

# Metody a zařízení pro hmotnostní kalibraci průtokoměrů

Libor Lojek

Článek je věnován současným hmotnostním metodám kalibrace průtokoměrů, při jejichž použití se při měření průtoku zpravidla dosahuje nejmenších nejistot, a zařízením pro jejich realizaci. Diskutovány jsou zejména statická metoda s pevným a letným startem a stručně také dynamická metoda.

## 1. Úvod

Všechny průtokoměry vyžadují pro přesné a správné měření kalibraci. Některé elektronické převodníky sice mohou být kalibrovány samostatně s využitím simulace elektrických signálů, ale přesně měřit lze pouze při spojení takového převodníku s kalibrovaným snímačem průtoku. Toto platí i pro průřezová měřidla převádějící průtok na rozdíl tlaků, u nichž lze při přímé kalibraci v kalibrační laboratoři průtoku dosáhnout větší přesnosti měření než při použití hodnot charakteristických parametrů měřidla odvozených pouze z jeho geometrie.

Komerčně dostupné průtokoměry v současné době dosahují velmi velké přesnosti měření zejména díky výpočetním výkonům současně mikroprocesorové techniky a digitálnímu zpracování měřicích signálů. Například Coriolisovy hmotnostní průtokoměry vykazují základní chybu přístroje na úrovni několika málo setin procenta z měřicího rozsahu. Tím jsou kladeny i stále větší požadavky na kalibrační laboratoře a na měřicí metody a zařízení, které používají.

Obecně lze konstatovat, že při kalibraci průtokoměrů se nedosahuje tak velké přesnosti jako při kalibraci měřidel hmotností, tlaku, teploty nebo elektrických veličin. Primární laboratoře národních metrologických institutů dosahují při měření uvedených „ostatních“ veličin nejlepších měřicích schopností v řádu tisícín procenta, zatímco nejlepší měřicí schopnosti primárních laboratoří pro měření průtoku „pouze“ hodnot v setinách procenta pro kapaliny a v desetínách pro plynná média.

Větší přesnosti se tedy dosahuje při měření průtoku kapalin. Průmyslové průtokoměry se nyní běžně kalibrují vodou. Podle svého typu mohou být následně použity i pro měření průtoku jiných kapalin. Coriolisovy hmotnostní průtokoměry kalibrované vodou lze např. použít i pro přesné měření průtoku plynů.

## 2. Metody kalibrace

Průtok je možné měřit jako objemový, tj. v objemových jednotkách, např. v krychlových metrech za hodinu, nebo jako hmotnostní průtok v hmotnostních jednotkách, kilogramech za hodinu. Objemový a hmotnostní průtok jsou

ve vzájemném vztahu prostřednictvím hustoty měřeného média (určené např. v kilogramech na metr krychlový). Hlavními faktory, které ovlivňují objemový průtok, resp. hustotu média, jsou teplota a tlak média. Měřit tyto veličiny je při kalibraci průtokoměrů velmi důležité. Hmotnostní průtok je na termodynamických veličinách nezávislý.

Při kalibraci průtokoměrů se zpravidla používá tzv. sběrná metoda, při níž se voda protékající kalibrovaným průtokoměrem jímá ve sběrné nádobě a její množství se následně stanovuje objemovou nebo hmotnostní metodou. Za zdroj proudící kapaliny se po-

Velmi přesných výsledků při kalibraci průtokoměrů může být dosaženo při použití písťových etalonů průtoku. Tato dynamická objemová metoda je zejména vhodná pro průtokoměry, které je nutné kalibrovat kapalinou s příslušnou viskozitou. V technické praxi se také používá pro měření velmi malých průtoků, protože není ovlivněna odpařováním.

## 3. Statická hmotnostní metoda s pevným startem

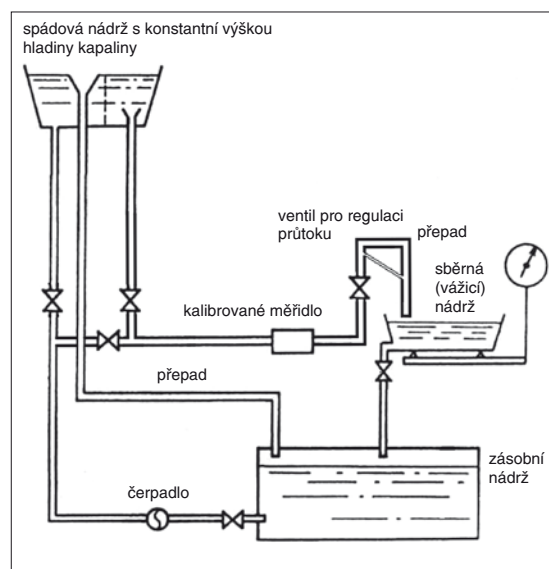
Pro statickou hmotnostní metodu s pevným startem je charakteristické, že měření začíná otevřením a končí uzavřením ventilu přednostně instalovaného za kalibrovaným průtokoměrem. Hmotnost proteklé kapaliny se měří za ustálených podmínek po ukončení plnění sběrné nádře. Měřicí trať musí být před mě-

ním i po něm zaplavena přesně po tzv. dělicí bod, zpravidla provedený jako přepad do sběrné nádře. Množství kapaliny proteklé průtokoměrem se stanovuje jako rozdíl výchozí a konečné hmotnosti kapaliny ve sběrné (vážicí) nádrži. Schéma jednoduchého zařízení pro kalibraci průtokoměrů statickou hmotnostní metodou s pevným startem je na obr. 1.

Nejdůležitějším prvkem z hlediska dosahované přesnosti kalibrace je u statické hmotnostní metody s pevným startem vážicí systém. Národní laboratoř průtoku v Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, SRN, je např. vybavena třemi vážicími systémy s váživostí 30 t, 3 t a 300 kg s integrovaným systémem automatické kalibrace, který umožňuje snímače hmotnosti před měřením znovu zkalibrovat. Tyto vážicí systémy dosahují rozšířené

nejistoty vážení menší než 0,01 %. Jsou zde souběžně využity dva vážicí principy, servomechanický, realizovaný v podobě ramenných vah s elektromagnetickým silovým vyrovnáním (*Electromagnetic Force Compensation – EFC*), a tenzometrický (tj. s převodem změny deformace materiálu měrného členu na změnu elektrického odporu). Základní schéma vážicího systému s váživostí 30 t je na obr. 2.

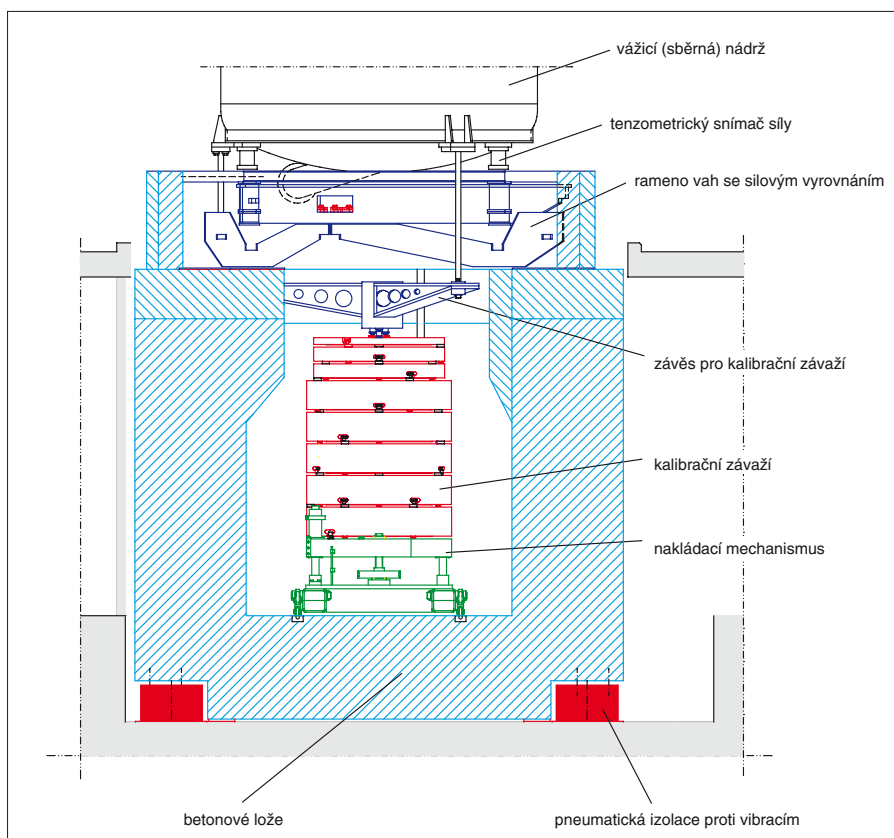
V praxi se potvrdilo, že servomechanické váhy mají v porovnání s tenzometrickými snímači síly menší hysterezi a větší stabilitu a citlivost. Předností tenzometrických snímačů je jejich kratší doba odezvy.



Obr. 1. Schéma zařízení pro kalibraci průtokoměrů statickou hmotnostní metodou s pevným startem (s napájením ze spádové nádře nebo čerpadlem)

užívá spádová nádrž s přepadovou hranou pro zajištění konstantní výšky hladiny, resp. konstantního tlaku v průběhu celé zkoušky, nebo čerpadlo, jehož otáčky mohou být řízeny měničem frekvence. Před zahájením kalibračního měření musí být celá měřicí trať zaplavena zkušební kapalinou, odzdušněna a vytemperována.

Nejmenší nejistoty měření průtoku lze zpravidla dosáhnout hmotnostními metodami, které jsou dále předmětem tohoto článku. Při určování hmotnosti proteklé kapaliny vážením je nezbytné indikované hodnoty korigovat na vliv vztlaku vzduchu.



Obr. 2. Schéma kalibračního vážicího systému s váživostí 30 t instalovaného v PTB, Braunschweig (zdroj: PTB [1])

Provoz čerpadla a voda cirkulující v potrubí jsou zdrojem mechanických vibrací, které by mohly negativně ovlivňovat jinak velmi velkou rozlišovací schopnost vážicího systému. Na základě výsledku rozboru vibračního chování laboratoře byly odhadnuty rezonanční frekvence systému a bylo navrženo optimální uložení vah s použitím systému izolace od zdrojů vibrací a systému aktivního tlumení vibrací. Celý vážicí systém je instalován na betonovém lůžku o hmotnosti 300 t uloženém na třinácti pneumatických izolačních modulech. Pasivní systém izolace bránící přenosu vibrací je doplněn systémem aktivního tlumení se snímači rychlosti. Čerpadla jsou rovněž instalována s použitím izolačních prvků.

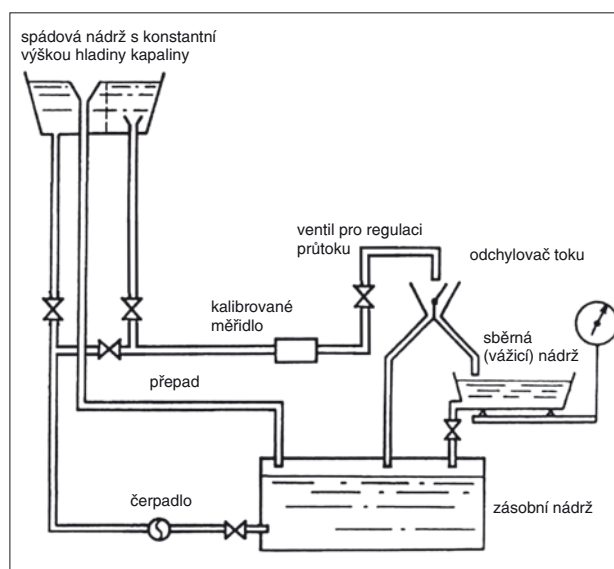
Snímače síly jsou pro redukci vlivu změn okolní teploty na přesnost měření tepelně izolovány a vybaveny elektrickým vytápěním, které udržuje jejich teplotu na stálé hodnotě o něco větší, než je teplota okolí.

Hlavním nedostatkem statické hmotnostní metody s pevným startem je, že průtok kalibrovaným měřidlem není po celou dobu kalibrace konstantní. Měření je tedy na začátku a na konci ovlivněno větší chybou kalibrovaného průtokoměru při měření malých průtoků a také jeho časovou konstantou. Tento vliv lze do jisté míry eliminovat prodloužením doby trvání zkoušky. Delší doba trvání a jí odpovídající větší měřené množství kapaliny však kalibraci neúměrně prodražují. V průběhu dlouhého měření může být navíc

nesnadné udržet stabilní podmínky, zejména teplotu zkušební kapaliny.

#### 4. Statická hmotnostní metoda s letným startem

Nedostatky statické hmotnostní metody s pevným startem lze překonat použitím její modifikace, metody s letným startem. Schéma odpovídajícího jednoduchého zařízení je



Obr. 3. Schéma zkušebního zařízení pro kalibraci průtokoměru statickou hmotnostní metodou s letným startem (s napájením ze spádové nádrže nebo čerpadlem)

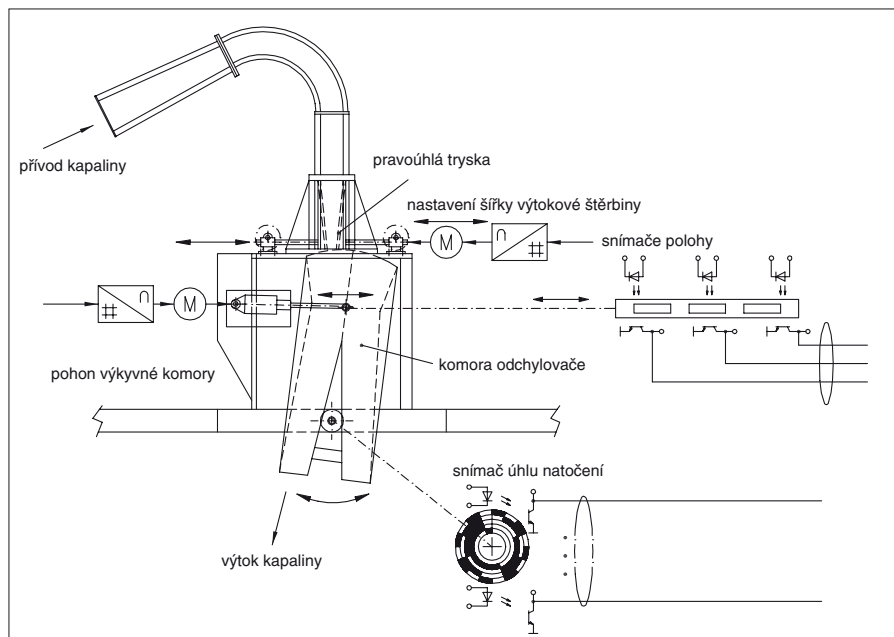
na obr. 3. Kalibrační zařízení je na rozdíl od předchozího vybaveno odchylovačem toku. Ten umožňuje přeměrovat tok vody z vratného potrubí do sběrné nádrže vážicího systému a následně zase zpět do vratného potrubí. Vlastní měření je spuštěno a ukončeno v okamžiku, když je odchylovač toku ve střední poloze. Tato poloha je snímána mechanickým nebo optickým snímačem, jehož výstupní signál je určen k ovládní čítače impulsů z kalibrovaného měřidla.

Statická hmotnostní metoda kalibrace s letným startem umožňuje významně zkrátit dobu trvání zkoušky a stanovit odchylku průtokoměru v daném bodě měřícího rozsahu při ustálených podmínkách. Na rozdíl od předchozí metody s pevným startem může být přesnost měření ovlivněna také nesymetrií pohybu odchylovače toku, změnou velikosti zkušební průtoky při přepnutí na začátku a konci měření a také nesymetrií rychlostního profilu toku v místě přepnutí.

Odchylovače toku mohou být v praxi provedeny různě. K tomu, aby odchylovač řádně fungoval, musí být splněny určité podmínky. Odchylovač toku nesmí při přepnutí ovlivňovat tlakové podmínky a proudění zkušební kapaliny. Kruhový profil přírodního potrubí je třeba převést např. na obdélníkový, čímž je minimalizována doba průchodu přepážky odchylovače proudem kapaliny. Rychlostní profil proudu na vstupu do vlastní komory odchylovače musí být pokud možno symetrický k její centrální rovině symetrie. Výtoková šterbina před komorou odchylovače musí být provedena tak, aby se výstupní proud kapaliny netřhal a nerozstříkaval. Rovněž musí být vyloučeno přimíchávání vzduchu. Přepážka odchylovače s ostrou hranou nesmí při průchodu proudem kapaliny způsobovat rozstříkávání vody. Pohyb přepážky odchylovače napříč proudem by měl být rovnoměrný a co nejlépe reprodukovatelný.

Všem uvedeným požadavkům vyhovuje odchylovač s nastavitelnou šířkou výtokové šterbiny zkonstruovaný v již zmíněné národní laboratoři PTB v Braunschweigu (obr. 4).

Potrubí přivádějící kapalinu ke komoře odchylovače toku je navrženo na základě numerických výpočtů rychlostního a tlakového pole tak, aby proud kapaliny vycházející z výtokové šterbiny byl plochý a pokud možno symetrický vzhledem ke středové rovině proudu (nesymetrie menší než 2 %). Symetrického rychlostního profilu lze dosáhnout kontrakcí proudu. Proto je výtoková šterbina konstruována jako zu-



Obr. 4. Odchylovač toku s nastavitelnou šířkou výtokové štěrbiny konstrukce PTB (zdroj: PTB)

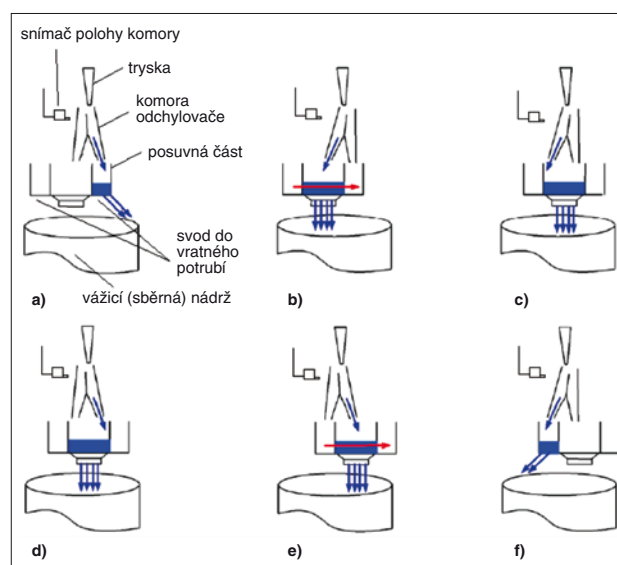
žující se tryska s minimálním poměrem 2 : 1 plochy vstupního průřezu k ploše výstupního průřezu. Boční stěny trysky jsou vyrobeny z plastu o velké tužnosti. Čelní a zadní stěna trysky jsou z průhledného materiálu, takže je možné sledovat proudění kapaliny a popř. měřit laserovými metodami jeho rychlostní profil. Šířka výtokové štěrbin je kontinuálně nastavitelná elektricky řízenými šrouby v rozsahu 1 : 10, a proto je možné pracovat s průtoky v rozsahu až 1 : 100. Rozsah rychlosti volného proudu kapaliny je 0,5 až 5 m/s. Volný proud kapaliny po opuštění výtokové štěrbin vchází do komory rozdělené vertikální přepážkou s ostrou dělicí hranou. Přepážka je vyrobena z korozivzdorné oceli s kvalitně vyleštěným pracovním povrchem (drsnost menší než 6,3 μm). Komora s přepážkou se natáčí okolo vodorovné osy. Úhel mezi přepážkou a proudem kapaliny nepřekročí 7,5°. Komorou pohybuje elektrický pohon se dvěma synchronizovanými lineárními táhly, který umožňuje dosahovat doby průchodu přepážky odchylovače proudem kapaliny asi 50 ms (pro přívod DN 50), popř. asi 150 ms (pro DN 150) s opakovatelností asi 0,2 ms. Časový průběh polohy (úhlu natočení) komory při přepnutí se při kalibraci zaznamenává spolu s ostatními veličinami.

Hodnota rozšířené nejistoty měření způsobené odchylovačem toku podle obr. 4 je 0,008 %.

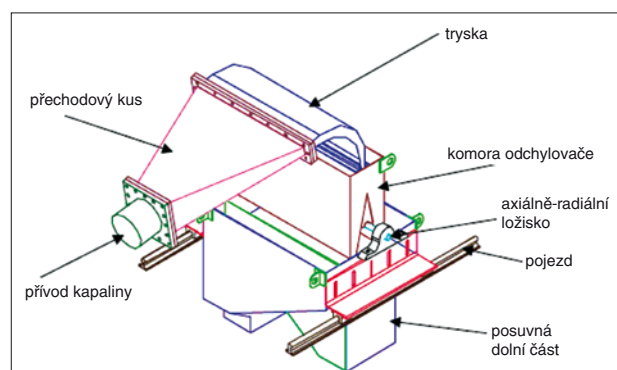
Významnou inovací z poslední doby v této oblasti je „jednosměrný“ odchylovač toku, jehož teoretickou studii publikoval výzkumný tým z národní laboratoře průtoků v NIST, Gaithersburg, USA, na konferenci Flomeko 2003 [3]. Tento převratný odchylovač o dva roky později v NIST sestavila a ověřila stážistka Dr. Mafrenková, původem z Ukrajiny [4].

Konstrukční řešení jednosměrného odchylovače toku eliminuje případnou nesymetrii rychlostního profilu proudění, nesymetrii rychlosti pohybu komory odchylovače v jednom a druhém směru a nesymetrii

metrii rychlostního profilu proudění, nesymetrii rychlosti pohybu komory odchylovače v jednom a druhém směru a nesymetrii



Obr. 5. Princip činnosti jednosměrného odchylovače toku: posloupnost fází a) až f) (zdroj: NIST [4])



Obr. 6. Konstrukce jednosměrného odchylovače toku (zdroj: NIST)

umístění snímače pro spuštění a ukončení měření času tím, že komora odchylovače se na začátku i konci měření pohybuje stejným směrem (obr. 5).

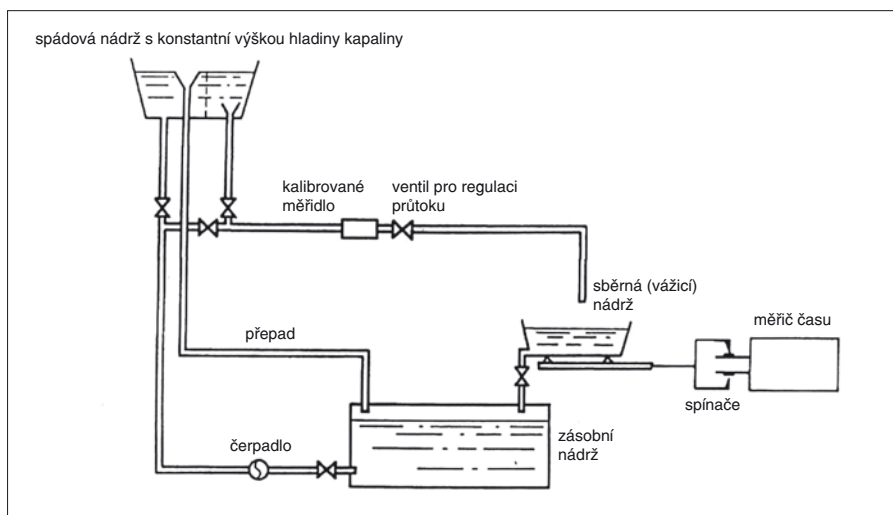
Nový systém podle obr. 5 se skládá ze dvou pohyblivých částí. Jednak ze samotného odchylovače toku s ostrou dělicí přepážkou, jednak z posuvné části se třemi komorami, z nichž prostřední ústí do sběrné nádrže vázícího systému a obě krajní do vratného potrubí. Na obr. 5a je počáteční situace, kdy kalibrační kapalina proudí pravou (při pohledu na obr. 5) větví komory odchylovače do vratného potrubí. Poté odchylovač přepne a kapalina proudí levou větví komory do sběrné nádrže (obr. 5b). Následně se posune dolní část systému (obr. 5c) tak, že po zpětném přepnutí odchylovače kapalina dále proudí do sběrné nádrže, ale již pravou větví komory (obr. 5d). Dolní část systému se opět posune (obr. 5e) a závěrem se proud kapaliny odchýlí zpět do vratného potrubí pohybem komory odchylovače ve stejném směru, jakým se komora pohybovala na začátku měření při odchýlení proudu z vratného potrubí do sběrné nádrže (obr. 5f).

Jednosměrný odchylovač toku správně funguje tehdy, jsou-li zachovány stále stejné rychlostní profil proudění za tryskou a průběh rychlosti natáčení komory ovladače v čase při přepínání toku. Uváží-li se, že podmínky při měření jsou stabilní a že se odchylovač pohybuje stejným směrem při přepnutí na začátku a konci zkoušky, jsou tyto podmínky patrně dostatečně splněny.

Přednosti této nové konstrukce byly prokázány při ověřování prototypů a při jejich používání v kalibrační laboratoři v NIST. Konstrukce jednosměrného odchylovače toku je schematicky znázorněna na obr. 6.

## 5. Dynamická hmotnostní metoda

Další možností, jak eliminovat vliv mechanického přesměrovávání proudu kapaliny odchylovačem toku, může být metoda dynamického vážení, kdy je hmotnost kapaliny ve sběrné nádrži stanovena dynamicky ze změny indikovaných hodnot během procesu plnění nádrže. Zařízení ke kalibraci průtokoměrů dynamickou hmotnostní metodou



Obr. 7. Schéma zkušebního zařízení pro kalibraci průtokoměrů dynamickou hmotnostní metodou (s napájením ze spádové nádrže nebo čerpadlem)

je schematicky znázorněno na obr. 7. Předností dynamického vážení je krátká doba kalibrace průtokoměru, ale velké přesnosti lze při dynamickém vážení dosáhnout jen tehdy, jsou-li dobře modelovány fyzikální procesy při vážení.

Alternativou k metodě dynamického vážení je komparační metoda kalibrace průtokoměrů založená na přímém porovnání protékajícího množství kalibrační kapaliny s etalonovým závažím. Na začátku měření natéká kapalina do uzavřené sběrné nádrže umístěné na komparační váze současně s etalonovým závažím. V okamžiku, kdy indikovaná hmotnost kapaliny dosáhne předem stanovené hodnoty, je automaticky spuštěno čítání impulzů z kalibrovaného měřidla. V průběhu měření je komparační váha odlehčena o hmotnost etalonového závaží. Čítání impulzů z měřidla, a tím i měření, je ukončeno v okamžiku, kdy údaj komparační váhy dosáhne stejné hodnoty jako na začátku měření. Takto stanovená hmotnost protékající kapaliny tedy není ovlivněna mechanickým pohybem odchylovače toku ani stabilitou váži-

cího systému. Při určování nejistoty měření však musí být vzaty v úvahu dynamické síly padajícího vodního sloupce a časová konstanta snímačů síly.

## 6. Závěr

K dosažení dobrých výsledků při kalibraci průtokoměrů je spolu s přesným etalonem třeba zajistit stabilní podmínky při měření, tj. konstantní průtok kalibračního média bez pulzací a tlakových rázů, stálou teplotu a tlak kalibrační kapaliny v době měření atd. Také je velmi důležité při kalibraci dodržet veškeré požadavky na správnou instalaci kalibrovaných průtokoměrů a správné nastavení elektronických převodníků. Mezinárodní organizace pro normalizaci jako ISO, CEN, OIML a např. ASME vydaly mnoho technických norem ohledně metod, zařízení a způsobu určování nejistot při kalibraci průtokoměrů.

Která metoda kalibrace je vhodná, záleží především na typu průtokoměru a jeho specifikované přesnosti. Hlavním parametrem při výběru kalibrační metody, popř. kalibrační

laboratoře, je nejistota měření. Nejistota měření při kalibraci by měla být alespoň třikrát lepší, než je specifikovaná přesnost kalibrovaného průtokoměru, je-li to technicky možné. Například nejlepší měřicí schopnost státního etalonu průtoku v Českém metrologickém institutu v Brně je asi 0,05 %.

Kalibrační laboratoře pravidelně prokazují svoji odbornou technickou způsobilost tím, že podstupují mezilaboratorní porovnání. Uživatelům průtokoměrů lze při výběru kalibrační laboratoře doporučit, aby si nechali předložit výsledky posledních provedených porovnání a přihlédl k nim.

## Literatura:

- [1] ENGEL, R. – BAADE, H.-J.: *New-Design Dual-Balance Gravimetric Reference Systems with PTB's New „Hydrodynamic Test Field“*. In: The 11<sup>th</sup> International Conference on Flow Measurement Flomeko 2003, Groningen, The Netherlands, May 12–14, 2003.
- [2] PÖSCHEL, W. et al.: *A unique fluid diverter design for water flow calibration facilities*. In: The 10<sup>th</sup> International Conference on Flow Measurement Flomeko 2000, Salvador, Brazil, June 5–8, 2000.
- [3] YEH, T. T. – YENDE, N. P. – ESPINA, P. I.: *Theoretical Self-Error-Canceling Diverters for Liquid Flow Calibration Facilities*. In: Proceedings of the Flomeko 2003, Groningen, The Netherlands, Gasunie, 2003.
- [4] MARFENKO, I. V. – YEH, T. T. – WRIGHT, J. D.: *Diverter Uncertainty Less Than 0.01% for Water Flow Calibrations*. In: Proceedings of the International Symposium on Fluid Flow Measurement, Queretaro, Mexico, 2006.
- [5] ENGEL, R.: *Dynamic Weighing – Improvements in Gravimetric Liquid Flowmeter Calibration*. In: The 5<sup>th</sup> International Symposium on Fluid Flow Measurement, Arlington, VA, USA, April 8–10, 2002.

Libor Lojek,  
Český metrologický institut  
(llojek@cmi.cz)

## ► NAMUR podporuje jednotnou integraci v oblasti provozních přístrojů

V časopise *Automa* již bylo oznámeno, že sdružení EDDL Cooperation Team (www.eddl.org) a FDT Group (www.fdt-group.org) uzavřela v dubnu 2007 smlouvu o vytvoření jednotného řešení pro integraci v oblasti provozních přístrojů FDI – *Field Device Integration* (blíže viz článek *Prosaďte se jednotný přístup k integraci zařízení?* v čísle 5/2007; [\[sy.cz/automa/2007/au050719.htm\]\(http://www.odbornecasopi.cz/automa/2007/au050719.htm\)\). K jejich úsilí se postupně připojují i další organizace, mezi nimi i německé sdružení výrobců a uživatelů automatizační techniky pro procesní výrobu NAMUR \(www.namur.de\). Očekává se, že návrh specifikace FDI, kompatibilní s koncepty EDDL, FDT a OPC UA a založený na postupech a vytvořených metodách, bude vydán do konce roku 2008.](http://www.odbornecasopi-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

Oba základní výchozí koncepty, EDDL i FDT/DTM, jsou již v procesní výrobě dobře zavedeny. Ani jeden z nich plně neuspokojuje požadavky uživatelů, stanovené např. v doporučení NE105, vydaném

NAMUR. Proto NAMUR podporuje vznik FDI a očekává od něj, že:

- bude všeobecně přijímáno dodavateli automatizační techniky,
- bude přijato jako mezinárodní standard,
- bude plně v souladu s NE105,
- bude zpětně kompatibilní s již instalovanými zařízeními,
- umožní převedení existujících systémů na nový standard.

Důležité je, aby FDI nebylo žádným dalším, zcela novým řešením, ale skutečně zastřešujícím standardem pro všechny již existující koncepty.

(Bk)