

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření průtoku (část 1.)

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: FLOW MEASUREMENT (PART 1)

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Obecně o snímačích průtoku

Pro měření průtoku a proteklého množství tekutin, tj. plynů a kapalin, je k dispozici velmi mnoho rozličných přístrojů využívajících různé fyzikální principy. Existence různých průtokoměrů je podmíněna tím, že existují velké rozdíly v chemických i fyzikálních vlastnostech průmyslových tekutin a v podmínkách i účelu měření. Při volbě vhodného průtokoměru je velmi důležitý i funkční princip. Různé typy přístrojů vykazují vždy určité přednosti i nedostatky a odtud pak vyplývá i stupeň uspokojení požadavků uživatele.

Význam měření průtoku je nesporný; průtokoměry poskytují informace o toku materiálu, jsou zdrojem podkladů pro bilanci během technologického procesu, při příjmu i expedici, slouží jako čidla v regulačních obvodech a mají i velký význam pro bilanční měření znečišťujících látek v oblasti ochrany životního prostředí.

Pojmy a definice z oblasti měření průtoku

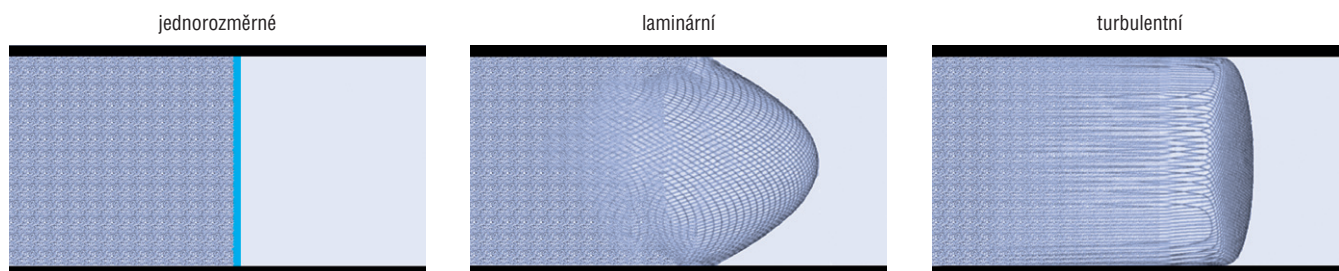
Průtok vyjadřuje množství tekutiny protékající průtočným průřezem za časovou jednotku. Výsledek měření průtoku může být udáván buď jako **průtok hmotnostní** Q_m (např. $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), nebo **objemový** Q_V (např. $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$).

$$Q_m = \frac{dm}{d\tau} \quad Q_V = \frac{dV}{d\tau} \quad (1)$$

Četná měřidla bývají vybavena integračním zařízením a jejich údaj pak udává **proteklé množství**, a to buď jako **proteklou hmotnost** m nebo **proteklý objem** V

$$m = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Q_m \cdot d\tau \quad V = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Q_V \cdot d\tau \quad (2)$$

Obr. 1. Druhy proudění a rychlostní profily



Průtok lze vyhodnotit i na základě měření místní nebo střední rychlosti média proudícího známým průřezem

$$Q_V = \int^S \bar{v} \cdot dS = \bar{v} \cdot S \quad (3)$$

kde \bar{v} je střední rychlost proudění média, S průřez potrubí.

Povaha proudění je závislá na rozložení třecích a setrvačných sil v tekutině (obr. 1.). Při **jednorozměrném proudění** se všechny částice pohybují stejným směrem a rychlost v libovolném místě tekutiny je určena pouze velikostí. Při **laminárním proudění** převládá účinek třecích sil mezi navzájem se nemíchajícími vrstvami proudící tekutiny. Částice se pohybují po drahách, které se navzájem nekříží. Rychlostní profil odpovídá parabolickému rozdělení s největší rychlostí v ose potrubí a nejmenšími rychlostmi v místě styku hraničních vrstev tekutiny se stěnou potrubí. Laminární proudění s rychlostním profilem rotačního paraboloidu je charakteristické pro viskózní tekutiny a malé rychlosti proudění. Při **turbulentním proudění** dochází ke křížení drah částic tekutiny, vytváří se víry a chaotický pohyb tekutiny. Uplatňují se především účinky setrvačných sil, tekutina proudí ve většině průtočného průřezu téměř stejnou rychlostí a rychlostní profil má plochý charakter.

Tenká vrstva tekutiny přiléhající k povrchu obtékaného tělesa se označuje jako **mezní vrstva**. Pro mezní vrstvu je typický velký rozdíl rychlosti proudění od nulové v blízkosti stěny až po rychlost nerušeného proudu. Do určité tloušťky má proudění laminární charakter, dále nastupuje vrstva nestabilní a nad laminární oblastí pak vzniká oblast turbulentního proudění. Mezní vrstva má důležitý význam při měření průtoku, hraje roli při umístění odběrů tlaku u průřezových měřidel, při uložení elektrod u indukčních průtokoměrů nebo při umístění piezoelektrických snímačů u ultrazvukových průtokoměrů. Za určitých podmínek může dojít k **odtržení proudu** a toho se využívá např. u vírových průtokoměrů.

Důležitým kritériem používaným pro posouzení druhu proudění je **Reynoldsovo číslo** Re , které vyjadřuje poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině. Pro kruhové potrubí o světlosti D je Reynoldsovo číslo definováno vztahem:

$$Re = \frac{\text{setrvačné síly}}{\text{třecí síly}} = \frac{\rho \cdot \bar{v}^2 \cdot D}{\eta \cdot \bar{v}} = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D}{\eta} = \frac{\bar{v} \cdot D}{\nu} \quad (4)$$

kde D je průměr potrubí, \bar{v} střední rychlost proudění, ρ hustota, η viskozita dynamická, ν viskozita kinematická.

Kritické Reynoldsovo číslo určuje hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním. Pro kruhové potrubí je $Re_{\text{krit}} = 2320$. Jestliže je $Re < 2320$, jedná se o laminární proudění, při $Re > 2320$ jde o turbulentní proudění. V okolí Re_{krit} existuje přechodová oblast, kde nelze o druhu proudění jednoznačně rozhodnout.

Většina přístrojů udává změřený průtok či proteklé množství při provozních podmínkách (tlak, teplota). V případě proměnných stavových veličin se provozní podmínky přepočítávají na určité vztažné podmínky. Moderní přístroje bývají vybaveny elektronickými obvody, které umožňují automatické provádění této korekce. Současný trend vývoje průtokoměrů je zaměřen na přímé měření hmotnostního průtoku, tj. měření nezávislé na teplotě, tlaku a viskozitě měřené tekutiny.

Klasifikace snímačů průtoku a proteklého množství

Snímače používané pro měření průtoku a proteklého množství tekutin lze klasifikovat podle různých hledisek, např. podle používané měřicí metody. Metody měření průtoku se dělí do tří hlavních skupin, a to na metody objemové, rychlostní a hmotnostní, které lze stručně charakterizovat takto:

a) objemové metody:

- odměřování objemu plynu nebo kapaliny v odměrných prostorech,
- cyklické plnění a vyprazdňování odměrných prostor,
- měřítkem proteklého množství je počet měřicích cyklů;

b) rychlostní metody:

- vhodnou metodikou se měří rychlost proudícího media,
- ze znalosti průtočného profilu a průřezu se vypočítává objemový průtok;

c) hmotnostní metody:

- měří se veličina, která je přímo úměrná hmotnostnímu průtoku.

Snímačů průtoku existuje velké množství; v tomto seriálu článků bude věnována pozornost takovým snímačům, které nacházejí uplatnění v cukrovarnictví či v potravinářském průmyslu. Podrobnější přehled snímačů průtoku je možno nalézt v řadě monografií (1 až 3).

Objemová měřidla

Objemové měření průtoku patří mezi absolutní metody. Měřidla využívající tento princip se proto používají pro přesná bilanční měření a jako etalony pro ověřování jiných měřidel průtoku. Objemová měřidla jsou založena na principu odměřování objemu plynu nebo kapaliny v odměrných prostorech. Lze je rozdělit na **měřidla s nespojitou funkcí**, kde průtok je určen

přírůstkem objemu za určitý časový interval, a na **měřidla se spojitou funkcí**. Měřidla s nespojitou funkcí se využívají převážně pro kalibrační účely a mohou sloužit jako etalony průtoku.

Spojité měřidla mají několik odměrných prostorů, které se cyklicky plní a vyprazdňují tak, aby průtok byl spojitý a měření plynulé. Měřítkem objemového průtoku je počet cyklů za jednotku času. Přístroje bývají vybaveny počítadly proteklého množství a používají se především jako měřidla bilanční a jako fakturační měřidla pro obchodní účely v distribučních sítích.

Membránový plynoměr, používaný pro měření množství plynu, je znázorněn na obr. 2. Ve společném pouzdru jsou dvě komory rozdělené koženými membránami, čímž jsou vytvořeny čtyři odměrné prostory I až IV. Každý prostor je spojen hrdlem s rozvodným ústrojím, tvořeným šoupátkem, jejichž pohyb je odvozen od pohybu membrán. V 1. fázi se plní prostory I a IV, vyprazdňují se prostory II a III, v 2. fázi je to opačně. Od pákového ústrojí je odvozen i pohyb počítadla. Membránové plynoměry se používají v distribučních sítích k měření množství topných plynů. Vyrábějí se pro průtoky od desetin až do stovek krychlových metrů za hodinu s nejistotou od $\pm 1,5$ –3 %.

Velmi rozšířeným objemovým měřidlem je **oválové měřidlo** (obr. 3.). V komoře se pohybují dvě oválná tělesa, jejichž pohyb je vzájemně vázán buď ozubením přímo na tělesech, nebo prostřednictvím ozubených kol. Rozdílný tlak na přední a zadní straně těles způsobí jejich otáčení, a tím i odměřování kapaliny. Oválová měřidla se používají k měření množství různých organických kapalin a produktů potravinářského průmyslu (např. etanolu, mléka aj.) a k měření petrochemických produktů. Jsou využívána pro průtoky od jednotek litrů do stovek krychlových metrů za hodinu při tlacích až 2 MPa a teplotě až 300 °C. Při dodržení rozměrů oválových těles a vyloučení prokluzu může být dosaženo i velmi malých nejistot měření (menších než 1 %). Na stejném principu pracují i průtokoměry s rotačními tělesy ve tvaru dětských piškotů i plynoměry s rotačními písty.

Průtokoměry turbínové a lopatkové

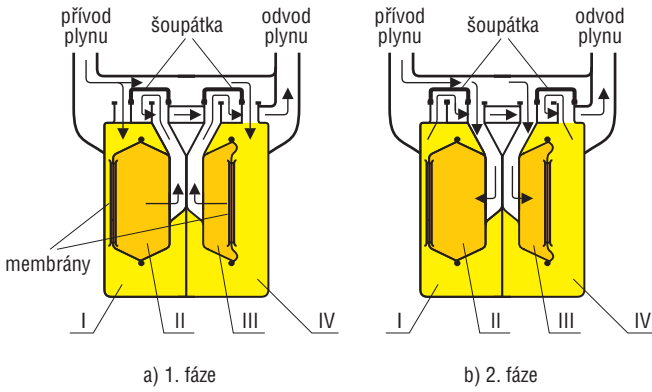
Nejběžnější typy průtokoměrů této skupiny jsou odvozeny od turbíny nebo lopatkového popř. šroubového kola, uváděných do otáčivého pohybu silovým účinkem proudící kapaliny. Rychlost otáčení je úměrná střední rychlosti proudění. Závislost frekvence otáčení f na objemovém průtoku Q_V je popsána Eulerovou turbínovou rovnicí, která vede k jednoduchému tvaru

$$f = k \cdot Q_V - s \quad (5)$$

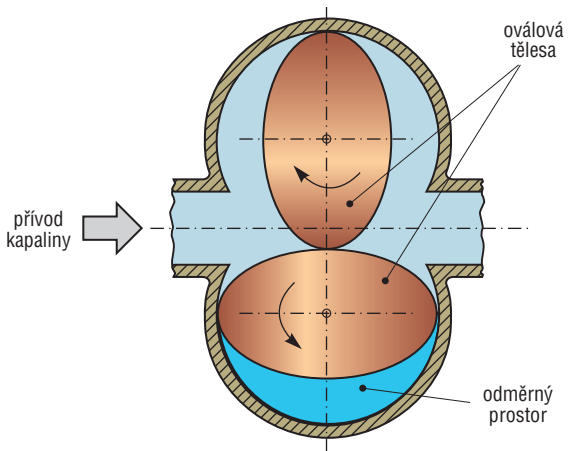
kde k je součinitel měřidla (stanovuje se při kalibraci), s skluz. Skluz je přímo úměrný zatěžovacímu momentu otočné části, tj. rotoru, a je ovlivňován okamžitou hodnotou průtoku. Podle směru proudění vzhledem k ose rotoru rozlišujeme průtokoměry axiální a radiální.

Představitelem **axiálních průtokoměrů** je **turbínový průtokoměr**, jehož schéma je na obr. 4. Rotor je vytvořen z lopatek (obvykle čtyř nebo osmi) připevněných k náboji uloženému v ložiskách. Ložiska jsou upevněna do ramen, která slouží jako usměrňovače proudu. Měřidla se vyrábí v širokém rozmezí měřicích rozsahů až do stovek $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a do potrubí je lze montovat v libovolné poloze. Konstrukčními úpravami v uložení

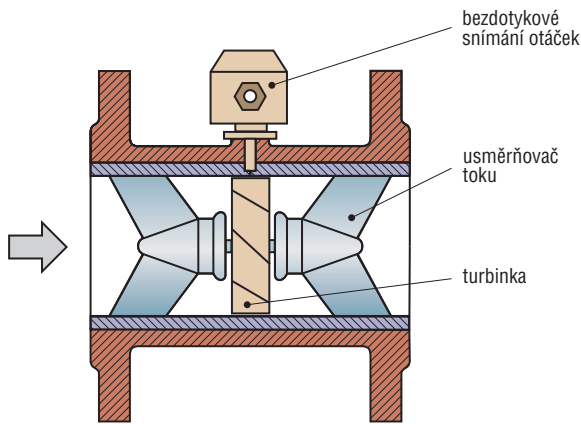
Obr. 2. Membránový plynoměr



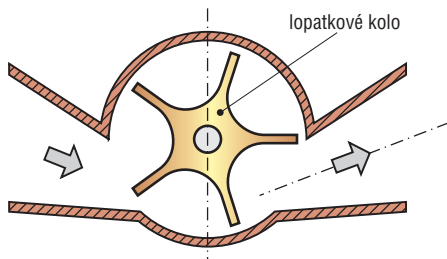
Obr. 3. Schéma oválového měřidla



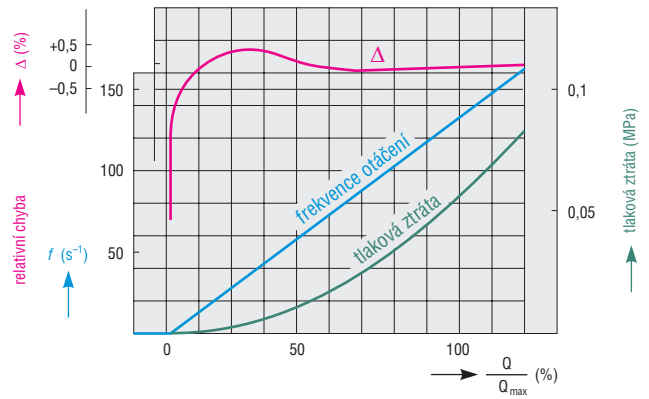
Obr. 4. Turbínový axiální průtokoměr



Obr. 5. Radiální lopatkový průtokoměr



Obr. 6. Charakteristiky radiálního lopatkového průtokoměru



a vhodným způsobem snímání otáček rotoru se dosahuje jeho minimálního momentového zatížení. Turbinové průtokoměry jsou vhodné pro kapaliny i pro plyny.

Pro impulzní snímání otáček se využívají různé snímače, jak mechanické, tak bezdotykové (indukční, fotoelektrické, elektromagnetické, ultrazvukové aj.). Impulzy se dále zesilují a tvarují na obdélníkový průběh. Frekvence otáčení turbíny je úměrná okamžitému průtoku, celkový počet otáček souvisí s proteklým množstvím tekutiny. Bezdotykové snímače jsou výhodné z hlediska číslicového zpracování signálu. Pro zjištění okamžitého průtoku se s konstantní periodou čítají impulzy a není nutný A/D převodník. Při bezdotykovém snímání otáček odpadá nutnost těsnění a přístroje je možno použít i k měření při velkých statických tlacích. Relativní chyba měření může být menší než 0,5 %, provozní tlaky do 30 MPa a teploty od -200 °C do 200 °C.

Princip uspořádání jednovtokového **lopatkového radiálního průtokoměru** je na obr. 5. Osa rotace ploch radiálního lopatkového kola je kolmá k ose vtokového otvoru. Otáčky kola se snímají stejně jako u turbínových průtokoměru.

Společným nedostatkem turbínových a lopatkových průtokoměru je značně velká relativní chyba v počátku stupnice, a také skutečnost, že rotor se začne pohybovat až při dosažení jistého minimálního průtoku Q_{min} , kdy jsou překonány statické pasivní odpory. Do té doby nezaznamenává měřidlo žádné proteklé množství. Současně tyto průtokoměry vykazují poměrně velkou trvalou tlakovou ztrátu. Příklad charakteristiky lopatkového rychlostního měřidla je uveden na obr. 6. Relativní nejistota měřidla se s rostoucím průtokem blíží jisté mezní hodnotě, která se zmenšuje se zvětšováním průtočné plochy měřidla a s růstem počtu rotujících ploch. Běžně využívaný rozsah je od 10 do 100 % maximálního průtoku; v tomto rozsahu je nejistota součinitele $k \pm 0,5 \%$ a může být i 0,25 %. V oblasti pod 10 % rozsahu se významně projevuje tření v ložisku a tření v kapalině a vztah mezi f a Q je značně nelineární. Turbinové průtokoměry vyžadují laminární charakter toku, a proto přímé úseky potrubí před a za měřidlem by měly odpovídat desetinásobku popř. pětinašobku průměru. Tyto průtokoměry nejsou vhodné pro vířící toky.

Vedle zde popsaných základních typů turbínových a lopatkových průtokoměru existuje mnoho jejich dalších modifikací. Přestože turbínový princip patří k nejstarším, nacházejí tyto průtokoměry stále široké uplatnění v praxi. Jsou použitelné pro velký rozsah průměrů potrubí, typicky mezi 5 až 500 mm. Turbinové a lopatkové průtokoměry se často používají k měření proteklého množství pitné i užitkové vody. Změny hustoty mají

velmi malý vliv na výstupní údaj. Nedostatkem těchto přístrojů je, že obsahují pohyblivé se mechanické prvky, jako jsou lopatky a ložiska, náchylné k poškození případnými pevnými částicemi v měřeném médiu.

Souhrn

V článku jsou probrány základní pojmy a definice z oblasti měření průtoku a je uveden příklad klasifikace snímačů průtoku. Podrobněji jsou popsána objemová měřidla pro měření proteklého množství plynu a kapalin, dále pak turbínové a lopatkové průtokoměry. Tyto typy snímačů se používají zejména pro bilanční měření případně jako etalony pro ověřování jiných měřidel průtoku. Často nacházejí uplatnění jako fakturační měřidla pro obchodní účely v distribučních sítích (např. měření spotřeby plynu a vody).

Klíčová slova: měření průtoku – pojmy a definice, klasifikace snímačů průtoku, objemová měřidla, membránové plynoměry, oválová měřidla, turbínové a lopatkové 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. ĎAĎO, S.; BEJČEK, L.; PLATIL, A.: *Měření průtoku a výšky hladiny*. BEN Praha, 2005, s. 45–293.
3. LIPTÁK, B. G.: *Process Measurement and Analysis*. CRC Press, 2003, s. 151–400.

Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Flow Measurement (Part 1)

The article discusses the basic concepts and definitions from the field of flow measurement and gives an example of classification of flow sensors. Volumetric meters for measuring the flow volume of gas and liquids, as well as turbine and paddlewheel flow meters are described in more detail. These sensors are used primarily for fluid balance measurement or as standards for the verification of other flow meters. They are often used as billing meters for commercial purposes in distribution networks (e.g. gas and water consumption readings).

Key words: flow measurement – terms and definitions, classification of flow sensors, volumetric flow meters, positive displacement meters, diaphragm gas meters, oval gear flow meters, turbine and paddlewheel flow meters.

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

OSOBNÍ



Ing. Josef Migdau slaví šedesáté narozeniny

Ing. Josef Migdau, obchodní zástupce osivářské firmy Maribo Seed International ApS, slaví v březnu letošního roku své šedesáté narozeniny. Jubilant se narodil 21. března 1957 v Čáslavi, dětství prožil v nedalekých Žlebech. Po absolvování Střední zemědělské technické školy v Čáslavi v letech 1972–1976 pokračoval ve studiu na fyto technickém oboru Vysoké školy zemědělské v Praze.

Po ukončení vysokoškolských studií v roce 1981 a roční vojenské prezenční službě nastoupil v roce 1982 do zemědělské praxe v JZD Potěhy, na okrese Kutná Hora, jako střediskový agronom. Jeho živý zájem o problematiku ochrany a výživy rostlin jej v roce 1991 přivedl na pozici agronoma specialisty pro ochranu a výživu rostlin v téměř podniku, v té době již pod názvem Zemědělské obchodní družstvo Potěhy. V roce 2006 se stal hlavním agronomem tohoto podniku, který patří a stále patří k předním podnikům pěstujícím cukrovou řepu v Čechách. V rámci svého působení prováděl celou řadu pokusů a ověřování systémů ochrany cukrovky proti škůdcům, chorobám a plevelům. Byl průkopníkem a propagátorem nových metod v hnojení cukrové řepy a aplikaci listových hnojiv i biologicky aktivních látek.

V letech 2006–2007 působil také jako člen představenstva Svazu pěstitelů cukrovky Čech, do jehož činnosti se aktivně zapojil.

V roce 2012 byl osloven osivářskou firmou pro cukrovku Maribo Seed, aby se o své bohaté zkušenosti z praxe podělil i s řadou dalších zemědělců v řepářských oblastech Čech. Tuto nabídku přijal a do dnešního dne pracuje jako obchodní zástupce a poradce firmy pro oblast cukrovarnické společnosti Tereos TTD v Dobrovici.

Při své práci využívá svých bohatých celoživotních zkušeností a agronomického citu pro pěstování nejen cukrovky, ale řady dalších polních plodin. Je řadou pěstitelů zván k odborným konzultacím a poradenství především při pěstování cukrové řepy.

Práce pro Ing. Josefa Migdaua vždy byla a je hlavním předmětem zájmu, stala se mu tak zároveň i koníčkem; tím je také myslivost, které se věnuje od roku 1976.

Přejeme jubilantovi pevné zdraví, úspěchy a spokojenost v práci i dobrou pohodu a radost v rodinném kruhu.

Vít Bittner