

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření průtoku (část 4.)

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: FLOW MEASUREMENT (PART 4)

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Společným znakem indukčních, ultrazvukových a vírových průtokoměrů je, že tyto snímače měří rychlost proudícího média v potrubí o známém průřezu a hodnotu průtoku vyhodnocují jako součin průřezu a rychlosti. Dalším jejich společným znakem je, že poskytují elektrický výstupní signál (analogový i číslicový) vhodný pro další zpracování. Každý z uvedených průtokoměrů má však své přednosti i určitá omezení. Ve 3. části byly popsány indukční průtokoměry, 4. část je věnována průtokoměrům ultrazvukovým a vírovým.

Ultrazvukové průtokoměry

Podle vyhodnocení ultrazvukového signálu se ultrazvukové průtokoměry rozdělují nejčastěji do dvou hlavních skupin:

- průtokoměry s vyhodnocováním doby průchodu signálu (*transit-time flowmeters*),
- průtokoměry využívající Dopplerův jev.

U každé z těchto skupin lze nalézt další podrobnější způsoby členění. Z hlediska montáže průtokoměru do potrubního systému rozeznáváme:

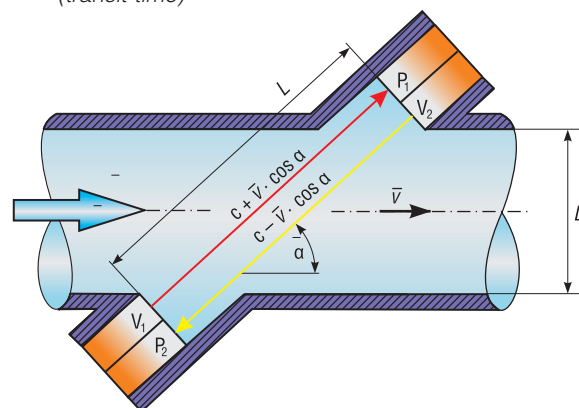
- provedení se smáčenými (zásuvnými) snímači (*in-line*), které jsou pevnou součástí měřicí trubice,
- provedení s příložnými snímači (*clamp-on*), kdy snímače jsou přikládány na stěnu potrubí; v tomto případě jde o bezdotykové měření.

UZ průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu

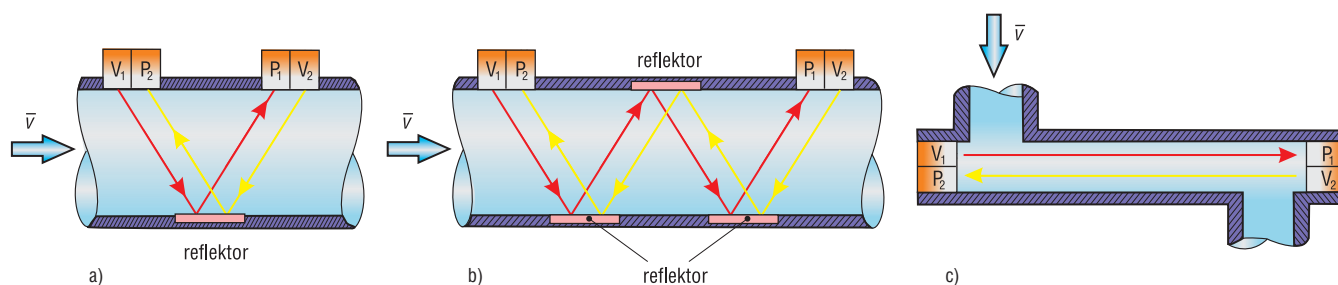
Základem průtokoměru je vysílač a přijímač ultrazvukového vlnění. Nejčastěji se používají **piezoelektrické měniče**, které mohou pracovat jak ve funkci vysílače (generátoru), tak ve funkci přijímače ultrazvuku. Frekvence vlnění závisí na rezonanční

frekvenci piezoelektrického měniče a obvykle je 0,5 až 1 MHz. Ultrazvukový průtokoměr je tvořen měřicí trubicí, ve které je zabudován jeden nebo více párů **vysílače a přijímače ultrazvukového signálu**. Průtokoměry jsou velmi často konstruovány v **diferenčním zapojení**, kdy je ultrazvukový signál vyslán jednak ve směru a jednak proti směru proudění. Principiální schéma takového průtokoměru se dvěma páry vysílače a přijímače ultrazvukových impulzů je znázorněno na obr. 1.

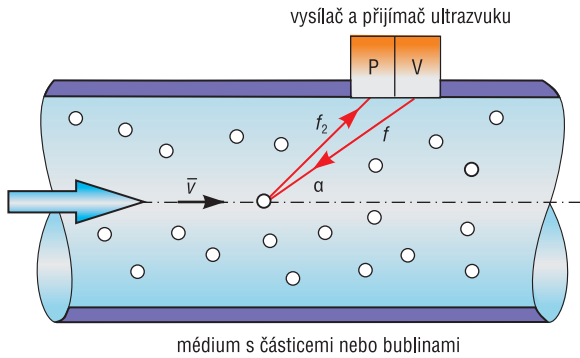
Vysílač V_1 vysílá impulzy ve směru proudění, vysílač V_2 proti směru proudění. Ultrazvukový impulz vyslaný vysílačem V_1 se šíří rychlostí $c + \bar{v} \cos \alpha$ kde c je rychlost šíření ultrazvuku v daném prostředí a \bar{v} je střední rychlost proudícího média; rychlost šíření impulzu od vysílače V_2 je $c - \bar{v} \cos \alpha$. Z naměřených dob mezi vysláním a příjmem impulzu pro jednotlivé dvojice vysílače a přijímače lze odvodit vztah pro výpočet střední rychlosti proudící tekutiny a při známém průřezu potrubí lze vypočítat i objemový průtok. Kompletní odvození výpočetních vztahů je uvedeno v (1).

Obr. 1. UZ průtokoměr s vyhodnocením doby průchodu signálu (*transit-time*)

Obr. 2. Umístění ultrazvukových měničů v měřicí trubici



Obr. 3. Princip Dopplerova průtokoměru



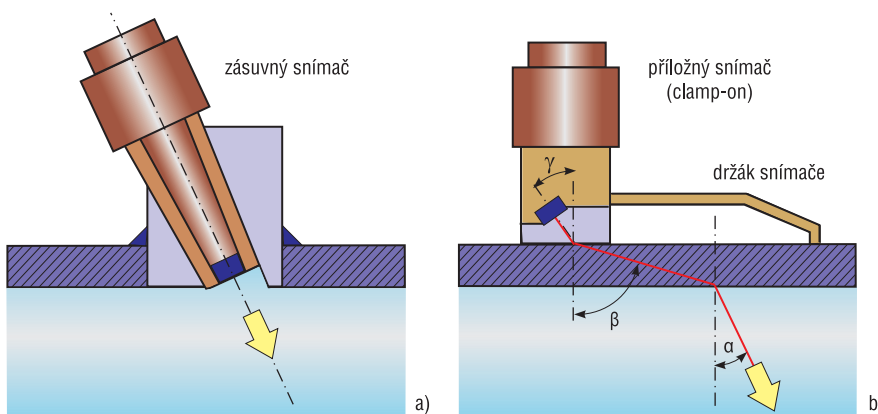
Větší citlivost měření se získá prodloužením dráhy mezi vysílačem a přijímačem ultrazvuku. Využívá se odraz od protější stěny potrubí, popř. od zabudované odrazové plochy, tzv. reflektoru (obr. 2. a), nebo opakovaný odraz od několika reflektorů umístěných v měřicí trubici (obr. 2. b). U potrubí s malými světlostmi se používá axiální uspořádání (obr. 2. c).

UZ průtokoměry využívající Dopplerův jev

Průtokoměr založený na Dopplerově jevu lze použít v případě, že proudící médium obsahuje částice odražející zvuk, tj. např. pevné částice či bubliny plynu v kapalině. Bez přítomnosti těchto částic nemůže průtokoměr tohoto typu pracovat. Průtokoměr se skládá z vysílače a přijímače ultrazvuku, které mohou být připevněny na jedné nebo obou stranách potrubí.

Ultrazvukový signál o známé frekvenci přibližně 1,2 MHz je vysílačem vyslán do proudící kapaliny (obr. 3.). Vysílaný signál se odráží od pohybující se částice či bubliny a jeho frekvence se podle Dopplerova jevu změní. Při zachycení odraženého signálu přijímačem dochází opět ke změně frekvence. Elektronické obvody převodníku vyhodnotí rozdíl mezi frekvencí vysílaného a přijímaného signálu, který je úměrný rychlosti proudícího média. Vhodným zpracováním signálu lze zjistit střední rychlost průtoku měřené tekutiny. Podrobné odvození výpočetních vztahů je uvedeno v (1). Průtokoměry tohoto typu vyžadují koncentraci suspendovaných částic či bublin nejméně 25 ppm a jejich velikost by měla být 30 μm nebo více. Nejistota měření

Obr. 4. Zásuvný a příložený snímač ultrazvukového průtokoměru



záleží na rychlostním profilu proudícího média, na obsahu a velikosti částic a velikosti potrubí. Kalibrací lze dosáhnout nejistoty ±1 %.

UZ průtokoměry se zásuvnými a příložnými snímači

Elektroakustické měniče ultrazvukového průtokoměru mohou být v těsném bezprostředním styku s měřenou kapalinou – tak tomu je u průtokoměru se **zásuvnými (smáčenými) snímači** (obr. 4. a). Mohou však být instalovány na potrubí z vnějšku – u průtokoměru s **příložnými snímači (clamp-on)** (obr. 4. b). Ultrazvukový signál mění rychlost a směr šíření i při průchodu stěnou potrubí, jak je vyznačeno na obrázku.

Příložné průtokoměry měří bezdotykově a neovlivňují měřený průtok, protože nezasahují do proudícího média. Mohou být na potrubí instalovány, aniž by bylo nutné přerušit provoz. S výhodou je lze využít k měření průtoku kalů a znečištěných tekutin, které běžným průtokoměrům způsobují těžkosti.

Vlastnosti ultrazvukových průtokoměrů

Ultrazvukové průtokoměry patří do skupiny moderních průtokoměrů spolu s průtokoměry indukčními a vírovými; vykazují však některé významné přednosti. Ve srovnání s indukčními průtokoměry mají tu výhodu, že s nimi lze měřit nevodivé kapaliny, plyny a páry. Ultrazvukové průtokoměry jsou schopné měřit i malé průtoky, kde již není vhodné použít vírový průtokoměr. Oproti ostatním typům průtokoměrů, jako jsou např. průřezová měřidla a turbínové průtokoměry, mají ultrazvukové průtokoměry přesvědčivé výhody v tom, že neobsahují pohyblivé součásti, tlaková ztráta je téměř nulová a vyžadují jen minimální údržbu.

Použití ultrazvukových průtokoměrů

UZ průtokoměry jsou sice náročné na technické provedení, mají však mnoho předností. Nezasahují do proudícího média a příložné snímače je možné dodatečně instalovat na povrch potrubí. Jsou použitelné k měření kapalin, plynů i nasycené páry, mohou pracovat v libovolné poloze a měřit proudění v obou směrech. Lze je využít při měření malých i velkých průtoků jak čistých, tak znečištěných a agresivních kapalin, k měření pulzujících průtoků a k měření kalů i za vysokých teplot. Potrubí může mít průměr od několika milimetrů až do několika metrů.

Dopplerovy průtokoměry nevykazují vysokou přesnost, jsou to však nenákladné přístroje pro monitorování průtoku. Jsou vhodné pro znečištěné tekutiny a nachází využití při měření kalů, odpadních tekutin, v kanalizaci, v provozech odpadních vod.

Ultrazvukové průtokoměry jsou velmi univerzální. Pouze velmi málo tekutin vede zvuk tak špatně, že nelze průtokoměr použít. Nepříznivý vliv může mít vysoký obsah bublin nebo suspendovaných částic,

kteří způsobí útlum ultrazvukových vln. Obtíže vznikají např. při měření suspenzí obsahujících vápno či kaolin. Bubliny v proudícím médiu obecně způsobují větší útlum akustického signálu než pevné částice, proto je lze méně tolerovat. UZ průtokoměry nacházejí široké uplatnění v různých odvětvích průmyslu k měření průtoku pitné i užitkové vody, odpadních a znečištěných vod a kalů, k měření průtoku teplotných a chladicích médií, v potravinářském a farmaceutickém k měření i za přísných hygienických podmínek.

Vírové průtokoměry

Princip tvorby vírů v proudícím médiu je znám již dlouho, ale teprve po roce 1970 byl tento jev využit ke konstrukci průtokoměru. U vírového průtokoměru se využívá tvorba tzv. *Kármánových vírů*, které vznikají při obtékání tělesa nepravidelného tvaru umístěného kolmo na směr proudění. Při oddělování vírů dochází k místnímu nárůstu rychlosti a poklesu tlaku na jedné straně a opačně k poklesu rychlosti a s tím spojenému nárůstu tlaku na druhé straně.

Princip vírového průtokoměru

Vytváření vírů za přepážkou deltového tvaru vloženou do proudícího média je znázorněno na obr. 5. Víry vznikají pravidelně a střídavě na jedné a druhé straně přepážky (s posunutím o 180°). Víry vznikající na jedné straně přepážky jsou od sebe stejně vzdáleny. V okamžiku oddělení víru dochází k místnímu zvýšení tlaku a poklesu rychlosti na jedné straně a opačně na druhé straně přepážky a děj se opakuje. Víry se vytvářejí s frekvencí, která je úměrná rychlosti průtoku tekutiny. Proudnice s víry vznikají na obou stranách přepážky, formují se dvě vířivé řady, vzniká tzv. *Kármánova stezka*, kterou charakterizují parametry a , b .

Pro frekvenci vytváření vírů f platí v určitém rozsahu lineární závislost na střední rychlosti proudění \bar{v} :

$$f = \frac{Sr}{d} \cdot \bar{v} \quad (1),$$

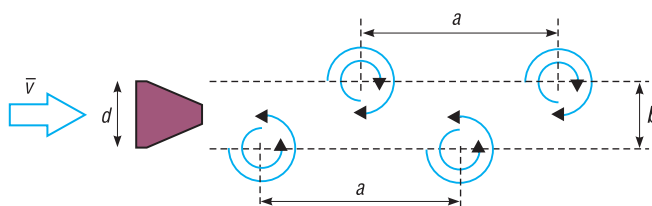
kde Sr je Strouhalovo číslo, d charakteristický rozměr přepážky (např. šířka přepážky).

Strouhalovo číslo závisí na tvaru a rozměrech vloženého tělesa a na světlosti potrubí D ; jeho hodnota je konstantní v poměrně široké oblasti proudění. Pokud průtokoměr pracuje v takové oblasti Reynoldsova čísla, kde je možno Strouhalovo číslo považovat za konstantní, je frekvence tvorby vírů přímo úměrná rychlosti proudění a není závislá na vlastnostech měřeného média jako je hustota, viskozita, teplota, tlak nebo elektrická vodivost.

Uspořádání vírového průtokoměru

Vírový průtokoměr tvoří dvě základní součásti: vírové těleso a senzor vytvářených vírů. Senzor může být integrovanou součástí vírového tělesa, nebo

Obr. 5. *Kármánova vírová stezka*



je umístěn odděleně. Na obr. 6. je nakreslen příklad uspořádání průtokoměru s oddělenou detekcí vírů. Při periodické tvorbě vírů na obou stranách vírového tělesa dochází k tlakovým změnám, které jsou snímány senzorem tlaku. Frekvence výstupního signálu senzoru tlaku je stejná jako frekvence vznikajících vírů.

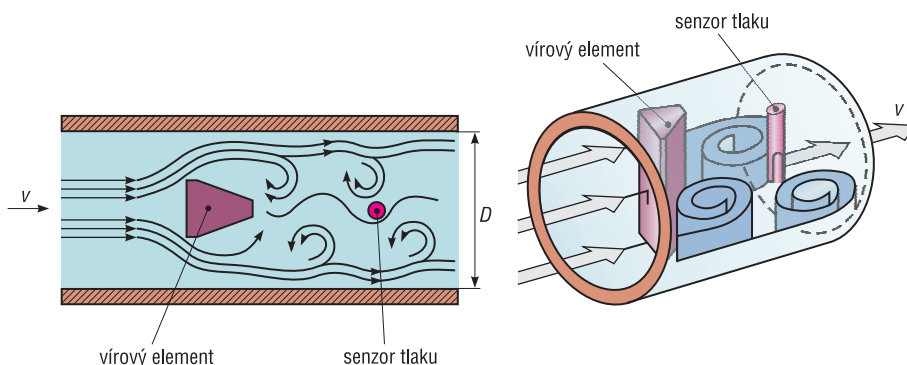
Různé typy vírových průtokoměru se liší zejména tvarem a rozměry vírového tělesa (*bluf body*), místem a principem snímání frekvence vzniklých vírů. Tvar vírového tělesa má rozhodující vliv na stabilitu periodické tvorby vírů. Nejlépe vyhovují hranolovitá tělesa s rovnou čelní stěnou a definovanou rovinou snímání vírů. V současnosti se nejvíce používají tělesa deltového nebo lichoběžníkového tvaru s ostře ohraničenou náběžnou hranou (obr. 7. a, b). Přepážky těchto tvarů existují v mnoha variacích a vykazují vynikající linearitu závislosti podle vztahu (1). Dvoudílné vírové těleso podle obr. 7. c kombinuje delta tvar přepážky, kde se vytvářejí víry, s tělesem, ve kterém je umístěn senzor pro měření frekvence vírů. Vírová tělesa tvaru T (obr. 7. d) využívají vynikající vlastnosti delta tvaru a možnost integrovaného uložení senzoru.

Pro snímání vírů lze využít buď odpovídající změny tlaku, nebo změny rychlosti. Místem snímání může být vložené vírové těleso, stěna potrubí, popř. jiná místa ve vírové oblasti. Měřenou veličinou u vírového průtokoměru je frekvence tvorby vírů. Jako senzory tlaku se používají senzory kapacitní, piezoelektrické, a tenzometrické. Senzory používané k detekci vírů v minulosti se potýkaly s citlivostí na vibrace potrubí, které byly zejména příčinou chybných údajů při nulovém průtoku. U moderních vírových průtokoměru se tento problém podařilo do značné míry překonat. Podrobný popis funkce senzorů pro detekci vírů je uveden v literatuře (1 a 2).

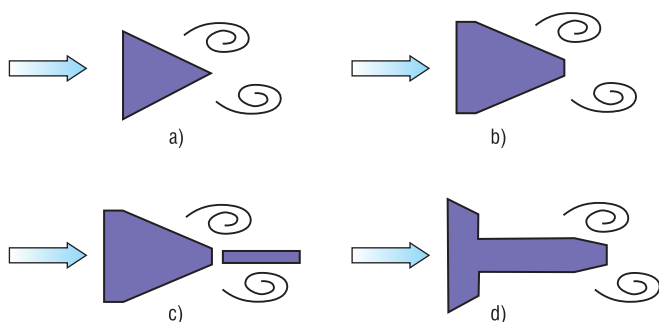
Vlastnosti vírového průtokoměru

Objemový průtok měřeného média se počítá z naměřené frekvence v elektronické jednotce převodníku.

Obr. 6. *Principiální uspořádání vírového průtokoměru*



Obr. 7. Tvary vírového tělesa



Pro objemový průtok Q_V platí:

$$f = \frac{Sr}{d} \cdot \frac{4 \cdot Q_V}{\pi \cdot D^2} = K \cdot Q_V \quad (2),$$

kde K je tzv. **K-faktor** průtokoměru, který udává počet impulzů odpovídající objemu proteklému za jednotku času.

K -faktor je důležitou veličinou, která charakterizuje vírový průtokoměr a velmi těsně souvisí se Strouhalovým číslem Sr . Hodnota K -faktoru je konstantní v širokém rozsahu hodnot Re . Většina vyráběných vírových průtokoměrů splňuje přesnost udávanou výrobcem v intervalu $10^4 < Re < 10^7$. K -faktor závisí pouze na geometrii vírového tělesa. Jeho hodnota se získává kalibračním měřením při výrobě průtokoměru. Naměřená jedinečná hodnota je pro každý průtokoměr uložena v paměti elektroniky měřidla; je uvedena na výrobním štítku přístroje a platí po celou dobu jeho životnosti. Nezmění-li se rozměry přepážky např. v důsledku eroze či koroze, nezmění se ani K -faktor a průtokoměr není nutno periodicky kalibrovat. Hodnota K -faktoru není závislá na typu média a průtokoměr lze používat pro plyny, páry a kapaliny beze změny senzoru. V rozmezí konstantnosti hodnoty K -faktoru není výstupní údaj průtokoměru ovlivňován změnami hustoty, teploty a tlaku.

Frekvence tvorby vírů se pohybují v jednotkách až tisících Hz v závislosti na rychlosti proudění a velikosti přístroje. Frekvence vírů při proudění plynů jsou přibližně desetkrát větší než u kapalin, což je dáno větší rychlostí proudění plynu než kapaliny ve stejném potrubí. Frekvence vírů u průtokoměrů menší velikosti jsou obvykle větší než u větších měřidel (3).

Použití vírových průtokoměrů

Vírové průtokoměry nacházejí široké uplatnění zejména jako náhrada klasických průřezových měřidel. Instalace vírových průtokoměrů je oproti průřezovým měřidlům jednodušší. Bývají k dispozici pro potrubí o světlosti od 15 do 400 mm k měření průtoku od jednotek až po tisíce krychlových metrů za hodinu. Vyznačují se velkým měřicím rozpětím tj. poměrem maximální a minimální měřené hodnoty. Skutečnost, že vírový průtokoměr není schopen měřit od nulového průtoku, není na překážku např. při regulaci průtoku na žádanou hodnotu. Může to však být na závalu při najíždění nebo odstavování procesu, když je třeba měřit průtoky mnohem menší než za provozních podmínek. Podobné problémy mohou nastat při dávkování nějaké látky a je

třeba podchytit i médium tekoucí malou rychlostí na počátku či ke konci dávkování. Pro takové případy není vírový průtokoměr vhodný.

Vírový průtokoměr je velmi vhodný pro měření průtoku vzduchu, technických plynů a syté i přehřáté páry. Je-li měření průtoku páry doplněno o měření teploty a tlaku je možno výhodnocovat i hmotnostní průtok. Používá-li se pára k vytápění, je účelné vyhodnocení tepelného výkonu.

Vírové průtokoměry lze použít pro měření průtoku mnoha kapalin a na rozdíl od indukčních průtokoměrů nezáleží na elektrické vodivosti média. Lze s nimi měřit i kapalně uhlovodíky, demineralizovanou vodu, kondenzát či napájecí vodu pro kotle. Uplatnění nacházejí při měření průtoků během procesů CIP a SIP v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Vírové průtokoměry mohou být provozovány při mnohem vyšších teplotách a tlacích než indukční průtokoměry.

Souhrn

V článku je vysvětlen princip ultrazvukových průtokoměrů. Jsou popsány UZ průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu a průtokoměry využívající Dopplerův jev. Jsou uvedeny průtokoměry se zásuvnými a příložnými snímači. Dále je vysvětlen princip vírového průtokoměru a je popsáno konstrukční uspořádání měřidla. Jsou diskutovány vlastnosti ultrazvukových a vírových průtokoměrů a ukázány možnosti jejich využití při provozním měření.

Klíčová slova: ultrazvukové průtokoměry; ultrazvukové průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu; Dopplerovy průtokoměry; vírové průtokoměry.

Literatura

- 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.
- KADLEC, K.: Vírové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití. *Automa* 20, 2014, (10), s. 34–39.
- McMILLAN G. K.; CONSIDINE D. M.: *Process/Industrial Instruments and Controls Handbook*. McGraw/Hill, New York, 1999, s. 4.126–4.127.

Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Flow Measurement (Part 4)

The article explains the principle of ultrasonic flowmeters. Transit-time ultrasonic flowmeters and Doppler flowmeters are listed. Flowmeters with in-line and clamp-on ultrasonic transducers are shown. The principle of vortex flowmeter is explained and the design of the gauges is described. Properties of the ultrasonic and vortex flowmeters are discussed and their applications for process measurements are shown.

Key words: ultrasonic flowmeters; transit-time ultrasonic flowmeter; Doppler ultrasonic flowmeters; vortex 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