

Měření neelektrických veličin

Část III

Studijní opora

Ing. Libor Kupka, Ph.D.



Měření neelektrických veličin

Téma 10: Měření síly a tlaku

Studijní cíl

Základní principy senzorů s deformačními měrnými tělísky a piezoelektrických senzorů síly. Způsoby měření tlaku a přehled tlakoměrů hydrostatických, silových, deformačních a senzorů tlaku s elektrickým výstupem.

Doba nutná k nastudování

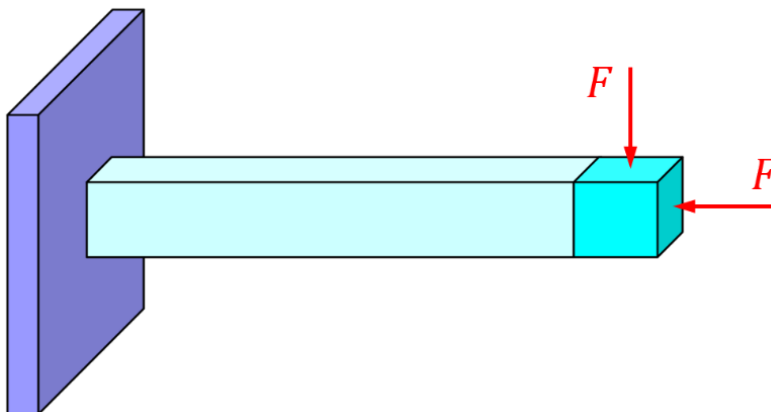
4 hodiny

Klíčová slova

Síla, siloměr, tenzometr, deformační měrné tělísko, zatěžovací nosník, piezoelektrický senzor, tlak, tlakoměr, deformační člen, vlnovec, membrána, MEMS senzor, převodník.

1 Měření síly

Při měření síly se uplatňují dva základní principy. Používají se buď tzv. **deformační měrná tělíska**, jejichž deformace se měří nejčastěji pomocí **tenzometrů**. Podrobněji byla problematika měření deformace tenzometry vysvětlena již ve studijních oporách Tenzometry I a Tenzometry II. Případně se k měření síly využívají senzory pracující **na bázi piezoelektrického jevu**. Obecně lze měřit sílu v tlaku či ohybu, viz obr. 1.



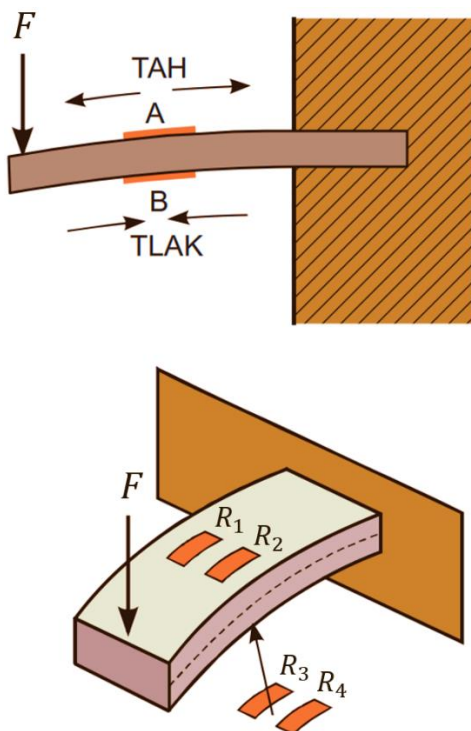
Obr. 1 – Měření tlakové či ohybové síly, zdroj autor dle (Lufinka, 2012)

1.1 S deformačním měrným tělískem

Působením síly na těleso dochází k jeho deformaci. U snímačů síly se využívá tlak či ohyb (viz obr. 1) a různé tvary deformačních tělísek (různé nosníky, prstence, pružiny, včetně reálných provedení průmyslových senzorů jsou na obr. 2 až obr. 20). Základní přehled senzorů pro měření síly (Morehouse Instrument Company, 2021) je uveden v tab. 1. Základní část senzoru pro měření silových účinků je převodník, který se skládá z měrného deformačního tělíska, tenzometrů a vyhodnocovacích obvodů. Nejjednodušší realizací je vetknutý nosník (obr. 2) vhodný pro měření malých sil nejvýše v desítkách kN. Deformace se nejčastěji měří pomocí tenzometrů téměř výhradně v můstkovém zapojení. Velmi častý úplný můstek bývá navíc doplněn o další prvky určené ke zlepšení teplotní stability.

Snímače lze v mechanickém měřicím řetězci použít pro tah i tlak, vyrábějí se ve velkém množství rozsahů od cca 10 N až po jednotky MN. Umožňují statické i cyklické zatěžování a jsou k dispozici i ve víceosém provedení.

Výhodou je, že měří i statickou hodnotu síly. Vyrábí se v širokém výběru typů, rozsahů a možnostech kotvení (velké množství výrobců a dodavatelů). Nevýhodou je malá přetížitelnost a velká citlivost na boční síly. (Kupka, 2022)



Obr. 2 – Realizace siloměrného členu s vetknutým nosníkem, upraveno dle (Kadlec, 2008)

Existuje celá řada provedení deformačních tělísek s různou konfigurací umístění tenzometrů. Pro jeden konkrétní typ deformačního tělíska mohou být tenzometry umístěny v různé konfiguraci (tah, tlak, ohyb, stříh). Na obr. 3 je provedení jednostranně podepřeného jednoduchého nosníku s výřezy ve tvaru binocular. Nosník má zpravidla čtvercový nebo obdélníkový průřez, ale může být i s průřezem kruhovým, v tomto případě nejčastěji s vnější pružinou. Konkrétní realizace senzorů jsou na obr. 6 vlevo a uprostřed.

Tab. 1 – Přehled typů senzorů s deformačním tělískem pro měření síly, volně dle (Morehouse Instrument Company, 2021)

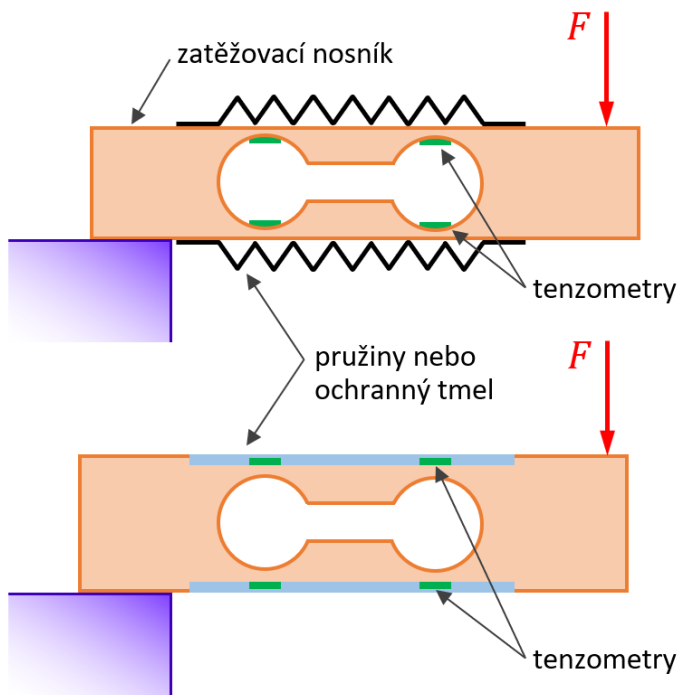
Skupina senzorů	Označení v angličtině	Označení a popis
S nosníkem, zatížení v ohybu	Single-point weightbeam	S jednobodovým podepřeným nebo vetknutým nosníkem
	Bending beam	S ohybovým nosníkem
	Cannister	S nosníkem zabudovaným v pouzdře
	Binocular	S jednoduchým nebo dvojitým nosníkem s dutinou binocular
	S type	S dvojitým nosníkem ve tvaru S
S nosníkem, zatížení ve stříhu	Shear beam	S jednoduchým nosníkem zatěžovaným ve stříhu
	Double shear beam	S dvojitým nosníkem, zpravidla v provedení binocular
	Clevis pin	S jednoduchým nosníkem ve tvaru vidlicového čepu (s kruhovým průřezem)
Nízkoprofilové kruhové	Pancake	S kruhovým deformačním tělískem v tlakové nebo střížné konfiguraci se středním závitem
	Donut	S kruhovým deformačním tělískem v tlakové nebo střížné konfiguraci se širokým středovým otvorem
Vertikální kruhové	Ring	S deformačním tělískem ve tvaru kroužku nastojato a tenzometry na stranách
Sloupové	Single column	S jedním válcovým (sloupovým) deformačním tělískem
	Multiple column	S více válcovými deformačními tělísky
	Donut	S kruhovým deformačním tělískem v tlakové konfiguraci se širokým středovým otvorem
Miniaturní, tzv. knoflíkové	Bending beam	S vestavěným ohybovým nosníkem
	Column	S válcovým deformačním tělískem
	Diaphragm	S membránou nebo s více membránami

Na obr. 4 je velmi často používané deformační tělísko v podobě dvojitého nosníku tvaru S ve střížné konfiguraci. Průmyslový senzor s tímto typem nosníku je na obr. 6 vpravo.

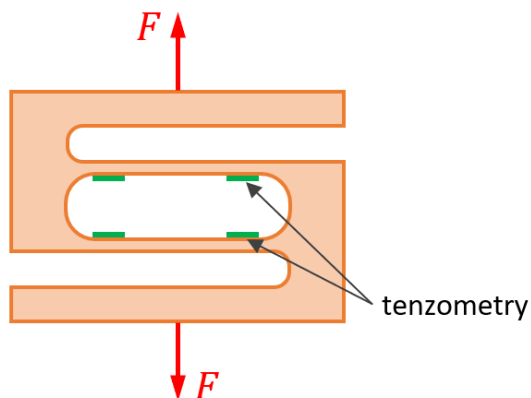
Na obr. 5 jsou dvě typická provedení deformačních tělísek v podobě dvojitých nosníků binocular pro měření tlakového zatížení. Tenzometry mohou být buď ve střížné nebo v ohybové konfiguraci. Příklady průmyslových provedení jsou pak na obr. 7.

Na obr. 8 je provedení měrného deformačního tělíska v podobě jednostranně podloženého, resp. vetknutého jednoduchého, nejčastěji traverzového nosníku (průřez ve tvaru I) s tenzometry typu V ve stříhové konfiguraci. Příklady dvou variant průmyslových provedení jsou na obr. 9.

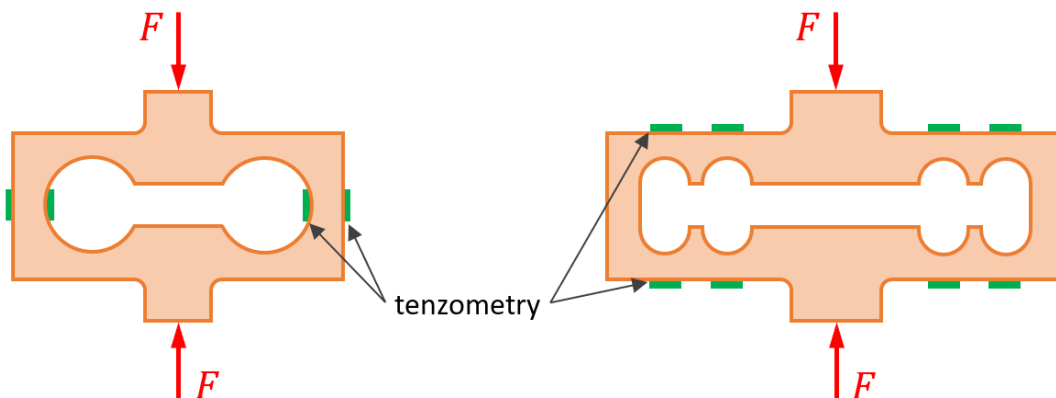
Na obr. 10 je deformační tělísko ve tvaru kroužku (prstence) pro měření tlakového zatížení. Deformace je měřena tenzometry v úplném můstku, které jsou umístěny na stranách kroužku. Možná průmyslová provedení tohoto méně častého řešení jsou na obr. 11.



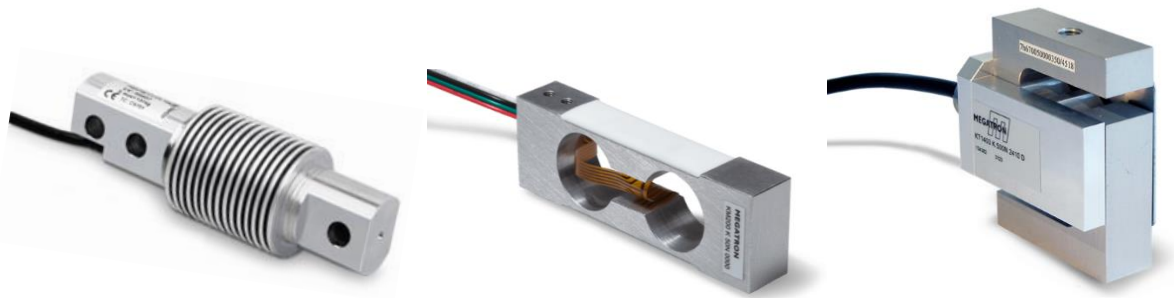
Obr. 3 – Deformační měrné tělísko v podobě jednoduchého nosníku, typ binocular, zdroj autor dle (Omega Engineering, 2023) a (Flintec, 2023c)



Obr. 4 – Deformační měrné tělísko v podobě dvojitého nosníku, typ S v střižné konfiguraci, zdroj autor dle (Sensorland, 2023)



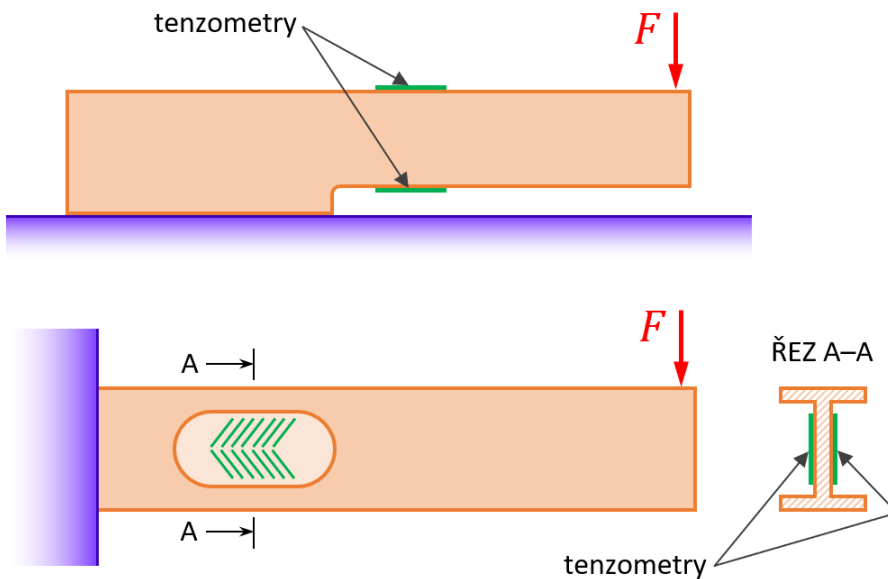
Obr. 5 – Deformační měrná tělíska v podobě dvojitého nosníku, typ binocular s tenzometry v střižné konfiguraci (vlevo) a v ohybové konfiguraci (vpravo), zdroj autor dle (Sensorland, 2023) a (Kyowa Electronics Instruments, 2023)



Obr. 6 – Průmyslová provedení nosíkových senzorů síly s jednoduchým nosníkem (vlevo a uprostřed) a s dvojitým nosníkem tvaru S (vpravo), zdroj (Dini Argeo, 2023) a (Megatron, 2023b)



Obr. 7 – Sensory s deformačními tělisky ve tvaru dvojitého nosníku, zdroj (Futek, 2023) a (Dini Argeo, 2023)

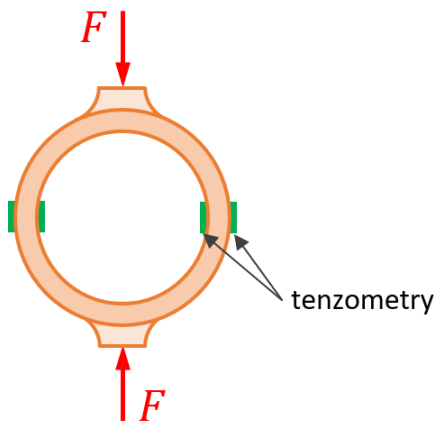


Obr. 8 – Deformační měrné tělísko v podobě jednoduchého nosníku: podložený (nahore) a jednostranně vetknutý (dole) s tenzometry ve stříhové konfiguraci, zdroj autor dle (Omega, 2023), (Sensorland, 2023) a (Flintec, 2023a)

Na obr. 12 a obr. 13 jsou dvě základní provedení senzorů pro měření tlakového zatížení s válcovým (sloupovým, angl. column, někdy též cylindrical) deformačním tělískem a s tělískem v podobě pružiny. Varianta na obr. 12 má tenzometry kryté umístěním uvnitř pouzdra, ale používají se i verze bez krytu a verze s tenzometry umístěnými uvnitř dutého válcového tělíska. Ve všech případech se jedná o tzv. jednoduchou sloupovou variantu, ale válcových sloupů může být vícero, nejčastěji tři. U varianty s pružinou se tenzometry typu V osazují přímo na ni a jedná se tak vlastně o střížnou konfiguraci. Sensory s tělisky tohoto typu mohou být realizovány také v miniaturním, tzv. knoflíkovém (angl. button) provedení.



Obr. 9 – Průmyslové provedení senzoru s jednoduchým nosníkem jednostranně zatěžovaným ve stříhu, zdroj (Dini Argeo, 2023)

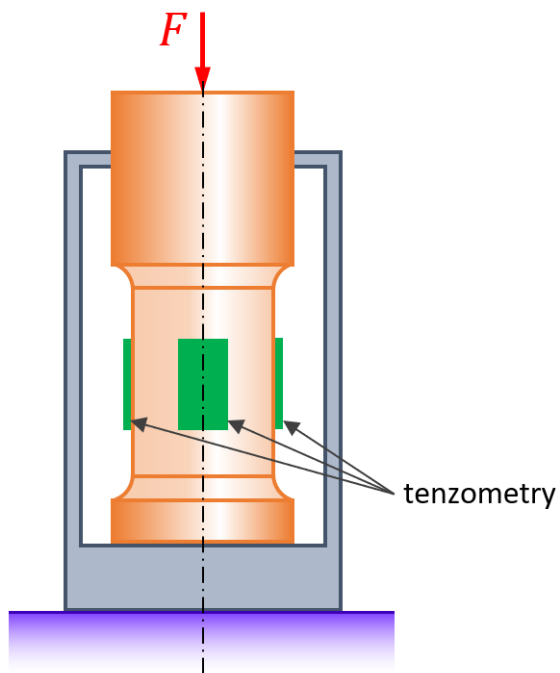


Obr. 10 – Deformační měrné tělísko ve tvaru kroužku (prstenec), zdroj autor dle (Omega, 2023)

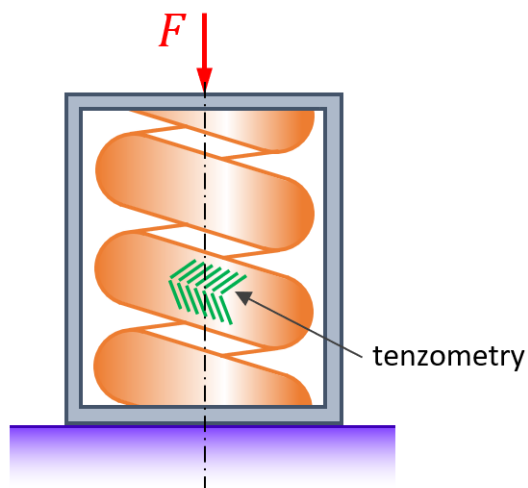


Obr. 11 – Snímače síly s prstencovým deformačním členem s tenzometry, zdroj (Direct Industry, 2023) a (Applied Measurements Australia, 2023)

Několik možných průmyslových provedení senzorů se sloupovými deformačními tělísky je uvedeno na fotografiích na obr. 14. Tento typ senzorů se velmi často v praxi používá při měření velkých zatěžovacích sil např. u zásobníků, plošin, jeřábů, vagónů apod. Další možná provedení senzorů síly v nízkoprofilovém provedení jsou na obr. 15 a obr. 16. Tenzometry mohou být umístěny v tlakové nebo střížné konfiguraci. Používají se varianty s vestavěným nosníkem nebo s kruhovým deformačním tělískem. Nejčastěji se buď jedná o provedení se středovým vnitřním (i průchozím) závitem či jedním nebo více menšími průchozími otvory (typ palačinka, angl. pancake) nebo s jedním velkým vnitřním otvorem (donut). Mohou být realizovány i v miniaturním knoflíkovém provedení.



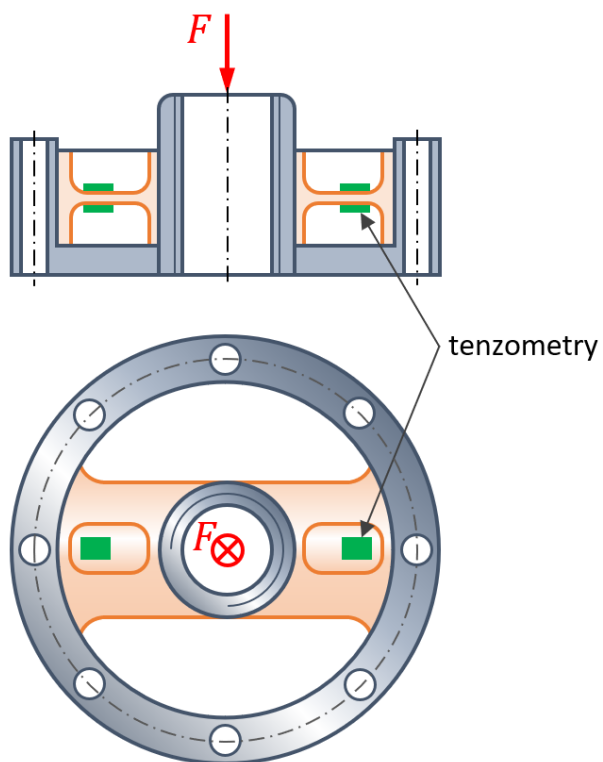
Obr. 12 – Válcové (sloupové) deformační měrné tělísko s tenzometry v tlakové konfiguraci, zdroj autor dle (Omega, 2023) a (Flintec, 2023b)



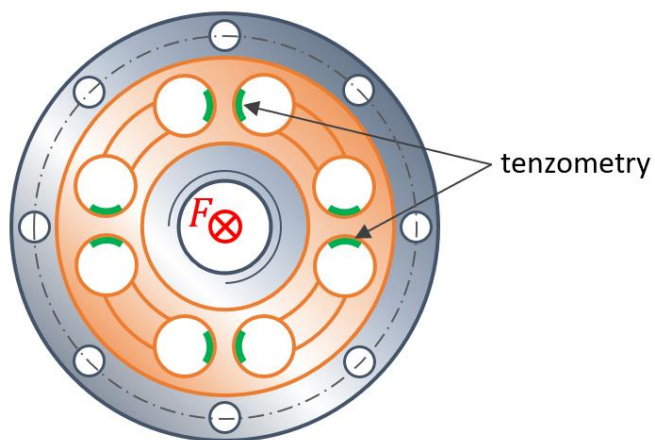
Obr. 13 – Deformační měrné tělísko ve formě spirálové pružiny s tenzometry ve sřížné konfiguraci, zdroj autor dle (Omega, 2023)



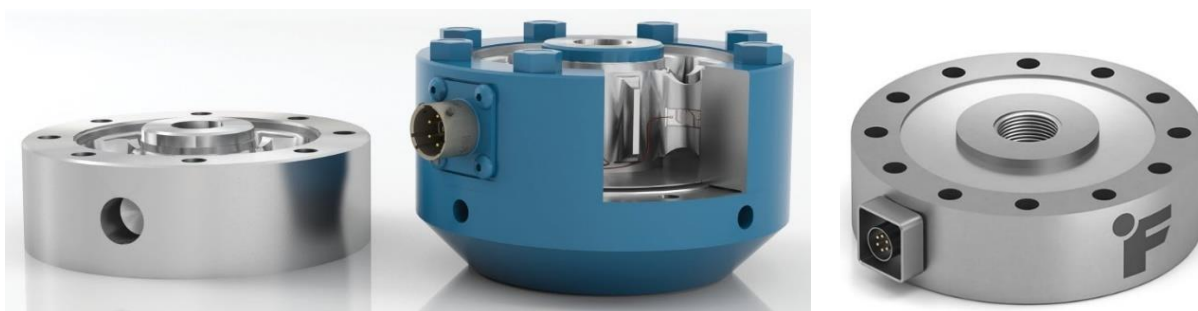
Obr. 14 – Různá provedení sloupových průmyslových senzorů pro měření síly, zdroj (Althen, 2023) a (Dini Argeo, 2023) a (Futek, 2023)



Obr. 15 – Nízkoprofilové kruhové deformační měrné tělísko s tenzometry v tlakové konfiguraci, zdroj autor dle (Sensorland, 2023)



Obr. 16 – Nízkoprofilové kruhové deformační měrné tělísko s tenzometry ve střížné konfiguraci, zdroj autor dle (Sensorland, 2023)

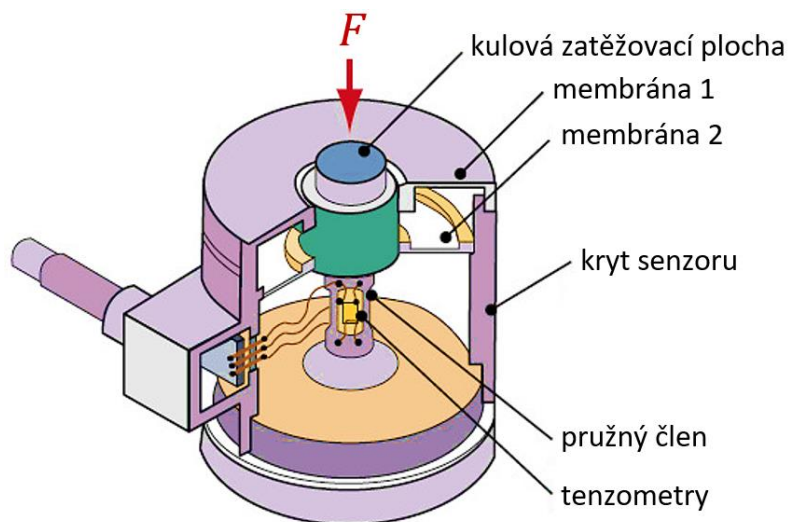


Obr. 17 – Průmyslová provedení nízkoprofilových senzorů síly s kruhovými deformačními tělísky typu pancake, zdroj (Interface, 2023) a (Futek, 2023)

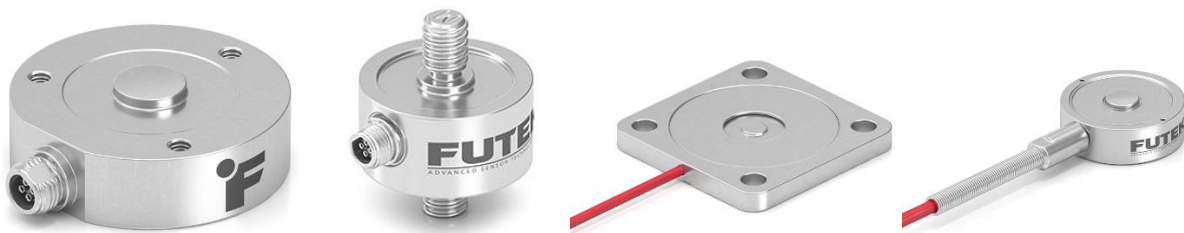


Obr. 18 – Průmyslová provedení nízkoprofilových senzorů síly s kruhovými deformačními tělisky typu donut, zdroj (Futek, 2023)

Dalším typem je senzor síly s membránovou konstrukcí, jehož schéma je na obr. 19. Může být typicky realizován s jednou nebo se dvěma membránami. Výhodou je, že může být velmi malých rozměrů, takže je často dostupný také v knoflíkovém provedení (obr. 20).



Obr. 19 – Schéma typického provedení miniaturního membránového senzoru pro měření síly, upraveno dle (Tekscan, 2023)



Obr. 20 – Miniaturní (knoflíková) průmyslová provedení senzorů síly, zdroj (Futek, 2023)

1.2 Piezoelektrické

Připomeňme, že piezoelektrický jev, kterému byl již věnován značný prostor v opoře týkající se měření zrychlení, představuje vlastnost krystalu generovat při deformaci elektrický náboj. Jev se může vyskytovat jen u nesymetrických krystalů (např. monokrystalický křemen), nebo lze využít tzv. PZT keramiku.

Existují tři základní principy vyvození piezoelektrického napětí (podélný – longitudinal, střížný – shear a příčný – transversal). Při zatížení se na ploše krystalu objeví elektrický náboj a ve

vodičích připojených ke krystalu začne protékat proud. Proud protéká jen při změně náboje (změně zatížení), tj. snímač **nedokáže měřit statické zatížení**. K vyhodnocení je nutné použít nábojový zesilovač sloužící k impedančnímu přizpůsobení a v menší míře k zesílení signálu. V praktických aplikacích je nutné vzít v úvahu vliv propojovacího kabelu, z čehož vyplývá nutnost použít snímač a odpovídající kabel. Ideální je použít vše (snímač, kabel, nábojový zesilovač) od jediného výrobce.

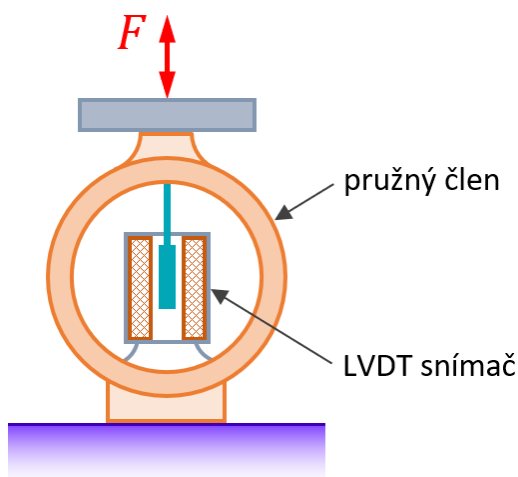
Piezelektrické snímače síly jsou z principu určeny jen pro tlakové síly. Pro síly tahové se musí použít speciální předepjaté snímače. Vyrábějí se ve velkém množství rozsahů (jednotky N až stovky kN) i ve víceosém provedení, viz příklady průmyslových senzorů na obr. 21. Jejich výhodou je miniaturní provedení i pro velké síly, velká tuhost a přetížitelnost. Změnou rozsahu zesilovače lze měřit i malé síly oproti rozsahu snímače. (Kupka, 2022)



Obr. 21 – Různá průmyslová provedení piezelektrických senzorů síly, zdroj (Kistler, 2023a)

1.3 S převodem deformace na výchylku

Další možností, jak měřit sílu, je převod deformace na výchylku. Jako převodníky se nejčastěji využívají deformační členy ve tvaru prstence. Deformace se pak může měřit s využitím např. LVDT snímače výchylky, obr. 22. Výhodou je, že lze v tomto případě měřit i dynamicky. Měřit lze jak tlakové, tak i tahové síly. Měření výchylky může být realizováno samozřejmě i jiným vhodným způsobem (obr. 23), viz předchozí studijní opory zabývající se podrobně přímo měřením výchylky.



Obr. 22 – Princip měření síly s využitím převodu deformace na výchylku, zdroj autor dle (Ripka, 2011)



Obr. 23 – Digitální prstencové měřiče síly, zdroj (Morehouse Instrument Company, 2023)

2 Měření tlaku

Z větší části je měření tlaku realizováno na stejných principech jako měření síly. Vychází se ze známého vztahu pro výpočet tlaku při znalosti síly a plochy

$$p = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S} \quad (1)$$

Využívá se deformace měrného tělíska s využitím tenzometrů (nejčastěji polovodičových) a piezoelektrického jevu. Deformace nebo posunutí deformačního dílu (membrána, trubka, vlnovec, krabice, nosník) se převádí na elektrický signál. V případě změny polohy se pak použijí již popisovaná čidla polohy – kapacitní, LVDT, optická aj. Připomeňme, že deformací piezoelektrického materiálu vzniká elektrický náboj přímo úměrný síle a je-li definována plocha, tak měřenému tlaku. Snímače tlaku jsou vyráběny v širokém rozsahu typů – pro různá média, i v kompaktním provedení a ve velkém množství rozsahů. (Kupka, 2022)

Jako druhou základní definici tlaku lze chápat rovnicí ve tvaru

$$p = h\rho g \quad (2)$$

přičemž tlak vyjádřen pomocí hydrostatického sloupce kapaliny o dané hustotě ρ a výšce h .

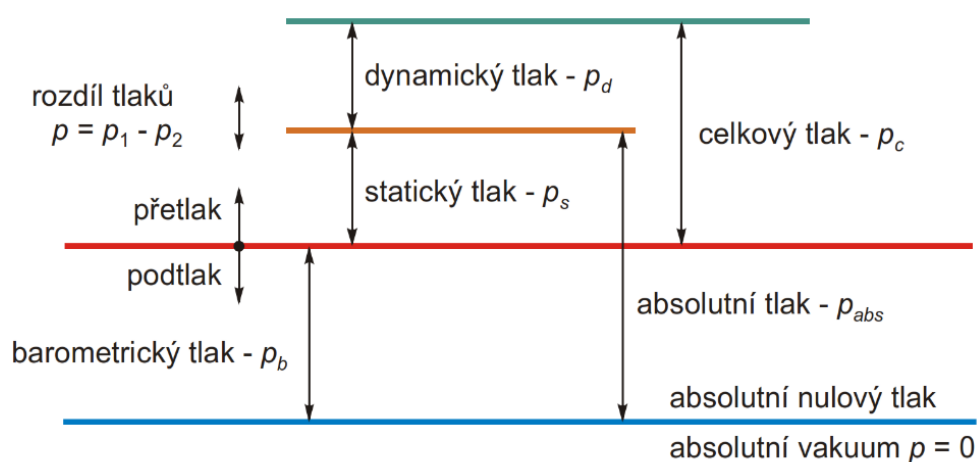
Základní jednotkou tlaku v mezinárodní soustavě SI je pascal (Pa). Jedná se o tlak, který vyvolá síla o velikosti 1 N působící rovnoměrně na plochu o velikosti 1 m². V praxi se ale využívají spíše násobky kPa, hPa a MPa, protože 1 Pa představuje velmi malý tlak. Další povolenou (vedlejší) jednotkou tlaku je 1 bar, což odpovídá přesně tlaku 100 kPa. Další vybrané jednotky tlaku, které se v praxi běžně používají a vzájemné přepočty mezi nimi jsou v tab. 2.

Hodnota tlaku se obvykle vztahuje buď k absolutnímu nulovému tlaku (jde o absolutní hodnotu tlaku) nebo k barometrickému (resp. atmosférickému) tlaku vzduchu v daném konkrétním místě za určitých podmínek měření (jde o relativní hodnotu tlaku). Případně lze uvažovat rozdíl dvou tlaků (diferenci), z nichž se ani jeden neshoduje s tlakem barometrickým.

Tab. 2 – Používané jednotky tlaku a převody mezi nimi (≡ znamená definováno, = odvozeno z definice normálního atmosférického tlaku, ≈ stanoveno přibližně výpočtem), zdroj (Wikipedie, 2023)

Jednotky tlaku	pascal [Pa]	bar [bar]	technická atmosféra [at]	fyzikální atmosféra [atm]	torr (mm HG) [Torr]	libra na čtver. Palec [psi]
1 Pa	≡ 1	≡ 10 ⁻⁵	≈ 10,197·10 ⁻⁶	≈ 6,8692·10 ⁻⁶	≈ 7,5006·10 ⁻³	≈ 1,4504·10 ⁻⁴
1 bar	≡ 10 ⁵	≡ 1	≈ 10197,162	≈ 0,9869233	≈ 750,0616	≈ 14,50377
1 at	≡ 98066,6	≡ 0,980665	≡ 1	≈ 0,9678·10 ⁻⁴	≈ 735,559	≈ 14,22334
1 atm	≡ 101325	≡ 1,01325	≈ 1,033227	≡ 1	= 760	≈ 14,696
1 Torr	≈ 133,322	≈ 1,3332·10 ⁻³	≈ 1,3595·10 ⁻³	≈ 1,3158·10 ⁻³	≡ 1	≈ 19,377·10 ⁻³
1 psi	≈ 6894,7573	≈ 68,948·10 ⁻³	≈ 70,307·10 ⁻³	≈ 68,046·10 ⁻³	≈ 51,7149	≡ 1

Další souvislosti jsou patrné z obr. 24. Např. přetlak a podtlak se vztahuje k okamžitému barometrickému (atmosférickému) tlaku.

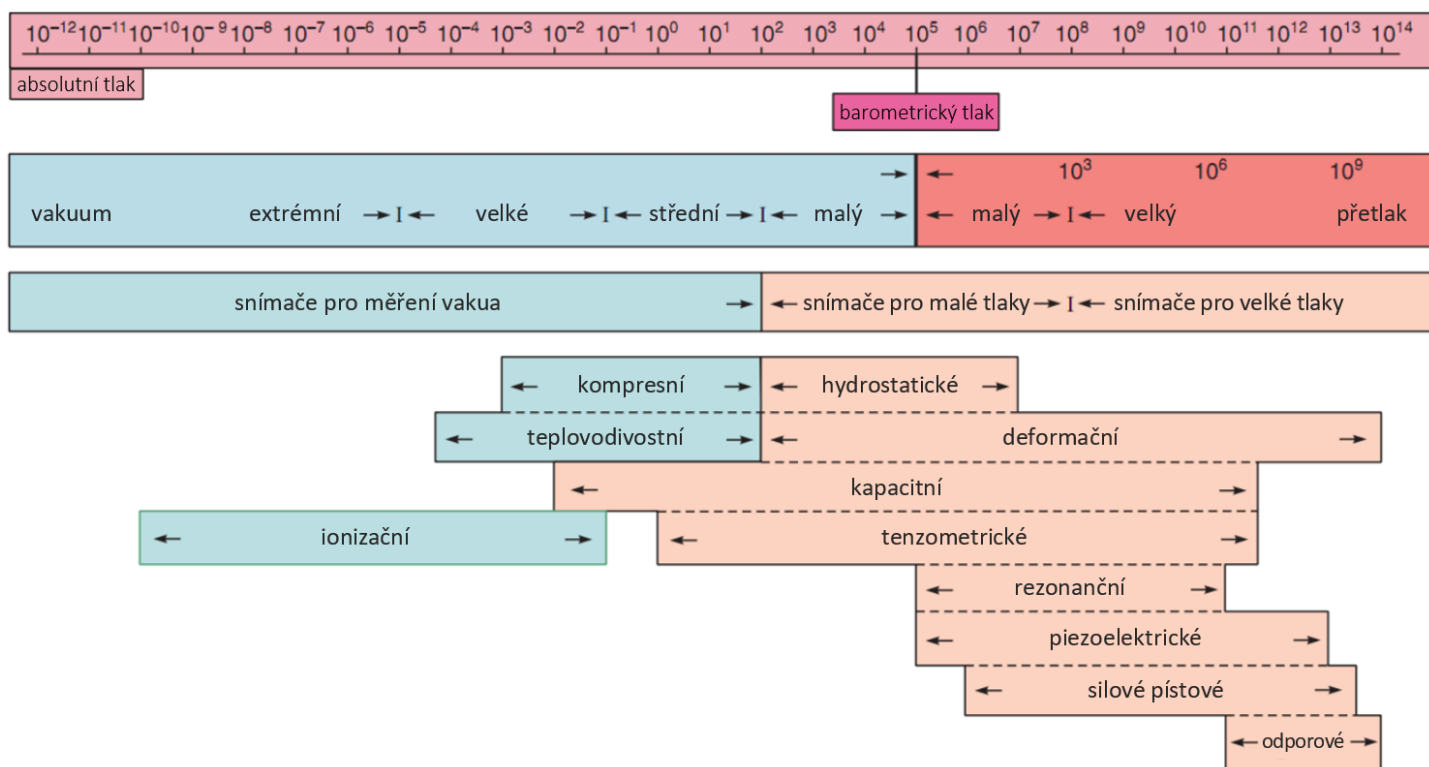


normální barometrický tlak - $p_{bn} = 101\,325\text{ Pa}$

Obr. 24 – Vzájemné souvislosti mezi různými vyjádřeními tlaku, zdroj (Kadlec, 2008)

Přístroje pro měření tlaku se běžně nazývají tlakoměry. Zároveň se ale pojem tlakoměr, resp. manometr, používá pro označení přístroje pro měření přetlaku. Přístroje pro měření podtlaku se pak označují jako podtlakoměry, resp. vakuometry či tahoměry. Dále je možné také měřit rozdíl dvou tlaků, k čemuž se používají rozdíllové, resp. diferenční tlakoměry. Přístroje pro měření barometrického (resp. atmosférického) tlaku se nazývají barometry.

Senzory pro měření tlaku, které se v technické praxi často označují jako převodníky tlaku, jsou elektronická zařízení používaná k měření tlaku s výstupním elektrickým signálem. Pro měření tlaku se využívají stejně jako u jiných neelektrických veličin různé fyzikální principy. Jejich základní přehled, vč. stručné charakteristiky a popisu principu funkce, udává tab. 3.



Obr. 25 – Orientační rozdělení tlakoměrů podle měřicího rozsahu, upraveno dle (Anon., Priemyselná informatika, b. r.)

Tab. 3 – Základní přehled snímačů a senzorů tlaku, zdroj (Kadlec, 2016)

Skupina snímačů	Základní princip měření	Typ snímače	Měřicí rozsah
Hydrostatické tlakoměry	založeny na definici hydrostat. tlaku, měří se výška sloupce kapaliny	U-trubicový	dle hustoty
		nádobkový	do 200 kPa (Hg)
		mikromanometr se sklonným ramenem	do 5 kPa (voda)
		kompresní vakuometry	10^{-3} až 10^3 Pa
Silové tlakoměry	založeny na definici tlaku jako síly působící na plochu	zvonový	do 1 kPa
		pístový	0 až 500 MPa
Deformační tlakoměry	měří se velikost deformace pružného prvku (deformačního tělíska, viz také měření síly)	trubicový (Bourdonův)	do 1 GPa
		membránový	do 1 MPa
		vlnovcový	do 0,1 MPa
		krabicový	do 1 kPa
Senzory tlaku s elektrickým výstupem	měří se výchylka (změna polohy) deformačního členu, nejčastěji membrány	potenciometrický	
		kapacitní	od -14 do 70 MPa
		indukčnostní	
		optický	

Skupina snímačů	Základní princip měření	Typ snímače	Měřicí rozsah
	měří se deformace, resp. změna mechanického napětí deformačního členu, nejčastěji membrány	tenzometrický	do 60 MPa
		piezoelektrický	do 30 GPa
		rezonanční	až 50 MPa
	v evakuované komoře se měří změna odporu žhaveného drátku nebo se využívá ionizace molekul plynu	tepelněvodivostní (Piraniho) vakuometr	až 10^{-4} Pa
		ionizační vakuometr	až 10^{-10} Pa
		odporové	80 MPa až 10 GPa

2.1 Hydrostatické a silové

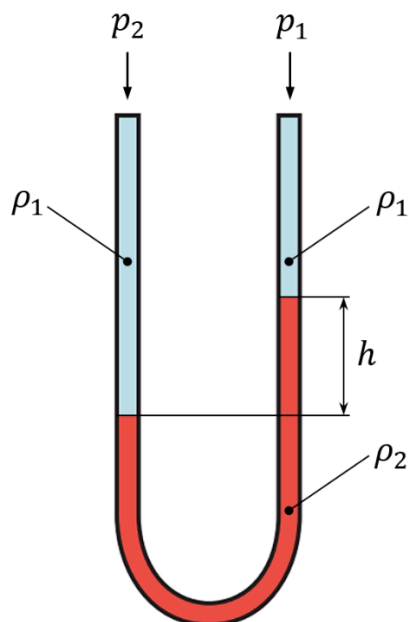
U **hydrostatických tlakoměrů** se využívá účinků hydrostatického tlaku dle rovnice (2). Měření tlaku se v tomto případě převádí na měření vzdálenosti, takže měřený tlak je úměrný výšce sloupce kapaliny, viz základní schéma U-trubicového tlakoměru na obr. 26. Tlakový rozdíl Δp lze totiž po dosazení a jednoduché úpravě vyjádřit jako závislost rozdílu hustot ρ_2 a ρ_1 a výšky h při konstantním tíhovém zrychlení g

$$\Delta p = p_2 - p_1 = h(\rho_2 - \rho_1)g \quad (3)$$

Bude-li navíc platit, že $p_2 \gg p_1$, potom

$$\Delta p = h\rho_2g \quad (4)$$

Jako tlakoměrná kapalina se nejčastěji používá rtuť nebo voda, příp. jiná vhodná organická kapalina, např. etanol nebo tetrachlór.



Obr. 26 – Základní schéma U-trubicového tlakoměru, upraveno dle (Kadlec, 2009)

Z důvodu závislosti hustoty kapaliny na teplotě jsou hodnoty měřeného tlaku závislé na teplotě. Rozsah měření je mimo hustoty teploměrné kapaliny určen délkou trubice (nejčastěji

skleněná, o délce maximálně 1,5 m). Např. je-li použita rtuť, lze měřit tlak až do 0,2 MPa, v případě použití vody, ale jen do 15 kPa.



Obr. 27 – Příklady hydrostatických tlakoměrů: U-trubicový (vlevo), nádobkový (vpravo) a nádobkový s jednoduchým a dvojitým nakloněným ramenem (uprostřed), zdroj (Kimo Electronic, 2023b)

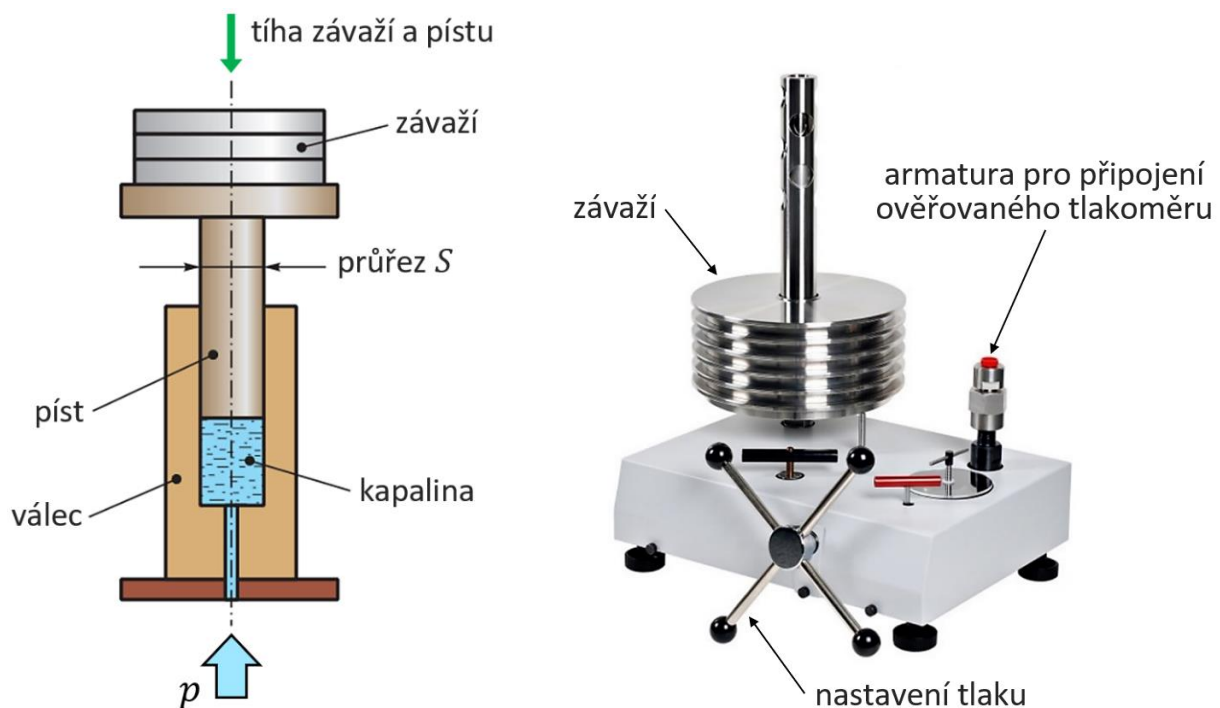


Obr. 28 – Nádobkové tlakoměry s doplňkovou elektronikou, zdroj (Kimo Electronic, 2023a)

Mimo U-trubicových existuje ještě nádobkový tlakoměr s jedním rozšířeným ramenem, u kterého se výška sloupce odečítá v úzkém rameni. Příp. tzv. mikromanometr, což je

modifikovaný nádobkový tlakoměr s nakloněným úzkým ramenem, příp. s dvojitým nakloněným ramenem, čímž se zvýší citlivost. Příklady reálných hydrostatických tlakoměrů jsou na obr. 27. V praxi se používají ještě také různé plovákové varianty nádobkového tlakoměru.

Hydrostatické tlakoměry jsou konstrukčně jednoduché, spolehlivé a přitom přesné měřicí přístroje, jejichž využití je především v laboratořích. V regulačních obvodech se příliš nepoužívají, protože běžně neposkytují elektrický výstupní signál, výhodný pro další zpracování. Existuje ale i průmyslové řešení, v rámci něhož lze např. nádobkové tlakoměry osadit elektrickými kontakty a doplnit potřebnými elektronickými obvody, viz obr. 28.

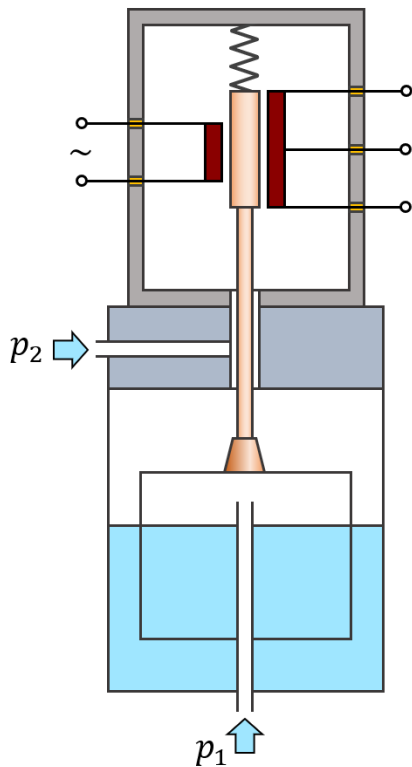


Obr. 29 – Schéma principu pístového tlakoměru (vlevo) a příklad reálného provedení (vpravo), upraveno dle (Kadlec, 2009) a (D-Ex Instruments, 2023)

Princip **silových tlakoměrů** vychází z rovnice (1). Tlaková síla působící na píst je zde kompenzována tíhovými silami závaží a pístu. Měření tlaku se v tomto případě převádí na měření síly a při známém průřezu pístu platí

$$p = \frac{G_z + G_p}{S} = \frac{(m_z + m_p)g}{S} \quad (5)$$

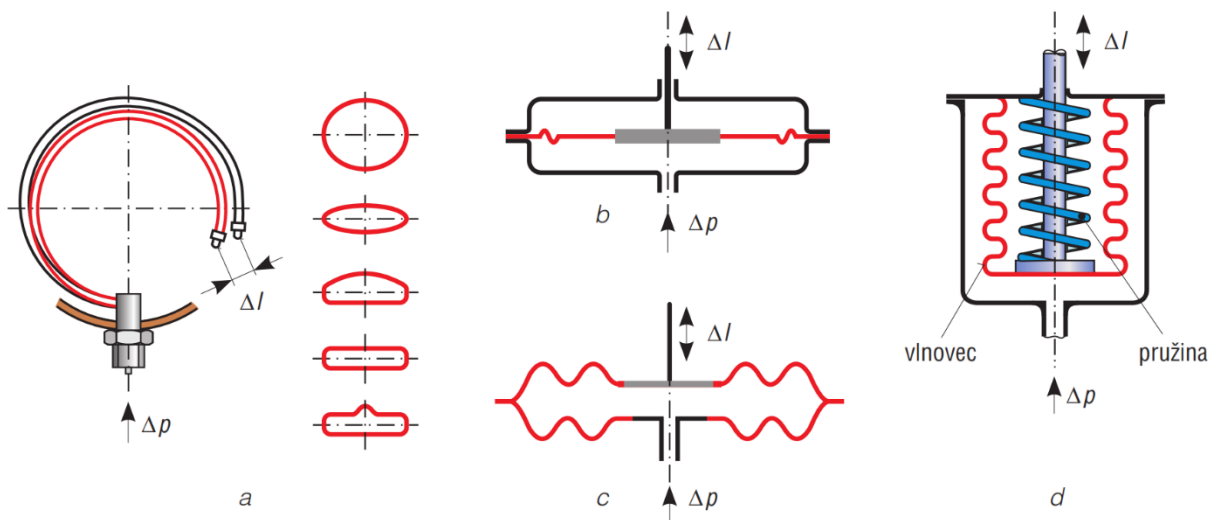
Na obr. 29 je uveden **pístový tlakoměr**. Jako tlakové médium (na obr. 29 kapalina) se nejčastěji používá voda nebo olej, ale i vzduch. Aby nedocházelo k tření pístu ve válci, je nutné jím otáčet. Pro svoji přesnost se tyto tlakoměry používají především jako kalibrační. Pro měření nízkých tlaků lze využít **zvonový tlakoměr**, který je založen principu působení měřeného tlaku na zvon ponořený do nádoby naplněné kapalinou. Může být buď zavěšený na váze, nebo s pružinou (obr. 30) a může být doplněn o tzv. indukční vysílač, takže na jeho výstupu je unifikovaný elektrický signál.



Obr. 30 – Schéma zvonového tlakoměru s pružinou a elektrickým výstupem, zdroj autor

2.2 Deformační

Funkce deformačních tlakoměrů vychází z principu pružné deformace tzv. tlakoměrného prvku při působení měřeného tlaku. Nejčastější typy používaných tlakoměrných prvků jsou uvedeny na obr. 31. Tlakoměrné prvky jsou vyráběny z uhlíkových i niklových ocelí, z mosazi, z bronzu a jiných vhodných slitin. Deformační tlakoměry mají obvykle mechanický výstup a ukazatel s ručkou, jejich tlakoměrné prvky ale mohou být osazeny snímači deformace nebo výchylky a senzory pak mohou mít i elektrický výstup.



Obr. 31 – Základní typy deformačních tlakoměrných prvků: a) Bourdonova trubice, b) membrána, c) krabice, d) vlnovec, zdroj (Kadlec, 2016)

2.2.1 Trubicové

Nejvíce používaným typem deformačních tlakoměrů jsou tlakoměry trubicové. Jako tlakoměrný prvek se obvykle používá Bourdonova trubice patentovaná francouzským vynálezce E. Bourdonem již v roce 1849. Může mít oválný, eliptický či jiný i nesymetrický průřez (obr. 31a) a tvar kruhového oblouku (písmeno C nebo U), ale i spirály nebo šroubovice. Na jednom konci je trubice pevně spojena s objektem a její druhý konec je zaslepen a přes převodový mechanismus spojen s cejchovaným ukazatelem. Vlivem působení tlaku se původně např. eliptický průřez snaží měnit na kruhový, čímž se mění zakřivení trubice, viz obr. 28. Rozsah měření je u mosazných trubic typicky od 0 do 0,5 MPa, u ocelových trubic s téměř kruhovým průřezem lze pak měřit až do jednotek GPa. Provozní tlakoměry (manometry) umožňují měřit i podtlak a často se používají jako informativní měřidla, ale přesnější přístroje se naopak používají i jako provozní etalony. Na obr. 32 jsou uvedeny příklady provozních deformačních tlakoměrů značky Bourdon.



Obr. 32 – Příklady provozních tlakoměrů značky Bourdon: s Bourdonovou trubicí (vlevo), membránový (uprostřed) a s elektrickým výstupem (vpravo), zdroj (Bourdon-Haenni, 2023)

2.2.2 Membránové

Základem membránových tlakoměrů je kruhová kovová membrána (tvar viz obr. 31) umístěná mezi dvěma přírubami. Tlak působící na jednu stranu membrány vyvolá její průhyb, který je přenášen na ukazatel nebo vhodným způsobem převáděn na elektrický signál (snímání deformace na kapacitním, indukčnostním či piezoelektrickém principu, viz text dále). Membránové tlakoměry mohou být konstruovány i jako diferenciální, je-li tlak přiváděn z obou stran. Výhodou je téměř lineární závislost a vyšší citlivost než u trubicových tlakoměrů. Z hlediska rozsahu měření jsou tyto tlakoměry vhodné spíše pro malé až střední tlaky, cca do 4 MPa.

2.2.3 Vlnovcové

Využití tlakoměrů vlnovcových je v oblasti nižších tlaků, příp. rozdílů tlaků, do cca 0,4 MPa. Jejich základem je tlakoměrný prvek ve tvaru tenkostěnného kovového nebo plastového

vlnovce (měchu) umístěného v pouzdře (viz schéma na obr. 31). Tuhost vlnovce, resp. měřicí rozsah snímače, může být zvětšena pružinou. Působením tlaku na vlnovec dochází ke změně jeho délky. Převodní charakteristika je téměř lineární.



Obr. 33 – Příklady provozních tlakoměrů značky JSP: s kapslovou membránou (vlevo), s oddělovací membránou (uprostřed) a s vlnovcem (vpravo), zdroj (JSP, 2023)

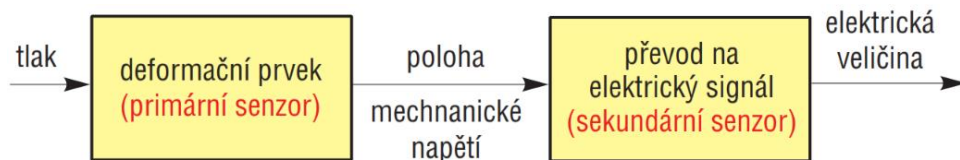
2.2.4 Krabicové

Základem krabicových tlakoměrů je tlakoměrná krabice složená ze dvou zvlněných navzájem spojených membrán. Tyto tlakoměry se používají pro měření malých přetlaků, podtlaků nebo rozdílů tlaků v rozsahu od cca 10 Pa až 1 kPa.

Příklady deformačních provozních tlakoměrů jsou uvedeny na obr. 32 a obr. 33. Tyto senzory jsou konstrukčně jednoduché, spolehlivé, odolné vůči rušení i v těžkých průmyslových provozech, poměrně levné a nepotřebují napájení. Jejich výhodou je také velká přestavná síla, což umožňuje připojení následných mechanických zařízení.

2.3 S elektrickým výstupem

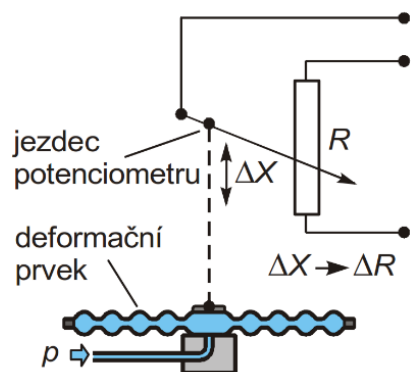
Moderní senzory tlaku s elektrickým výstupem pracují na principu vícenásobného převodu a ve své podstatě se skládají ze dvou senzorů, viz obr. 34. Primární senzor je realizován v podobě deformačního tlakoměrného prvku (trubice, membrána, vlnovec, krabice, viz výše, ale i nosník, viz měření síly) a na jeho výstupu je změna polohy nebo mechanického napětí. Navazující sekundární senzor pak umožňuje výstup primárního senzoru převést na elektrickou veličinu. Jedná se tedy o senzor polohy (odporový, resp. potenciometrický, indukčnostní, kapacitní nebo optický) nebo o senzor mechanického napětí (tenzometrický, piezoelektrický nebo rezonanční).



Obr. 34 – Blokové schéma senzoru tlaku s elektrickým výstupem, zdroj (Kadlec, 2016)

2.3.1 Potenciometrické

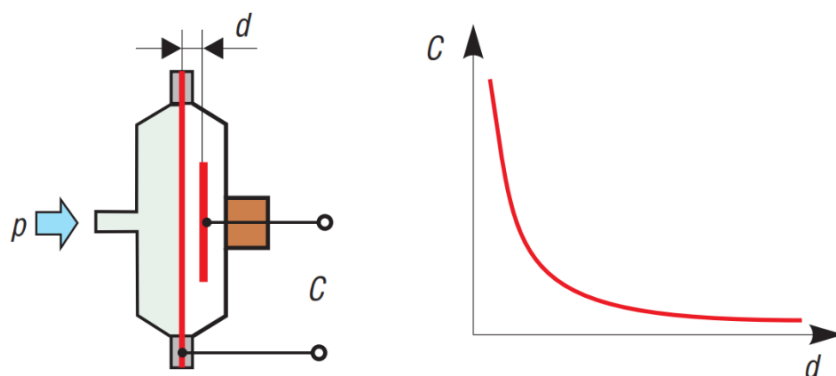
Potenciometrický senzor tlaku (označovaný též někdy jako odporový vysílač), jehož základní schéma je na obr. 35, se skládá z deformačního prvku mechanicky spojeného s jezdcem potenciometru. Změna deformace způsobená měřeným tlakem se tak vyhodnocuje jako změna odporu. Jde o jednoduché a velmi levné konstrukční řešení, u kterého není ani nutné použít zesilovač. Nevýhodou je ale citlivost na vibrace a s postupem času vznikající mechanické opotřebení, vlivem něhož se snižuje přesnost senzoru.



Obr. 35 – Schéma principu činnosti potenciometrického snímače tlaku, zdroj (Kadlec, 2016)

2.3.2 Kapacitní

Poměrně jednoduché je i konstrukční uspořádání kapacitních senzorů tlaku. Jedna z elektrod kondenzátoru je pevná a druhou tvoří přímo membrána, jejíž poloha se mění v závislosti na měřeném tlaku, viz obr. 36. Tím dochází ke změně kapacity kondenzátoru, závislost je ale nelineární.



Obr. 36 – Schéma principu činnosti kapacitního senzoru tlaku a odpovídající nelineární převodní charakteristika, zdroj (Kadlec, 2016)

Pro měření rozdílu tlaků lze využít diferenciální zapojení na obr. 38a. Membrána v tomto případě představuje střední pohyblivou elektrodu kondenzátoru, jež se navíc zapojuje do měřicího můstku. Uspořádání citlivé části senzoru je na obr. 38b. Vnitřní část je vyplněna buď silikonovým olejem, nebo jinou inertní kapalinou. Médium, jehož tlak měříme nepůsobí přímo na měřicí membránu, ale na postranní oddělovací membrány. Pevné elektrody jsou umístěny na keramickém nebo skleněném izolantu, který je vhodně tvarován tak, aby byla změna kapacity co největší a zároveň, aby mohly při přetížení čidla fungovat jako mechanický doraz.

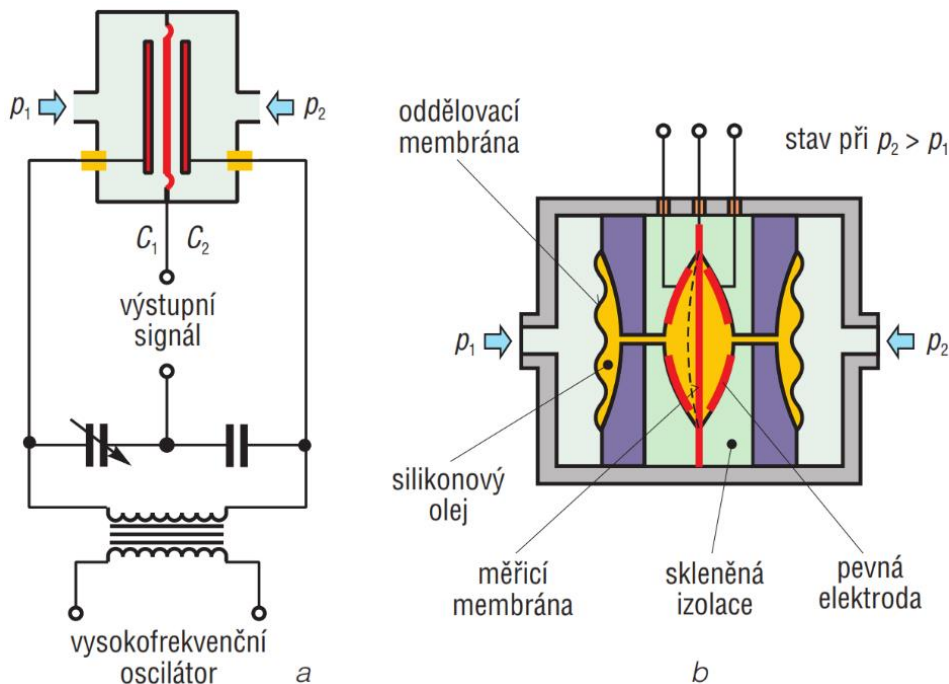


Obr. 37 – Příklady různých typů průmyslových senzorů tlaku s elektrickým výstupem značky Baumer, zdroj (Profess, 2023)

Deformace měřicí membrány vyvolá navzájem opačnou změnu kapacit C_1 a C_2 , přičemž výstupní napětí je přímo úměrné rozdílu těchto kapacit

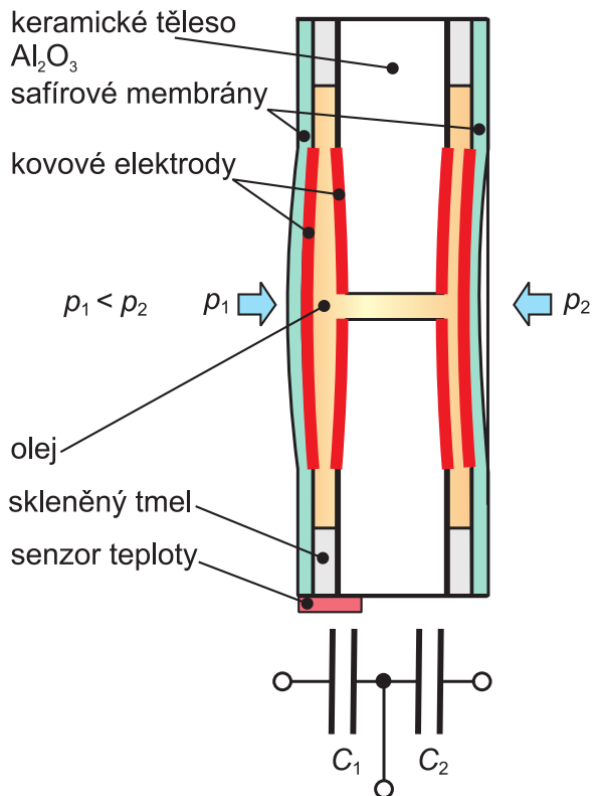
$$C_1 - C_2 = C_0 + \Delta C - (C_0 - \Delta C) = 2\Delta C \quad (6)$$

čímž je dosaženo dvojnásobné citlivosti oproti běžnému kapacitnímu čidlu. Velmi důležité je použití následných obvodů s kompenzací parazitních kapacit způsobených kapacitami kabelů, přívodních vodičů a stínícího krytu. Obvyklý rozsah snímačů rozdílu tlaků je od 100 Pa až do 40 MPa.



Obr. 38 – Princip činnosti diferenciálního kapacitního senzoru: a) zapojení, b) možné uspořádání, zdroj (Kadlec, 2016)

U moderních kapacitních senzorů se používá keramická měřicí membrána, jež je součástí tzv. keramické měřicí cely, viz obr. 39. Je tvořena tělesem z velmi čisté keramiky a safírovými membránami s velkou mechanickou pevností na nichž jsou elektrody kondenzátoru. Prostor uvnitř je vyplněn silikonovým olejem. Vlivem působení rozdílu tlaků dochází k průhybu membrán a tím ke změně kapacity. Ta je vyhodnocována mikroprocesorově řízenými elektronickými obvody s plně automatickou kompenzací parazitního vlivu teploty.



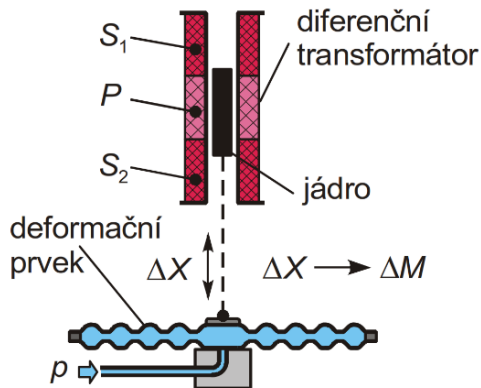
Obr. 39 – Schéma keramické měřicí cely moderního kapacitního senzoru tlaku, zdroj (Kadlec, 2016)



Obr. 40 – Příklady průmyslových senzorů tlaku, přetlaku a rozdílů tlaků s keramickou měřicí celou Cerabar a Deltabar, zdroj (Endress+Hauser, 2023)

2.3.3 Indukčnostní

Indukčnostní senzory tlaku jsou nejčastěji realizovány s využitím diferenciálního transformátoru LVDT (více viz studijní text k měření polohy), viz obr. 41. Změna měřeného tlaku vyvolá prostřednictvím vhodného deformačního prvku výchylku Δx , která způsobí změnu vzájemné indukčnosti ΔM mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru.

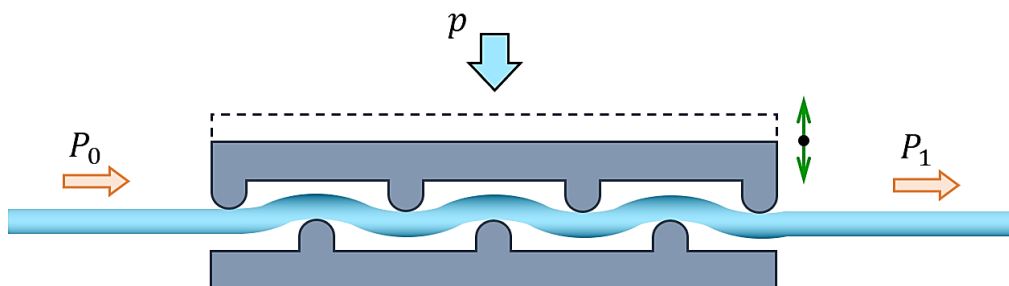


Obr. 41 – Schéma principu činnosti indukčnostního snímače tlaku, zdroj (Kadlec, 2009)

2.3.4 Optické

Optický vláknový senzor tlaku využívá vzniku mikroohybů vlákna, které vznikají vlivem tlaku hrotů při působení měřeného tlaku, viz schéma na obr. 42. Spodní základna je pevná a poloha horní základny se vlivem tlaku mění o Δx . Tím dochází ke konverzi vyšších vidů v optickém vlákne, které je mnohavidové. Vstupní optický výkon P_0 se v důsledku toho po průchodu vlákem sníží na hodnotu P_1 , což se vyhodnotí následnými elektronickými obvody.

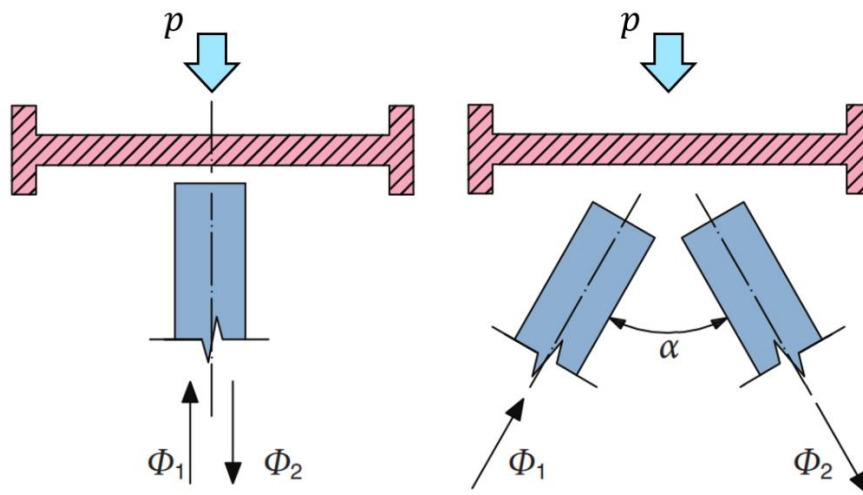
Na obr. 43 je schéma uspořádání odlišného typu optického vláknového senzoru tlaku s membránou s reflexní vrstvou. Vlivem působení měřeného tlaku na membránu se mění vzdálenost mezi koncem vlákna a membránou s nanosenou reflexní vrstvou. Dopadá-li na reflexní vrstvu světlo s tokem Φ_1 , intenzita odraženého světla se mění a tím i světelný tok Φ_2 . Na obr. 43 vlevo je varianta s jedním optickým vláknem kolmo k membráně a vpravo pak varianta se dvěma vlákny se vzájemným úhlem natočení α .



Obr. 42 – Schéma principu senzoru tlaku s optickými vlákny, zdroj autor dle (Bejček, 2011)

Další typ optického vláknového senzoru tlaku využívá ve své struktuře Fabry-Perotův rezonátor, u kterého se vlivem působení měřeného tlaku mění rozměry, čímž dochází k jeho

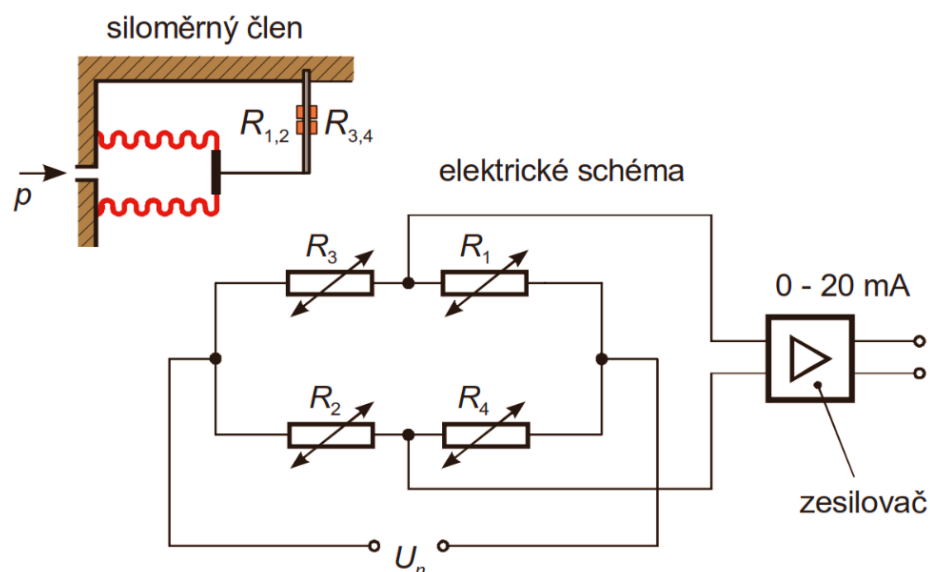
přeladování. Změna tlaku je tak v tomto případě úměrná změně rezonanční frekvence rezonátoru. V průmyslové praxi a i v armádní technice se používají též velmi přesné senzory s dvojramenným jednovidovým Mach-Zehnderovým interferometrem. Ty i při frekvencích do 100 Hz dosahují citlivosti 100 mPa.



Obr. 43 – Schéma uspořádání optického vlákňového senzoru tlaku s membránou s reflexní vrstvou: se společným vláknem (vlevo) a se dvěma vlákny (vpravo), upraveno dle (Bejček, 2011)

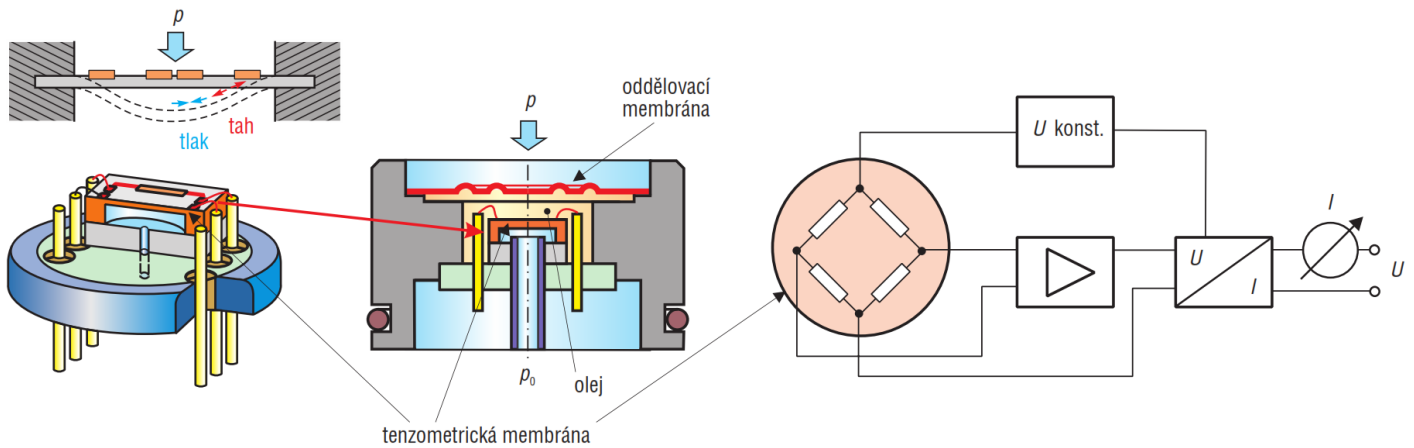
2.3.5 Tenzometrické

Základní princip převodu tlaku na deformaci je patrný z obr. 44. Siloměrný člen, resp. deformační měrné tělísko, např. vlnovec, se deformuje vlivem měřeného tlaku. Změna je následně vyhodnocována tenzometry zapojenými v úplném můstku. Na výstupu senzoru je pak unifikovaný proudový signál. V moderních tenzometrických senzorech tlaku se využívají výhradně tenzometry polovodičové, jejichž funkce je založena na piezorezistivním jevu (podrobnosti viz předchozí studijní opory týkající se tenzometrů).



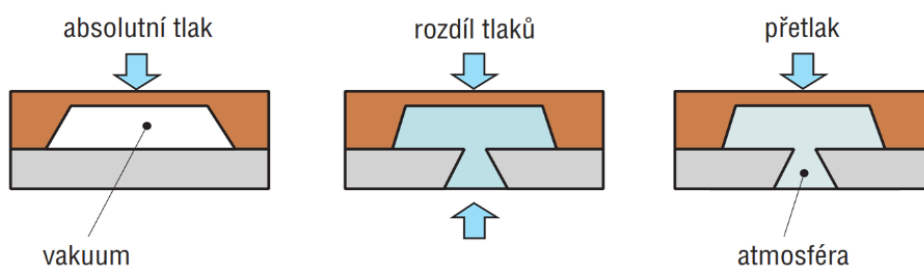
Obr. 44 – Základní schéma principu převodu tlaku na deformaci, zdroj (Kadlec, 2008)

U moderních miniaturních senzorů se používají tlakoměrné cely s polovodičovými tenzometry realizovanými difúzní technologií přímo na křemíkové membráně. Ta je po obvodu vetknuta a při měření dochází k její deformaci, viz obr. 45 (průhyb membrány je zde pro ilustraci oproti skutečnosti nadsazen). Tenzometry jsou po povrchu membrány umístěny v jejím středu, kde dochází k namáhání tlakem, ale i po obvodu, tedy v místě namáhání tahem.



Obr. 45 – Schéma uspořádání a princip činnosti senzoru tlaku s difundovanými polovodičovými tenzometry, zdroj (Kadlec, 2016)

Z důvodu potřeby měřit tlak i jiných médií, než je suchý čistý vzduch, se v konstrukci senzorů používá ještě dodatečná kovová oddělovací membrána. Meziprostor je navíc vyplněn olejem. Snímací prvky senzorů mohou být alternativně použity pro měření absolutního tlaku, přetlaku, podtlaku i rozdílu tlaků. V případě měření absolutního tlaku je prostor pod membránou tzv. evakuován a hermeticky uzavřen, při ostatních měřeních je propojen buď s okolní atmosférou, nebo s prostorem s jiným tlakem, viz obr. 46. Na obr. 47 je několik provedení v praxi velmi rozšířených průmyslových senzorů tlaku DMK 331 s křemíkovou membránou. Provedení pouzdra je buď nerezové, nebo v kombinaci plast – nerez; senzory mají buď kabelový výstup, nebo konektor pro osazení výstupního bloku s kabelovou průchodkou.



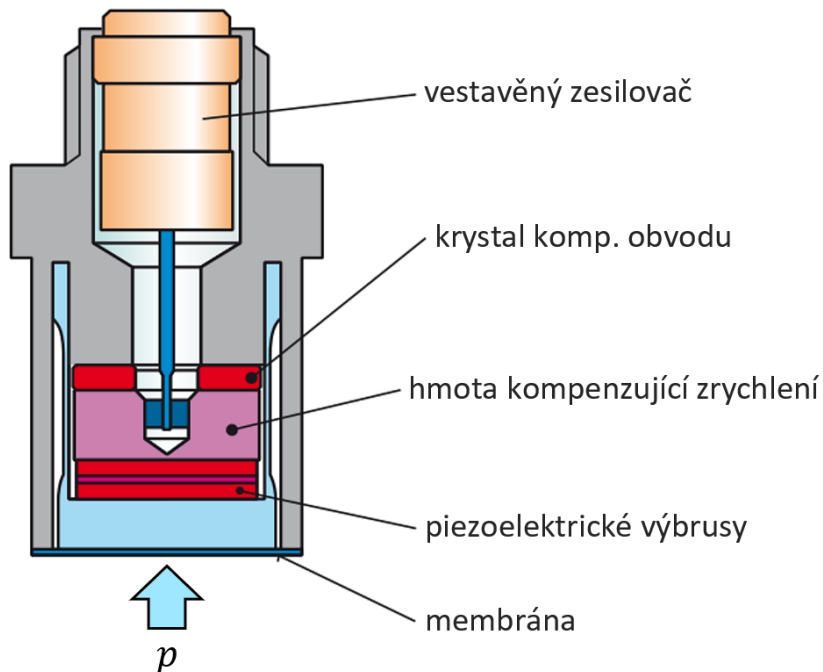
Obr. 46 – Přizpůsobení prostoru pod membránou pro konkrétní typ měření tlaku, zdroj (Kadlec, 2016)



Obr. 47 – Různá provedení průmyslových senzorů tlaku DMK 331 s křemíkovou membránou s difundovanými tenzometry, zdroj (BD Sensors, 2023)

2.3.6 Piezoelektrické

Na obr. 48 je schéma uspořádání piezoelektrického senzoru tlaku se dvěma výbrusy z PZT keramiky ve tvaru disku a v navzájem paralelním uspořádání. V této konfiguraci se totiž náboje obou výbrusů sčítají a zvyšuje se tak přesnost měření. Přenos síly vyvolané měřeným tlakem je zprostředkován pomocí membrány.



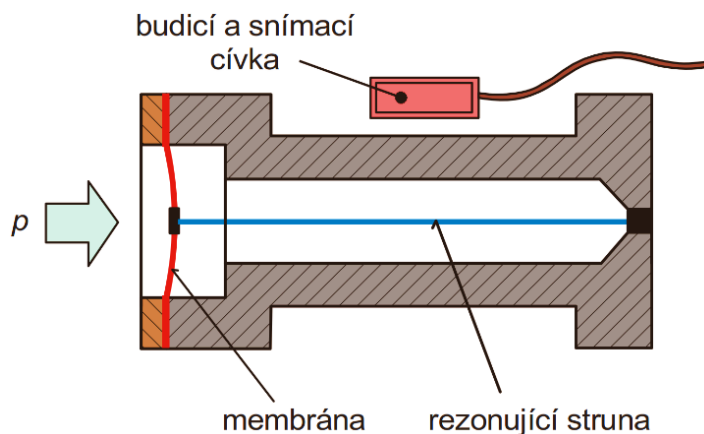
Obr. 48 – Schéma piezoelektrického senzoru tlaku, upraveno dle (Kadlec, 2009)

Senzor je navíc vybaven kompenzací vlivu zrychlení, takže obsahuje další hmotu osazenou piezoelektrickým výbrusem s opačnou polarizací. V krytu senzoru, který zároveň slouží jako magnetické stínění, je přímo zabudován zesilovač s velkým vstupním odporem.

Mezi výhody piezoelektrických senzorů patří především jejich dynamické vlastnosti, díky čemuž mohou být použity při měření tlakových dynamických dějů, např. v motorech a kompresorech. Nicméně, kvůli faktu, že piezoelektrické snímače obecně neměří staticky a ani v pásmu frekvencí do cca 0,5 Hz, je jejich použití v tomto směru omezené a je též nutné u nich používat pokročilejší elektroniku. Jsou ale velmi odolné, miniaturních rozměrů a velmi spolehlivé.

2.3.7 Rezonanční

Základním principem funkce rezonančních senzorů tlaku je závislost rezonanční frekvence mechanického kmitajícího prvku – struny, viz obr. 49. Jeden konec struny je pevně spojen s tělem senzoru a druhý je připojen k membráně sloužící pro přenos deformace způsobené měřeným tlakem.



Obr. 49 – Schéma rezonančního senzoru tlaku, zdroj (Kadlec, 2009)

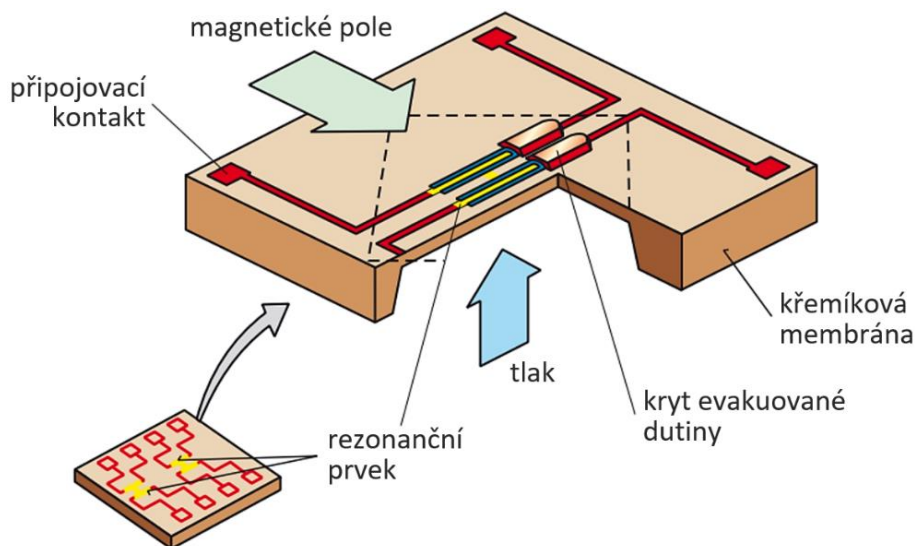
Kmity struny jsou buzeny elektromagneticky pomocí budící a snímací cívky. Vlastní frekvence takto vzniklého rezonátoru závisí na rozměru a tvaru kmitajícího prvku, hustotě jeho materiálu ρ , Youngovu modulu pružnosti materiálu E a mechanické deformaci ($\sigma = \varepsilon E$, kde poměrné prodloužení $\varepsilon = \Delta l/l$)

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\varepsilon E}{\rho}} \quad (7)$$

V uvedené konfiguraci vyvolá změna měřeného tlaku působícího na membránu změnu mechanického napětí struny a tím současně i změnu její vlastní frekvence. U senzorů tohoto typu je nezbytně nutné kompenzovat parazitní vliv teploty, což se provádí v navazujících integrovaných elektronických obvodech.

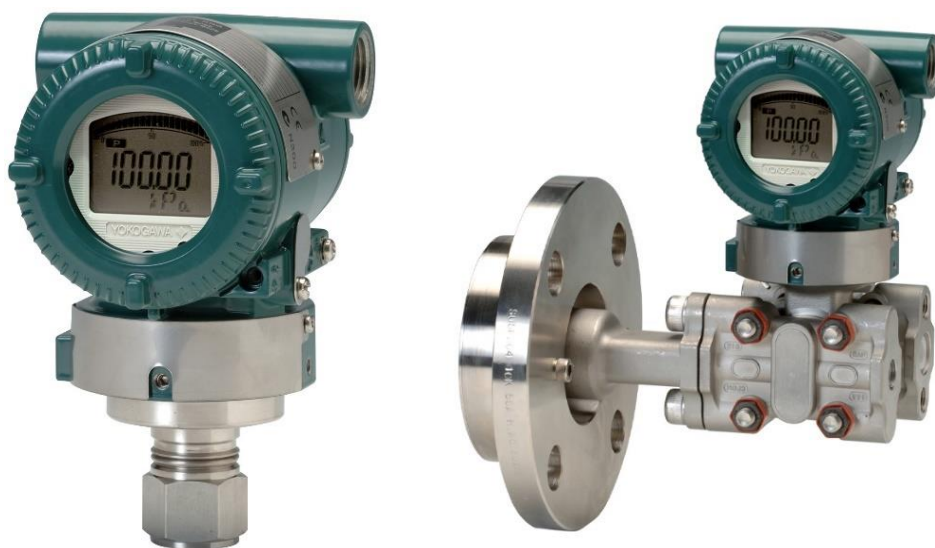
Moderní praktické realizace rezonančního senzoru tlaku ale využívají místo struny mikromechanický rezonanční prvek realizovaný technologií MEMS. Na obr. 50 je schéma integrovaného senzoru tohoto typu s označením DPharp od společnosti Yokogawa. Realizace průmyslových senzorů jsou pak na obr. 51. Základem senzoru jsou dva rezonátory ve tvaru písmene H, realizované mikroelektronickým obráběním monokrystalu Si a umístěné uvnitř evakuované dutiny z důvodu snížení vlivu parazitní teploty a vlhkosti. Rezonátory se nachází v magnetickém poli permanentního magnetu a jsou buzené střídavým proudem s využitím zesilovače s proměnlivým zesílením, který udržuje konstantní amplitudu kmitů. Miniaturní nosič rezonátorů jsou široké 5 μm a dlouhé 500 μm .

Senzor se skládá z křemíkové membrány na kterou měřený tlak působí přes kovovou oddělovací membránu. Meziprostor je vyplněn nejčastěji silikonovým olejem. Pružná deformace membrány vyvolá změnu mechanického napětí ve zmiňovaných rezonátorech, čímž se změní jejich vlastní frekvence. Konstrukce s dvojicí rezonátorů se stejně velkým výstupním signálem, ale s opačným působením, slouží ke dvojnásobnému zvýšení citlivosti. Frekvenční výstupy jsou zpracovávány pomocí mikroprocesoru. Měřit lze rozdíl tlaků, ale na rozdíl od piezoelektrických senzorů i statický tlak.



Obr. 50 – Schéma integrovaného mikromechanického rezonančního senzoru tlaku, upraveno dle (Bejček, 2011)

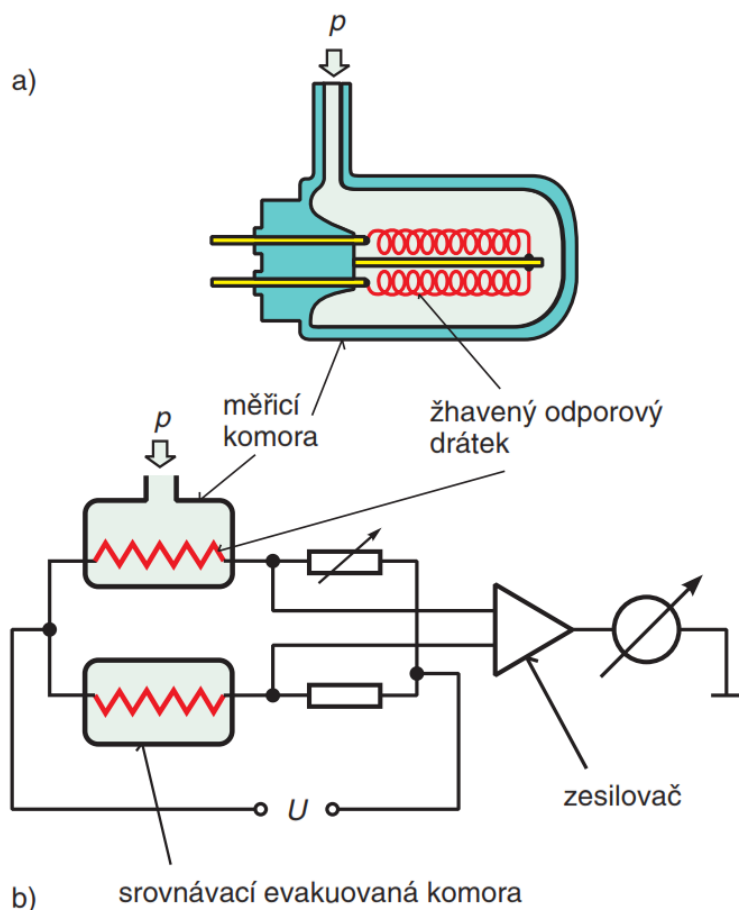
Rezonanční senzory tlaku vyráběné technologií MEMS patří mezi nej přesnější tlakoměry vůbec. Pracují bez hystereze, vykazují vynikající stabilitu a tedy i opakovatelnost měření a oproti jiným sensorům mají podstatně vyšší odstup výstupního signálu od šumu. Výstupním signálem je frekvence, což usnadňuje převod na číslicový signál.



Obr. 51 – Průmyslové provozní rezonanční senzory tlaku DPharp EJX od spol. Yokogawa, zdroj (Yokogawa, 2023)

2.3.8 Tepelněvodivostní

Tepelněvodivostní senzory tlaku patří do skupiny elektrických tlakoměrů pro měření extrémních tlaků, v tomto případě velmi malých (tzv. velkého vakua). Piraniho vakuometr, jehož princip je znázorněn na obr. 52, vychází ze závislosti tepelné vodivosti plynu na absolutním tlaku. Používá se v rozmezí od 10^{-4} Pa až do 100 Pa. Tlaky nad 100 Pa měřit nelze, protože při vyšších tlacích se tepelná vodivost plynu s tlakem prakticky nemění.

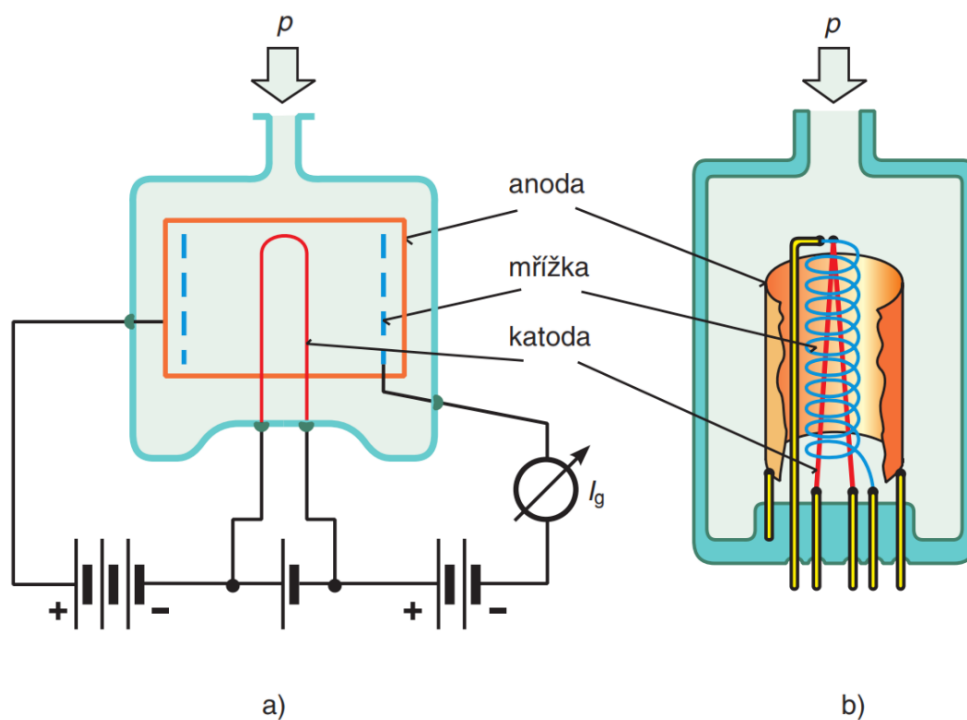


Obr. 52 – Princip tepelněvodivostního senzoru tlaku (Piraniho vakuometru): a) uspořádání měřicí komory, b) schéma zapojení, zdroj (Kadlec, 2007)

Součástí skleněné nádoby (obr. 52a), která je propojena s měřicí komorou, je zatavená malá spirála z platiny vyhřívána za pomoci konstantního proudu na teplotu v rozmezí 200 až 300 °C. Plyn v měřicí komoře ochlazuje žhavenou spirálu, která je zapojena v jedné větvi úplného Wheatstoneova můstku (obr. 52b). V druhé větvi můstku je zapojena obdobná spirála fyzicky umístěná v evakuované srovnávací komoře.

2.3.9 Ionizační

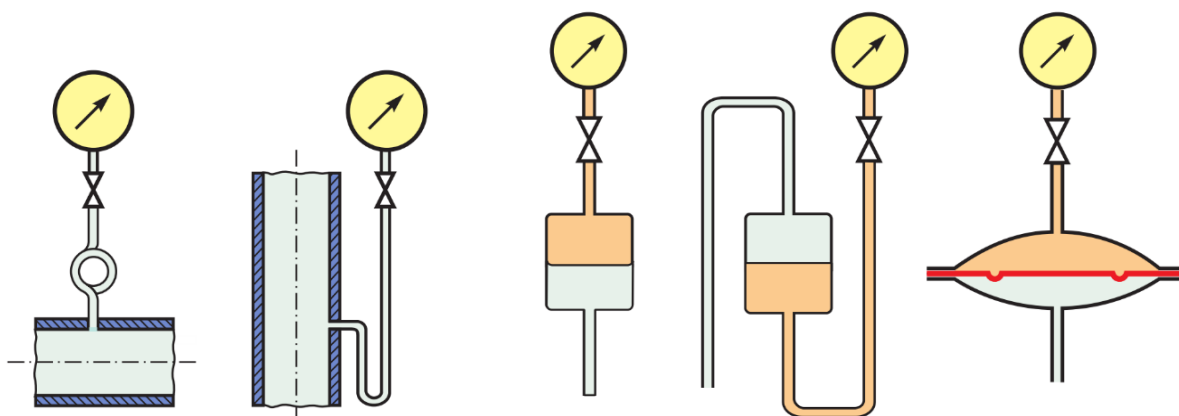
Pro měření extrémně malých absolutních tlaků až do 10^{-10} Pa lze využít vakuometry ionizační. Ty využívají jevu elektrické ionizace molekul, konkrétně ionizaci způsobenou termoemisí, radioaktivním zářením, nebo doutnavým výbojem. V případě termoemise je do prostoru triody (obr. 53) přiváděn plyn, jehož absolutní tlak má být měřen. Z katody jsou emitovány elektrony, které jsou následně přitahovány anodou a při srážce s molekulami zbytkového vzduchu jsou z nich vyráženy elektrony. Tímto způsobem ionizované molekuly vzduchu jsou pak přitahovány mřížkou, na níž se generuje tzv. mřížkový proud I_g . Proud je přímo úměrný počtu zbytkových molekul vzduchu. Měřený absolutní tlak je tedy úměrný velikosti mřížkového proudu. (Kadlec, 2007)



Obr. 53 – Schéma principu ionizačního senzoru tlaku: a) zapojení, b) uspořádání vakuometru, zdroj (Kadlec, 2007)

2.4 Pomocná zařízení při měření tlaku

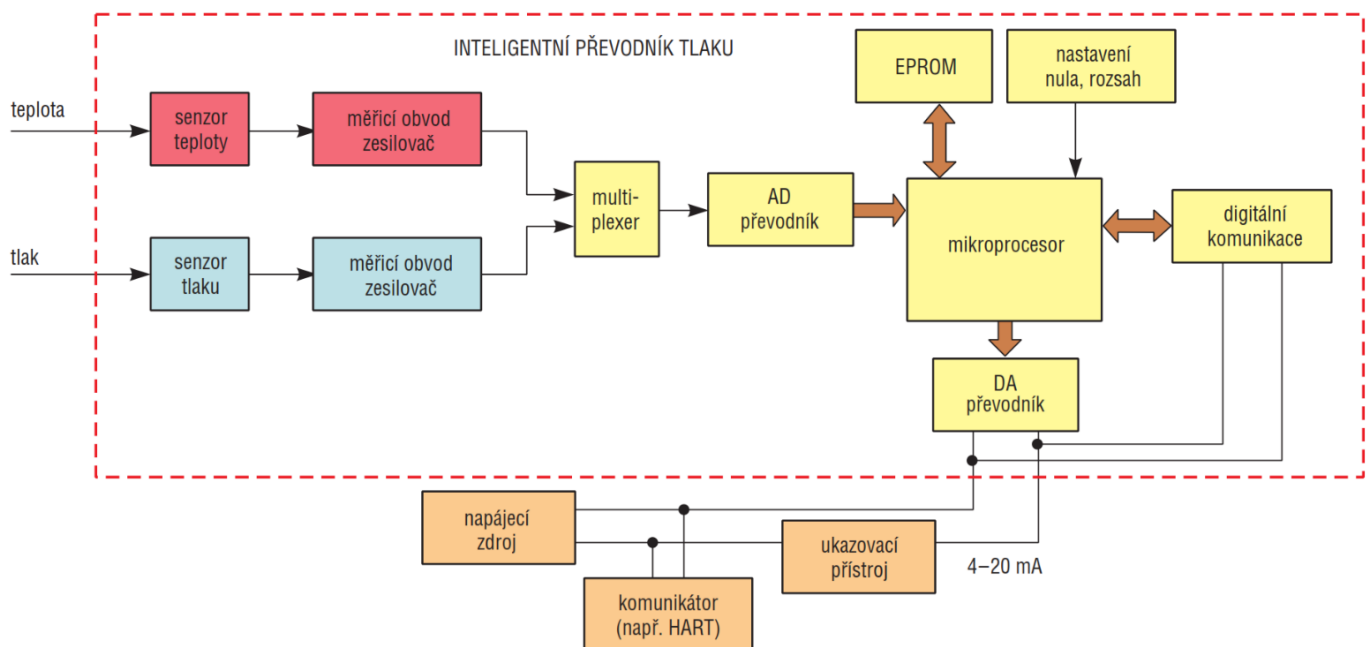
Při reálných měřeních je nutné volit vhodné místo měření tak, aby měřený statický tlak nebyl ovlivněn dynamikou okolního prostředí. Místo měření by tedy mělo být dostatečně daleko od armatur, kolen a ventilů. U vodorovného potrubí je místo měření v jeho horní části, u potrubí svislých na boku. Navíc bývají kvůli nebezpečí zanášení senzorů nečistotami, příp. kondenzátem, mezi měřicí místo a senzor instalovány kondenzační smyčky, viz obr. 54. Je-li potřeba měřit tlak agresivních látek, zařazuje se buď oddělovací nádobka nebo membrána, viz také některá průmyslová provedení senzorů na výše uvedených fotografiích na obr. 32 a obr. 33.



Obr. 54 – Pomocná zařízení používaná při provozním měření tlaku: kondenzační smyčky (vlevo) a oddělovací nádobky (vpravo), zdroj (Kadlec, 2007)

2.5 Inteligentní převodníky tlaku

Tzv. inteligentní převodníky (smart, viz také studijní materiály – téma 1) se používají nejen ve spojitosti s měřením tlaku, ale samozřejmě i u jiných neelektrických veličin. Jsou charakteristické využitím mikroprocesoru a dalších potřebných elektronických obvodů (A/D a D/A převodníků, zesilovačů, logických obvodů, pamětí a komunikačních obvodů) ve svojí struktuře, viz blokové schéma na obr. 55. Nedílnou součástí takového převodníku je samozřejmě také potřebný software. K přenosu informací ze sensorů se využívají unifikované analogové nebo digitální elektrické signály. Používají se také průmyslové komunikační protokoly, např. HART, dle něhož je na analogový proudový unifikovaný signál v rozsahu 4 až 20 mA superponován frekvenčně závislý sinový signál s konstantní amplitudou (zpravidla 0,5 mA) o dvou různých frekvencích (2,2 kHz a 1,2 kHz), přičemž jedna frekvence odpovídá logické nule a druhá logické jedničce.



Obr. 55 – Blokové schéma inteligentního převodníku tlaku, zdroj (Kadlec, 2016)

Součástí inteligentních převodníků mohou být nejen výše uvedené elektronické obvody, ale také obvody zajišťující základní diagnostiku, korekci chyb, kompenzaci parazitních veličin, autokalibraci, úpravu převodní charakteristiky a další. Nevýhodou inteligentních převodníků je prozatím stále ještě vyšší pořizovací cena.

3 Otázky a úkoly

- 1) Vyjmenujte alespoň šest typů deformačních měrných tělísek a načrtněte jejich tvar.
- 2) K čemu se v praxi používají siloměry s nízkoprofilovými deformačními tělísky označované jako donut nebo pancake? Kam se u nich obvykle umísťují tenzometry?
- 3) Na jakých principech je založeno měření tlaku? Nakreslete diagram s vyznačením vzájemných souvislostí mezi různými vyjádřeními tlaku.

- 4) Vyjmenujte a stručně popište alespoň tři deformační tlakoměry.
- 5) Na jakých principech pracují tlakoměry s elektrickým výstupem? Jeden z principů si vyberte a podrobněji jej popište.

4 Použitá literatura

ALTHEN SENSORS & CONTROLS, 2023. *Cylindrical Load Cells* [online]. [citováno 27. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.althensensors.com/sensors/weighing-sensors-load-cells/cylindrical-load-cells/>>

Anon. *Priemyselná informatika: meranie procesných veličín* [online]. [Citováno 28. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<http://www.pit.6f.sk/snimace-tlaku/>>

APPLIED MEASUREMENTS AUSTRALIA, Pty. Ltd., 2023. *Ring Type load cell PSRT* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://appliedmeasurement.com.au/product/psrt/>>

BEJČEK, Ludvík a Jan Vaculík, 2011. Snímače tlaku. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **17**(1), 20-23. ISSN 1210-9592.

BD SENSORS, GmbH., 2023. *Pressure transmitter DMK 331: ceramic sensor*. [online]. [citováno 28. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.bdsensors.de/en/pressure/pressure-transmitter/details/produkt/dmk-331>>

BOURDON-HAENNI, GmbH., 2023. *Pressure gauge: the original from Bourdon* [online]. [citováno 27. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.bourdon-instruments.com/int/en/product-overview/pressure-gauges/c/36822>>

D-EX INSTRUMENTS, s.r.o., 2023. *Pístové tlakoměry* [online]. [citováno 29. 6. 2023]. Dostupný z WWW: <https://www.dex.cz/kategorie_produkty/pistove_tlakomery/>

DINI ARGEO, S.r.l., 2023. *Load Cells* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<http://www.diniargeo.com/men/scales/load-cells.aspx>>

DIRECT INDUSTRY, 2023. *Tension/compression load cells* [online]. [citováno 27. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-tlak>>

ENDRESS+HAUSER Czech, s.r.o., 2023. *Měření tlaku: výkonné přístroje pro měření provozního tlaku, diferenčního tlaku, hladiny a průtoku* [online]. [citováno 27. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/tension-compression-load-cell-133724-5.html>>

FLINTEC, Inc., 2023a. *Beam load cell: single-ended shear* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.flintec.com/weight-sensors/load-cells/how-does-a-beam-load-cell>>

FLINTEC, Inc., 2023b. *Compression load cell: columnar* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.flintec.com/weight-sensors/load-cells/how-does-a-beam-load-cell>>

FLINTEC, Inc., 2023c. *Single-point load cell: platform* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.flintec.com/weight-sensors/load-cells/how-does-a-beam-load-cell>>

FUTEK ADVANCED SENSOR TECHNOLOGY, Inc., 2023. *Load Cells* [online]. [citováno 27. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.futek.com/store/load-cells>>

HOTTINGER BRÜEL & KJÆR, 2023. *Force Sensors & Load Cells* [online]. [citováno 27. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.hbm.com/en/0249/force-sensors-and-force-transducers/>>

INTERFACE, Inc., 2023. *Low Profile Interface Load Cells* [online]. [citováno 27. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.interfaceforce.com/product-category/load-cells>>

JSP, s.r.o., 2023. *Manometry, manovakuometry* [online]. [citováno 27. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_tlaku_a_tlakove_diference/manometry>

KADLEC, Karel, 2007. Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 4). *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **13**(11), 42-46. ISSN 1210-9592.

KADLEC, Karel, 2008. *Příprava na laboratorní práci Měření a regulace tlaku, kalibrace tlakoměrů*. Praha: VŠCHT, Fakulta chemicko-inženýrská.

KADLEC, Karel, 2009. *Měřicí a řídicí technika pro 1. roč. magisterského studia FPBT: měření tlaku* [studijní opora]. Praha: VŠCHT, Fakulta chemicko-inženýrská.

KADLEC, Karel, 2016. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: měření tlaku. *Listy cukrovarnické a řepařské*. **132**(11), 360-365. ISSN 1805-9708.

KIMO ELECTRONIC, Pvt. Ltd., 2023b. *ECM Electric contact pressure controllers* [online]. [citováno 29. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.kimoinstruments.com/detail/ecm-electric-contact-pressure-controllers>>

KIMO ELECTRONIC, Pvt. Ltd., 2023b. *Liquid Column Manometers* [online]. [citováno 29. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.kimoinstruments.com/hvac-and-r-instruments/manometers/liquid-column-manometers>>

KISTLER GROUP, 2023a. *Force sensors* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.kistler.com/DE/en/c/force-sensors/CG21-force-sensors>>

KISTLER GROUP, 2023b. *Pressure sensors* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.kistler.com/DE/en/c/pressure-sensors/CG21-pressure-sensors>>

KUPKA, Libor, 2022. *Základy mechatroniky: výukový materiál*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

KYOWA ELECTRONICS INSTRUMENTS, Co., Ltd., 2023. *Load Cells (Load Transducers)* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.kyowa-ei.com/eng/technical/sensors/loadcells.html>>

LUFINKA, A. 2012. Snímače pro měření vzdálenosti, posuvu, síly a tlaku. In: *Experimentální metody – přednášky*. Liberec, TU.

MEGATRON, s.r.o., 2023a. *Převodníky tlaku* [online]. [citováno 22. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.megatron.cz/kategorie/senzorika/snimace-tlaku-teploty/tlakove-snimace>>

MEGATRON, s.r.o., 2023b. *Snímače síly* [online]. [citováno 22. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.megatron.cz/kategorie/senzorika/tenzometry/snimace-sily>>

MOREHOUSE INSTRUMENT COMPANY, Inc., 2023. *Digital Ring Force Gauge* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://mhforce.com/product/digital-ring-force-gauge/>>

MOREHOUSE INSTRUMENT COMPANY, Inc., 2021. *Types of Load Cells* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://mhforce.com/types-of-load-cells/>>

OMEGA ENGINEERING, Inc., 2023. *Load Cell Designs* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.omega.co.uk/literature/transactions/volume3/load3.html>>

PROFESS, spol. s r. o., 2023. *Měření tlaku: průmyslové snímače tlaku* [online]. [citováno 27. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.profess.cz/cs/pci/produkty/mereni_tlaku/prumyslove_snimace_tlaku>

RIPKA, Pavel a kol., 2011. *Senzory a převodníky* [skripta]. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-04696-8.

SENSORLAND, 2023. *How They Work: Load / Force Cells* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.sensorland.com/HowPage005.html>>

TEKSCAN, Inc., 2023. *Load Cell Vs. Force Sensor* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.tekscan.com/resources/whitepaper/load-cell-vs-force-sensor>>

WIKIPEDIE, 2023. *Tlak. Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [citováno 27. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://cs.wikipedia.org/wiki/Tlak>>

YOKOGAWA EUROPE, B.V., 2023. *Pressure Transmitters* [online]. [citováno 28. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.yokogawa.com/za/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/pressure-transmitters/>>

Seznam zkratk

A/D analogově digitální

D/A	digitálně analogový
EPROM	erasable programmable read-only memory (mazatelná paměť pouze pro čtení)
HART	highway addressable remote transducer (komunikační protokol)
LVDT	linear variable differential transformer (diferenciální transformátorový snímač)
MEMS	micro electro mechanical systems (mikroelektromechanické systémy)
PZT	piezoelektrická (keramika)
SI	Le Système International d'Unités (mezinárodní soustava jednotek)
TU	Technická univerzita

Rejstřík

atmosférický. viz barometrický
deformační měrné tělísko, 1, 2, 3, 4
 binocular, 3, 5, 6
 dvojitý nosník, 5, 6
 typ S, 5
 jednoduchý nosník, 5, 6
 s tenzometry zatěžovanými ve stříhu, 6
 kroužek (prstenec), 7
 kruhové nízkoprofilové
 s tenzometry v tlakové konfiguraci, 9
 s tenzometry ve střížné konfiguraci, 10
 spirálová pružina, 8
 válcové, 8
HART protokol, 35, 39
kondenzační smyčka, 34, 35
oddělovací nádobka, 35
odporový vysílač. viz potenciometrický senzor
piezoelektrický jev, 1, 11, 13
převodník tlaku. viz senzor tlaku
senzor síly
 piezoelektrický, 11
 s deformačním měrným tělískem, 2
 binocular, 3, 4
 dvojitý nosník, 6
 jednoduchý nosník, 6
 s tenzometry zatěžovanými ve stříhu, 7
 kroužek (prstenec), 7
 miniaturní knoflíkový, 11
 miniaturní membránový, 10
 s nízkoprofilovým kruhovým deformačním tělískem
 donut, 10

- pancake, 10
- s převodem deformace na výchylku, 12
- senzor tlaku, 14, 23, 26, 32, 33
 - indukčnostní, 26
 - inteligentní, 35
 - ionizační, 34
 - kapacitní, 23, 24, 26
 - MEMS, 1, 31, 32, 39
 - optický vláknový, 27
 - piezoelektrický, 30
 - potenciometrický, 23
 - průmyslový, 24, 26, 29, 30
 - rezonanční, 31, 32
 - tenzometrický, 29
 - tepelněvodivostní, 33
- smart. viz inteligentní
- tenzometr, 1, 2, 3, 13, 28
- tlak, 1, 2, 3, 13, 16, 17, 21, 24, 29, 32, 34, 36
 - absolutní, 13, 34
 - barometrický, 13, 14
 - diferenční, 13, 14
 - hydrostatický, 16
- tlakoměr, 1, 14, 18, 19
 - barometr, 14
 - deformační, 20, 21
 - krabicový, 22
 - trubicový, 21
 - vlnovcový, 22
 - diferenční, 14
 - hydrostatický, 16, 17, 18
 - nádobkový, 15, 17, 18
 - nádobkový s nakloněným ramenem, 18
 - U-trubicový, 15, 16, 17
 - manometr, 14
 - membránový, 21
 - silový, 19
 - pístový, 19
 - zvonový, 19, 20
- tlakoměrná cela, 29
- tlakoměrný prvek, 20
 - Bourdonova trubice, 21
 - membrána, 1, 13, 21, 23, 25, 29, 34
 - tlakoměrná krabice, 22
 - vlnovec, 1, 13, 21, 22, 23, 28
- Wheatstoneův můstek, 33

Měření neelektrických veličin

Téma 11: Měření průtoku

Studijní cíl

Základní principy objemových, rychlostních a hmotnostních průtokoměrů. Popis senzorů průtoku pracujících na různých fyzikálních principech – s měřením tlaku, s pohyblivými součástmi, indukčních, ultrazvukových a tepelných.

Doba nutná k nastudování

4 hodiny

Klíčová slova

Objemový průtok, hmotnostní průtok, rychlost proudění, laminární proudění, turbulentní proudění, průtokoměr, plynoměr, clona, dýza, trubice, kapilára, rotametr, vodoměr, anemometr, kalorimetr, potrubí, přepad, žlab, ultrazvuk, Dopplerův jev, Coriolisova síla

1 Základní principy senzorů průtoku

Průtokem se poněkud nepřesně označuje jednak **rychlost proudění tekutiny** (tj. kapaliny i plynu), ale současně i objemový a hmotnostní průtok. **Objemový průtok** Q_V [m^3s^{-1}] odpovídá objemu kapaliny (nestlačitelné), který proteče daným průřezem za jednotku času

$$Q_V = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

Hmotnostní průtok Q_m [kg s^{-1}] pak udává hmotnost plynu (stlačitelného), který projde daným průřezem za jednotku času

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

a současně platí vzájemná relace mezi oběma průtoky

$$Q_m = \rho Q_V \quad (3)$$

Součástí některých senzorů bývá integrační zařízení, takže jsou schopny udávat **proteklé množství** (hmotnost m či objem V).

Měření průtoku patří mezi velmi důležitá měření neelektrických veličin, neboť průtokoměry mají široké uplatnění v průmyslu. Slouží jako senzory v regulačních obvodech, dávají informace o toku materiálu a v neposlední řadě mohou být zdroji pro bilanční rozvahy u

technologických procesů. Senzory lze rozdělit na základní typy podle mnoha hledisek (podrobnější dělení průtokoměrů je v tab. 1), nejčastěji na základě použité měřicí metody:

- **objemové** – dochází u nich k odměřování tekutin (plynů či kapalin) v odměrných komorách;
- **rychlostní** – jejich základem je měření rychlosti proudícího média zvolenou metodou, z níž se následně vypočítá objemový průtok;
- **hmotnostní** – měří se vhodná veličina přímo úměrná hmotnostnímu průtoku.

Tab. 1 – Základní přehled snímačů průtoku, zdroj autor dle (Kadlec, 2006a) a (Ďaďo, 2011)

Skupina snímačů	Typ průtokoměru	Bližší specifikace	Základní princip měření	Rozsah použití [m ³ /hod]
Objemové	Objemová měřidla	S nespojitou funkcí	Měří se přírůstek objemu za čas	10 ⁻³ až 10 ²
		Se spojitou funkcí	Cyklické plnění a vyprazdňování komor	10 ⁻³ až 10 ³
Rychlostní	S měřením rozdílu tlaků	Rychlostní sondy	Závislost dynam. tlaku proudícího média na rychlosti proudění	1 až 10 ²
		Průřezové (clony a dýzy)	Měření rozdílu statických tlaků před a za zúžením průtočného profilu	10 ⁻⁴ až 10 ³
		Kapilární (laminární)	Měření tlakového spádu na kapiláře	10 ⁻⁵ až 10
		Kolenové	Měření rozdílu tlaků na vnitřní a vnější stěně kolena	10 až 10 ³
	Rotametry	Plovákové	Měří se změna průtočného průřezu	10 ⁻⁴ až 10 ³
	Náporové (deformační)	Pružinové a terčíkové	Deformace pružného prvku vyvozená kinetickou energií proudící tekutiny	1 až 10 ⁴
	Turbínové a lopatkové	Axiální (šroubové, turbínové)	Rotační člen je uváděn do pohybu díky silovému působení proudící tekutiny, jeho otáčky jsou úměrné rychlosti proudění	10 ⁻⁴ až 10 ³
		Radiální (jedno- či několikavrtkové lopatkové)		
	Elektromagnetické	Indukční	Elektromagnetická indukce vlivem pohybu vodiče v magnetickém poli	10 ⁻³ až 10 ⁵
	Ultrazvukové	Založené na Dopplerově jevu	Měří se změna frekvence ultrazvukové vlny při odrazu od pohybující se nehomogenity	10 ⁻³ až 10 ⁴
		Vyhodnocující dobu šíření ultrazvukového signálu	Měří se doba šíření ultrazvukové vlny ve směru a proti směru proudění	
	Značkovací	S uměle vytvořenou značkou	Měří se doba přemístění značky unášené tekutinou	–
		Korelační	Korelují se signály ze dvou za sebou umístěných detektorů značky	
	Přepady, žlaby	Měřicí přepad	Měří se poloha hladiny před přepadem	10 ⁻¹ až 10 ⁴
Parshallův žlab		Modifikace Venturiho koncepce	10 ⁻¹ až 10 ⁵	

Skupina snímačů	Typ průtokoměru	Bližší specifikace	Základní princip měření	Rozsah použití [m ³ /hod]
Rychlostní	Vírové	–	Měří se frekvence vírů vznikajících při obtékání tělesa	10 ⁻¹ až 10 ⁴
Hmotnostní	Coriolisovy	Se zakřivenou trubicí	Využívá se Coriolisova síla vznikající při pohybu tekutiny v rotující soustavě	1 až 10 ³
		S přímou trubicí		
	Tepelné	Termoanemometry	Měří se chladící účinek nucené konvekce na vyhřívané čidlo	10 ⁻⁴ až 1
		Kalorimetrické	Měří se míra oteplení způsobená prouděním	10 ⁻⁵ až 1
Fluidikové	Spojité výstup	S dýzou	Princip průtokoměru s dýzou	
	Frekvenční výstup	Vířivé	Měřená kapalina se uvádí do vírového pohybu s frekvencí úměrnou průtoku	
		Vírové	Princip měření frekvence Kármánových vírů vznikajících při obtékání tělesa	
		Oscilační	Měří se frekvence oscilací proudící kapaliny	

V kapitole je volně čerpáno ze zdrojů (Ďaďo, 2011; Kadlec, 2006a; Kadlec, 2006b; Kadlec, 2012; Kadlec, 2016; Kadlec, 2017a až f; Kupka, 2022; Orlíková, 2001).

2 Objemové průtokoměry

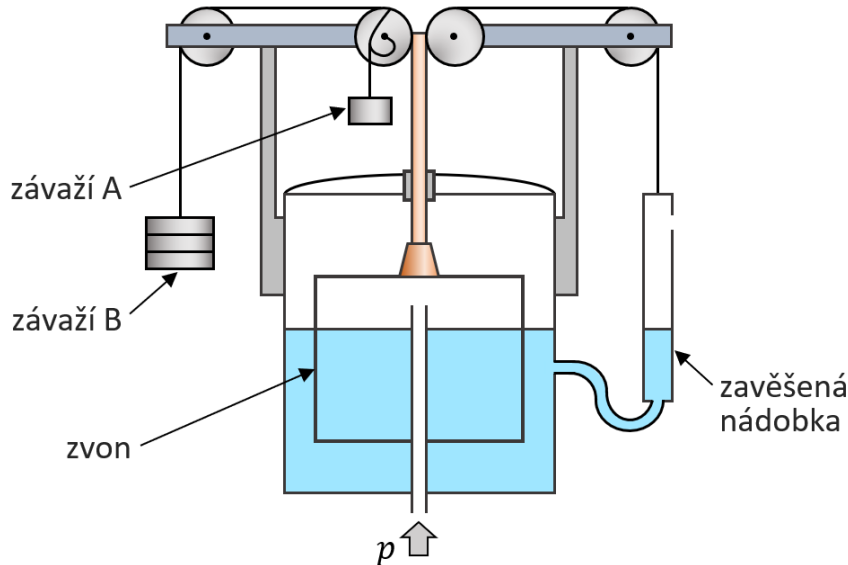
Senzory určené k měření objemového průtoku pracují na principu plnění a vyprazdňování komor určitého objemu. Objemové průtokoměry **s nespojitou funkcí** indikují přírůstek objemu za určitý čas. Průtokoměry **se spojitou funkcí** pracují na principu cyklického plnění a vyprazdňování několika odměrných komor tak, že průtok je spojitý a měření zcela plynulé.

2.1 S nespojitou funkcí

Tyto průtokoměry obsahují velké množství pohyblivých částí a z toho důvodu nejsou vhodné pro měření znečištěných kapalin nebo kapalin s pevnými částicemi. Jsou ale velmi přesné, a proto se používají nejčastěji jako etalony. Nejznámějším je patrně **zvonový krychloměr** (obr. 1), který se používá pro měření objemu plynu. Měřicí část ve tvaru zvonu zasahuje do vodou naplněné nádoby. Pod zvon je přiváděn plyn, jehož objem má být měřen, a jeho objem je úměrný zdvihu zvonu. Měří se čas, za který se krychloměr naplní.

V průběhu vynořování zvonu z kapaliny klesá její vztlaková síla a tím se hmotnost zvonu zvyšuje. Zároveň roste tlak plynu pod zvonem a protože plyny jsou stlačitelné, tak i jeho hustota. Tento jev je nutné pro zachování podmínek v průběhu plnění krychloměru eliminovat, resp. kompenzovat. To lze provést např. pomocí přídavného závaží zavěšeného na

kladce ve tvaru Archimedovy spirály (závaží A na obr. 1). Zvon spojený s kladkou o průměru d bude mít při vynoření o Δh přírůstek hmotnosti Δm a vyvolá točivý moment $\Delta M = \Delta m r$. Ten musí být kompenzován momentem přidavného závaží s hmotností m_A na proměnném rameni délky r_A tak, že v každém okamžiku bude $\Delta m r = m_A r_A$.



Obr. 1 – Princip činnosti zvonového krychloměru, zdroj autor dle (Jenčík, 2003)

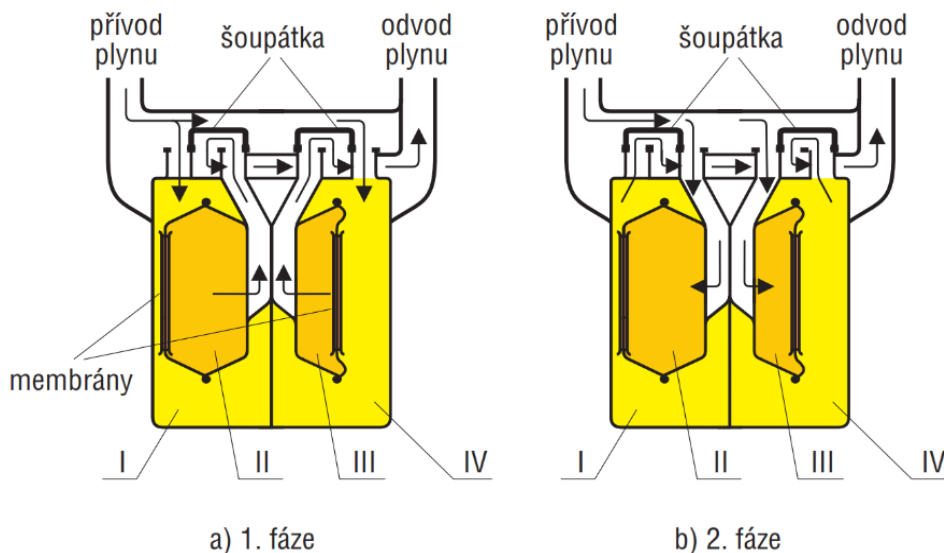
Další možností je použití závaží na lanku nebo řetězu s dimenzováním odpovídajícím nárůstu síly protizávaží (závaží B) s klesajícím vztlakem. Nebo může být použita nádobka zavěšená na lanku a spojená hadičkou s prostorem v nádrži, jejíž hladina je ve stejné výšce jako v nádrži. Průřez nádobky musí být navržen tak, aby přírůstek hmotnosti kapaliny v ní odpovídal nárůstu hmotnosti zvonu, resp. snížení vztlaku. (Jenčík, 2003)

2.2 Se spojitou funkcí

Jsou velmi přesné a používají se zejména jako měřidla bilanční, laboratorní a fakturační v distribučních sítích. Patří mezi ně membránové (obr. 2 a obr. 3) a bubnové plynoměry (obr. 4 a obr. 5) a pístové (obr. 6 až obr. 9) a oválové (obr. 10 a obr. 11) průtokoměry. Jistou nevýhodou těchto průtokoměrů je, že způsobují tlakovou ztrátu.

2.2.1 Membránové plynoměry

Membránový (někdy též měchový) plynoměr se skládá ze dvou komor umístěných v jednom pouzdru rozdělených koženými membránami. Tím vznikají 4 oddělené prostory označené římskými čísly, viz obr. 2. Každý z nich je propojen s rozvodnou částí tvořenou šoupátkem, jejichž pohyb je odvozován od pohybu membrán a s tím je spojen i pohyb počítadla. V 1. fázi se postupně plní prostory I a IV a vyprazdňují se II a III, ve 2. fázi je to pak opačně. Na obr. 3 jsou dva typy fakturačních membránových plynoměrů značky Elster.



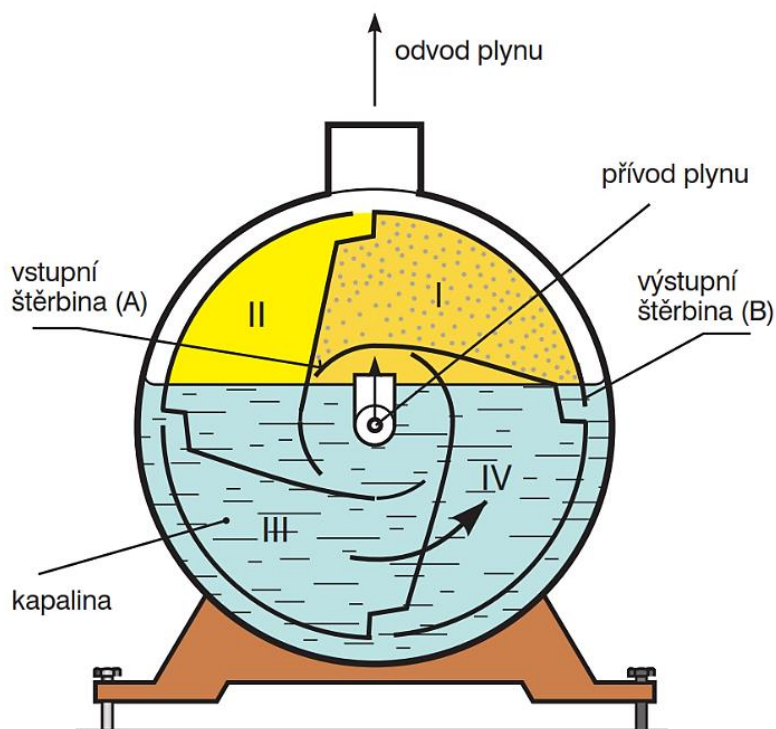
Obr. 2 – Schéma membránového plynoměru, zdroj (Kadlec, 2017c)



Obr. 3 – Fakturační membránové plynoměry značky Elster, zdroj (Honeywell, 2023)

2.2.2 Bubnové plynoměry

Bubnový plynoměr je konstruován v podobě ležaté válcové nádoby částečně naplněné kapalinou v níž je umístěn otočný buben se šterbinami pro přívod a odvod plynu, který je současně rozdělen na prostory I až IV, viz obr. 4. Při otáčení bubnu se postupně uzavíráním, resp. otevíráním přívodů a odvodů odměřuje objem plynu postupně ve všech prostorech. Proteklé množství udává počítadlo spojené s hřídelí bubnu. Bubnové plynoměry se nejčastěji používají jako přesná laboratorní měřidla. Na obr. 5 jsou laboratorní bubnové plynoměry Ritter v různých provedeních (s ručkovým ukazatelem, s digitálním displejem a v transparentním provedení s ručkovým displejem a mechanickým číselným počítadlem doplněný o hydrostatický tlakoměr a kalibrační sadu).



Obr. 4 – Schéma bubnového plynoměru, zdroj (Kadlec, 2006a)

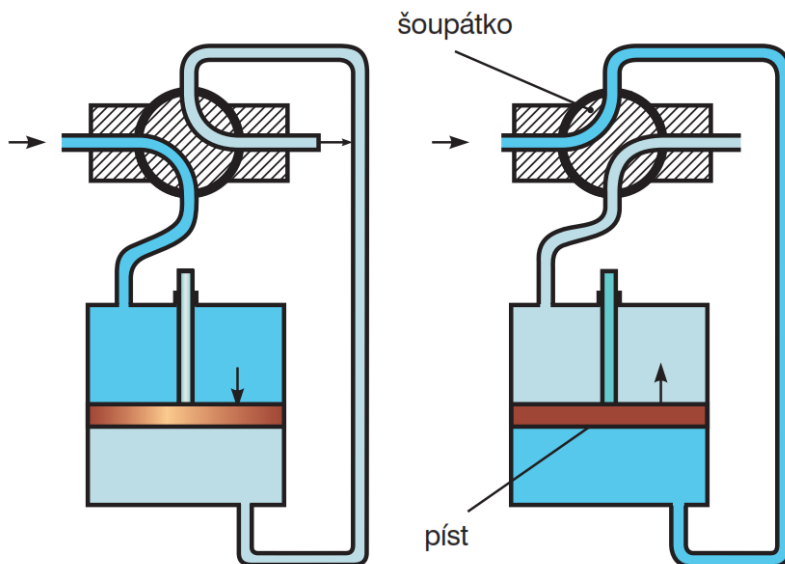


Obr. 5 – Různá provedení laboratorních bubnových plynoměrů značky Ritter, zdroj (Dr.-Ing. Ritter Apparaterbau, 2023)

2.2.3 Pístové průtokoměry

Nejpřesnějšími měřidly z této skupiny vůbec, jsou pístové průtokoměry. I zde se měřenou kapalinou postupně plní a vyprazdňují prostory vymezené pístem, který se vlivem tlakového spádu pohybuje a je spojen s počítadlem, viz schéma na obr. 6 a reálné provedení na obr. 7 vlevo. Používají se např. pro indikaci průchodu mazacího oleje ložisek generátorů (Hennlich,

2023). Mohou být i složitější konstrukce s více písty, přičemž oblast použití je např. u produktovodů (ropné produkty a jiné chemikálie). Příklad dvoupístového objemového průtokoměru je na obr. 7 vpravo. Pístové průtokoměry mohou být v klasickém provedení s ručkovým ukazatelem, nebo mohou dnes již být doplněny o modul s displejem a příp. i o další elektronické obvody, takže mohou být součástí regulačních obvodů.



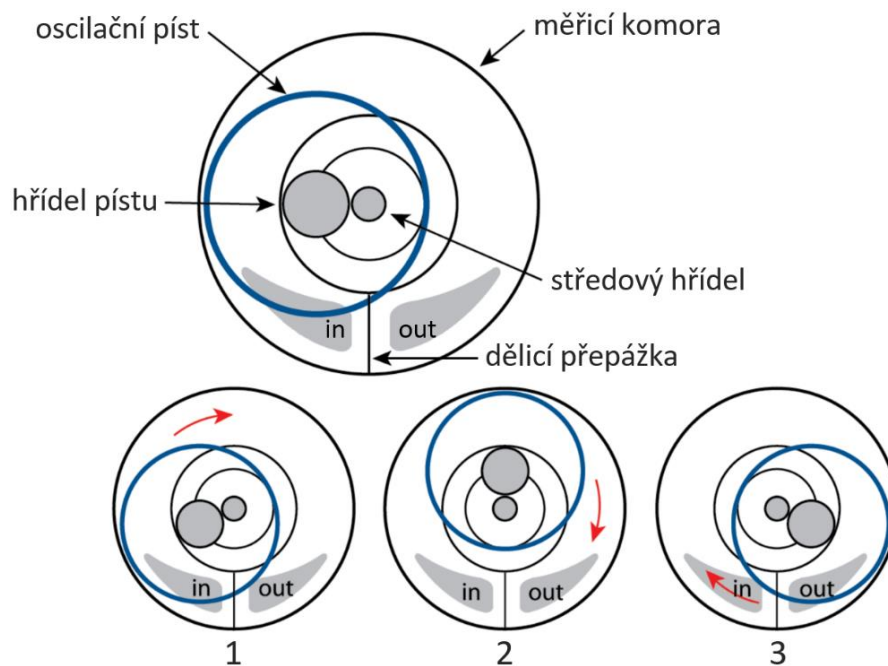
Obr. 6 – Schéma pístového průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2006a)



Obr. 7 – Průmyslové pístové objemové průtokoměry různé konstrukce: mechanický s jedním pístem (vlevo) a se dvěma písty, zobrazený navíc v kompletu s omezovacími a rozvodnými členy, senzory tlaku a zobrazovacím prvkem s displejem (vpravo), zdroj (Hennlich, 2023c) a (TCS Europe, 2023)

V praxi velmi často používaná varianta je se speciálním rotačním, resp. oscilačním pístem. Princip funkce je znázorněn na obr. 8. Měřená kapalina vstupuje do průtokoměru vstupním otvorem (označen in) a její hybnost způsobí, že se píst začne otáčet okolo speciální vačkové hřídele. Pootočením pístu se začne plnit prostor měřicí komory o známém objemu, který je utěšňován prostřednictvím pístu a dělicí přepážky a oddělen tak od výstupního otvoru (fáze 1). Během fáze 2 nedochází k dalšímu plnění až do okamžiku dosažení výstupního otvoru, kdy

začne vyprazdňování komory (fáze 3). Rotace pístu se detekuje nejčastěji pomocí Hallových sond a po proběhnutí celého cyklu (fáze 1 až 3) je generován impulz. Každý vygenerovaný impulz pak koreluje s přesně změřeným objemem kapaliny.



Obr. 8 – Princip činnosti průtokoměru s oscilačním pístem, upraveno dle (Metron-Farnier, 2023)

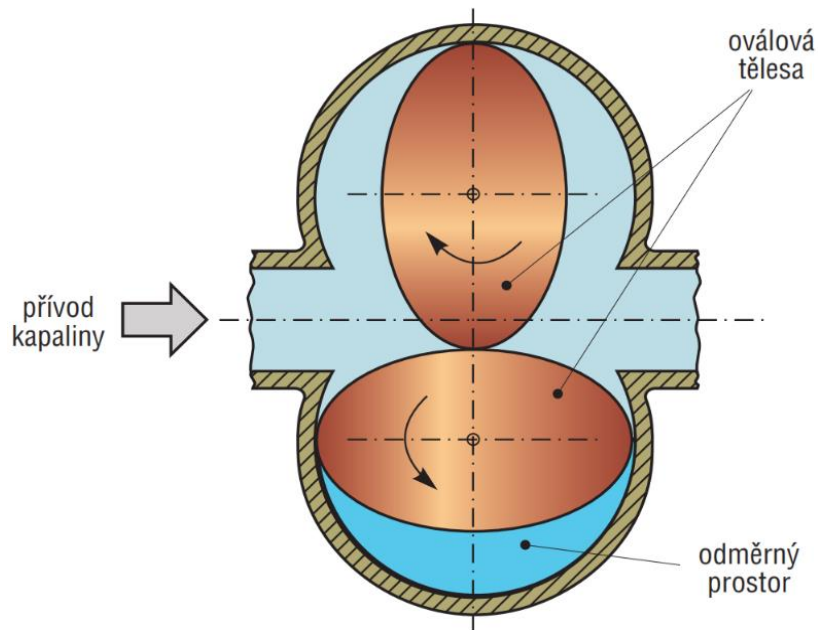
Reálné provedení komory s oscilačním pístem je na obr. 9 vlevo. Na dalších fotografiích je samostatně uveden také měřicí modul a dvě různé varianty senzoru s různými měřicími moduly od společnosti Litre Meter, Ltd., která je v této oblasti leaderem trhu.



Obr. 9 – Průmyslové provedení průtokoměru s oscilačním pístem, postupně zleva doprava: průtokoměr bez krytu – pohled na komoru s oscilačním pístem, měřicí modul FlowPod, dvě verze průtokoměru s různým měřicími modulem, zdroj (MJ Systems, 2023)

2.2.4 Oválové průtokoměry

Poměrně rozšířeným průtokoměrem je **průtokoměr oválový**. Rozdílný tlak na přední a zadní straně dvou oválových těles způsobuje jejich otáčení a tím i prostřednictvím ukazatele odměřování proteklého množství, viz obr. 10. Na stejném principu pracují i průtokoměry s rotory s cykloidním průřezem (tvar piškotu), s rotačními písty, nebo ozubenými koly. Na obr. 11 je příklad reálného provedení oválového rotačního průtokoměru Elster od společnosti Honeywell.



Obr. 10 – Schéma oválového průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017c)



Obr. 11 – Rotační průtokoměr Elster, zdroj (engineerx.decorexpro.com/cs/, 2020)

3 Rychlostní průtokoměry

Průtok se v tomto případě vyhodnocuje nepřímo, a to měřením střední rychlosti proudění tekutiny. Ta je závislá na rychlostním profilu a na druhu proudění (v závislosti na Reynoldsově čísle Re může být laminární nebo turbulentní). (Kupka, 2022)

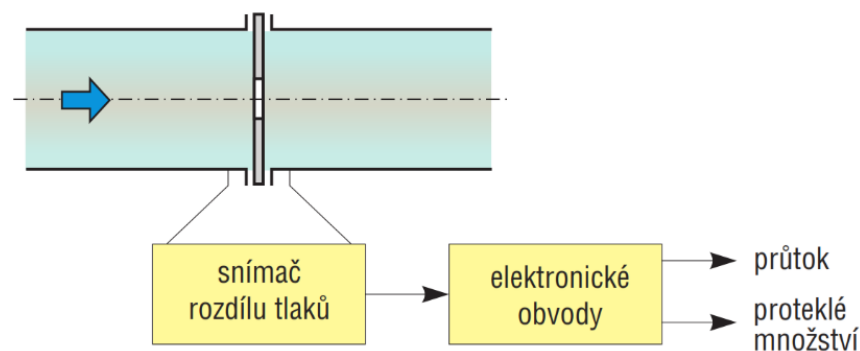
3.1 S měřením rozdílu tlaků

Průmyslové průtokoměry jsou nejčastěji založeny na měření rozdílu tlaku před a za tzv. primárním prvkem (škrticím orgánem) senzoru, viz obr. 12. Konkrétně to může být **clona**, **dýza**, **Venturiho dýza** nebo **trubice**, **Pitotova trubice**, **Prandtlova trubice** aj.

Princip vychází z Bernoulliho rovnice vyjadřující zákon zachování mechanické energie, podle něhož v tekutině klesá tlak se zvětšováním rychlosti proudění. K tomuto jevu dochází tehdy, vložíme-li do potrubí překážku. Rychlost proudění lze v závislosti na tlakové diferenci v okolí překážky vyjádřit

$$v = k \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

kde k je bezrozměrná konstanta související s vlastnostmi primárního prvku.

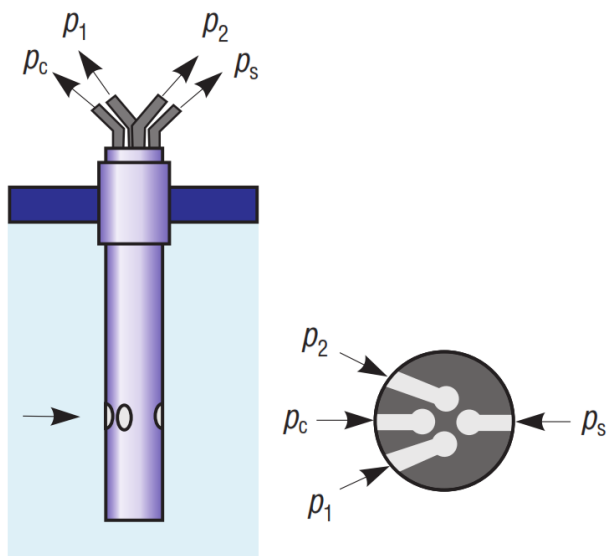


Obr. 12 – Základní princip rozdílového průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017d)

3.1.1 Rychlostní několikaotvorové sondy

Několikaotvorové sondy se používají k měření průměrné rychlosti proudění. Snímá se u nich celkový a statický tlak z několika otvorů umístěných jak na náporové straně, tak na straně otočené směrem do úplavu, viz schéma na obr. 13.

V praxi se používají sondy různých tvarů, např. s kruhovým průřezem, s průřezem ve tvaru čtverce nebo příp. kosočtverce, nebo s průřezem ve tvaru T. Příkladem takové sondy je sonda značky Annubar od spol. Emerson na obr. 14. Ta je běžně integrována v jednom celku s elektronickým převodníkem tlaku. Výhodou těchto průtokoměrů jsou především malá tlaková ztráta, snadná integrace do potrubí a nízké náklady na údržbu. Mají standardně unifikovaný proudový výstup 4 až 20 mA a protokol HART.



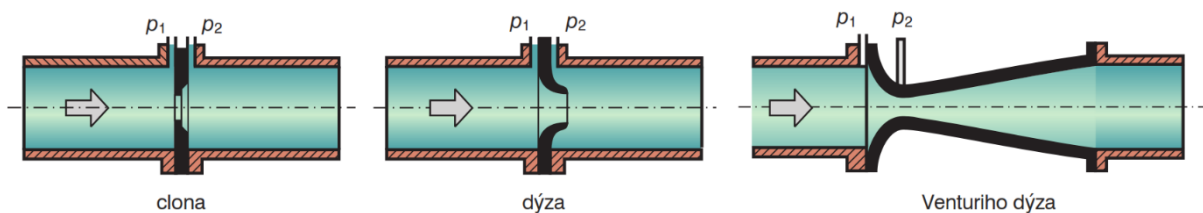
Obr. 13 – Schéma několikaotvorové rychlostní sondy, zdroj (Kadlec, 2017d)



Obr. 14 – Průtokoměr Rosemount Annubar s několikaotvorovou rychlostní sondou: sonda s T průřezem vč. osazení pro montáž hlavice (vlevo), hlavice s převodníkem (uprostřed), kompletní senzor pro měření diferenciálního tlaku doplněný o senzor teploty (vpravo), zdroj (Emerson Electric, 2023b)

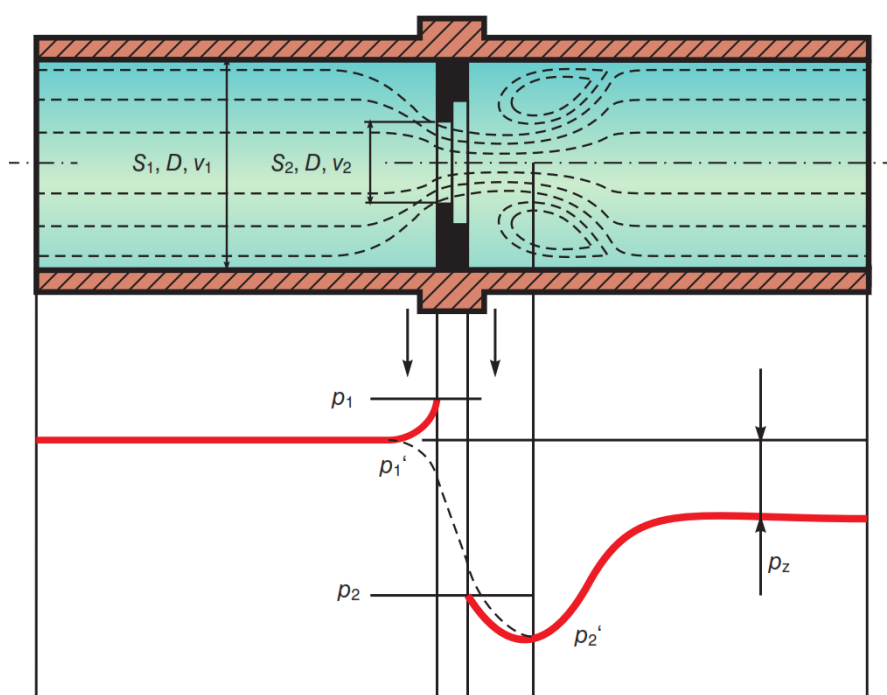
3.1.2 Průřezové (clony a dýzy)

Při měření se využívají jevy, které provází zúžení průtočného průřezu různého charakteru, viz obr. 15. Rozdíl tlaků (statických) p_1 a p_2 se snímá pomocí diferenčního tlakoměru a je přímo úměrný průtoku. V minulosti byl tento způsob měření průtoku nejčastěji využívaným.



Obr. 15 – Základní primární škrticí prvky, zdroj (Kadlec, 2006a)

Mezi nejčastější primární škrticí prvky lze zahrnout **kruhovou clonu** (obr. 15 vlevo) v podobě tenkého kotouče s otvorem a upravenými hranami. Dalšími jsou **dýza**, což je nátrubek se zaoblenou vtokovou hranou a ostrou výtokovou hranou (obr. 15 uprostřed), a **Venturiho dýza**, což je také nátrubek se zaoblenou vtokovou hranou a kuželovitě se rozšiřující výtokovou částí (obr. 15 vpravo).



Obr. 16 – Proudění a průběh tlaků v okolí clony, zdroj (Kadlec, 2006a)

Na obr. 16 je znázorněn průběh proudění a odpovídající závislost tlaků v okolí kruhové dýzy. Je zřejmé, že proudnice se vlivem průchodu tekutiny clonou za ní zužují a vznikají také turbulence.

Pro nestlačitelnou ideální kapalinu platí rovnice kontinuity, kdy v souladu se značením na obr. 16 bude

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (5)$$

přičemž $S_1 = \pi D^2/4$ a $S_2 = \pi d^2/4$.

Dále při měření ve vodorovných potrubích platí dle Bernoulliho rovnice

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (6)$$

Pokud dále z rovnice (5) vyjádříme rychlost v_1 a dosadíme ji do (6), bude pro objemový tok Q_V platit

$$Q_V = S_2 v_2 = \frac{S_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (7)$$

Průběh tlaků v ose potrubí je na obr. 16 dole znázorněn čárkovanou čarou, průběh tlaků u stěn potrubí pak plnou červenou čarou. Ve výpočtových vzorcích se v praxi používá opravný koeficient, resp. součinitel průtoku C , závislý na již výše zmiňovaném Reynoldsově čísle (Re) a na poměru průměrů $\beta = d/D$. V případě stlačitelného plynu nebo páry již není hustota konstantní a je nutné navíc zavést expanzní součinitel ε . Potom pro objemový průtok platí vztah

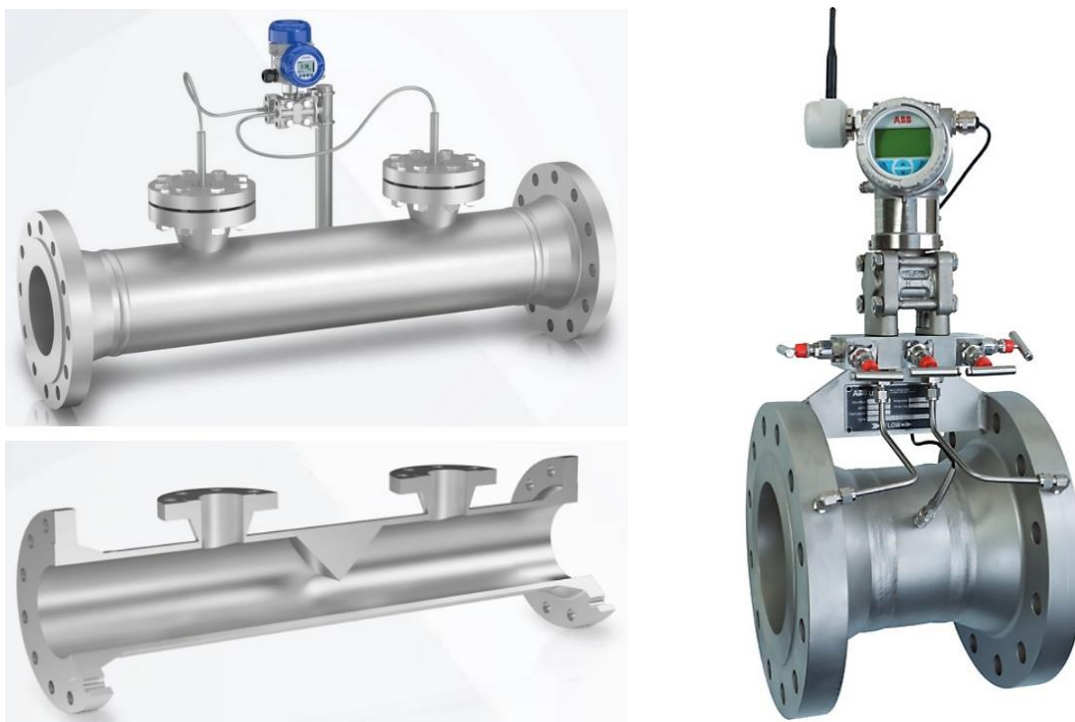
$$Q_V = \frac{C\varepsilon S_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (8)$$

Hodnoty součinitele C se pro různé typy škrticích prvků určují experimentálně a velmi často jsou již tabelovány.



Obr. 17 – Clonové průtokoměry v průmyslovém provedení: Deltatop DPO (vlevo), Orimaster M (uprostřed) a Orimaster V (vpravo), zdroj (Endress+Hauser, 2023a) a (ABB, 2023b)

Na obr. 17 je několik průmyslových provedení clonových průtokoměrů od společnosti Endress+Hauser a ABB. Průtokoměry Orimaster V jsou zajímavé tím, že u nich lze měnit pouze clonu a to ještě přímo v provozu (Ptáček, 2012).

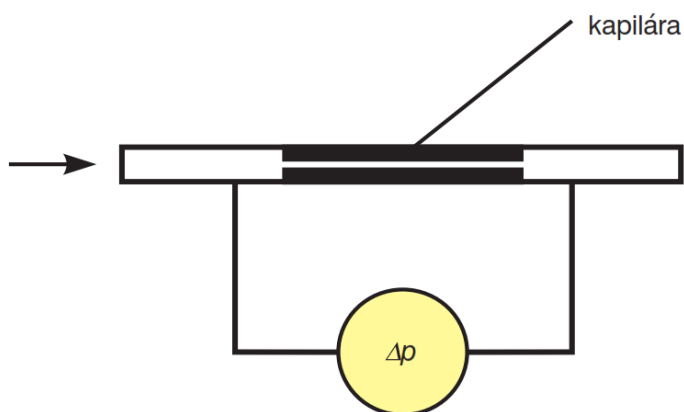


Obr. 18 – Provozní klínové průtokoměry: řez potrubím s klínem a připojení diferenčního tlakového senzoru Optibar DP 7060 (vlevo) a kompaktní klínový senzor WedgeMaster FPD570 (vpravo), zdroj (Krohne Messtechnik, 2023) a (ABB, 2023c)

Dalším možným škrticím prvkem je klín ve tvaru V, viz řez potrubím na obr. 18 vlevo dole. Princip funkce je jinak stejný a vyhodnocuje se rozdíl tlaků měřených nějakým vhodným diferenčním senzorem tlaku. Průtokoměr toho typu se v odborné i firemní literatuře označuje jako wedge flowmeter. Na obr. 18 vlevo je řešení od společnosti Krone s nátrubky a vpravo pak kompaktní provedení od ABB.

3.1.3 Kapilární (laminární)

U kapilárních průtokoměrů se jako škrticím prvkem používá kapilára a opět jako u průtokoměrů průřezových se měří rozdíl tlaků Δp , viz obr. 19. V provozu lze realizovat řešení podobné tomu na obr. 18, jen se škrticím prvkem v podobě kapiláry.



Obr. 19 – Základní princip kapilárního průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2006a)

Tok za kapilárou je laminární a platí pro něj Hagenova-Poiseuillova rovnice

$$Q_V = \frac{\pi d^4}{128\eta l} (p_1 - p_2) \quad (9)$$

příčemž d je průměr kapiláry, l její délka a η je dynamická viskozita média.

Někdy se místo kapiláry používá jejich soustava, příp. soustava lamel. Měřené médium musí být čisté, známého složení a musí být také známa hodnota jeho dynamické viskozity. Pro měření diferenčního tlaku se používají integrované elektronické tlakoměry s tenzometry.

3.1.4 Kolenové

Pracují na principu měření tlakového spádu, který vzniká při průchodu tekutiny zakřiveným kanálem – v tomto případě kolenem. Jedná se o jeden z vůbec nejstarších principů měření průtoku, který se používal v průmyslu již v 1. polovině 20. století. První zmínky o této metodě měření se objevují již okolo roku 1910. O měření průtoku s využitím kolene pojednává např. velmi podrobná zpráva s názvem „The Use of an Elbow in a Pipe Line for Determining The Rate of Flow in the Pipe“ o rozsahu 38 stran publikovaná W. M. Lansfordem v rámci bulletinu University of Illinois z prosince 1936.

Základem je pravoúhlé koleno s přírubami a dvěma protilehlými otvory (úhel 45°) pro připojení diferenčního tlakoměru, viz obr. 20. V minulosti to byly často tlakoměry hydrostatické nádobkové, v dnešní době se použijí diferenční tlakové senzory, např. typu Optibar DP, podobně jako u klínového průtokoměru na obr. 18.

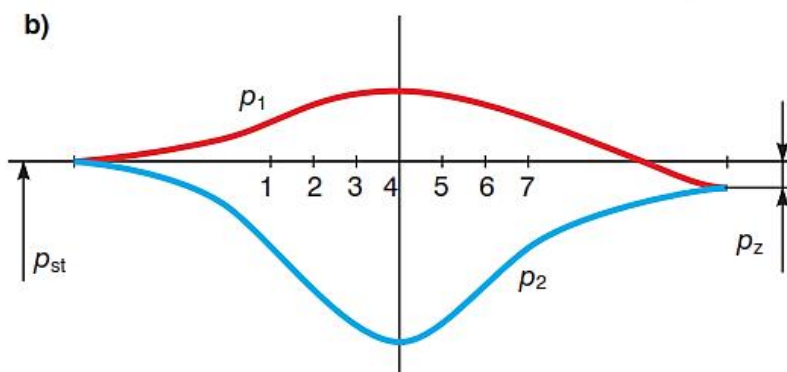
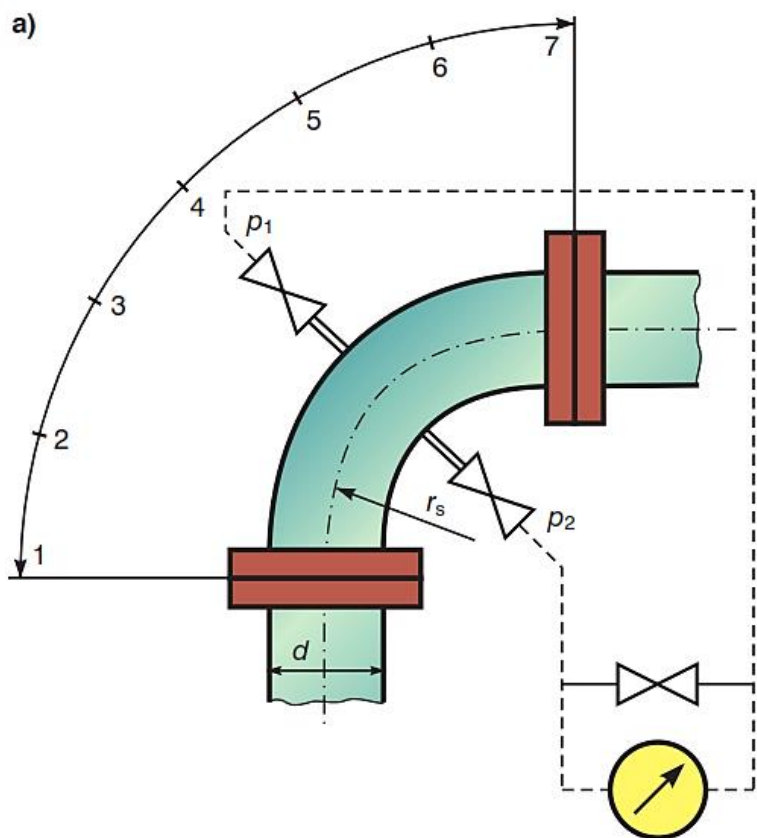
Výhody měření průtoku s využitím kolene jsou především prostorové, neboť není potřeba žádný rovný úsek potrubí, který je někdy v rámci potrubních rozvodů obtížně realizovatelný nebo jej dokonce realizovat nelze. Přitom měření s využitím kolene vykazuje vysokou přesnost a bezproblémovou opakovatelnost.



Obr. 20 – Koleno s přírubami a protilehlými otvory pro měření tlaku, zdroj (Primary Flow Signal, 2023)

Uspořádání kolenového průtokoměru a rozložení statických tlaků jsou znázorněny na obr. 21. Bude-li tekutina proudit kolenem, dojde v důsledku změny směru proudění ke změně rozložení rychlostí a statických tlaků v místě zakřivení. Na základě toho dojde k růstu tlaku na vnitřní straně oblouku a naopak k poklesu tlaku na straně vnější. Největší rozdíl je v ose

symetrie kolena, tedy u kolena s úhlem 90° to je v 45° , takže v tomto místě, na protilehlých stranách kolene, je nejvhodnější měřit tlak. To je také dobře patrné z grafu na obr. 21b. Rozdíl tlaků je ale poměrně malý, takže je nutné využít citlivý diferenční senzor tlaku.



Obr. 21 – Schéma kolenového průtokoměru, a) základní uspořádání, b) rozložení statických tlaků, zdroj (Kadlec, 2006a)

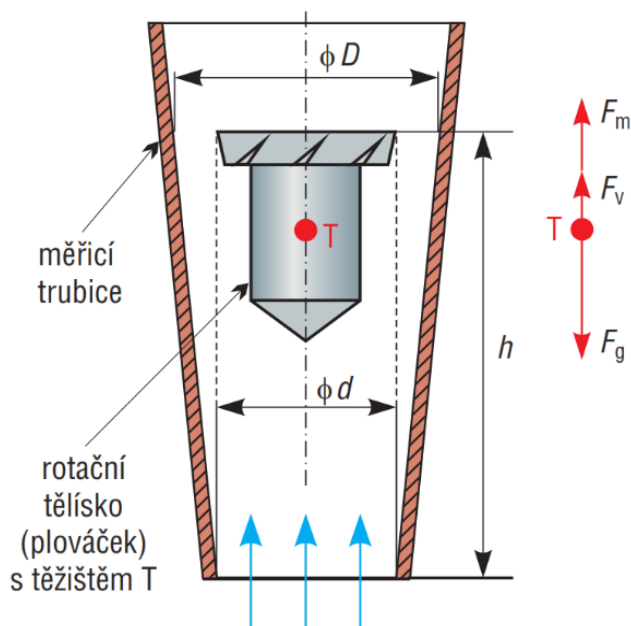
Objemový průtok se vypočte s využitím vztahu

$$Q_V = C_k \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{r_s}{2d}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (10)$$

kde C_k je průtokový součinitel kolena závislý na jeho geometrii. Pro poměr $r_s/d \in \langle 0,94; 1,48 \rangle$ je $C_k \approx 1$.

3.2 Rotametry

Základem rotametru (plovákového průtokoměru) je svislá kuželovitá měřicí trubice (rozšiřuje se směrem nahoru), uvnitř které se volně pohybuje plovák. Pokud tekutina trubicí neproudí, zůstává plovák dole, ale jakmile začne proudit, bude se plovák pohybovat směrem nahoru. Poloha plováku je tedy úměrná rychlosti proudění a zjišťuje se buď přímo na stupnici na stěně trubice průtokoměru, nebo se snímá elektricky různými snímači polohy. Možné je i pneumatické snímání s využitím systému tryska – klapka. Mezi výhody plovákových průtokoměrů patří jejich měřicí rozsah (jsou schopné měřit i malé průtoky), nízká tlaková ztráta, jednoduchá instalace a poměrně příznivá cena. (Kupka, 2022)



Obr. 22 – Schéma plovákového průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017d)



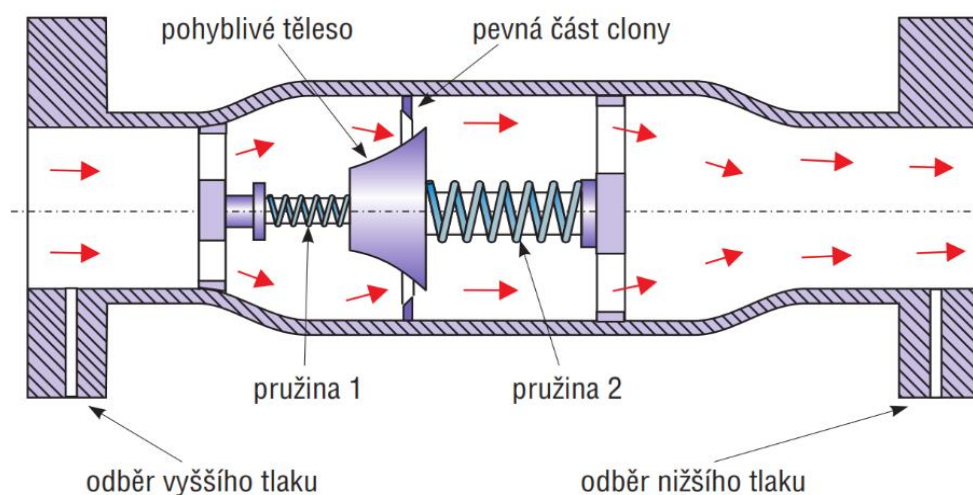
Obr. 23 – Několik průmyslových provedení rotametrů značky Yokogawa, zdroj (Yokogawa Europe, 2023)

Princip činnosti rotametru je patrný z obr. 22. Směrem dolů působí v těžišti plováčku tíhová síla F_g , směrem nahoru pak vztlaková síla F_v a síla proudící tekutiny (média) F_m . Pokud jsou uvedené síly v rovnováze, plováček v tekutině zaujímá určitou polohu a nepohybuje se. To se změní se změnou velikosti průtoku. Jelikož je plováček v horní části opatřen šikmými zářezy, tak při proudění tekutiny rotuje, což napomáhá jeho stabilizaci v trubici.

Rotometry mohou být konstruovány jako trubice ze skla nebo čirého plastu s přímo vyznačenou stupnicí nebo v podobě tvarované trubky s přírubami s ručkovým či číslicovým ukazatelem nebo displejem. Příklady provozních rotometrů Yokogawa jsou na obr. 23.

3.3 Náporové

Náporové průtokoměry, někdy též označované jako deformační, pružinové, terčíkové nebo pádlové, patří do široké skupiny průtokoměrů s proměnným průřezem, stejně jako rotometry. Na rozdíl od rotometrů je u nich ale potřebná síla vyvolaná pružinou, takže mohou být používány i v horizontální poloze.



Obr. 24 – Schéma pružinového průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017d)

Princip funkce je patrný z obr. 24. Síla vyvolaná pružinou působí na pohyblivé těleso (kruhový terčík, klapka nebo pádlo), které v případě nulového průtoku uzavře otvor ve cloně. Jakmile začne proudit tekutina, tak síla, kterou vyvolá, posune pohyblivé těleso a uvolní otvor ve cloně. Síla působící na plochu pohyblivého tělesa S je úměrná dynamickému tlaku tekutiny s hustotou ρ proudící rychlostí v a pak pro její velikost platí vztah

$$F_d = K_c S \frac{\rho v^2}{2} \quad (11)$$

kde K_c je součinitel závislý na tvaru pohyblivého tělesa (terčíku, pádla).

Jak již bylo řečeno, lze tyto snímače používat v podstatě v libovolné poloze, navíc i pro syké materiály. Buď jen jako tzv. proudznaky a indikátory průchodu média (např. obilovin, cukru apod.) s dvoustavovým výstupem, nebo pro spojitá měření, viz obr. 25. U dvoustavových indikátorů jsou elektrické kontakty jsou často spínány magnetickým polem při přiblížení

permanentního magnetu pádla. U průtokoměrů se spojitým výstupem se využívá princip deformace nosníku (torzního prvku – pádla), který se vyhodnocuje pomocí tenzometrů.



Obr. 25 – Náporové hlídače průtoku a průtokoměry, postupně zleva doprava: pádlový hlídač průtoku SPM, náporový hlídač průtoku UR1, pádlový průtokoměr TZ1 s ručkovým ukazatelem a odolný náporový průtokoměr DP65 pro těžké provozy, zdroj (Hennlich, 2023a) a (Hennlich, 2023b)

3.4 Turbínové a lopatkové

Základem těchto průtokoměrů jsou turbíny nebo lopatková, příp. šroubová kola, která začnou otáčet vlivem průchodu média. Rychlost otáčení je pak úměrná střední rychlosti proudění a pro závislost frekvence otáčení na průtoku lze z Eulerovy turbínové rovnice odvodit jednoduchý vztah

$$f = kQ_V - s \quad (12)$$

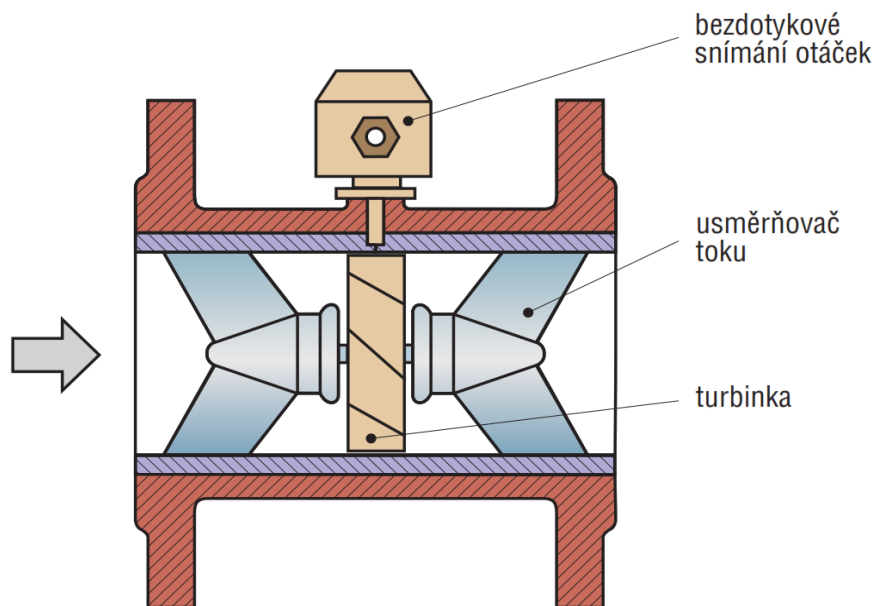
v němž k je součinitel průtokoměru stanovený při jeho kalibraci a s je skluz přímo úměrný zatěžovacímu momentu rotoru (turbíny nebo kola).

V závislosti na směru proudění vzhledem k ose rotoru se tyto průtokoměry ještě dále dělí na axiální a radiální. Do skupiny turbínových a lopatkových průtokoměrů lze zařadit i nejrůznější indikátory a ukazatele průtoku v provedení s průhledem, které ale obvykle nemají dále využitelný výstupní signál.

3.4.1 Axiální (šroubové, turbínové)

Na obr. 26 je uvedeno schéma axiálního turbínového průtokoměru s rotorem tvořeným lopatkami (běžně 4 nebo 8) spojenými nábojem s ložiskovým uložením. Ložiska jsou spojena s rameny, která slouží současně pro usměrnění proudu. Výhodou těchto průtokoměrů je, že je lze provozovat v libovolné poloze. Vyrábí se v širokém rozsahu průtoků, až v řádu stovek m^3/hod . Snímání otáček je buď mechanické, viz průtokoměr na obr. 27 vlevo, nebo bezdotykové, a to indukční, elektromagnetické, ultrazvukové či fotoelektrické. Přístroje

s bezdotykovým snímáním otáček (obr. 27 vpravo) poskytují přímo celkový počet otáček úměrný proteklému množství a nevyžadují použití A/D převodníku.



Obr. 26 – Schéma axiálního turbínového průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017c)

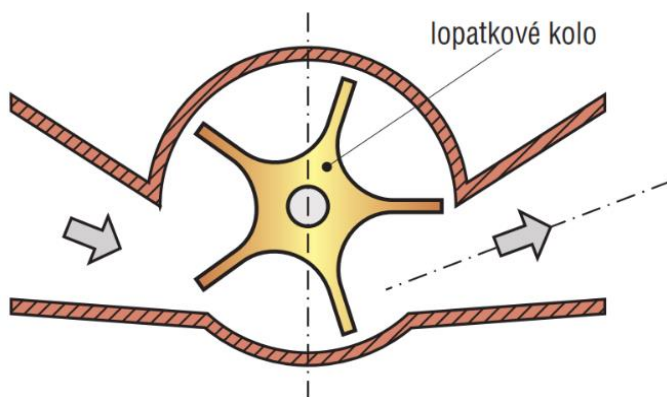


Obr. 27 – Turbínové průtokoměry: s číslicovým mechanickým počítadlem (vlevo) a modulem s displejem (vpravo), zdroj (engineerx.decorexpro.com/cs/, 2020) a (Bingo Senzor Tech, 2023)

3.4.2 Radiální (jedno- či několikavtokové lopatkové)

Jednovtokové radiální průtokoměry, jejichž schéma je na obr. 28, mají osu rotace kolmou k ose vtokového otvoru. Snímání otáček je u nich obdobné jako u průtokoměrů turbínových. Lopatkové průtokoměry se hojně využívají k měření proteklého množství pitné i užitkové vody, tj. jako vodoměry, ať už s mechanickým ručkovým nebo číselným ukazatelem, nebo

s displejem, viz příklady reálných provedení na obr. 29 a obr. 30. V průmyslových aplikacích (příklady na obr. 31) se je nedoporučuje používat pro tekutiny s velkou viskozitou. Mechanické varianty navíc obsahují pohyblivé části, takže jsou poměrně náchylné na opotřebování a k usazování nečistot.



Obr. 28 – Schéma radiálního lopatkového průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017c)



Obr. 29 – Domovní vodoměry: mechanický s dílčími analogovými ukazateli a číselným údajem GMDM-I/SV (vlevo) a inteligentní elektronický bez pohyblivých částí s displejem a obousměrnou komunikací iPerl (vpravo), zdroj (Geos AGT, 2023) a (Sensus, 2023)



Obr. 30 – Průmyslové vodoměry: mechanický s dílčími analogovými ukazateli a číselným údajem MeiStream Plus (vlevo) a inteligentní elektronický bez pohyblivých částí s displejem a obousměrnou komunikací Cordonel (vpravo), zdroj (Sensus, 2023)

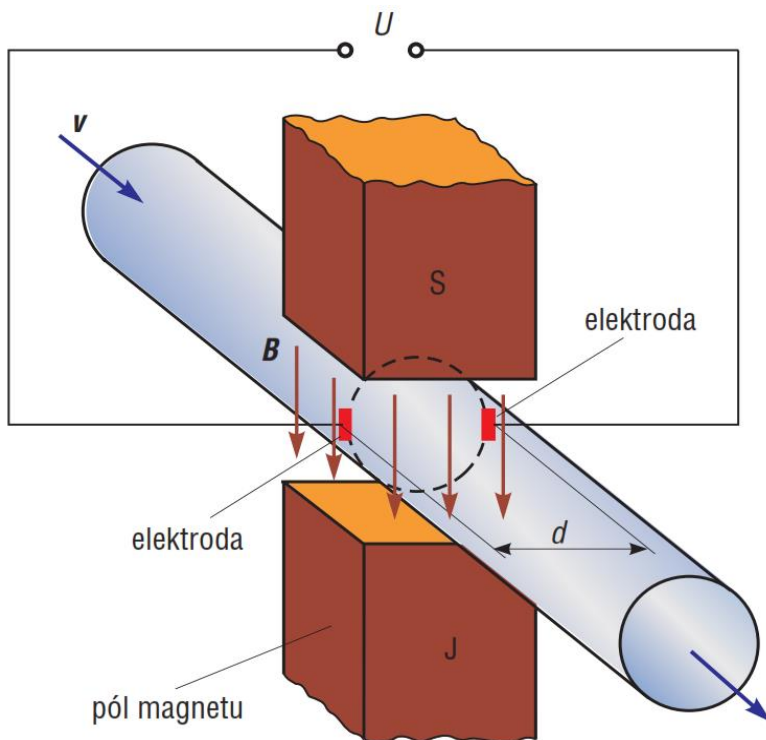
Pro srovnání jsou na obr. 29 a obr. 30 uvedeny také moderní domovní a průmyslové vodoměry bez pohyblivých částí, které spadají do kategorie tzv. smart senzorů a samozřejmě disponují obousměrnou komunikací pro dálkové odečty, nastavování a diagnostiku.



Obr. 31 – Průmyslové průtokoměry s lopatkovým kolem řady RR, RRH a TDH, zdroj (Hennlich, 2023d)

3.5 Elektromagnetické indukční

Elektromagnetické indukční průtokoměry pracují na principu Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Průtokem elektricky vodivé tekutiny v homogenním magnetickém poli se indukuje elektrické napětí, které je úměrné rychlosti proudění.



Obr. 32 – Základní princip indukčního průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017e)

Nutnou podmínkou pro korektní měření je, že potrubí musí být celé zaplněno tekutinou. Indukční průtokoměry jsou bezdotykové, nekládají se do potrubí a nezpůsobují tedy žádnou

tlakovou ztrátu. Výhodou je, že je možné s nimi měřit i agresivní (např. kyseliny) a silně znečištěné kapaliny. Měření není ovlivněno změnami tlaku, teploty, viskozitou, obsahem pevných částic apod. Navíc nemají ani pohyblivé části, které by podléhaly opotřebování, mohou pracovat v libovolné poloze a nevyžadují přímý úsek potrubí pro stabilizaci průtoku. (Kupka, 2022)

Základní princip činnosti je znázorněn na obr. 32. Bude-li se pohybovat v elektromagnetickém poli s indukcí B kapalina rychlostí v , bude se v ní indukovat elektromotorická síla (napětí) dle vztahu

$$F_m = U_m = B d v \quad (13)$$

kde d je délka vodiče, zde vzdálenost elektrod, a vektory rychlosti a intenzity jsou navzájem kolmé.

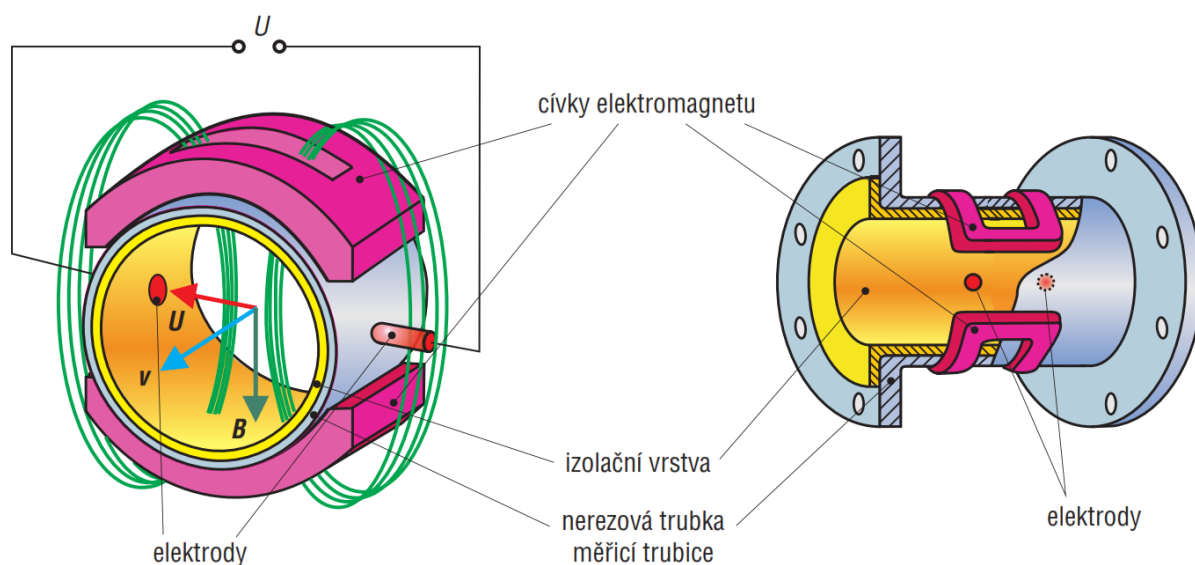
Část potrubí mezi póly magnetu je vyrobena z nemagnetického a nevodivého materiálu. Na vnější části trubky jsou dvě elektrody, které snímají indukované napětí, jež je funkcí rychlosti proudění. Reálné provedení je ale složitější, neboť měřená kapalina neproudí stejnou rychlostí a její rychlostní profil pak odpovídá danému charakteru proudění. Pro průtokoměr s kruhovým průřezem za určitých zjednodušení platí, že indukované napětí je úměrné střední rychlosti proudění a lze jej vypočítat podle vztahu

$$U_m = B d \frac{4Q_V}{\pi d^2} = \frac{4B}{\pi d} Q_V \quad (14)$$

který lze při uvažování $B = konst$ a $d = konst$ upravit do základního tvaru

$$U_m = K Q_V \quad (15)$$

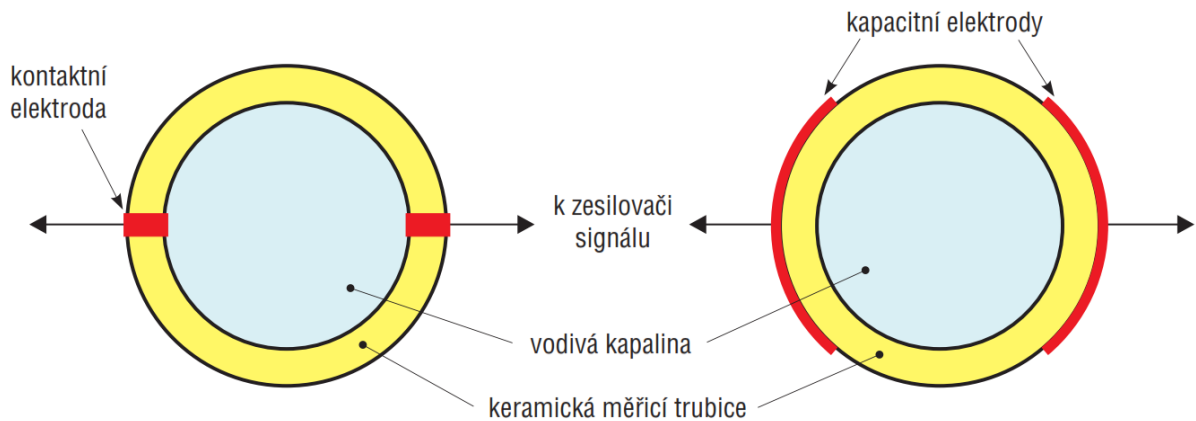
přičemž konstanta K se stanovuje na základě kalibrace.



Obr. 33 – Schéma indukčního průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017e)

Na obr. 33 je schéma konstrukce indukčního průtokoměru. Pro vytvoření magnetického pole se používají elektromagnety v podobě cívek buzených střídavým proudem či stejnosměrnými

pulsy s obdélníkovým nebo lichoběžníkovým průběhem a frekvencí od 7 do 30 Hz. Snímací elektrody mohou být buď kontaktní (obr. 34a) nebo kapacitní (obr. 34b). V případě, že jsou elektrody v přímém kontaktu s měřenou kapalinou, musí být vyrobeny z materiálu s výbornou vodivostí a odolností proti abrazivitě a chemickému působení. Lepším řešením jsou elektrody kapacitní bez nutnosti přímého kontaktu s kapalinou. Ke zpracování a diagnostice se využívají následné elektronické obvody s mikroprocesory, které jsou buď přímou součástí průtokoměru, nebo jsou v odděleném modulu. Indukční průtokoměry běžně poskytují několik různých typů výstupních signálů – unifikované analogové proudové a napěťové, frekvenční, logické a digitální, a zároveň disponují displejem pro okamžitou indikaci.



a) měření s kontaktními elektrodami

b) měření s kapacitními elektrodami

Obr. 34 – Měření s kontaktními a kapacitními elektrodami, zdroj (Kadlec, 2017e)

Na obr. 35 je průmyslový indukčnostní průtokoměr ABB FEP 300 s diagnostickými funkcemi, detekcí prázdného potrubí a s možností komunikace prostřednictvím protokolů HART, Fieldbus a Profibus. Na obr. 36 je několik provedení průtokoměrů od společnosti Yokogawa s odolnou keramickou vložkou a s kapacitními elektrodami.

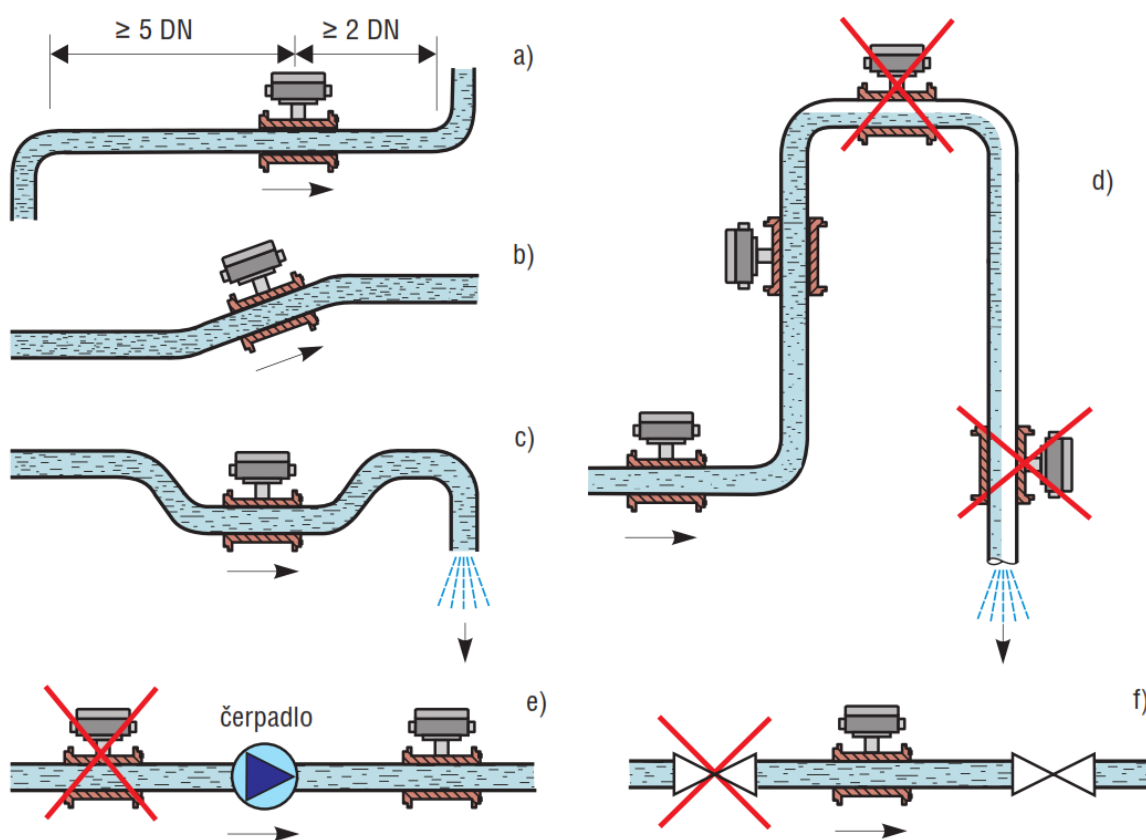


Obr. 35 – Indukční průtokoměr ABB FEP300, zdroj (ABB, 2023a)



Obr. 36 – Indukční průtokoměry Yokogawa, postupně zleva doprava: typ ADMAG AXV s keramickou vložkou, typ CA s kapacitními elektrodami a řídicí moduly s převodníkem řady AXG a AXW, zdroj (Yokogawa Europe, 2023).

Správné umístění indukčních průtokoměrů ilustruje obr. 37. Průtokoměr lze sice do potrubí zabudovat v libovolné poloze, nicméně pro správný provoz je nutné, aby byl průtočný průřez zcela zaplněn kapalinou. To vylučuje určité konfigurace zobrazené na obr. 37d, e, f.



Obr. 37 – Správná a nesprávná umístění indukčního průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017e)

3.6 Ultrazvukové

Na základě způsobu vyhodnocování ultrazvukového signálu je lze dělit na dva základní typy. Jde o průtokoměry s vyhodnocováním doby šíření signálu (transit-time flowmeters) a průtokoměry pracující na základě Dopplerova jevu.

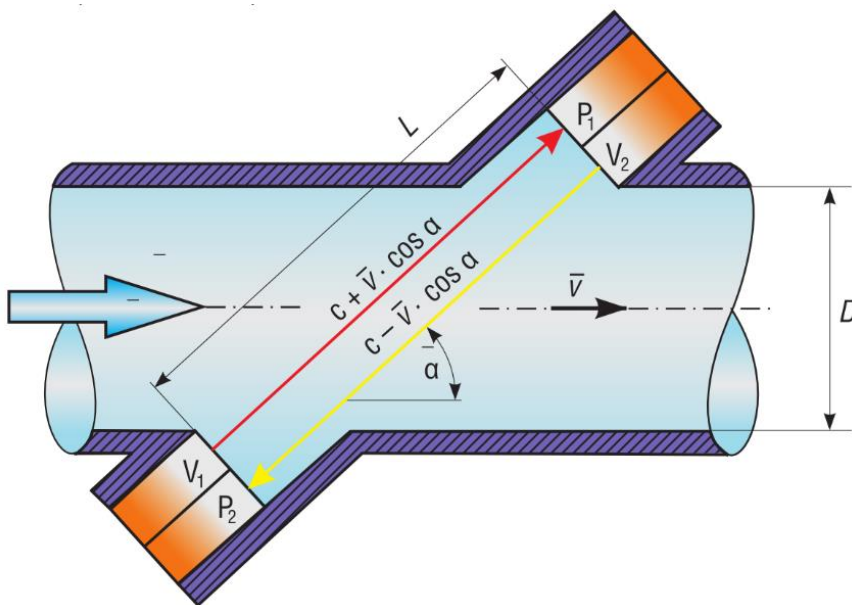
3.6.1 Vyhodnocující dobu šíření ultrazvukového signálu

Prvním typem jsou průtokoměry, které pracují na principu měření doby průchodu signálu médium. Jejich základem jsou dvě vysílací a přijímací jednotky umístěné za sebou ve směru proudění. První vysílač vysílá ultrazvukový signál po směru proudění tekutiny a druhý proti směru. Sleduje se časový rozdíl mezi vysláním signálů a jejich detekcí druhou jednotkou, který je úměrný rychlosti proudění. Tyto průtokoměry měří pouze rychlost proudění čistých tekutin, na rozdíl od průtokoměrů dopplerovských. Ultrazvukové průtokoměry jsou bezkontaktní, takže nezpůsobují v potrubí tlakovou ztrátu, současně neobsahují žádné pohyblivé části, které by se mohly opotřebovávat.

Základními prvky ultrazvukového průtokoměru jsou vysílač s přijímačem UZ vlnění, nejčastěji v podobě piezoelektrických měničů pracujících s frekvencí 0,5 až 1 MHz. V měřicí trubice je vestavěn jeden nebo více dvojic vysílačů a přijímačů. Nejčastější je konfigurace diferenční, viz obr. 37, v níž je UZ signál vysílán šikmo pod úhlem α ve směru (dvojice V_1 a P_1) a v protisměru (V_2 a P_2) proudění. UZ impuls se šíří rychlostí

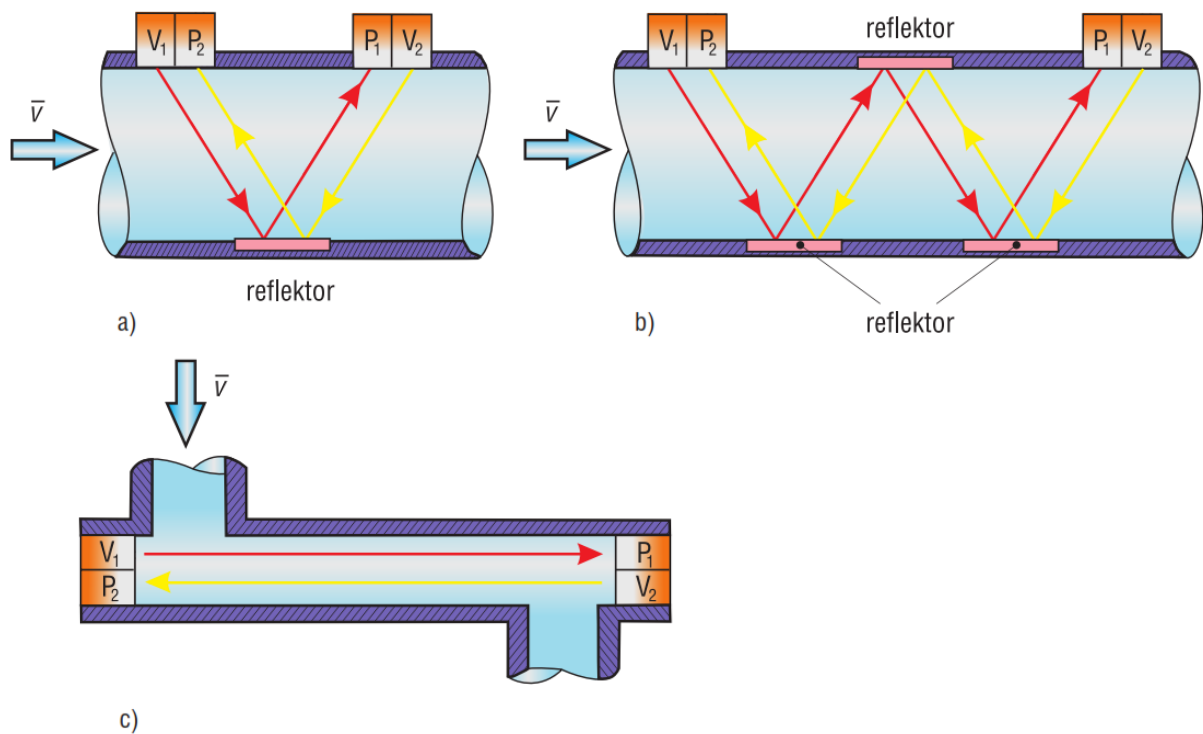
$$v_{1,2} = c \pm \bar{v} \cos(\alpha) \quad (16)$$

kde c je rychlost šíření ultrazvuku v daném prostředí a \bar{v} je střední rychlost proudícího média. Znaménko ve vztahu (16) je kladné nebo záporné podle toho, je-li vysíláno ve směru (+) nebo v protisměru (–) proudění. Z časů naměřených mezi vysláním a přijetím UZ impulzů lze odvodit střední rychlost proudící kapaliny a při známém průřezu D stanovit objemový průtok.



Obr. 38 – Princip průtokoměru s vyhodnocováním doby průchodu signálu, zdroj (Kadlec, 2017f)

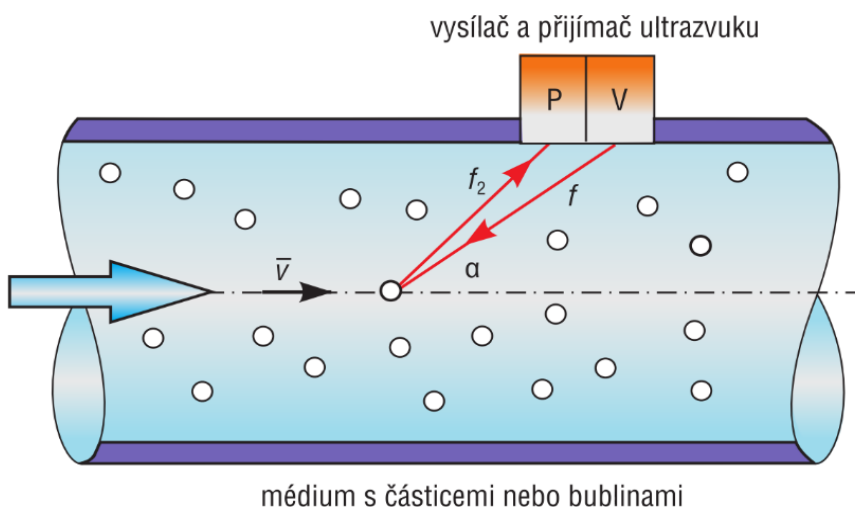
Je-li potřeba zvýšit citlivost měření, lze prodloužit dráhu mezi vysílačem a přijímačem, viz obr. 37. Buď s využitím jednoho (a) nebo více (b) odrazů od protější stěny potrubí, nebo pomocí tzv. axiálního uspořádání (c) u potrubí menších světlostí.



Obr. 39 – Umístění ultrazvukových průtokoměrů v potrubí: a) s jedním odrazem, b) s třemi odrazy, c) v axiálním uspořádání, zdroj (Kadlec, 2017f)

3.6.2 Založené na Dopplerově jevu

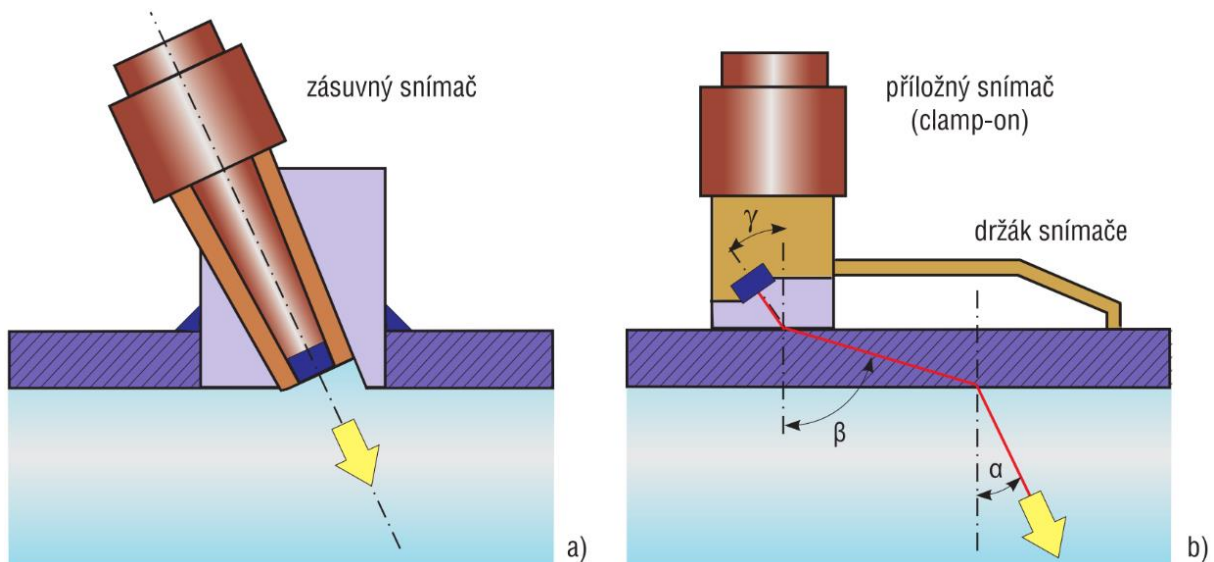
Druhým typem ultrazvukových průtokoměrů jsou přístroje využívající Dopplerova jevu, které vysílají do tekutiny ultrazvukové vlny o dané frekvenci a přijímají vlny odražené od pevných částic nebo od bublin v tekutině, viz obr. 40.



Obr. 40 – Princip Dopplerova průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017f)

Frekvence přijatého ultrazvukového vlnění je odlišná od frekvence vyslané vlny. Rozdíl uvedených frekvencí je úměrný rychlosti proudění. (Kupka, 2022)

Ultrazvukové průtokoměry existují ve dvou základních provedeních. Mohou být v přímém styku s měřeným médiem – pak se jedná o **zásuvné**, resp. **smáčené senzory**, nebo se instalují z vnější strany potrubí – jde o **příložné senzory** (clamp-on), viz obr. 41.



Obr. 41 – Umístění ultrazvukového snímače: a) zásuvný, b) příložný, zdroj (Kadlec, 2017f)

Moderní ultrazvukové průtokoměry jsou výhodné především tím, že neobsahují žádné pohyblivé součásti, které by se opotřebovávaly a nemusí být vůbec ve styku s měřeným médiem. Způsobují buď žádnou nebo minimální tlakovou ztrátu, umožňují měřit i malé průtoky a nevyžadují téměř žádnou údržbu. Oproti indukčním průtokoměrům mají tu výhodu, že umí měřit i nevodivé kapaliny, plyny a páry. Mohou také pracovat v libovolné poloze. Příklady průmyslových senzorů jsou na obr. 42 a obr. 43.



Obr. 42 – Průmyslové ultrazvukové průtokoměry Rosemount: dvoucestný řady 3412 (vlevo), čtyřcestný řady 3814 (uprostřed) a s dvojitou konfigurací (vpravo), zdroj (Emerson Electric, 2023a)



Obr. 43 – Příložený ultrazvukový průtokoměr Proline Prosonic Flow P500, zdroj (Endress+Hauser, 2023b)

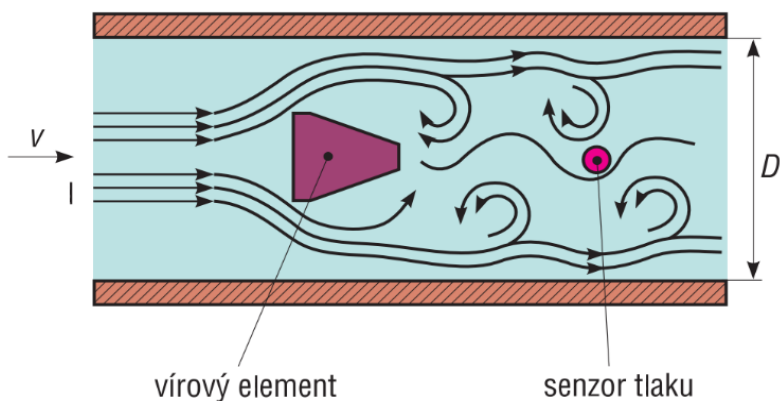
3.7 Vírové

Jsou založeny na von Kármánově jevu. Jev byl pojmenován podle amerického vědce židovského původu Theodora von Kármána (1881 až 1963), který se zabýval fyzikou, zejména termodynamikou, ale i raketovou technikou a astronautikou. Podstatou jevu je, že po stranách překážky obtékané tekutinou, vznikají střídavě na obou stranách víry, které tvoří tzv. von Kármánovu stezku. V určitém rozsahu hodnot Reynoldsova čísla ($Re < 300$) je frekvence vzniku vírů úměrná rychlosti proudění tekutiny, a tedy i velikosti průtoku. Souvislost frekvence vytváření vírů za překážkou s jejím charakteristickým rozměrem a rychlostí proudění se vyjadřuje pomocí Strouhalova čísla Sr (pojmenováno podle prof. Čeňka [Vincence] Strouhala, pocházejícího ze Seče), které má pro ustálené proudění hodnotu $Sr = 1$. V určitém rozsahu platí lineární závislost frekvence na střední rychlosti \bar{v} proudění

$$f = \frac{Sr}{d} \bar{v} \quad (17)$$

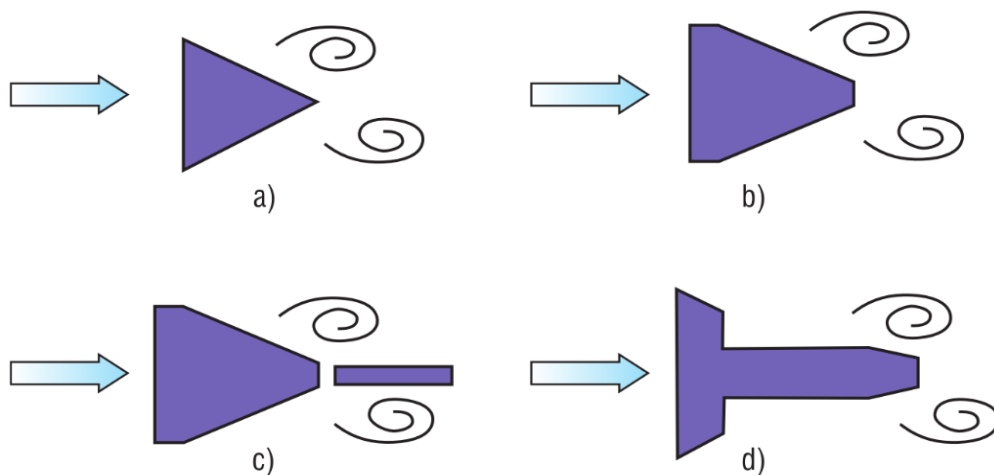
kde d je charakteristický rozměr překážky, typicky její šířka. (Kupka, 2022) a (Kadlec, 2017f)

Vznik vírů je doprovázen změnou rychlosti nebo tlaku, a to může být snímáno vhodným senzorem a následně převedeno na elektrický signál (lze použít např. piezoelektrický snímač). Výhodou vírových průtokoměrů je, že nejsou příliš citlivé na změny teploty, tlaku nebo hustoty měřené tekutiny a jejich tlaková ztráta je nízká. Nelze je ale použít při velmi malých rychlostech proudění a pro měření tekutin s velkou viskozitou. (Kupka, 2022)



Obr. 44 – Princip vírového průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2017f)

Vírový průtokoměr, jehož uspořádání je na obr. 44, se skládá z vírového tělesa a senzoru tlaku, přičemž senzor tlaku může být buď přímou součástí vírového tělesa (bluf body), nebo je umístěn samostatně (obr. 44). Rozměry a tvar vírového tělesa (příklady na obr. 45) jsou rozhodující při tvorbě vírů a mají vliv na jejich periodicitu. Pro měření tlaku se používají senzory piezoelektrické, kapacitní a tenzometrické.



Obr. 45 – Možné tvary vírových těles, zdroj (Kadlec, 2017f)

Při periodické tvorbě vírů dochází ke periodickým změnám tlaku, čemuž pak odpovídá frekvence výstupního signálu tlakoměru. Objemový průtok lze pak vypočítat s využitím vztahu

$$f = \frac{Sr}{d} \frac{4}{\pi D^2} Q_V = K Q_V \quad (18)$$

v němž K je tzv. K -faktor průtokoměru udávající počet impulzů, který odpovídá objemu za jednotku času a určuje se při kalibračním měření.

Vírové průtokoměry jsou velmi vhodné pro měření průtoku vzduchu, plynů a syté či přehřáté páry. Často se používají v tepelné technice, především v rámci otopných systémů, ale i ve farmaceutickém a chemickém průmyslu. Příklady provozních senzorů jsou na obr. 46.



Obr. 46 – Provozní vírové průtokoměry Rosemount: řady 8600 pro malou a velkou světlost potrubí (vlevo a uprostřed) a řady 8800 MultiVariable s měřením teploty, zdroj (Emerson Electric, 2023a)

3.8 Se značením tekutiny

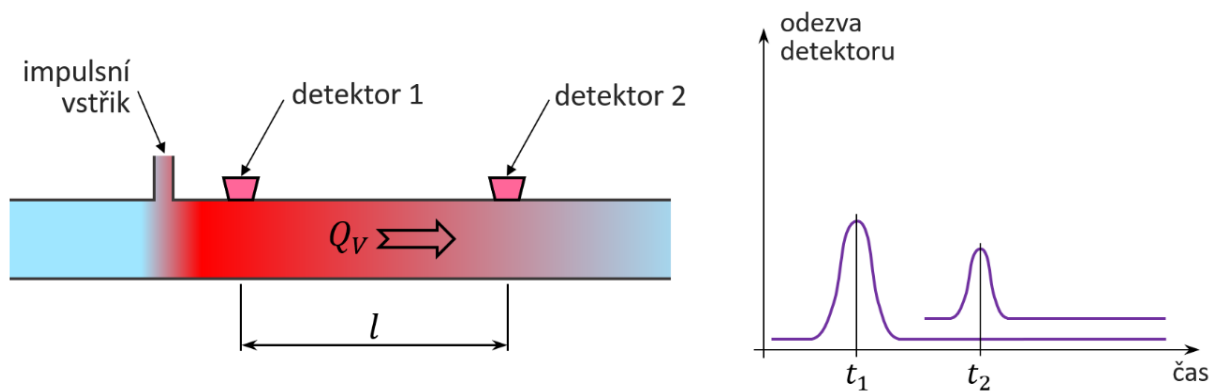
Měření průtoku pomocí značkovacích metod (se značením tekutiny, resp. směšovací) spočívá v měření doby, za níž se daná značka unášená tekutinou přesune od jednoho sledovaného místa k druhému. Střední rychlost proudění se tedy vypočte ze známé vzdálenosti l mezi detektory a rozdílu časů detekce v prvním a druhém místě při konstantním průřezu potrubí

$$\bar{v} = \frac{l}{\Delta t} = \frac{l}{t_2 - t_1} \quad (19)$$

3.8.1 S uměle vytvořenou značkou

Do tekutiny se přidají značky v podobě barviva, elektrolytu, ionizační směsi, radioizotopu, jiného plynu atp. Podle zvoleného typu značky se volí vhodný způsob její detekce. Při změně vlastností tekutiny, např. jejím ohřátím, se použije např. termistor. Při změně chemického složení tekutiny pak chemický analyzátor. Jak již bylo řečeno, tak se průchod značky detekuje dvojicí detektorů, základní princip je na obr. 47.

Používají se dvě základní metody určení průtoku z rychlosti šíření značky. První z nich je metoda postupové doby popsána již výše a ilustrovaná na obr. 47. Do měřené tekutiny se vstříkne málo rozpustná látka, jejíž postup se sleduje detektory. V případě plynu se jako značky používají radioaktivní látky. Druhou metodou je určování průtoku z postupného zředování značkovací látky. V tomto případě existují ještě dvě varianty.



Obr. 47 – Princip určování průtoku z doby postupu značky v tekutině, zdroj autor dle (Ďaďo, 2005)

Bud' se provede impulsní vstřík známého objemu V značkovací látky s koncentrací C_1 a v určité vzdálenosti se ve zvoleném časovém intervalu $\langle t_1; t_2 \rangle$ odebírají vzorky a měří se jejich koncentrace (integrační metoda). Ze závislosti koncentrace na čase se určí její střední hodnota C_2 a na základě její znalosti se z rovnice níže vypočte objemový průtok

$$VC_1 = Q_V C_2 (t_2 - t_1) \quad (20)$$

Případně se provádí průběžná injektáž značkovací látky s koncentrací C_1 konstantním objemovým průtokem q_1 po delší čas. Ve vhodně zvolené vzdálenosti, v níž už došlo k promíchání tekutiny a značkovací látky se odebírají vzorky a měří se jejich koncentrace. Po určité době se koncentrace ustálí na konstantní hodnotě C_2 a injektáž se ukončí. Objemový průtok se určí z rovnice

$$C_1 Q_V = C_2 (Q_V + q_1) \quad (21)$$

Jelikož zpravidla $Q_V \gg q_1$, lze Q_V zjednodušeně vypočítat

$$Q_V = q_1 \frac{C_1}{C_2} \quad (22)$$

(Ďaďo, 2005)

3.8.2 Korelační

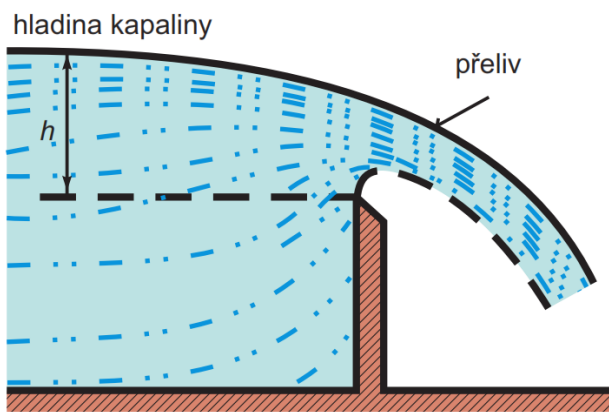
Jako značky se v tomto případě používají nehomogenity (tj. poruchy), pevné částice, bubliny a jiné nečistoty v tekutině. K detekci se využívají ultrazvukové senzory. V tzv. prohledávacím cyklu se vyše prvním senzorem UZ impuls. V přijímacím cyklu se přijme signál odražený od poruch. V dalším prohledávacím cyklu se vyše UZ signál druhým senzorem a vyhodnocovací elektronika pak hledá v přijatém signálu repliku prvního detekovaného signálu. Z měřené doby posunutí a známé vzdálenosti mezi detektory lze stanovit rychlost tekutiny. K porovnání detekovaných signálů se používá jejich vzájemná korelace a zpoždění mezi detekcí se stanoví na základě nalezení maxima korelační funkce. (Kadlec, 2006b)

3.9 Přepady a žlaby

Přepady a žlaby je vhodné použít při měření průtoku kapalin v rámci otevřených kanálů – různých kanálů, stok apod.

3.9.1 Měřicí přepad

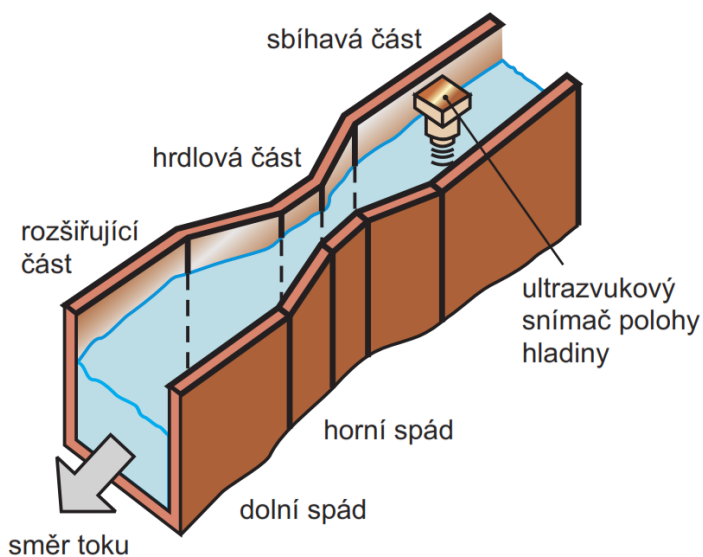
V případě otevřeného kanálu bude přepad tvořit bariéru, přes kterou bude kapalina přetékat. Mírou průtoku je výška hladiny h volné hladiny od přepadové hrany (tzv. koruny přepadu), viz obr. 48. Přepad může být realizován s různým průřezem, např. pravoúhlým, lichoběžníkovým nebo ve tvaru V. Pro jednotlivé varianty přepadu jsou k dispozici vztahy pro přepočítání mezi výškou hladiny a průtokem.



Obr. 48 – Schéma měřicího přepadu, zdroj (Kadlec, 2006b)

3.9.2 Parshallův žlab

V otevřených kanálech lze pro měření průtoku použít také Parshallův žlab, který vychází z Venturiho koncepce měření průtoku, viz obr. 49.



Obr. 49 – Schéma Parshallova žlabu, zdroj (Kadlec, 2006b)

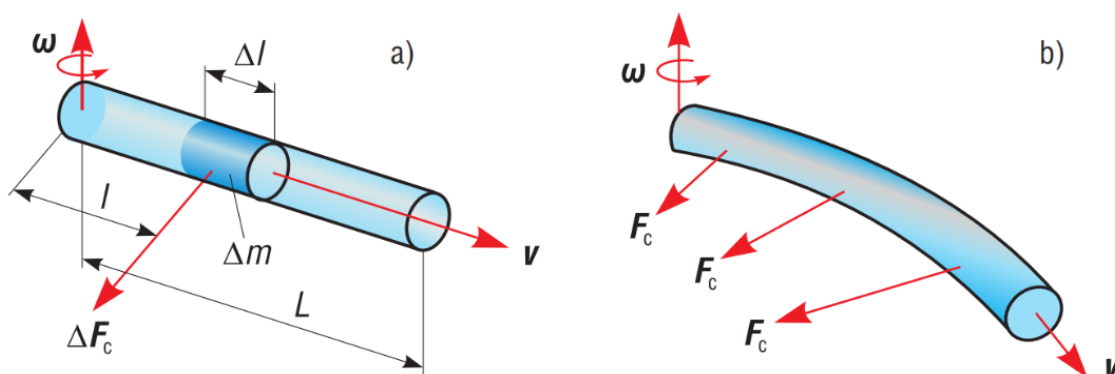
Žlab má tři části – sbíhavou, hrdlovou a rozšiřující. Ve sbíhavé části a na konci hrdlové části se měří výška hladiny, nejčastěji pomocí ultrazvukových senzorů. Ve sbíhavé části je dno žlabu rovné, v hrdlové části klesá. Tzv. koruna je tedy určena jako dělicí linie mezi sbíhavou a hrdlovou částí. Mírou průtoku je v tomto případě rozdíl měřených hladin.

4 Hmotnostní

Mimo nepřímého zjištění hmotnostního průtoku přepočtem z objemového průtoku podle (3) existuje jen velmi málo přímých metod měření hmotnostního průtoku. Nejpoužívanější je zřejmě Coriolisův průtokoměr. Měření je založeno na vyhodnocování deformace záměrně rozkmitané trubice způsobené Coriolisovou silou. Tato deformace je velmi malá a projeví se fázovým posunem měřených kmitů, který je úměrný hmotnostnímu průtoku tekutiny trubicí.

4.1 Coriolisovy

Coriolisovy průtokoměry jsou velmi přesné a jsou v podstatě nezávislé na teplotě, tlaku, viskozitě a obsahu pevných částic v tekutině. Další výhodou je skutečnost, že nevyžadují ustálený rychlostní profil proudění, a tudíž není nutné žádné rovné usměrňování potrubí před a za průtokoměrem. Vzhledem k tomu, že se jedná o snímače bez pohyblivých částí, je jejich životnost velmi vysoká. Nevýhodou je především vysoká pořizovací cena. (Kupka, 2022)



Obr. 50 – Princip působení Coriolisovy síly: a) vyznačení základních veličin, b) silové účinky při deformaci, zdroj (Kadlec, 2017g)

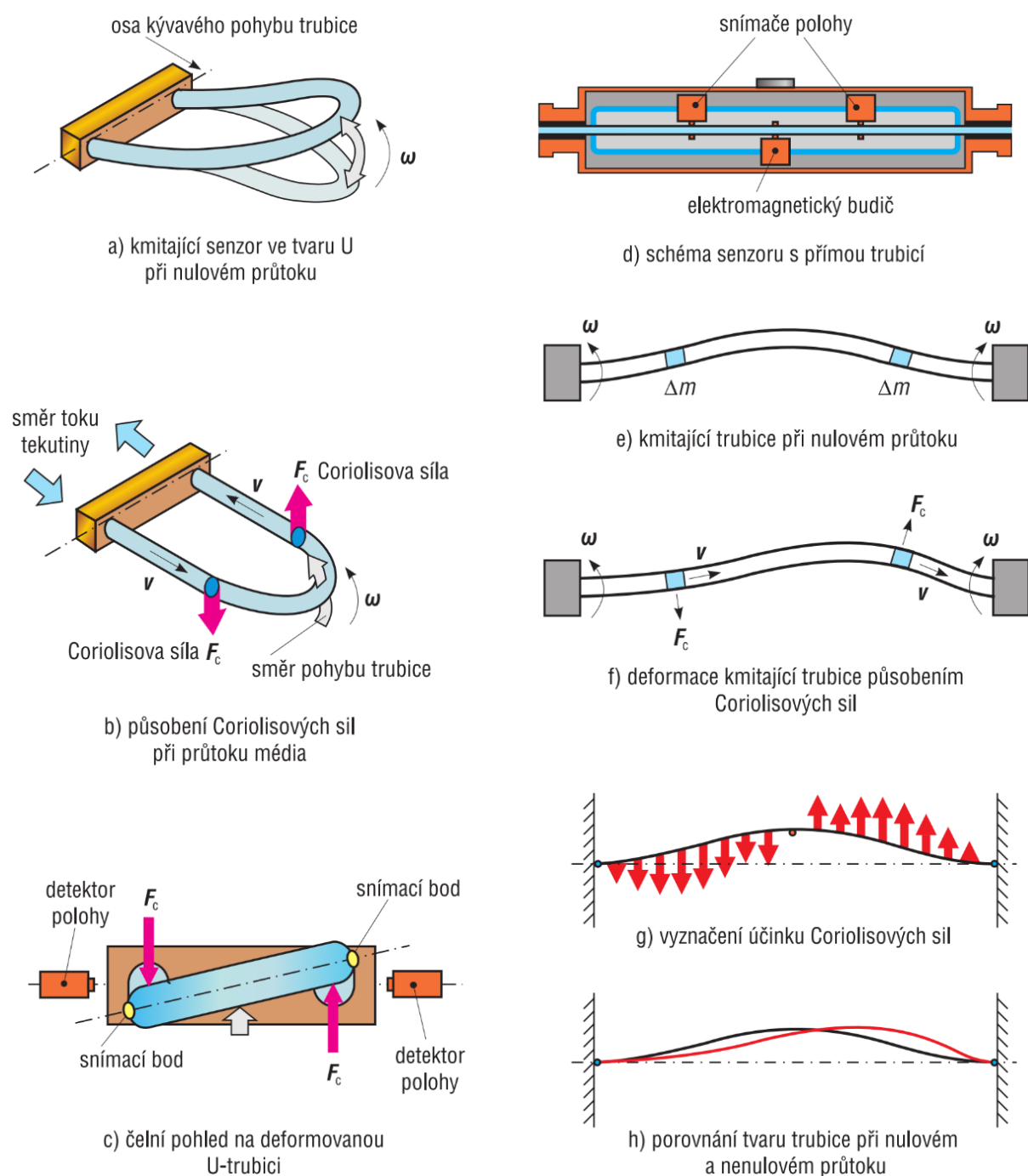
Coriolisovu setrvačnou sílu objevil francouzský matematik a fyzik Gaspard-Gustave de Coriolis (1792 až 1843). Vliv této síly na trubku s proudící tekutinou je patrný z obr. 50. Bude-li potrubím rotujícím s úhlovou rychlostí ω proudit rychlostí v tekutina, bude na její element o hmotnosti Δm působit Coriolisova síla

$$\Delta F_c = 2\Delta m(\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}) \quad (23)$$

jejíž směr je normálový k rovině vektorů $\boldsymbol{\omega}$ a \mathbf{v} . Součin $2(\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega})$ se označuje jako tzv. Coriolisovo zrychlení. Pro velikost síly bude s respektováním vektorového součinu dvou kolmých vektorů a po dosazení za rychlost $v = \Delta l / \Delta t$ platit

$$|\Delta F_C| = \Delta F_C = 2 \frac{\Delta m}{\Delta t} \Delta l \omega = 2 Q_m \Delta l \quad (24)$$

z čehož je zřejmá souvislost mezi Coriolisovou silou a hmotnostním průtokem Q_m .



Obr. 51 – Vliv a princip působení Coriolisovy síly na základní typy měřicích trubic, zdroj (Kadlec, 2017g)

Protože je vyhodnocování průtoku z velikosti Coriolisovy síly obtížné, využívá se vlivu momentu síly na element délky Δl o hmotnosti Δm , který se nachází ve vzdálenosti l od osy rotace. Velikost momentu se vypočte

$$\Delta M = \Delta F_C l = 2 l \omega Q_m \Delta l \quad (25)$$

a celkový moment působící na potrubí délky L se vypočte integrací

$$M = 2\omega Q_m \int_0^L l \, dl = L^2 \omega Q_m \quad (26)$$

Coriolisovy průtokoměry mohou být různé konstrukce s měřicími trubicemi různého tvaru. Mohou být ve tvaru U (obr. 51a), což bylo nejčastější řešení v minulosti, ale i jinak zakřivené nebo přímé (obr. 51d). Princip působení Coriolisovy síly a její vliv na U trubici a přímou trubici je podrobněji ilustrován na obr. 51. Deformace měřicích trubic se měří pomocí přesných senzorů polohy (nejčastěji indukčních, kapacitních nebo optických) a vyhodnocuje se fázový posuv snímaných kmitů. Příklady různých provozních průtokoměrů jsou na obr. 52. Průtokoměry s více zakřivenými měřicími trubicemi mají vyšší citlivost, přesnost a vyšší odolnost proti rušivým vlivům (např. vibracím potrubí), ale způsobují vyšší tlakové ztráty a hůře se udržují a čistí.



Obr. 52 – Různá provedení Coriolisových průtokoměrů Yokogawa, zdroj (Yokogawa Europe, 2023)

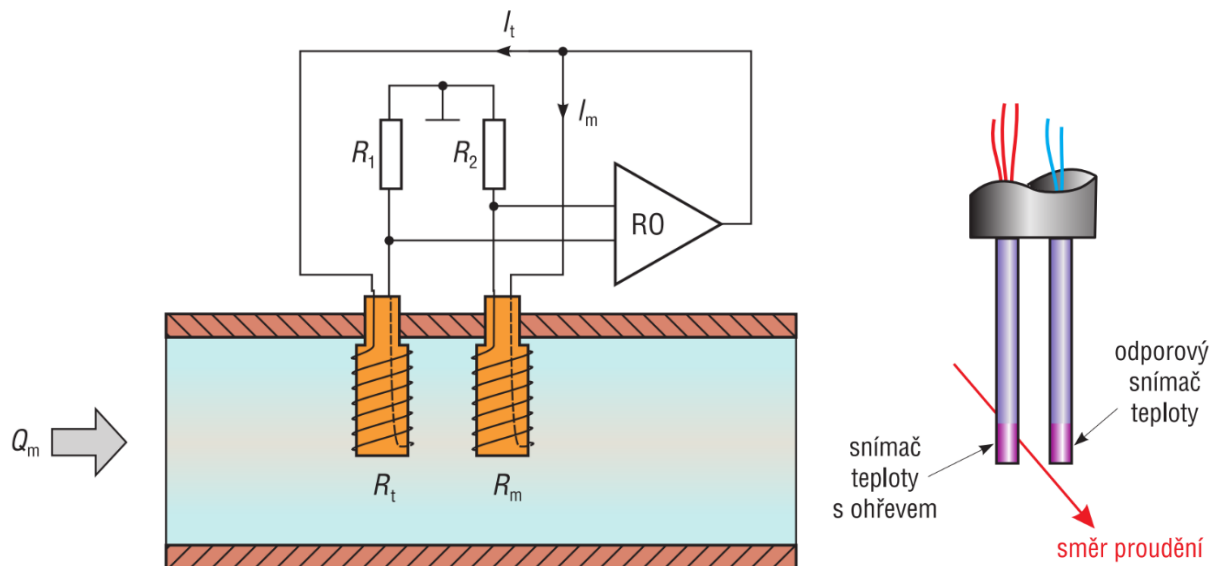
4.2 Tepelné

Používá se dvou způsobů měření – anemometrického a kalorimetrického. Součástí obou je žhavené tělísko a dva teploměry. Termoanemometr vyhodnocuje ochlazení žhaveného tělíska vlivem proudění tekutiny a kalorimetr vyhodnocuje zahřívání okolního média. Základem snímačů jsou PTC a NTC termistory (v minulosti se používal platinový drát).

Výhodou je velmi přesné měření průtoků i při malých rychlostech proudění, jednoduchá konstrukce a nízká cena díky použitým polovodičovým součástkám. Nevýhodou je nevhodnost těchto snímačů pro měření znečištěných kapalin a plynů a omezený rozsah teplot měřené tekutiny. (Kupka, 2022)

4.2.1 Termoanemometry

Citlivé části termoanemometru jsou umístěny přímo v měřené proudící tekutině, viz obr. 53. Při měření průtoky je pak vyhodnocováno ochlazení vyhřívaného čidla. Jde o dva odporové teploměry umístěné buď vedle sebe, nebo za sebou ve směru toku. Teploměry se zapojují do můstku, přičemž čidlem s malým odporem R_m prochází vyšší proud a zahřívá se tak na vyšší teplotu, zatímco čidlo s odporem R_t má teplotu měřené tekutiny.



Obr. 53 – Princip a schéma provedení hmotnostního termoanemometru, zdroj (Kadlec, 2017g)

Vlivem proudění tekutiny se vyhřívané čidlo ochlazuje. V tzv. izotermním režimu udržují regulační obvody (RO) teplotu vyhřívaného čidla na konstantní hodnotě změnou velikosti proudu I_m . Velikost proudu odpovídá hmotnostnímu průtoky Q_m , ale závislost je nelineární. Lze ji aproximovat rovnicí

$$I_m = a + b\sqrt{Q_m} \quad (27)$$

v níž a je konstanta aproximující tepelnou konvekci (vedením a zářením) při nulovém průtoky a b je konstanta závislá na geometrii snímače a tepelné vodivosti a kapacitě, hustotě a viskozitě tekutiny.

Provozní senzory mohou být buď v průtočném nebo v zásuvném základním provedení, viz jejich příklady na obr. 54.

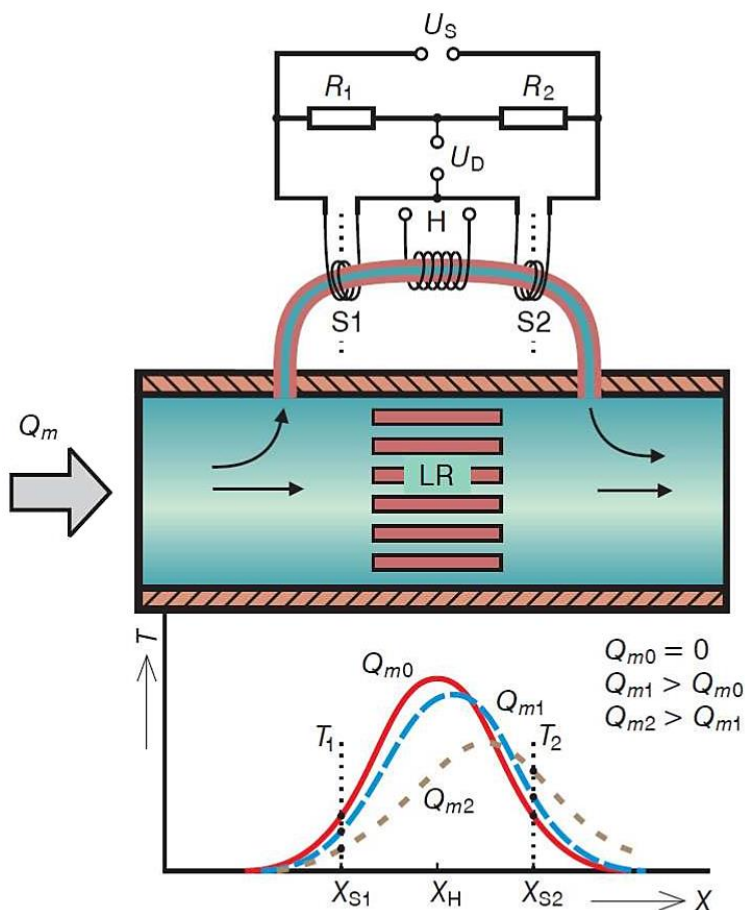


Obr. 54 – Průmyslové hmotnostní termoanemometry Endress+Hauser a hlídač průtoku IFM: zásuvné provedení anemometru (vlevo), průtočné provedení anemometru (uprostřed) a hlídač průtoku (vpravo), zdroj (Automation24, 2023)

4.2.2 Kalorimetrické

V případě kalorimetrických průtokoměrů je ve středu profilu potrubí s proudícím médiem, nebo spíše častěji v tenkém obtokovém kanále umístěn zdroj tepla, viz obr. 55. Před a za ním se měří teplota a průtok se pak určuje z jejího rozdílu. Jinými slovy, průtokoměr vyhodnocuje míru změny oteplení v závislosti na proudění tekutiny. Zmiňovaný obtokový kanál je realizovaný v podobě tenkostěnné kapiláry typicky s průměrem 1 mm, kterou prochází jen část celkového průtočného množství.

Protože jsou senzory umístěny na obtokové kapiláře s laminárním prouděním, jsou někdy označovány jako kapilární, i když jsou založeny na tepelném principu. Velmi často se používají provozní průmyslové senzory kompaktní konstrukce, např. v provedení od firmy Vögtlin Instruments na obr. 56.



Obr. 55 – Princip kalorimetrického anemometru, zdroj (Kadlec, 2006c)



Obr. 56 – Několik možných provedení kompaktních provozních kalorimetrických průtokoměrů, zdroj (Vögtlin Instruments, 2023)

5 Otázky a úkoly

1) Co si představujete pod měřením průtoku? Jaké veličiny vlastně můžeme měřit?

- 2) Jak pracují a k čemu se v praxi používají membránové a bubnové plynoměry? Do jaké základní skupiny průtokoměrů patří?
- 3) Vyjmenujte a stručně popište základní typy rychlostních senzorů průtoku. Kde často nachází uplatnění průtokoměry radiální lopatkové?
- 4) Vysvětlete, jak pracují ultrazvukové průtokoměry. Uveďte jejich základní varianty a popište princip jejich funkce.
- 5) Na jakých principech pracují hmotnostní průtokoměry? Co je základem funkce průtokoměrů Coriolisových a tepelných?

6 Použitá literatura

AUTOMATION24, Inc., 2023. *Thermal dispersion flow sensors* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.automation24.com/thermal-dispersion-flow-sensors>>

ABB s.r.o., 2023a. *Electromagnetic flowmeter ProcessMaster FEP300* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://new.abb.com/products/measurement-products/flow/electromagnetic-flowmeters/process-industry/processmaster-fep300>>

ABB s.r.o., 2023b. *Compact orifice flowmeter OriMaster FPD500* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://new.abb.com/products/measurement-products/flow/differential-pressure-flowmeters/compact-dp-flowmeters/fpd500-compact-orifice-flowmeter>>

ABB s.r.o., 2023c. *Compact wedge meter WedgeMaster FPD570* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://new.abb.com/products/measurement-products/flow/differential-pressure-flowmeters/compact-dp-flowmeters/fpd570-compact-wedge-meter>>

BINGO SENZOR TECH, Co., Ltd., 2023. *Inteligentní turbínový průtokoměr* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://cs.sgmls.com/turbine-flow-meter-water-sensor-impeller-flow-meter.html>>

EMERSON ELECTRIC, Co., 2023a. *Achieve Precision Flow Measurement and Process Control* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.emerson.com/cs-cz/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement>>

EMERSON ELECTRIC, Co., 2023b. *Rosemount™ 3051SFA Annubar™ Flow Meter* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.emerson.com/cs-cz/catalog/automation/measurement-instrumentation/differential-pressure-flow/rosemount-sku-3051sfa-annubar-flow-meter-en-gb>>

ENDRESS+HAUSER Czech, s.r.o., 2023a. *Měření průtoku: Přehled výrobků pro aplikace měření průtoku kapalin, plynů a páry* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-prutoku>>

ENDRESS+HAUSER Czech, s.r.o., 2023b. *Proline Prosonic Flow P 500 ultrazvukový průtokoměr: příložený průtokoměr pro omezené prostory v procesním průmyslu s až 3 vstupy/výstupy* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-prutoku/Prosonic-Flow-P500?t.tabId=product-overview>>

ENGINEERX.DECOREXPRO.COM/CS/, 2020. *Jak a v čem se měří průtok plynu: metody měření + přehled všech typů plynoměrů* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://engineerx.decorexpro.com/cs/gaz/standart/v-chem-izmeryaetsya-rashod-gaza.html>>

ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL, 2011. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-313-5.

DR.-ING. RITTER APPARATEBAU GMBH & Co. KG, 2023. *Drum-type Gas Meters* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.ritter.de/en/products/drum-type-gas-meters/>>

GEOS AGT, s.r.o., 2023. *Vodoměr domovní GMDM-I/SV* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://obchod.geosagt.cz/art.-GMDM-ISV-p23376-c265>>

HENNLICH, s.r.o., 2023a. *Pádlové hlídače průtoku / hlídače s pružnou clonkou* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.hennlich.cz/meres/padlove-hlidace-prutoku-hlidace-s-pruznou-clonkou/>>

HENNLICH, s.r.o., 2023b. *Pádlové průtokoměry / průtokoměry s pružnou clonkou* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.hennlich.cz/meres/padlove-prutokomery-prutokomery-s-pruznou-clonkou/>>

HENNLICH, s.r.o., 2023c. *Pístový průtokoměr TZ1* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.hennlich.cz/meres/pistovy-prutokomer-tz1/>>

HENNLICH, s.r.o., 2023d. *Průtokoměry s lopatkovým nebo oválným kolem, turbínové, zubové* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.hennlich.cz/meres/prutokomery-s-lopatkovym-nebo-ovalnym-kolem-turbinove-zubove/>>

HONEYWELL INTERNATIONAL, Inc., 2023. *Gas Metering: Mechanical Flow Metering* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.smartenergy.honeywell.com/product-category/products/gas/gas-metering>>

JENČÍK, Josef a Jaromír Volf, 2003. *Technická měření*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 978-80-01-02138-6.

KADLEC, Karel, 2006a. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 1). *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **12**(10), 5-9. ISSN 1210-9592.

KADLEC, Karel, 2006b. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 2). *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **12**(11), 24-29. ISSN 1210-9592.

- KADLEC, Karel, 2006c. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 3). *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **12**(12), 30-34. ISSN 1210-9592.
- KADLEC, Karel, 2012. Indukční průtokoměr – princip, vlastnosti a použití. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **18**(10), 10-13. ISSN 1210-9592.
- KADLEC, Karel, 2017c. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření průtoku (část 1.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **133**(3), 116-119. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, 2017d. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření průtoku (část 2.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **133**(4), 149-153. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, 2017e. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření průtoku (část 3.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **133**(5/6), 190-194. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, 2017f. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření průtoku (část 4.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **133**(7/8), 237-240. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, 2017g. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření průtoku (část 5.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **133**(9/10), 317-321. ISSN 1805-9708.
- KROHNE MESSTECHNIK, GmbH, 2023. Wedge flowmeter: DP flowmeter for harsh process applications with abrasive and viscous media [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://krohne.com/en/products/flow-measurement/flowmeters/differential-pressure-flowmeters/wedge-flowmeter>>
- KUPKA, Libor, 2022. *Základy mechatroniky: výukový materiál*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- LANDSFORD, Wallace M., 1936. The Use of an Elbow in a Pipe Line for Determining The Rate of Flow in the Pipe. In *University of Illinois Bulletin*. **XXXIV**(33), no. 289, 38 s.
- MJ SYSTEMS, LLC, 2023. *VFF Rotary Piston Meters* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://mjsusa.com/manufacturers/litremeter-rotary-piston-flow-meter/>>
- METRON-FARNIER, Inc., 2023. *Altair Meters* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://metronfarnier.com/residential-meters/>>
- ORLÍKOVÁ, Soňa, 2001. Měření průtoku tekutin – principy průtokoměrů. *Elektrorevue*. 49(12). ISSN 1213-1539.
- PRIMARY FLOW SIGNAL, Inc., 2023. FE Fabricated Elbow Meter [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.primaryflowsignal.com/products/specialty-meters/fe-fabricated-elbow-meter>>
- PTÁČEK, Jan, 2012. Kompaktní průtokoměry snižují náklady na měření. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **18**(3), 30-31. ISSN 1210-9592.
- SENSUS, 2023. *Metrology, Communications and Software Products* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://sensus.com/emea/products/?utility=water&product_categories=metrology>

VÖGTLIN INSTRUMENTS, GmbH, 2023. *Premium Capillary Mass Flow Meters and Mass Flow Controllers for Gases* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW:

<<https://www.voegtlin.com/en/mass-flow-meters-and-controllers-for-gases/smarttrak-series/>>

YOKOGAWA EUROPE, B.V., 2023. *About YOKOGAWA's Flowmeters* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.yokogawa.com/za/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/flow-meters>>

Seznam zkratek

A/D	analogově digitální
ČVUT	České vysoké učení technické
HART	highway addressable remote transducer (komunikační protokol)
UZ	ultrazvuk
NTC	negative temperature coefficient
PTC	positive temperature coefficient
RO	regulační obvod

Rejstřík

A/D převodník, 23
Bernoulliho rovnice, 12, 15
clamp-on. viz příložený
Coriolisova síla, 1, 3, 40, 41, 42
Coriolisovo zrychlení, 40
elektromotorická síla, 27
Eulerova turbínová rovnice, 23
expanzní součinitel, 16
Faradayův zákon elektromagnetické indukce, 26
hlídač průtoku
 náporový, 22
 pádlový, 22
kalorimetr. viz kalorimetrický senzor
měřicí přepad, 3, 38, 39
Parshallův žlab, 3, 39
plovák, 20
primární prvek (škrticí orgán), 12
 clona, 1, 12, 14, 16
 dýza, 1, 12, 14

- kapilára, 1, 17
- Pitotova trubice, 12
- Prandtlova trubice, 12
- trubice, 1, 12, 20, 21, 31, 40
- V klín, 17
- Venturiho dýza, 3, 12, 14, 39
- proteklé množství, 2, 7
- proudění
 - laminární, 44
 - turbulentní, 1, 12
- průtok, 1, 2, 4, 16, 19, 31, 36, 38, 44, 46
 - hmotnostní, 1, 40
 - objemový, 1, 2, 15, 16, 31, 38
- průtokoměr
 - hmotnostní, 1, 3, 39
 - Coriolisův, 40, 42
 - tepelný, 4, 42
 - kalorimetrický, 4, 44, 45
 - termoanemometr, 4, 42, 43, 44
 - objemový, 4
 - s nespojitou funkcí, 4
 - zvonový krychloměr, 4, 5
 - se spojitou funkcí, 2, 5
 - bubnový plynoměr, 7, 8
 - membránový plynoměr, 6
 - oválový, 11
 - pístový, 8, 9
 - s oscilačním pístem, 10
- rychlostní, 12
 - axiální turbínový, 23, 24
 - elektromagnetický indukční, 26, 27, 28, 29, 30, 47
 - náporový, 2, 21, 22
 - pádlový, 23
 - několiakotvorová sonda, 12, 13, 14
 - plovákový, 20, 21
 - průřezový, 2, 14
 - clonový, 16
 - kapilární, 17, 18
 - klínový, 17
 - kolenový, 2, 18, 19
 - radiální, 3
 - radiální lopatkový, 24, 25
 - vodoměr, 25, 26
 - rozdílový, 12
 - se značením tekutiny, 37
 - korelační, 3, 38
 - s uměle vytvořenou značkou, 3, 37

- turbínový, 2
- ultrazvukový, 3, 31, 33
 - příložný, 33, 34, 46
 - s měřením doby průchodu, 3, 31, 32
 - založené na Dopplerově jevu, 3, 33
 - zásuvný, 33
- vírový, 3, 4, 35, 36, 37
- Reynoldsovo číslo, 35
- rotometr. viz plovákový průtokoměr
- rovnice kontinuity, 15
- rychlost proudění tekutiny, 1
- s ozubenými koly. viz oválový
- s rotačním pístem. viz oválový
- Strouhalovo číslo, 35
- termistor, 43
- turbína, 23
- vírové těleso, 36
- von Kármánova stezka, 35
- von Kármánův jev, 35

Vytvořeno v rámci projektu **Studijní program Automatizace (SPAUT)**
na **Univerzitě Pardubice**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-16591/2022.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy

MS
MIT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY