2]

obr. 6 je znázorněna závislost odchylky naměřené a skutečné hustoty na tlaku, typicky $1,5 \cdot 10^{-7}$ kg/m³/Pa, a odchylka po kompenzaci údajem z externího snímače. V pásmu 0 až 10 MPa je závislost odchylky hustoty na tlaku lineární a absolutní odchylka naměřené a skutečné hodnoty nepřesáhne $\pm 0,2$ kg/m³.

2.1.3 Rychlost proudění

Pro dosažení maximální přesnosti měření hustoty by měla být rychlost proudění v co nejmenší, protože tím je zajištěno, že v měřicí trubici je homogenní vzorek tekutiny. Při velkém průtoku je třeba brát v úvahu také mechanický vliv rychlosti proudění: v zahnuté části trubice působí na proudící médium odstředivé síly, jejichž tlak na trubici způsobuje zvýšení tuhosti trubice a zvyšuje její vlastní frekvenci. Protože rychlost proudění v lze odvodit z měřeného průtoku, je možné její vliv kompenzovat.

2.2 Vlastnosti měřeného média

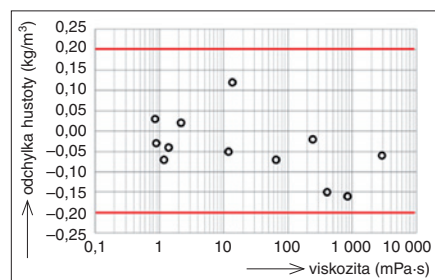
2.2.1 Hustota

Pro zajištění lineární závislosti naměřeného signálu na skutečné hustotě pro různé hustoty média ρ v měřicí trubici (naplněné homogenní tekutinou) je třeba velmi pečlivě

navrhnout konstrukční uspořádání měřidla. Výsledky zkoušky na obr. 7, získané v laboratoři H&D Fitzgerald Ltd., jež je akreditována britskou službou UKAS, dokázaly, že podpora tohoto konstrukčního kroku analýzou pomocí FEM byla úspěšná [2]. Pro jedenáct různých tekutin při teplotě 25 °C, počínaje vzduchem s hustotou 1,38 kg/m³ přes různé uhlovodíky, etanol ve vodě, vodu, dextransu ve vodě, dimethylftalát a konče tetrachloretylenem s hustotou 1 612 kg/m³ zůstaly odchylky naměřené a skutečné hustoty v pásmu ±0,2 kg/m³. Bylo otestováno několik průtokoměrů různých velikostí a výsledky byly přibližně shodné. Více detailů o nejistotách měření lze najít v certifikátech [2].

2.2.2 Viskozita média

Viskózní tekutiny přenášejí střížná napětí, a proto je přesné měření jejich hustoty problematické. Viskozita totiž způsobuje, že velmi viskózní média jsou u rozkmitané stěny trubice urychlovány v mnohem větším objemu než u médií s malou viskozitou. Výsledkem



Obr. 8. Odchylka naměřené a skutečné hustoty v závislosti na viskozitě média při +25 °C podle certifikátů 15215 a nn15217R, vydaných laboratoří H&D Fitzgerald Ltd.; odchylky leží v pásmu ±0,2 kg/m³ [2]

je, že průtokoměr naměří větší hustotu, než je skutečná. Užitím patentované metody je však možné z útlumu kmitání trubice určit dynamickou viskozitu média η a prostřednictvím této informace vliv viskozity kompenzovat. Na obr. 8 jsou znázorněny výsledky zkoušek získaných stejnou laboratoří jako v předchozí kapitole: britskou H&D Fitzgerald Ltd. Až do viskozity 2 885 mPa·s zůstává odchylka hustoty v pásmu ±0,2 kg/m³. Při testování průtokoměrů různých velikostí byly získány stejné výsledky. Další detaily o nejistotách měření lze najít v certifikátech [2].

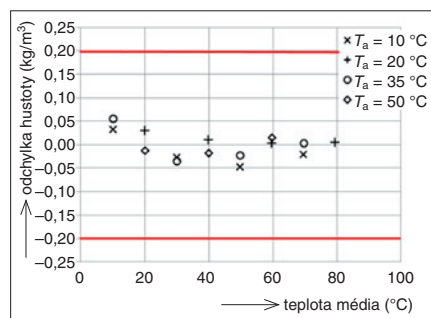
2.2.3 Stlačitelnost tekutin a vliv plynu v kapalíně

Kapaliny vykazují mnohem menší stlačitelnost než plyny, a tudíž rychlost zvuku c v kapalínách je mnohem větší než ve vzduchu. Jestliže je v kapalíně obsažen plyn, stlačitelnost směsi vzroste. Vzhledem ke stlačitelnosti je potom amplituda kmitání kapaliny větší než amplituda kmitání trubice a v důsledku toho se hustota kapaliny jeví větší, než ve skutečnosti je. Simultánním buzením vyšších řádů rezonanční frekvence trubice lze určit rychlost zvuku ve směsi, která umožní

zcela eliminovat odchylku měření hustoty. Detaily této zcela nové a patentované metody lze najít v [3].

2.2.4 Korozí, abraze, tvorba úsad

V některých případech se v průtokoměru projevuje korozí nebo abraze či se tvoří úsady. Protože k těmto jevům dochází postupně, přesnost měření hustoty se v čase zhoršuje, aniž by si toho operátor všiml. Nová diagnostická funkce Heartbeat Technology však umožňuje tyto pomalé změny odhalit



Obr. 9. Odchylky naměřené a skutečné hustoty v závislosti na teplotě média (vody) pro různé teploty okolí

a sledovat [4]. Jestliže je jejich monitorování začleněno do systému prediktivní údržby, může být průtokoměr včas vyčištěn a překalibrován, aby se obnovila původní přesnost měření. Využití funkce Heartbeat Technology navíc umožňuje snímač vyměnit dříve, než praskne měřicí trubice, nebo jej vyčistit před tím, než se ucpe.

2.3 Vlivy prostředí a instalace

2.3.1 Teplota prostředí a tepelná radiace

Dalším problémem je to, že teplota krytu průtokoměru obecně závisí na oslunění, teplotě okolí a vedení tepla a její rozdělení je málokdy homogenní. V reálném prostředí jsou často teplota krytu T_h , závislá zejména na teplotě okolního prostředí, a teplota měřicí trubice T_m , závislá nejvíce na teplotě média, rozdílné. Jejich rozdíl vytváří tepelné namáhání měřicí trubice, které může být redukováno optimalizací tvaru trubice. Zbytekový vliv lze kompenzovat vhodným umístěním odporového snímače teploty T_h na krytu. Při tom byly rozhodujícími faktory simulace FEM a CFD v kombinaci s experimentálním přístupem. Na obr. 9 se teplota okolí T_a mění v rozmezí od +10 do +50 °C. Odchylky hustoty jsou zanedbatelné a leží v intervalu ±0,2 kg/m³. Podobných výsledků bylo dosaženo při oslunění snímače.

2.3.2 Vnější síly a vibrace

Tvar trubice a tuhost krytu byly také optimalizovány tak, aby měření hustoty nebylo citlivé na vnější mechanické napětí vzniklé při instalaci. Současně však byly zachovány malé rozměry a hmotnost snímače. Budicí frekvence vyplývající z výšky trubice zaru-

čuje vynikající odolnost proti vlivu vnějších rušivých vibrací, které mají typicky mnohem nižší frekvence, než jaká je rezonanční frekvence měřicí trubice.

2.3.3 Orientace snímače

Všechny zahnuté trubice Coriolisových průtokoměrů jsou do jisté míry náchylné na vliv tíhy. V závislosti na úhlu γ , který svírá osa potrubí se svislicí, vlastní tíha trubice natahuje nebo stlačuje, čímž se mírně mění rezonanční frekvence a vzniká odchylka určená hustoty. Po instalaci průtokoměru lze tento úhel γ zadat do patentovaného přepočítávacího algoritmu, který vliv tíhy automaticky koriguje.

3. Závěr

V tomto článku byl představen nový typ Coriolisova průtokoměru. Mezi jinými přednostmi umožňuje přesné měření hustoty média, které je požadováno v mnoha úlohách v procesním průmyslu. Bylo vysvětleno, co všechno bylo při konstrukci snímače optimalizováno pro zaručení spolehlivého měření hustoty v provozu. V procesu konstruování byla použita simulace s využitím metod FEM a CFD v součinnosti s experimentálním přístupem. Výsledkem je vynikající schopnost měření hustoty: široký měřicí rozsah a výborná přesnost. Nakonec byl průtokoměr testován interně i v nezávislé laboratoři a bylo ověřeno, že v širokém rozsahu provozních podmínek, při různých vlastnostech měřeného média stejně jako v různém prostředí a při různých druzích instalace je odchylka naměřené a skutečné hodnoty do ±0,2 kg/m³.

Literatura:

- [1] BAKER, Roger C. *Flow measurement handbook: Industrial designs, operating principles, performance and applications*. [Reprint]. New York: Cambridge Univ. Press, 2005. ISBN 978-0521-1017-657.
- [2] UKAS calibration certificate number 15215; Calibration certificate nn15217R. St. Asaph, UK: H&D Fitzgerald Ltd., 2016.
- [3] ZHU, H., R. RIEDER a Y. LIN. An Innovative Technology for Coriolis Metering under Entrained Gas Condition. In: *FLOMEKO*. Sydney, 2016.
- [4] Heartbeat Technology™ – Reliable and flexible proof testing: Proof testing with Heartbeat Technology [online]. Reinach: Endress+Hauser AG [cit. 2017-06-12]. Dostupné z: <https://www.endress.com/en/media-center/news-and-press-releases/Flowmeters-proof-test-IEC-61508>
- [5] KADLEC, Karel. Coriolisovy průtokoměry. *Automa*. Praha: FCC Public, 2010, (10), 40–42. ISSN 1210-9592.

Alfred Rieder, Hao Zhu,
Michael Wiesmann, Endress+Hauser
Flowtec AG. Grafika: Endress+Hauser.
Překlad: Petr Bartošík