

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření průtoku (část 3.)

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: FLOW MEASUREMENT (PART 3)

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Indukční průtokoměry

Indukční průtokoměry jsou využívány k průmyslovému měření průtoku již více než 50 let a stále nacházejí široké uplatnění v mnoha oborech a hojně se využívají také v potravinářském průmyslu. Vzhledem k tomu, že se tento typ průtokoměru velmi často používá k měření různých provozních médií v cukrovarnictví, je věnována jeho popisu celá část 3.

V odborných publikacích se čtenář setká s různým označením: průtokoměr **indukční**, **magneticko-indukční**, **elektromagnetický**, **magnetický**. Označení indukční průtokoměr je v souladu s ČSN EN 24006 a vychází z toho, že měřicí princip se nejčastěji vysvětluje Faradayovým indukčním zákonem.

Princip indukčního průtokoměru

Podle Faradayova zákona vzniká při pohybu vodiče v magnetickém poli napětí jako důsledek časové změny magnetického toku. Na obr. 1. je znázorněno principiální schéma indukčního průtokoměru. Pohybující se vodič je představován sloupcem elektricky vodivé kapaliny mezi dvěma elektrodami. Při proudění se tento vodič pohybuje stejnou rychlostí jako kapalina. Permanentní magnet nebo elektromagnet vytváří magnetické pole, které prochází potrubím i kapalinou. Úsek potrubí mezi póly

magnetu musí být z nemagnetického a nevodivého materiálu. Na vnitřním průměru měřicí trubice jsou zabudovány dvě elektrody pro snímání indukovaného napětí. Spojnice elektrod je kolmá na směr magnetických siločar. Pohybuje-li se kapalina napříč magnetickým polem o indukci B rychlostí v , indukuje se na elektrodách napětí U , jehož velikost je podle Faradayova zákona dána vztahem:

$$U = B \cdot d \cdot v \quad (1),$$

kde d je délka vodiče (vzdálenost elektrod); vektory B a v jsou navzájem kolmé.

Ze vztahu (1) je zřejmé, že signálové napětí snímané na elektrodách průtokoměru je lineární funkcí rychlosti proudění. Objemový průtok Q_v je možno vypočítat jako součin rychlosti proudění a průtočného průřezu. V praxi je situace poněkud složitější, protože měřená kapalina se v potrubí nepohybuje stejnou rychlostí a rychlostní profil odpovídá příslušnému charakteru proudění. Za jistých předpokladů platí, že indukované napětí je úměrné střední rychlosti kapaliny v trubici. Po dosazení do vztahu (1) se dospěje pro průtokoměr s kruhovým průřezem o průměru d ke vztahu:

$$U = B \cdot d \cdot \frac{4 Q_v}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot B}{\pi \cdot d} \cdot Q_v \quad (2),$$

a za předpokladu konstantní magnetické indukce a vzdálenosti elektrod dostaneme základní vztah pro indukční průtokoměr:

$$U = K \cdot Q_v \quad (3),$$

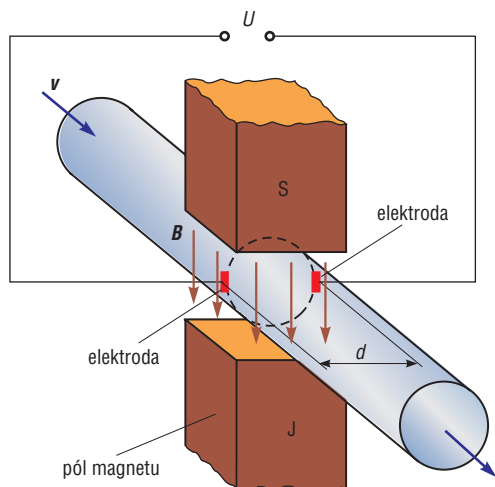
kde K je konstanta, která zahrnuje charakteristické vlastnosti měřidla. Hodnota K se určuje při kalibraci průtokoměru vodou. Takto stanovená hodnota pak platí pro každou vodivou kapalinu. Vzhledem k tomu, že lineární závislost (3) platí v celém rozsahu průtokoměru, provádí se kalibrace jen při jedné hodnotě průtoku. Při změně směru toku se změní polarita signálu.

Konstrukce indukčního průtokoměru

Na obr. 2. je zobrazeno schéma uspořádání indukčního průtokoměru. Průtokoměr tvoří tři základní komponenty: měřicí trubice, elektromagnet a elektrody. Tyto prvky jsou vestavěny do pouzdra, které musí být v souladu s provozními podmínkami.

Elektromagnet je tvořen obvykle soustavou dvou tvarovaných cívek umístěných v elektricky a magneticky stíněném

Obr. 1. Princip indukčního průtokoměru



Poznámka: Jiné vysvětlení principu měření vychází z Lorentzova zákona o působení magnetické síly na náboj, který se pohybuje v magnetickém poli a elektrické síly na tento náboj v elektrickém poli. Odvození je možno nalézt v literatuře (1, 3).

krytu. K buzení magnetického pole cívek lze využít proud stejnosměrný, střídavý nebo stejnosměrné pulzy. Nejčastěji je využíváno *buzení stejnosměrnými pulzy* obdélníkového nebo lichoběžníkového průběhu o frekvenci 7 až 30 Hz. Problematika buzení magnetického pole je velmi podrobně popsána v literatuře (2, 3).

Snímací elektrody snímají signální indukované napětí a jsou v přímém kontaktu s proudící kapalinou. Materiál elektrod musí vykazovat velmi dobrou elektrickou vodivost a odolnost proti působícím provozním vlivům (abraze, chemické působení). Soustava elektrod bývá nejčastějším zdrojem závad, které jsou vyvolány korozí či abrazí elektrod, zanášením úsadami anebo porušením jejich těsnosti.

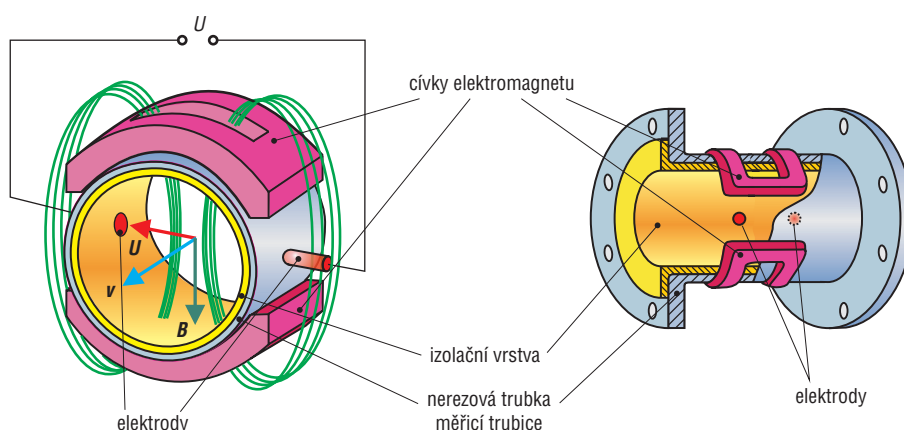
Někteří výrobci nabízejí indukční průtokoměry s kapacitními elektrodami, které nejsou v kontaktu s měřeným médiem (obr. 3.b). Měřicí elektronika vyhodnocuje náboj vyvolaný pohybující se kapalinou v magnetickém poli, který vzniká na izolovaných plošných elektrodách. Signál z kapacitních elektrod lze použít i pro vyhodnocení zaplnění trubice kapalinou.

Elektronické obvody potřebné pro řízení napájení magnetického obvodu a pro vyhodnocení napěťového signálu snímaného na elektrodách jsou součástí převodníku, který může být integrální součástí průtokoměru anebo je umístěn odděleně. Moderní převodníky řízené mikroprocesory zajišťují zpracování signálu z elektrod (zesílení, digitální filtraci, potlačení rušivých signálů) a obvykle poskytují několik nezávislých výstupů (proudový, napěťový, frekvenční, pulzní, digitální výstupy a rozhraní, indikace na displeji). Elektronické obvody

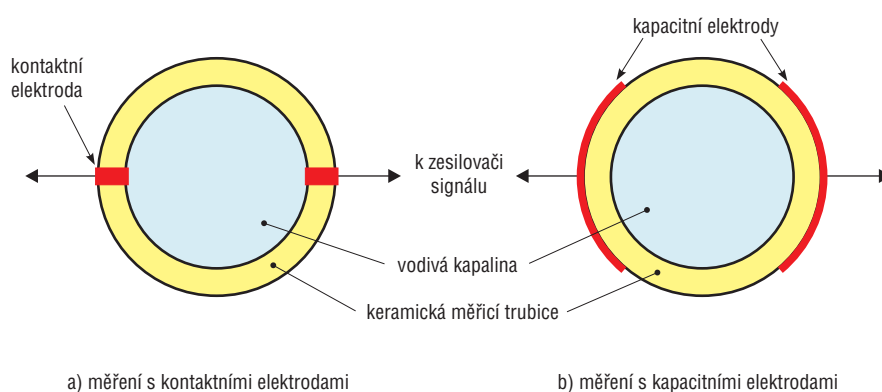
mohou zajišťovat i diagnostiku průtokoměru (zaplnění potrubí, zkrat, korozi a usazeniny na elektrodách, deformaci izolační výstelky aj.).

Příklady provedení indukčních průtokoměrů jsou na obr. 4. Na obr. 4.a je průtokoměr *ABB FEP300* (www.abb.com/cz), který může komunikovat prostřednictvím protokolu HART, Foundation Fieldbus a Profibus PA, je vybaven diagnostickými funkcemi

Obr. 2. Základní součásti indukčního průtokoměru



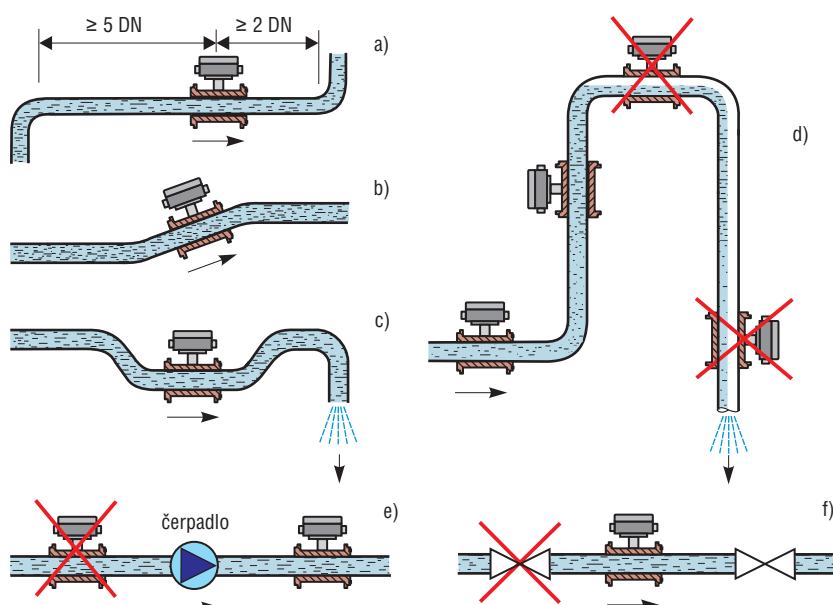
Obr. 3. Měření s kontaktními a kapacitními elektrodami



Obr. 4. Indukční průtokoměry: a) ABB FEP300 (www.abb.com/cz), b) Optiflux 7300 (cz.krohne.com), c) Proline Promag 10P (www.cz.endress.com)



Obr. 5. Umístění indukčního průtokoměru



a umožňuje např. detekci prázdného potrubí. Na obr. 4.b je průtokoměr *Optiflux 7300* (cz.krohne.com) vybavený kapacitními elektrodami a keramickou výstelkou. Jelikož elektrody nejsou v kontaktu s měřeným médiem, nemůže docházet k nežádoucím reakcím měřeného média s kovovými elektrodami. Na bezkontaktních elektrodách se navíc nemohou vytvářet povlaky ani inkrustace. Hladká a neporézní keramická výstelka měřicí trubice je velmi tvrdá, dokonale těsná, mimořádně chemicky odolná a odolává procesům CIP/SIP; je tedy velmi vhodná pro aplikace s vysokými nároky na hygienu např. v potravinářství nebo ve farmacii. Průtokoměr *Promag 10P* (www.cz.endress.com) na obr. 4.c je určen pro měření kapalin s korozivními účinky při teplotách až 180 °C.

Vliv měřeného média na výsledky měření

Ve specifikaci indukčních průtokoměrů je vždy uváděno, že **elektrická vodivost měřené kapaliny** musí být větší než určitá hodnota. Jak vyplývá ze vztahu (1) či (2) signál průtokoměru není závislý na vodivosti média. U všech elektrických obvodů pro měření napětí musí vstupním obvodem protékat malý elektrický proud. Impedance tohoto obvodu musí být mnohem větší, než je

impedance ostatních částí obvodu. Požadavek na minimální vodivost tedy souvisí s impedancí použitého převodníku. U běžných indukčních průtokoměrů se minimální elektrická vodivost média pohybuje v rozmezí 1–5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Měrné vodivosti vybraných látek jsou uvedeny v tab. I. Z tabulky je zřejmé, že destilovaná voda nesplňuje požadavek minimální vodivosti, ale většina vodných roztoků je bezpečně nad požadovaným minimem. Požadovanou vodivost naopak nemá většina organických látek a olejů.

Bublínky plynu (nejčastěji vzduchu) rozptýlené v tekutině způsobují, že hodnota výstupního signálu je větší, než odpovídá objemovému průtoku kapaliny. Při větších bublinách nebo pěně bude signál zatížený šumem; bubliny velkých rozměrů (srovnatelných s rozměrem elektrody) mohou vést i k přerušení měření.

Usazeniny v měřicí trubici zmenšují průřez, čímž zvyšují rychlost proudění a tedy i signál na elektrodách. Vodivé usazeniny na elektrodách a na vnitřní straně měřicí trubice

významně ovlivní výstupní napětí snímače, v krajním případě mohou způsobit i krátké spojení se zemnicím kontaktem. Nevodivé usazeniny mohou elektricky izolovat elektrody od měřené tekutiny. Některé typy průtokoměrů bývají vybaveny mechanickými systémy pro čištění elektrod.

Změny hustoty měřeného média nemají žádný vliv na objemový průtok, který udává indukční průtokoměr. Ani **změny viskozity** výsledek měření neovlivňují. To ovšem neplatí pro newtonovské tekutiny, jejichž viskozita závisí na rychlosti proudění.

Rychlostní profil má minimální vliv na přesnost měření. Průtokoměr pracuje spolehlivě jak při laminárním, tak při turbulentním charakteru proudění. Signál průtokoměru mohou ovlivňovat turbulence a víření způsobené ventily, čerpadly a ohyby potrubí. Doporučuje se instalovat průtokoměr tak, aby před ním byl rovný úsek o délce 5D a za ním 2D (obr. 5.a).

Vlastnosti indukčního průtokoměru

Využitelný **měřicí rozsah** není u průtokoměru omezen vlastním měřicím principem, reálný měřicí rozsah však omezen je. Reálně využívaný rozsah rychlostí je 0,1–12 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, což odpovídá dynamickému rozsahu měření $Q_{\max} : Q_{\min} = 120 : 1$. Maximální průtok by měl být optimálně v rozmezí rychlosti proudění asi 2–3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při rychlostech vyšších než 5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ již může být významněji narušena vložka měřicí trubice, zejména při měření suspenzí.

Přesnost indukčních průtokoměrů se obvykle vyjadřuje jako relativní chyba vztažená k rozsahu přístroje a běžně je od 0,2 do 0,5 %. Vyráběné snímače pokrývají světlosti potrubí od DN 2 až do DN 3 000.

Výstupní signál indukčního průtokoměru prakticky **nezávisí na teplotě a tlaku**. Maximální provozní teplota průtokoměru je závislá především na použitém materiálu měřicí trubice i její vložky a pohybuje se do 150–180 °C. Je třeba zdůraznit, že výběr materiálu a konstrukční provedení snímače mají zásadní vliv na užitečné vlastnosti indukčního průtokoměru.

Tab. I. Měrné vodivosti vybraných látek

Látka	Měrná vodivost ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
Demineralizovaná voda	0,01
Pitná voda	200 až 800
Těžká štáva	až $9 \cdot 10^3$
Zelený sirob	až $14 \cdot 10^3$
Melasa	až $36,5 \cdot 10^3$
Ethanol	0,2
Benzin	$1 \cdot 10^{-8}$

Zásady správného umístění indukčního průtokoměru ilustruje obr. 5. Při instalaci průtokoměru má zásadní význam míra zaplnění průtočného průřezu snímače. Přístroj lze do potrubí zabudovat v libovolné poloze. Průtočný průřez však musí být zcela zaplněn, protože signál je úměrný rychlosti průtoku a objemový průtok se vyhodnocuje ze součinu rychlosti a průtočného průřezu. Existují však i takové typy indukčních průtokoměrů, u nichž se nedostatečné zaplnění potrubí zjišťuje pomocnou elektrodou a elektronický obvod signalizuje poruchový stav anebo se zaplnění potrubí měří (měří se poloha hladiny v měřicí trubici – nejčastěji kapacitním hladinoměrem) a údaj o průtoku se automaticky přepočítává.

Průtokoměr je vhodné umístit před svislou částí potrubí (obr. 5.a), nebo ve stoupající části (obr. 5.b), nebo v sifonu (obr. 5.c). Spojnice elektrod snímače musí být přibližně vodorovná. Osazení průtokoměru v nejvyšším místě potrubí není vhodné; zde se mohou shromažďovat bubliny plynu a při nedostatečném průtoku tam nebude potrubí zaplněné (obr. 4.d). Pro instalaci průtokoměru není vhodná ani sestupná část potrubí s volným výtokem; tam se může potrubí při nulovém průtoku zcela vyprázdnit. Vhodné umístění je ve svislém potrubí, kde kapalina stoupá vzhůru, bubliny plynu mohou unikát a nehromadí se v měřicí trubici. Průtokoměr by se neměl instalovat do sání čerpadla, kde vzniká nebezpečí podtlaku s případným uvolňováním plynu z kapaliny (obr. 5.e). Regulační a uzavírací armatury by měly být zařazeny vždy až za průtokoměrem (obr. 5.f).

Důležitou podmínkou správné funkce indukčního průtokoměru je spolehlivé *uzemnění* snímače. Uzemnění na technologickou kapalinu tvoří zkrat pro bludné proudy. Není-li systém správně uzemněn, mohou bludné proudy způsobovat posun nuly výstupního signálu. Pro uzemnění se používají zemnicí kroužky, které se vkládají před měřič a za něj mezi měřicí trubici a potrubí, anebo lze použít zemnicí elektrodu umístěnou v měřicí trubici snímače.

Použití indukčního průtokoměru

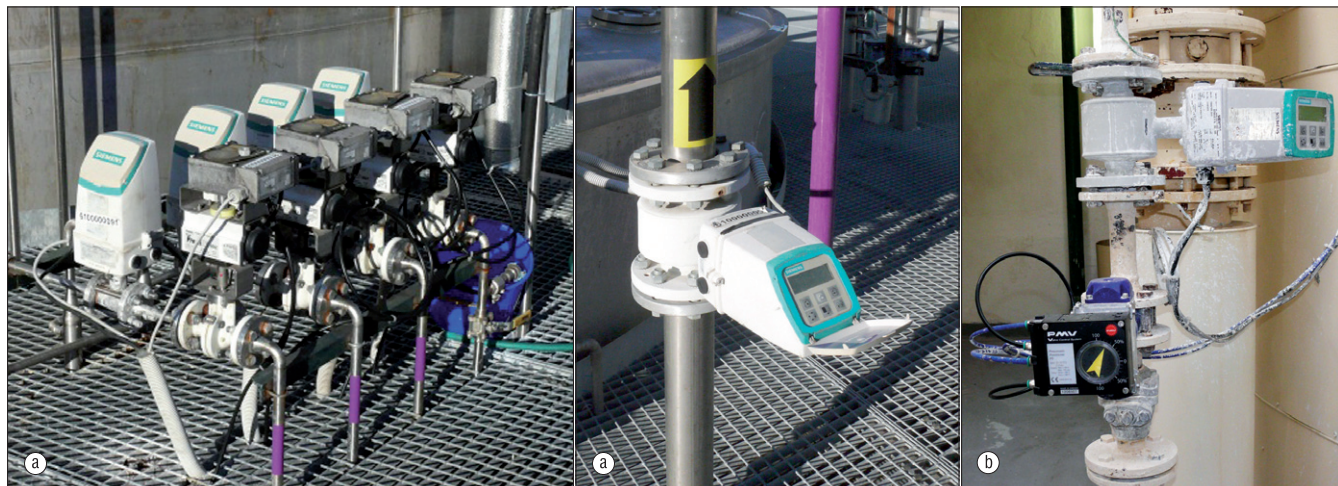
Vzhledem k jednoduchému a spolehlivému funkčnímu principu (snímač neobsahuje žádné pohyblivé mechanické

Obr. 6. Indukční průtokoměry Yokogawa – Admag ve varně cukrovaru Dobrovice Tereos TTD, a. s. (foto M. Kmínek)



součásti), s ohledem na to, že signál snímače prakticky nezávisí na teplotě a tlaku, na viskozitě, hustotě a elektrické vodivosti média (při splnění nutné podmínky minimální elektrické vodivosti), a vzhledem k robustní konstrukci mohou indukční průtokoměry spolehlivě měřit průtok celé řady kapalných médií. Lze je použít k měření průtoku vody, odpadních vod,

Obr. 7. Indukční průtokoměry Siemens Sitrans: a) u fermentačních tanků v lihovaru Dobrovice Tereos TTD, a. s.; b) při měření průtoku vápenného mléka v cukrovaru Dobrovice Tereos TTD, a. s. (foto M. Kmínek)

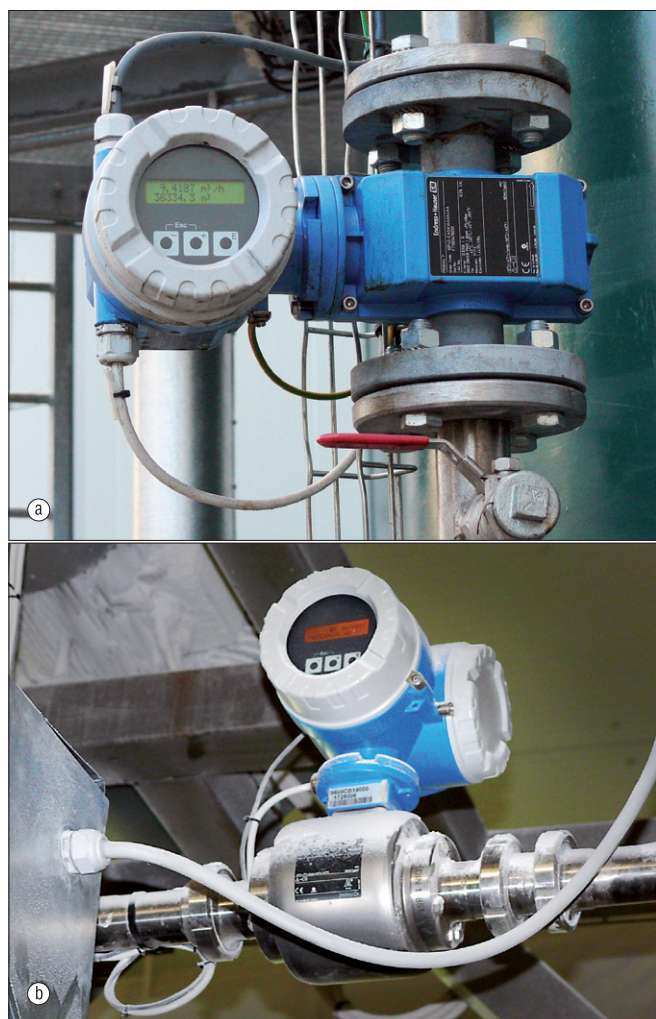


Tab. II. Přednosti a nevýhody indukčních průtokoměrů

Přednosti	Omezení a nevýhody
– žádné překážky v toku média, – nevykazuje tlakové ztráty, – bez pohyblivých částí, – velmi dobrá odolnost proti erozi, – nezávislost na změnách viskozity, hustoty, tlaku a turbulencích, – dostatečně malá nejistota, – možnost měření v obou směrech, – vhodné i pro měření agresivních médií, znečištěných kapalin a kalů, – značný rozsah měření průtoku pro velké rozpětí průměrů.	– pouze pro elektricky vodivé kapaliny, – většinou vyžadují zcela zaplněné potrubí, – doporučuje se přímé potrubí 5D před měřidlem a 3D za ním, – problémy s usazováním nečistot na elektrodách nebo vodivých povlaků na trubce měřidla, – doporučuje se správné uzemnění snímače, – vyšší cena.

korozivních a chemicky agresivních látek, suspenzí s pevnými částicemi, erozivních a viskózních médií, kalů, kašovitých hmot i past. Na obr. 6. až 8. je uvedeno několik příkladů instalací indukčních průtokoměrů od různých výrobců v provozech cukrovarnického a potravinářského průmyslu. Na závěr jsou v tab. II. shrnuty hlavní přednosti a také nevýhody a omezení indukčních průtokoměrů.

Obr. 8. Indukční průtokoměry Promag Endres+Hauser: a) měření průtoku vody v kotelně cukrovaru Dobrovice Tereos TTD a. s.; b) měření průtoku suspenze droždí v pekárně (foto M. Kmínek)



Souhrn

V článku je vysvětlen princip funkce indukčního průtokoměru a je popsáno konstrukční uspořádání snímače. Je diskutován vliv měřeného média na výsledky měření. Jsou uvedeny zásady pro montáž průtokoměru do technologické aparatury. Jsou uvedeny příklady aplikací indukčního průtokoměru při provozním měření v cukrovaru. V závěru jsou ukázány přednosti a nedostatky uvedeného typu snímače.

Klíčová slova: indukční průtokoměry; princip indukčního průtokoměru; vlastnosti indukčního průtokoměru.

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.
- ĎAĎO, S.: Měřicí obvody indukčních průtokoměrů. *Automa*, 11, 2005, (11), s. 41–47.
- ĎAĎO, S.; BEJČEK, L.; PLATIL, A.: *Měření průtoku a výšky hladiny*. BEN Praha, 2005, s. 161–204.

Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Flow Measurement (Part 3)

The article explains the principle of the electromagnetic flowmeter and describes the design of the transducer. It discusses the influence of the measured fluid on the measurement results and describes the principles of installation of the flowmeter in technological devices. It also gives examples of applications of the electromagnetic flowmeter in the process measurement in a sugar factory and lists the strengths and weaknesses of this type of sensor in the conclusion.

Key words: electromagnetic flowmeters; principle of electromagnetic flowmeter; properties of electromagnetic flowmeter.

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