



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MĚŘENÍ PROCESNÍ VELIČINY – TLAK

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLE – PRESSURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Martin Kouba

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. et Ing. Antonín Konečný

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

| | |
|-------------------|-------------------------------------|
| Ústav: | Ústav automatizace a informatiky |
| Student: | Ing. Martin Kouba |
| Studijní program: | Strojirenství |
| Studijní obor: | Aplikovaná informatika a řízení |
| Vedoucí práce: | Ing. et Ing. Antonín Konečný |
| Akademický rok: | 2022/23 |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření procesní veličiny – tlak

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tlak má významný vliv u mnoha procesů. Proto patří často mezi základní procesní veličiny, které se monitorují. V současné době je žádoucí, aby se jednotlivé procesní veličiny měřily, vyhodnocovaly v reálném čase. Způsob a rychlost měření, zpracování, vyhodnocení těchto veličin má zásadní vliv na dodržení technologických postupů nebo norem. Proto je nezbytné věnovat této problematice náležitou pozornost.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše v oblasti měření tlaku.
- Začlenění měření tlaku do měřicího řetězce.
- Popsat a uvést příklady vlivů na nejistotu měření tlaku.
- Využití bezdrátové komunikace.
- Vlastní závěry a/nebo doporučení.

Seznam doporučené literatury:

NETOLICKÝ, P., KUPKA, L. a TŮMOVÁ, O., 2020. Analysis of a measurement process in the field of variability. In: Proceedings of the 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics): CDEE 2020. Plzeň, 2020, s. 172-175. ISBN 978-1-72815-879-2.

Sborníky technické harmonizace: Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

FRADEN, J. Handbook of Modern Sensors. 5th ed. 2016. Cham: Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-19302-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-19303-8.

NOVÁK, M. Technická měření. V Praze: České vysoké učení technické, 2018, 234 s. ISBN 978-80-01-06388-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Měření procesní veličiny tlaku je důležitým prvkem a podmínkou funkčnosti mnoha průmyslových aplikací, zejména v prostředí výroby komodit, dopravy, farmacie, potravinářství a mnoha dalších. V praxi existuje celá řada metod měření tlaku, které se aplikují v různých prostředích a podmínkách. Výběr měřicích snímačů závisí na mnoha faktorech, jako je rozsah měření, prostředí, citlivost, rychlost odezvy nebo odolnost vůči prostředí. Správný postup při jejich kalibraci a stanovení nejistot měření zvyšují důvěryhodnost výsledků měření. Prostředky pro přenos dat v moderním pojetí umožňují lépe zabezpečit a zrychlit přenos informace v měřicím řetězci. Všechny výše uvedené skutečnosti v posloupnosti a ve vzájemné vazbě zásadně ovlivňují výslednou spolehlivost a efektivitu měření procesních veličin. Studie měření procesní veličiny tlaku z komplexního pohledu umožní analyzovat jednotlivé prvky měřicího řetězce a jejich provázanost. Obsah práce poskytuje základní orientaci v problematice měření tlaku a zachycuje hlavní trendy v jednotlivých oblastech.

ABSTRACT

The measurement of the process quantity of pressure is an important element and condition of the functionality of many industrial applications, especially in the environment of commodity production, transport, pharmacy, food industry and many others. In practise, there are many pressure measurement methods that are applied in different environments and conditions. The choice of measuring equipment depends on many factors, such as the measurement range, environment, sensitivity, response speed, or environmental resistance. The correct procedure in their calibration and determination of measurement uncertainties increase the credibility of the measurement results. The means of data transfer in a modern concept make it possible to better secure and speed up the transfer of information in the measurement chain. All of the above-mentioned facts, in sequence and in relation to each other, fundamentally affect the resulting reliability and effectiveness of the measurement of the process quantity. The study of the measurement of the process quantity of pressure from a comprehensive point of view will allow us to analyse the individual elements of the measuring chain and their interconnection. The content of the thesis provides a basic orientation to the issue of pressure measurement and captures the main trends in individual areas.

KLÍČOVÁ SLOVA

Senzor tlaku, měřicí řetězec, měření tlaku, převodník tlaku, nejistoty měření, bezdrátový přenos

KEYWORDS

Pressure sensor, measurement chain, pressure measurement, pressure transducer, measurement uncertainty, wireless communication



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2023

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUBA, Martin. Měření procesní veličiny – tlak [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149656>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Antonín Konečný.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. et Ing. Antonínu Konečnému za průběžné komplexní vedení, odborné připomínky a vstřícný osobní přístup při zpracování tématu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2023

.....

Ing. Martin Kouba

OBSAH

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD | 15 |
| 2 | REŠERŠE TLAKOVÝCH SNÍMAČŮ | 17 |
| 2.1 | Charakteristika tlaku a jeho referenční úrovně..... | 17 |
| 2.2 | Definice senzoru, snímače, převodníku tlaku a tlakoměru | 18 |
| 2.3 | Kategorie snímače dle kompletnosti..... | 18 |
| 2.4 | Typy podle tlakového rozsahu..... | 19 |
| 2.5 | Typy podle konstrukce..... | 19 |
| 2.5.1 | Kapalinové tlakoměry | 20 |
| 2.5.2 | Deformační snímače tlaku..... | 26 |
| 2.5.3 | Tlakoměry se silovým účinkem..... | 28 |
| 2.5.4 | Elektrické snímače tlaku | 30 |
| 2.5.5 | Speciální snímače tlaku..... | 35 |
| 2.5.6 | Inteligentní převodníky tlaku | 36 |
| 3 | ZAČLENĚNÍ MĚŘENÍ TLAKU DO MĚŘICÍHO ŘETĚZCE | 39 |
| 3.1 | Části měřicího řetězce | 39 |
| 3.2 | Instalace snímačů tlaku do měřicího řetězce | 40 |
| 3.3 | Výběr snímačů tlaku a jejich výhody..... | 41 |
| 3.4 | Trendy v oblasti snímačů tlaku..... | 41 |
| 3.5 | Metodika výběru snímače tlaku..... | 44 |
| 3.6 | Oblíbené moderní snímače tlaku | 46 |
| 3.7 | Příklad výběru tlakového snímače..... | 47 |
| 4 | PŘENOS DAT ZE SNÍMAČE | 49 |
| 4.1 | Analogově digitální převodník | 49 |
| 4.2 | Proudová a napěťová smyčka..... | 49 |
| 4.3 | Technologie přenosu dat vodičem za použití protokolu | 50 |
| 4.4 | Typy vodičů..... | 51 |
| 4.5 | Bezdrátová technologie přenosu dat ze snímače | 52 |
| 4.6 | Trendy a využití bezdrátové technologie přenosu | 55 |
| 4.7 | Srovnání přenosu dat vodičem a bezdrátové technologie | 56 |
| 5 | KALIBRACE TLAKOVÝCH SNÍMAČŮ | 59 |
| 5.1 | Metrologické dokumenty a zodpovědné organizace | 59 |
| 5.2 | Proces kalibrace | 61 |
| 5.3 | Kalibrační standardy | 63 |
| 5.3.1 | Laboratorní kalibrační přístroje | 63 |
| 5.3.2 | Kalibrační přenosné přístroje | 63 |
| 6 | CHYBY SNÍMAČŮ TLAKU | 65 |
| 7 | PŘÍSPĚVKY K NEJISTOTĚ MĚŘENÍ TLAKU | 69 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 7.1 | Rozdělení nejistot | 69 |
| 7.2 | Předpisy a pravidla pro výpočet nejistoty | 70 |
| 7.3 | Přesnost snímače a nejistota | 71 |
| 7.4 | Chyba v tlakovém bodě..... | 71 |
| 7.5 | Nejistota typu A u tlakového snímače | 72 |
| 7.6 | Nejistota typu B u tlakového snímače | 72 |
| 8 | VLASTNÍ ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ..... | 77 |
| 9 | ZÁVĚR..... | 79 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 81 |
| | SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK..... | 85 |

1 ÚVOD

Tlak patří mezi základní fyzikální veličiny. Tlak je sledován jak v přirozeném prostředí, tak v průmyslu, kde se stal důležitým prvkem a podmínkou funkčnosti mnoha průmyslových procesů.

Tlak je měřen tlakoměry nebo tlakovými snímači, které pracují na základě různých principů a konstrukčních variant a zajišťují primární funkci detekce tlaku a převodu velikosti veličiny tlaku na měřitelnou hodnotu. Práce se věnuje řešením jednotlivých tlakových snímačů, popisu konstrukčního řešení a principu funkce snímání tlaku. Dále jsou jednotlivé typy snímačů popisovány z pohledu jejich výhod nebo případně slabých stránek a jsou také vzájemně porovnávány ve vztahu k aplikačnímu prostředí.

Tlakový snímač je nutné pro každou konkrétní aplikaci pečlivě vybrat a dále ho integrovat vhodným způsobem do měřicího řetězce. Práce popisuje způsob takové integrace do měřicího řetězce včetně jeho umístění, komplexních kritérií výběru vhodného typu snímače nebo trendových typů integrovaných do moderních měřicích řetězců.

Moderní systémy měření tlaku, založené často na kombinaci tradičních a inovativních technologií, vyžadují komplexní přístup při návrhu architektury měřicího řetězce. Dnes je trendem integrace moderních přenosových systémů z důvodu centralizace řízení, ukládání provozních dat na vzdálená datová úložiště nebo internetu věcí, z důvodu vzdálené správy snímačů, komunikace a ovládání systému například formou regulace. Práce rozebírá možnosti přenosu dat ze snímače tradičním způsobem, tj. vodičem a aktuálně trendovým způsobem založeným na využívání bezdrátové technologie. Jednotlivé přenosové technologie tato práce detailně popisuje a předkládá porovnání jednotlivých přenosových technologií v měřicím řetězci současně s vymezením trendů v této oblasti.

Neméně důležitým parametrem spolehlivého řešení je garance přesnosti měření veličiny tlaku zejména přesnosti snímače. Přesnost tlakového snímače ovlivňují chyby snímačů, které práce popisuje a definuje jejich typické vlastnosti a důsledky. Chyby jsou integrovány do výpočtu nejistoty definovanými postupy, založenými na metrologických předpisech a statistických parametrech příspěvku k nejistotě. Práce popisuje typové chyby, jejich příspěvky k nejistotě a způsoby, jak tyto parametry počítat. Současně práce pojednává o metrologické legislativě, o organizacích působících v oblasti metrologie, o postupech kalibrace a základních zákonných normách vytvářející strukturu legislativy, určenou pro stanovená měřidla potažmo tlakové snímače.

Průřezový popis jednotlivých částí měřicího řetězce tlakového snímače s detailnějším rozbohem důležitých prvků je cílem této práce současně s vymezením trendů a výhod jednotlivých koncepčních řešení.

2 REŠERŠE TLAKOVÝCH SNÍMAČŮ

Tlak je v obecné rovině, při nerovnoměrném silovém působení, definován jako podíl elementární síly dF , která působí ve směru vektoru normály na elementární plochu dS_N .

Vzorec tlaku lze tak vyjádřit vztahem 2.1. [9]

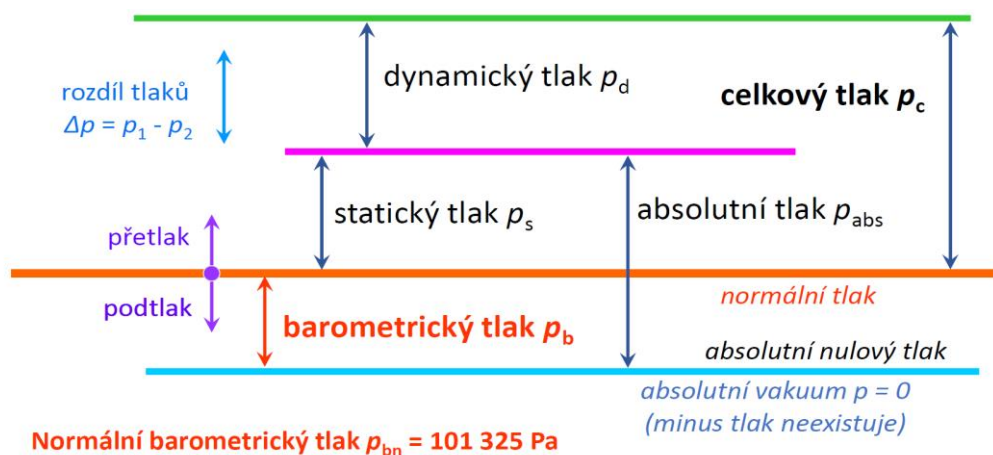
$$p = \frac{dF}{dS_N} [Pa] \quad (2.1)$$

Jednotka tlaku Pascal [Pa] je zavedenou hlavní jednotkou v soustavě SI. Vzhledem k historické existenci veličiny tlaku a velmi rozsáhlému použití napříč prakticky veškerými přírodními a technickými obory je používaná jednotka v daném oboru velmi často opatřena předponou dle SI anebo je využívána historická jednotka oborově vhodná (Torr, Bar apod.). [1]

Tlak je veličinou, kterou je nutné v rámci hodnot jednoznačně vymezit k referenční úrovni. Měření, interpretace a vyhodnocení této veličiny je tak vázáno na účel, který má hodnota tlaku reprezentovat. Naměřená hodnota tlaku je většinou odkazována k referenční úrovni absolutní hodnoty tlaku nebo tlaku barometrického.

2.1 Charakteristika tlaku a jeho referenční úrovně

Tlak je vždy charakterizován k předem určené referenční úrovni (obr. 1). [14]



Obr. 1: základní definice tlaků a vzájemné vztahy [35]

- Absolutní tlak – jedná se o tlak vztažený k dokonalému vakuu s použitím absolutní nuly jako referenčního bodu. Příkladem je snímač barometrického tlaku.
- Diferenční tlak – je definován jako rozdíl mezi dvěma tlaky na každé straně senzoru.
- Dynamický tlak – jedná se o tlak, který vzniká působením proudící tekutiny (kapaliny nebo plynu) na relativně klidné těleso, které obtéká, nebo měří naopak tlakový odpor, který vzniká působením pohybujícího se tělesa na klidnou tekutinu.
- Barometrický tlak – jedná se o tlak vzdušného obalu země na určitém místě. S nadmořskou výškou jeho hodnota klesá.

- Statický tlak – jedná se o tlak vzhledem k barometrickému tlaku.
- Celkový tlak – jedná se o tlak, který je součtem statického a dynamického tlaku.

2.2 Definice senzoru, snímače, převodníku tlaku a tlakoměru

Pojem senzor a snímač je v literatuře velmi často zaměňován. Jedním z hlavních důvodů je stavebnicová konstrukce snímačů, kdy jednotlivé komponenty, respektive funkce snímače mohou, ale nemusí být integrovány do jednoho zařízení. Obecně platí, že senzor je komponentou zajišťující fyzické zachycení hodnoty fyzikální veličiny. Jedná se velmi často o kontaktní membránu s příslušnou snímací komponentou (například tenzometrem). Tato komponenta je velmi často označovaná jako čidlo.

Oproti tomu snímač je komponentou, která obsahuje senzor s elektrickým výstupem a zajišťuje i další rozšířené funkce pro připojení snímače k lince, mechanické komponenty pro upevnění snímače na potrubí, někdy rovněž zobrazovací jednotku apod. Jedná se tedy o komplexnější výrobek. Tlakový snímač, pokud je vybaven modulem zajišťujícím zesílení a převod elektrického signálu, je v literatuře také označován jako měřicí převodník tlaku.

Ve vztahu k terminologii senzoru a snímače je důležité zmínit rovněž označení tlakoměr, barometr a manometr. Tyto komponenty kategorizujeme jako snímače a lze je popsat jako měřicí přístroje obsahující analogový displej nebo digitální zobrazovací displej.

Různá pojmenování tlakových snímačů jsou popisována i v anglické literatuře, kdy vztupně, v souvislosti s doplňováním dalších funkcí k primárnímu senzoru, hovoříme o zařízeních „*pressure sensor*“ (tlakový senzor), „*pressure transducer*“ (převodník tlaku) a „*pressure transmitter*“ (tlakový snímač s konektivitou).

Senzory, z principu jejich funkce, dělíme na senzory intrinsické, fungují na principu jejich vlastností. Druhou skupinu tvoří senzory fungující na základě pružného členu.

Tlakové snímače je možné kategorizovat podle různých kritérií. Za základní dělení se považuje dělení podle kompletnosti a podle konstrukce.

2.3 Kategorie snímače dle kompletnosti

1. Základní senzor nebo čidlo

Senzory jsou určeny pro integraci do komplexnějších sestav snímačů. Senzory v této úrovni nemívají ochrannou schránku, stupeň ochrany IP (Ingress Protection), zesilovací člen nebo tepelně kompenzační prvky. [1]

2. Průmyslové snímače

Jedná se o kompletní snímače s IP ochranou proti prachu a stříkající vodě, obsahující kompenzační prvky, napájecí obvod, případně seřizovací prvky pro provozní kalibrace. Výstup snímače bývá analogový, poslední trendy směřují k doplňování mikroprocesoru zejména pro úpravu signálu respektive jeho digitalizaci. [1]

3. Inteligentní převodníky tlaku

Inteligentní převodníky, nazývané též *smart* převodníky zahrnují většinou odporové nebo kapacitní senzory, zesilovací prvky, D/A a A/D převodníky a unifikovaný elektrický výstup. V důsledku takto popsany převodník představuje již specifický typ měřicího řetězce. [1]

2.4 Typy podle tlakového rozsahu

Tlakoměry a tlakové snímače dělíme podle tlakového rozsahu následovně: [1]

- **Manometry** – zařízení měřící jak tlak tekutin, tak i plynů v technologickém prostředí, například v potrubí. Manometry obsahují velmi často Bourdonovu trubici.
- **Vakuometry** – zařízení sloužící k měření tlaku pod hodnotou tlaku atmosférického. Vakuometry bývají například membránové tlakoměry.
- **Barometry** – zařízení, která se používají k měření atmosférického tlaku. Barometry využívají zejména kapalinový princip.
- **Diferenciální tlakové snímače** – zařízení, určené k měření rozdílu tlaku mezi dvěma body v technologickém systému. Využívají celou řadu principů, typicky použití dvou nezávislých tlakových membrán.

2.5 Typy podle konstrukce

- Kapalinové tlakoměry
 - U – tlakoměr
 - Nádobkový tlakoměr se svislou trubicí
 - Nádobkový tlakoměr se šikmou trubicí
 - Betzův tlakoměr
 - Prstencový tlakoměr
 - Kapalinový barometr
 - Kompresní vakuometr
 - Kompenzační tlakoměr
- Deformační snímače tlaku
 - Bourdonova trubice
 - Membránový snímač tlaku
 - Vlnovcový snímač tlaku
 - Krabicový snímač tlaku
- Tlakoměry se silovým účinkem
 - Pístový tlakoměr
 - Zvonový tlakoměr
- Snímače tlaku s elektrickým výstupem
 - Potenciometrický snímač tlaku
 - Indukčností snímač tlaku
 - Piezoelektrický snímač tlaku

- Kapacitní snímač tlaku
- odporový snímač tlaku s tenzometry
- Speciální snímače
 - Rezonanční snímače tlaku
 - Optický snímač tlaku
- Inteligentní převodníky tlaku

2.5.1 Kapalinové tlakoměry

Hodnota tlaku je odečítána z výšky hladiny kapaliny v nádobě. Princip funkce spočívá ve vyrovnání měřeného tlaku působícího na hladinu kapaliny a hydrostatického tlaku sloupce kapaliny. Rozsah měření je korigován použitím kapaliny s jinou hustotou. Délka trubice je omezena na cca 1,5 metru. [4]

U – tlakoměr

Tento typ U-tlakoměru (obr.2) tvoří trubice ohnutá do tvaru U doplněná o stupnici. Může být také sestavena ze dvou trubic, které jsou dole spojeny (např. pomocí hadice). Trubice jsou naplněny z poloviny tlakovou kapalinou. Rozsah měření je určen zvolenou kapalinou, tj. její hustotou, a dále výškou trubice. Nevýhodou tohoto tlakoměru je nutnost odečítání hodnot v obou trubicích. [1]

Jsou-li trubice otevřeny do atmosféry, potom je výška hladiny v obou trubicích stejná. Poté, co na jednu stranu přivedeme tlakový vzduch, tak je kapalina na této straně stlačena a hladina klesne. V druhé trubici vzroste hladina o stejnou hodnotu. V případě přivedení podtlaku do jedné z trubic bude funkce obrácená, tj. na straně, kam byl přiveden podtlak se hladina zvýší a na druhé straně se sníží o stejnou hodnotu. Hodnoty výšky hladin odečítáme ze stupnice, kterou je zařízení vybaveno. Následně pomocí rozdílu výšek počítáme měřený tlak podle vztahu 2.2. Hodnoty jsou odečítány opticky, v případě požadavku na přesnější měření elektronicky. [1]

Tlak se počítá ze vztahu:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h \quad (2.2)$$

ρ_1 – hustota vzduchu [kg/m^3]

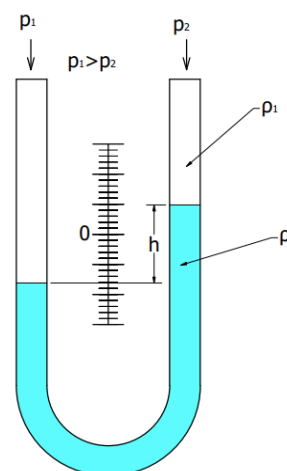
ρ_2 – hustota kapaliny [kg/m^3]

p_1 – tlak v levé trubici [Pa]

p_2 – tlak v pravé trubici [Pa]

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

h – výška sloupce kapaliny odečtená na tlakoměru [m]



Obr. 2: U – trubicový tlakoměr [1]

Nádobkový tlakoměr se svislou trubicí

Tento typ tlakoměru (obr.3) je modifikací U – trubicového tlakoměru, ve které má jedna trubice násobně větší průměr než druhá, a proto je změna hladiny v této širší trubici nepodstatná a je ji možné při výpočtu zanedbat. Odečítání hodnoty rozdílu výšek hladiny se provádí pouze na úzké trubici. Tlak měřený nádobkovým tlakoměrem se počítá dle vztahu 2.3. Nevýhodou tohoto tlakoměru je nutnost kalibrace průřezu, aby nebyla ovlivněna poměrová hodnota převodu tlakoměru e . [1]

Výpočet tlaku:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} + 1 \right) = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h \cdot e \quad (2.3)$$

p_1 – tlak v levé trubici [Pa]

p_2 – tlak v pravé trubici [Pa]

ρ_1 – hustota vzduchu [kg/m^3]

ρ_2 – hustota kapaliny [kg/m^3]

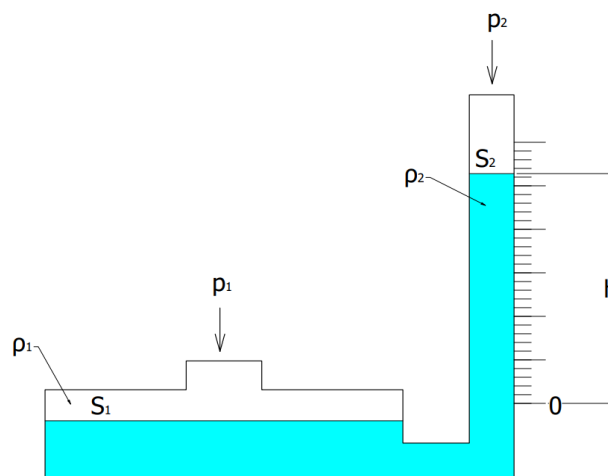
g – tíhové zrychlení [m/s^2]

h – výška sloupce kapaliny odečtená na tlakoměru [m]

e – převod tlakoměru ($e = \frac{S_2}{S_1} + 1$) [-]

S_1 – plocha široké trubice [m^2]

S_2 – plocha úzké trubice [m^2]



Obr. 3: Nádobkový tlakoměr se šikmou trubicí [1]

Nádobkový tlakoměr se šikmou trubicí

Tento typ je modifikací nádobkového tlakoměru se svislou trubicí a jeho schéma je prezentované na obr. 4. Modifikace umožňuje nastavit úhel úzké trubice v rozsahu 0° až 90° . Natočení trubice má vliv na přesnost měření. Se zmenšováním úhlu natočení se snižuje rozsah měření a zvyšuje přesnost. Nevýhodou tohoto tlakoměru je nutnost kalibrace průřezu, aby nebyla ovlivněna hodnota převodu tlakoměru e . Další nevýhodou je pomalé nabíhání výšky hladiny při malém úhlu natočení. Výpočet tlaku se provádí dle vztahu 2.4. [1]

Výpočet tlaku:

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h = \\ &= (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot l \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} + \sin(\alpha) \right) = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot l \cdot e \end{aligned} \quad (2.4)$$

p_1 – tlak v levé trubici [Pa]

p_2 – tlak v pravé trubici [Pa]

ρ_1 – hustota vzduchu [kg/m^3]

ρ_2 – hustota kapaliny [kg/m^3]

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

h – výška sloupce kapaliny odečtená na tlakoměru [m]

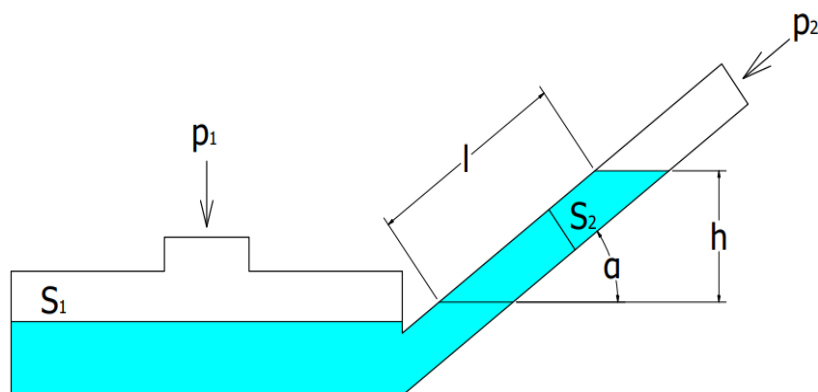
l – šikmá výška kapalinového sloupce [m]

e – převod tlakoměru $\left(e = \frac{S_2}{S_1} + \sin(\alpha) \right)$ [-]

S_1 – plocha široké trubice [m^2]

S_2 – plocha úzké trubice [m^2]

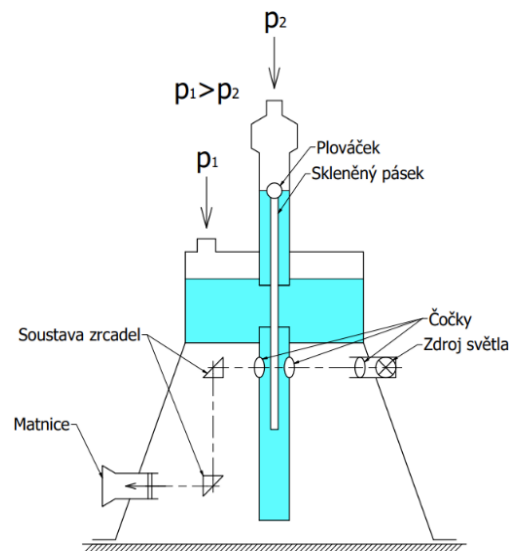
α – úhel nastavení úhlu trubice [$^\circ$]



Obr. 4: Nádobkový tlakoměr se šikmou trubicí [1]

Betzův tlakoměr

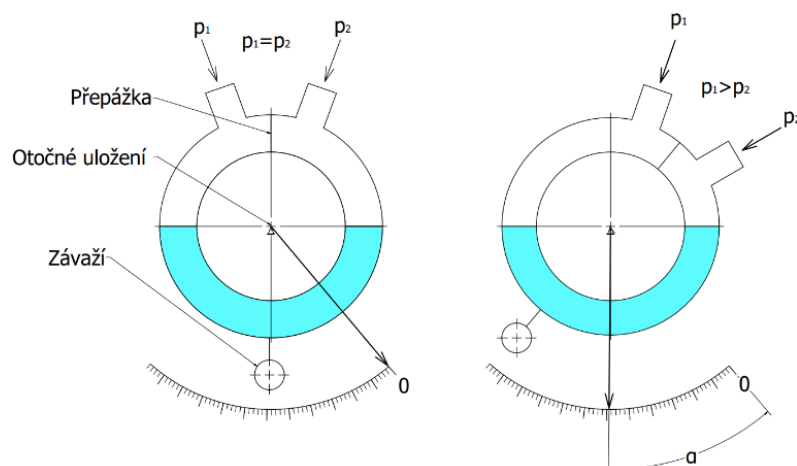
Betzův tlakoměr (obr. 5) nachází uplatnění především v přesném laboratorním měření. Výška hladiny kapaliny se měří pomocí plováčku, na který je připevněn skleněný pásek se stupnicí. Odečítání hodnot ze skleněného pásku probíhá opticky. Pomocí čoček a zrcadel je naměřená hodnota promítnuta na matnici. Přesnost odečítání hodnot je 0,05 – 0,2 mm. Nevýhodou tohoto tlakoměru je nutnost kalibrace průřezu, aby nebyla ovlivněna hodnota převodu tlakoměru e . Další nevýhodou je dlouhá nabíhací doba. [5]



Obr. 5: Betzův tlakoměr [5]

Prstencový tlakoměr

Základ tlakoměru, zobrazeného na obr.6, tvoří dutá kruhová trubice, která je v horní polovině rozdělena přepážkou. Kruhová trubice je otočně uložena a přibližně z poloviny naplněna kapalinou. Kapalina spolu s přepážkou rozdělují vnitřní prostor trubice na dvě části. K oběma částem je připojeno tlakové prostředí. Ke spodní části trubice je připojeno závaží, které vymezuje výchozí rovnovážnou polohu. Pokud jsou tlaky v tlakových prostředích stejné, nedochází k vychýlení trubice. V případě odlišných hodnot tlaků dojde k úhlovému vychýlení trubice z výchozí polohy. Odečítání rozdílu se provádí pomocí ručičky, která tuto hodnotu ukáže na stupnici. Následně se tlak počítá dle vztahu 2.5. Výhodou tohoto prstencového tlakoměru je vysoká citlivost a univerzálnost měření (měří podtlak, přetlak i rozdíl tlaků). Mezi další výhody patří jednoduchá výměna závaží při provozu a rovněž necitlivost měřidla na změnu teploty. Nevýhodou je vysoká setrvačnost, z čehož plyne dlouhá doba měření. [5]



Obr. 6: Prstencový tlakoměr [5]

Výpočet tlaku:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{M \cdot g \cdot R}{S \cdot r} \cdot \sin(\alpha) \quad (2.5)$$

p_1 – tlak v levé trubici [Pa]

p_2 – tlak v pravé trubici [Pa]

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

M – kroutící moment [$\text{N} \cdot \text{m}$]

R – vnější průměr prstence [m]

r – vnitřní průměr prstence [m]

S – vnitřní plocha prstence [m^2]

α – úhel pootočení [$^\circ$]

Kapalinový barometr

Tyto typy barometrů se používají pro měření atmosférického tlaku. Trubice tlakoměru je naplněna kapalinou a tvoří dvě ramena. Výše položené rameno je na konci zataveno a nad hladinou kapaliny je vakuum. Do níže položeného ramena je přiveden tlakový vzduch. Hodnotu měřeného tlaku počítáme z naměřené výšky mezi hladinami dle vztahu 2.6. [44]

Kapalinové barometry mají několik modifikací jako je například Gay-Lussacův barometr zobrazený na obr. 7, Fortinův barometr uvedený na obr. 8, nebo přesný dvou-trubicový barometr. Odlišnosti se týkají formy odečítání hodnot nebo nutnosti korigovat výsledky z důvodu kapilárního efektu. [44]

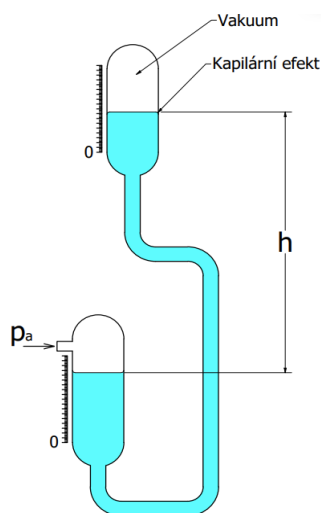
Výpočet tlaku:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.6)$$

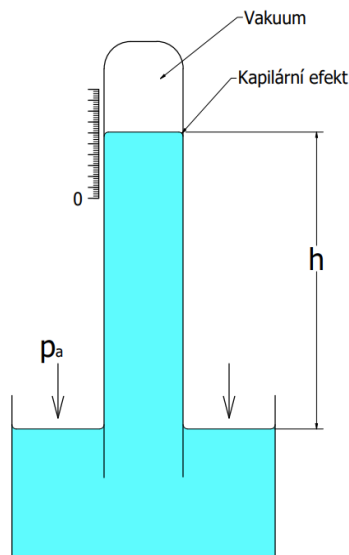
ρ – hustota kapaliny [kg/m^3]

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

h – výška sloupce kapaliny odečtená na tlakoměru [m]



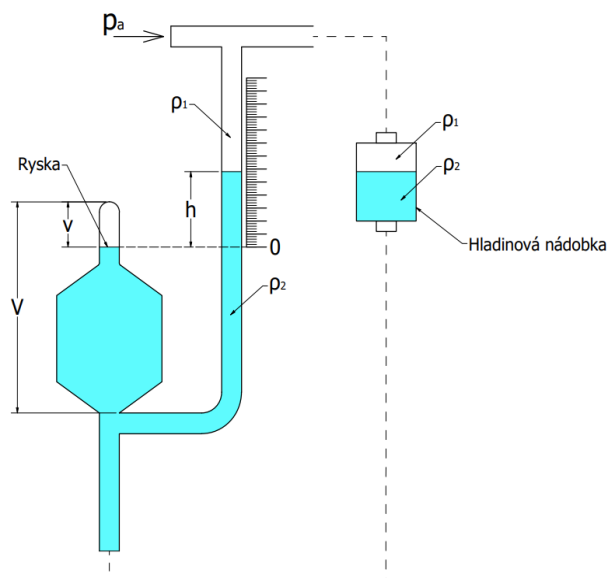
Obr. 7: Gay-Lussacův barometr [44]



Obr. 8: Fortinův Barometr [45]

Kompresní vakuometr

Kompresní tlakoměr (obr. 9) je využíván zejména pro měření malých absolutních tlaků. Princip jeho funkce je založen na platnosti Boyova zákona ($p \cdot V = konst.$). Při měření dochází k uzavření určitého objemu vzduchu o absolutním tlaku pomocí rtuťového sloupce o výšce h . Na začátku měření se pomocí hladinové nádoby sníží hladina tak, aby rtuť opustila vakuometr a otevřel se tak vstup pro měřený tlak. Poté, co se měřený tlak dostane do prostoru vakuometru, dochází ke zdvihání hladinové nádoby, čímž se nejdříve uzavře prostor V a dalším zdviháním se objem měřeného vzduchu stlačí na hodnotu v určenou ryskou. Ve volné trubici spojené s měřeným prostorem je vlivem tlaku rtuť vytlačena do výšky h . Tlak se následně počítá pomocí této výšky dle vztahu 2.7. [1]



Obr. 9: Kompresní vakuometr [1]

Výpočet tlaku:

$$p_a \cdot V = (p_a + \rho \cdot g \cdot h) \cdot v \rightarrow p_a = \frac{v}{V-v} \cdot \rho \cdot g \cdot h = e \cdot \rho \cdot g \cdot h \quad (2.7)$$

p_a – absolutní tlak [Pa]

V – objem velké nádoby [m^3]

v – objem malé nádoby [m^3]

ρ – hustota kapaliny [kg/m^3]

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

h – výška sloupce kapaliny odečtená na tlakoměru [m]

e – převod tlakoměru ($e = \frac{v}{V-v}$) [-]

Kompenzační tlakoměr

Kompenzační tlakoměr je variantou nádobkového tlakoměru. Tlakoměr pracuje na diferenčním principu a měří rozdíl dvou tlaků. Do menší nádoby je přiváděn vyšší z měřených tlaků. Do větší nádoby přivádíme menší z měřených tlaků. Nádobku postupně pomalu zvedáme mikrometrickým šroubem nahoru, dokud se hladina ve větší nádobce nevrátí do původní polohy. Poloha hladiny v menší pohyblivé nádobce se zjišťuje pomocí hrotového stavoznaku. Rozdíl výšek hladin lze odečítat velmi přesně, v setinách mm. [46]

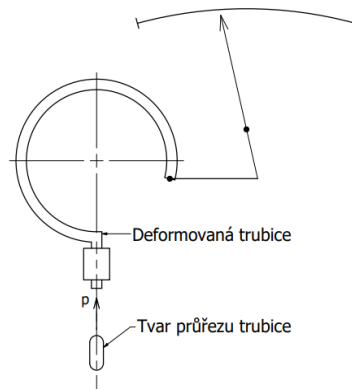
2.5.2 Deformační snímače tlaku

Deformační tlakoměry vyhodnocují velikost měřeného tlaku z velikosti deformace, tj. změny geometrického tvaru deformačního prvku. Deformace musí probíhat pouze v rozsahu pružné deformace prvku, v opačném případě dochází ke zkreslení výstupu nebo dokonce zničení přístroje. [1] [4]

Bourdonova trubice

Jedná se o trubici stočenou do spirály, nebo do kruhového oblouku (obr. 10). Na jednom konci je ukotvena na tělese tlakoměru a skrz toto ukotvení do trubice přivádíme tlakový vzduch. Na druhém konci je trubice uzavřena a je na ní připevněn mechanickým převodem ukazatel na stupnici. [1] [4]

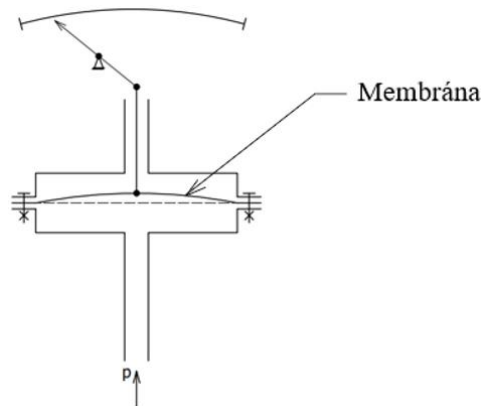
Nevýhodou tohoto tlakoměru je citlivost na změnu teploty z důvodu rozpínání materiálu. V porovnání s dalšími deformačními tlakoměry (např. membránový tlakoměr) se jedná o méně přesné zařízení. [1] [4]



Obr. 10: Bourdonova trubice [4]

Membránový snímač tlaku

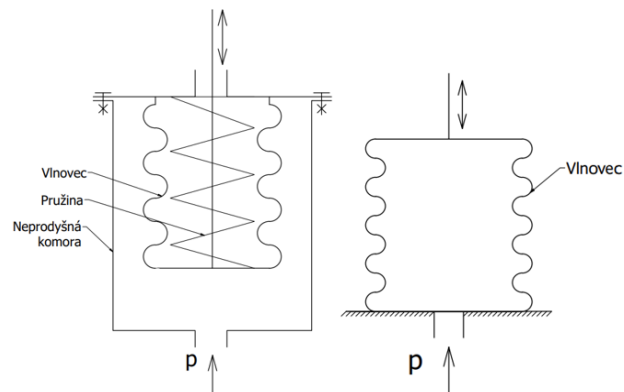
Měřený tlak je vyhodnocován z deformačního členu, kterým je v tomto případě membrána (obr. 11). Membrána se prohýbá působením měřeného tlaku a tento průhyb je mechanicky přenášen na indikační ručičku nebo jiný indikační prvek. [1] [4]



Obr. 11: Membránový snímač tlaku [4]

Vlnocový snímač tlaku

Měřený tlak je vyhodnocován z deformačního členu, kterým je v tomto případě vlnovec (obr. 12). Vlnovec je válcovitá nádoba s vlnitým povrchem.



Obr. 12: Vlnocový snímač tlaku [1] [4]

Vlnovcový snímač tlaku může být zhotoven ve dvou variantách:

- Vlnovec je vložen do neprodyšné vzduchové komory, kdy je z vnější strany zatěžován tlakem.
- Tlak je přiveden do vlnovce.

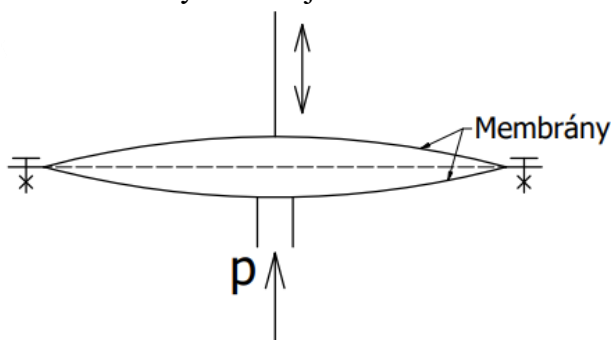
Velikost tlaku se určuje z velikosti stlačení (natažení) vlnovce měřeným médiem. Odpor proti deformaci vlnovce je závislý na odporu vlastního materiálu proti deformaci. Tento odpor může být zvýšen vhodně zvolenou pružinou. Pružinu je nutné automaticky použít při konstrukci vlnovce z umělé hmoty nebo gumy, protože tyto materiály disponují malou tuhostí. [1] [4]

Krabicový snímač tlaku

Tlakoměrným prvkem je v tomto případě kruhová nádoba jejíž dna jsou tvořeny membránami. Tento tlakoměr může být konstruován ve variantách:

- Snímač tlaku je vložen do neprodyšné vzduchové komory, kdy je z vnější strany zatěžován tlakem.
- Tlak je přiveden do snímače tlaku. (obr. 13).

Velikost naměřeného tlaku se vyhodnocuje z velikosti deformace pružné membrány. [4]



Obr. 13: Krabicový snímač tlaku [4]

2.5.3 Tlakoměry se silovým účinkem

Hodnota tlaku je vypočtena z naměřené síly. Hodnotu tlaku působícího ze spodní části na snímač měříme přidáváním závaží na píst tlakoměru. Závaží je přidáváno do doby ustálení pístu v rovnovážném stavu. [1] [4]

Pístový tlakoměr

Používá se především ke kalibraci deformačních tlakoměrů. V měřicí nádobě vytvoříme tlak pomocí šroubového mechanismu (obr. 14). Vlivem tohoto tlaku dojde k zvednutí pístu. Píst pomocí závaží ustálíme v rovnovážné poloze. Po ustálení pístu v rovnovážné poloze počítáme tlak dle vztahu 2.8. [1] [4]

Výpočet tlaku:

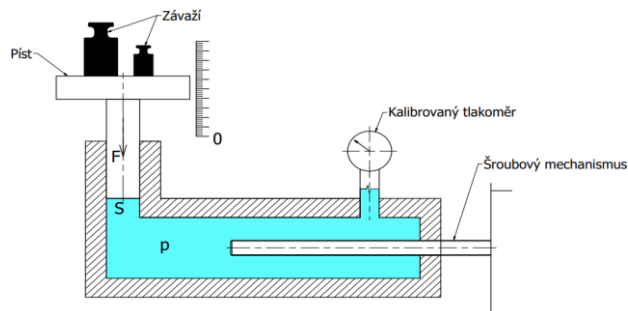
$$p = \frac{F + F_b}{S} \quad (2.8)$$

p - tlak kapaliny [Pa]

F – celková síla, která působí na píst [N]

F_b – korekční faktor vztlaku [N]

S – Plocha pístu [m²]



Obr. 14: Pístový tlakoměr [1]

Zvonový tlakoměr

Základ zvonového tlakoměru tvoří zvon, který je ponořen do kapaliny (obr. 15). Pod tento zvon je přiveden tlakový vzduch. Vzniklá tlaková síla vytlačí zvon z výchozí pozice do pozice, ve které odečteme hodnotu l . Pomocí této hodnoty počítáme měřený tlak dle vztahu 2.9. Proti této síle působí vnější síla způsobená úbytkem tlaku při vynořování zvonu. [1] [4]

Výpočet tlaku:

$$p = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot \rho \cdot g \cdot l = e \cdot \rho \cdot g \cdot l \quad (2.9)$$

S_1 – vrchní plocha zvonu [m²]

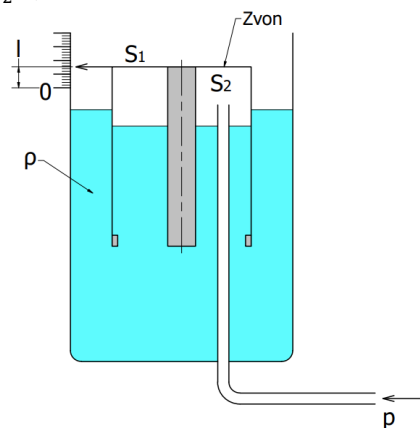
S_2 – spodní plocha zvonu [m²]

g – tíhové zrychlení [ms⁻²]

ρ – hustota kapaliny [kgm⁻³]

l – zdvih zvonu

e – převod tlakoměru ($e = \frac{S_1 - S_2}{S_2}$) [-]



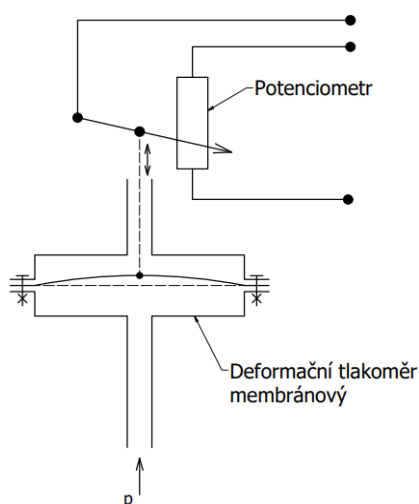
Obr. 15: Zvonový tlakoměr [1]

2.5.4 Elektrické snímače tlaku

Typickým znakem těchto snímačů je výstup snímače v podobě elektrického signálu.

Potenciometrický snímač tlaku

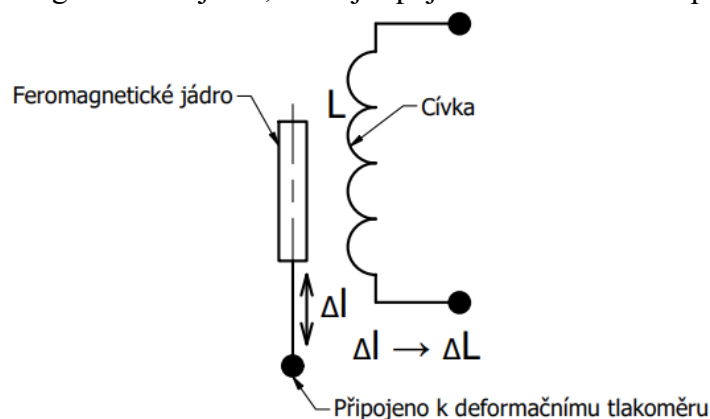
Používá se pro převod výstupu deformačního tlakoměru na elektrický signál. Pohyblivý prvek deformačního tlakoměru je spojen s jezdcem potenciometru (rezistor s proměnným odporem). V praxi se používají posuvné (obr. 16) a rotační potenciometry. Při přivádění tlaku do tlakoměru dojde k posunu membrány, dále k mechanickému posunu jezdce potenciometru, který změní jeho odpor. Z této změnové hodnoty je následně vyhodnocována velikost měřeného tlaku. [35]



Obr. 16: Potenciometrický snímač tlaku [35]

Indukčností snímač tlaku

Používá se pro převod výstupu deformačního tlakoměru na elektrický signál. Změna polohy deformačního prvku se převádí na změnu indukčnosti cívky, jak je schematicky uvedeno na obr. 17, případně na změnu vzájemné indukčnosti dvou cívek. Změna indukčnosti se provádí změnou polohy feromagnetického jádra, které je spojeno s deformačním prvkem. [13]



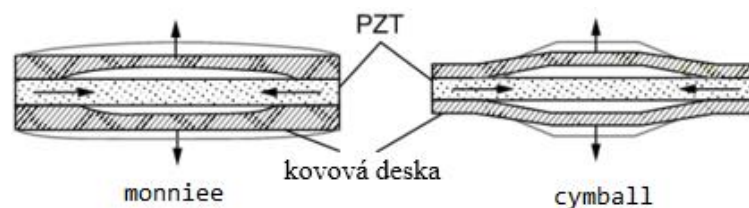
Obr. 17: Indukčností tlakoměr [13]

Piezelektrický snímač tlaku

Tyto typy snímačů využívají takzvaného piezelektrického jevu. Při mechanickém namáhání piezelektrického materiálu se objeví elektrický náboj mezi jeho dvěma protilehlými stranami. Současně obráceně, pokud je na piezelektrický materiál aplikováno elektrické pole, bude tento materiál generovat mechanické napětí podobně jako elektromechanický převodník. [36]

Materiály piezelektrických jader: [11]

1. piezelektrické monokrystaly přírodní nebo syntetické jako je křemen, rochellová sůl, tantalát sodný a podobné krystalické látky s piezelektrickými vlastnostmi.
2. syntetická polykrystalická feroelektrická keramika vycházející dnes primárně z technologie PZT, což je zkratka sloučeniny prvků Pb, Zr a Ti ve formě tuhých roztoků zirkoničitanu olovnatého (PbZrO_3) nebo titaničitanu olovnatého (PbTiO_3).
3. piezelektrické kompozitní sensory typu keramika–kov, přičemž v těchto kompozitech jsou kovové čelní desky nebo skořepina spojeny s aktivní keramikou a současně s okolním médiem a zprostředkovávají tak přenos napětí na keramiku. Typické pro tuto kategorii jsou piezelektrické snímače typu „monnie“ a „cymbal“ (obr. 18).



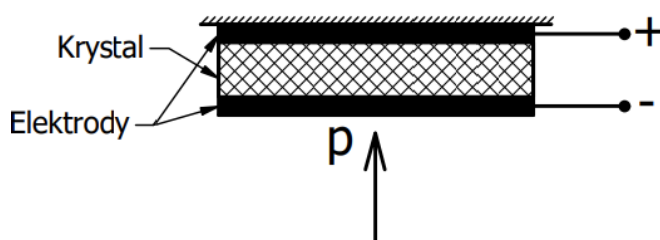
Obr. 18: Piezelektrické kompozitní sensory [11]

4. Kompozity typu keramika–polymer používané v případě požadavku na hydrostatickou citlivost díky měkkému polymeru. Materiál PVDF (polyvinylidenfluorid), vykazující vysoké feroelektrické vlastnosti (tj. jev při kterém je elektrická polarizace materiálu přeorientována vlivem cíleného působení vnějšího elektrického pole, přičemž feroelektrické látky jsou současně pyroelektrické a piezelektrické).

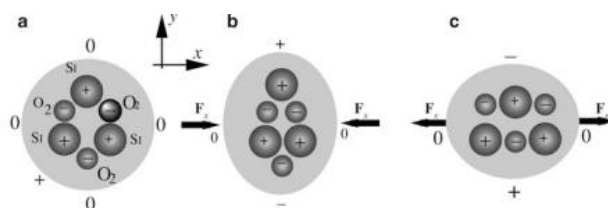
Princip funkce piezelektrického snímače s křemenným jádrem:

Molekula křemenu je tvořena jedním atomem křemíku a dvěma atomy kyslíku. Křemen má krystalovou strukturu a na každou buňku připadají tři atomy křemene a šest atomů kyslíku. Kyslík se slučuje do párů. Každý atom křemíku nese čtyři kladné náboje a každý pár atomů kyslíku nese čtyři záporné náboje. To je důvod, proč je křemík za standardních podmínek elektricky neutrální. Při působení vnější síly se deformuje mřížka a dochází k posouvání atomů tak, že se na straně atomu křemíku vytvoří kladný náboj a záporný náboj se vytvoří na straně kyslíkového páru (obr. 20). Krystal tedy vyvíjí nevyváženost podél osy y, jestliže je krystal natažen podél osy x. Tímto způsobem dojde k vytvoření elektrického náboje vlivem mechanické deformace krystalu. Pro zachycení tohoto náboje jsou na krystal připevněny alespoň dvě vodivé

elektrody na opačných stranách výbrusu (obr. 19), čímž se piezoelektrický senzor stává kondenzátorem (jako dielektrikum mezi deskami slouží krystal). Krystal tedy funguje jako generátor elektrického náboje, jehož výsledkem je napětí na kondenzátoru. Ačkoli náboj vzniká v místě působící síly, kovové elektrody vyrovnávají náboj podél celého povrchu tzn. nemůžeme přesně určit, v jakém místě je krystal stlačován. Pro určení je nutné využít elektrody se složitějším vzorem nebo větší počet obyčejných elektrod. Hodnota měřeného tlaku se určuje z velikosti vytvořeného napětí na kondenzátoru. Piezoelektrický snímač se široce používá pro měření kolísání tlaku v reálném čase. Výhodou tohoto typu snímače je rychlost jeho reakce na změnu tlaku. [2] [4] [13]



Obr. 19: Piezoelektrický snímač [4]

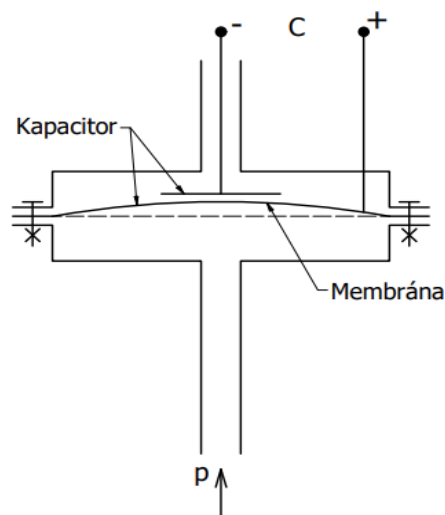


Obr. 20: Princip piezoelektrického jevu [2]

Kapacitní snímač tlaku

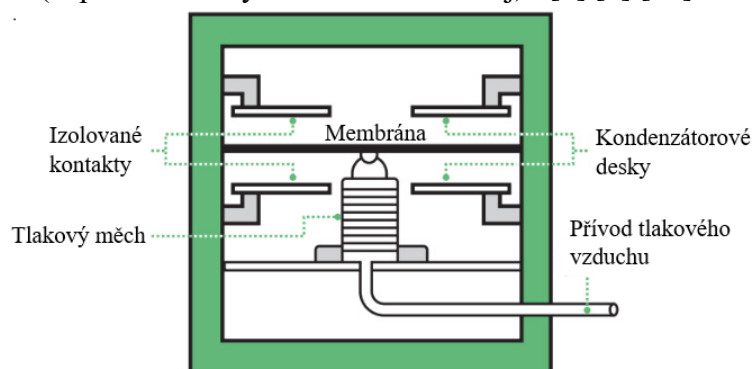
Kapacitní snímače tlaku využívají princip změny kapacity kondenzátoru v závislosti na tlaku. Jedna elektroda kondenzátoru je tvořena membránou deformačního snímače (obr. 21). Vlivem tlaku dochází ke změně polohy této membrány. Změnou vzdálenosti elektrod se mění velikost kapacity kondenzátoru. Ze změn kapacity kondenzátoru vyhodnocujeme velikost tlaku. Obvody bývají na výstupu vybaveny komponenty pro potlačení parazitních kapacitancí, které mohou být způsobeny například charakteristikou kabelu. [4] [1]

Závislost průběhu kapacity na deformaci je nelineární (hyperbolická). Vlivem tohoto průběhu jsou změny kapacity největší při malých vzdálenostech elektrod. Z důvodu tohoto nelineárního průběhu musí být vyhodnocovací obvod snímače vybaven linearizačním členem. [4]



Obr. 21: Kapacitní snímač [4]

Variace tohoto typu snímače je často používána pro měření rozdílu mezi tlaky. Pro tento účel je snímač tvořen dvěma elektrodami, mezi nimiž se vlivem tlaku pohybuje membrána, která je pohyblivou elektrodou dvojitého kondenzátoru (obr. 22). Existuje i varianta, která slouží k měření přetlaku a podtlaku. Tělo moderního kapacitního snímače bývá vyrobeno z keramiky, elektrodami bývají vakuově napařené kovové vrstvy. Prostor dutiny snímače je vyplněn kvalitním dielektrikem (např. silikonový nebo minerální olej). [2] [4] [13]



Obr. 22: Kapacitní snímač k měření podtlaku a přetlaku [14]

Odporový snímač tlaku s tenzometry

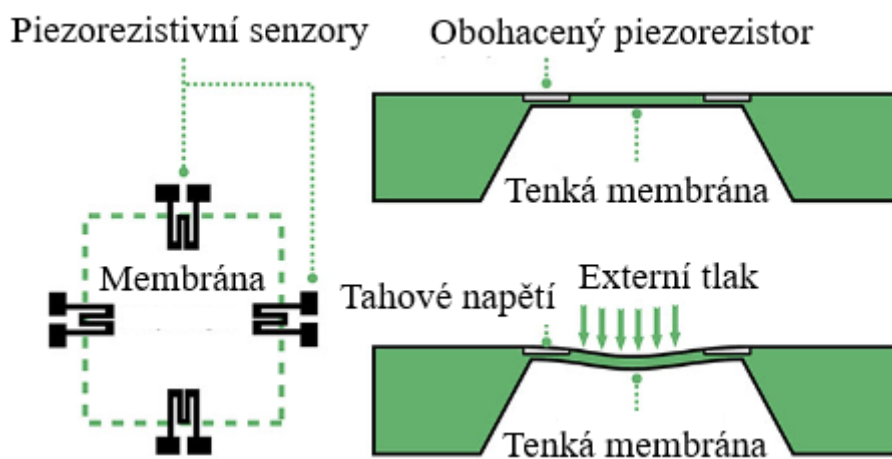
Jedná se o membránový snímač, ve kterém je čidlem vodič (tzv. tenzometr) spojený s membránou, a jehož principem je změna odporu tohoto vodiče v souvislosti s deformací membrány a následně vodiče. Při konstrukci senzoru je nutné kompenzovat teplotní závislost odporu vodiče, aby fluktuace provozní teploty neovlivňovaly výstupní hodnoty snímače. Z těchto důvodů je aktivní tenzometrický prvek (obr. 25) vyráběn kromě polovodičů rovněž ze slitiny konstantanu, jehož parametry nejsou významně citlivé na změnu teploty. [13]

Tenzometry mohou být uspořádány jako Wheatstoneův můstek (obr. 24), což je obvod složený ze čtyř odporů a používá se k měření neznámého elektrického odporu. Odporů jsou zapojeny do dvou větví. Neznámý odpor (odpor tenzometru) se zjišťuje porovnáním poměru odporů v jedné a v druhé větvi. [2] [4]

1. Piezorezistivní odporový snímač tlaku

Tento typ snímače, označovaný také jako polovodičový snímač, je založen na principu funkce odporového snímače. Vodičem je polovodičový materiál (křemík) difúzně obohacený příměsí, která významně zesílí závislost odporu na mechanickém namáhání. Senzor využívá silnou schopnost polovodiče měnit svou vodivost, a to až 60x více než standardní kovové tenzometry. Vodivost se při zatížení v absolutních číslech mění až o 8 řádů. Z důvodu agresivity měřeného média je obvyklé měřený tlak zprostředkovat přes jiné pracovní médium (často je využíván silikonový olej) přes oddělovací mezi-membránu. Obecně jsou takové senzory s oddělovací membránou používané pro měření vyšších a vysokých tlaků. [13] [17]

Tenzometrické pásky se vyrábí například v podobě pásků lepených na deformovanou plochu tj. membránu (obr. 23). [35]



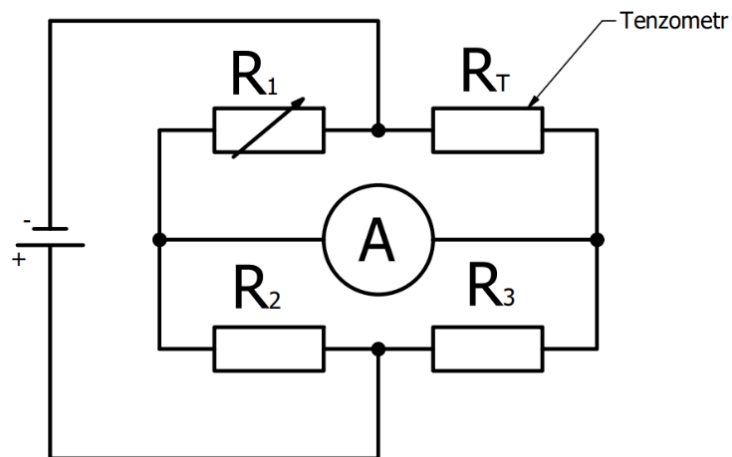
Obr. 23: Piezorezistivní snímač tlaku [14]

2. Tenkovrstvé tenzometry

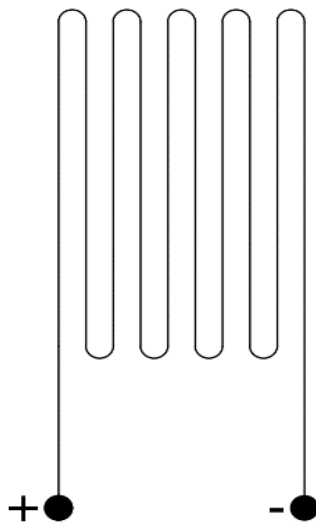
Tenzometr je založený na membránové technologii, v rámci které je na izolační keramickou vrstvu napařena kovová vrstva velmi tenké tloušťky o velikosti cca 0,000 1 mm a tento celek je nanesen na kovový deformační člen, tj. membránu. Tato konfigurace je velmi odolná a vhodná pro měření vysokých tlaků. [13]

3. Tlustovrstvé tenzometry

Tenzometr je založen na membránové technologii, v rámci které je na membránu, vyrobenou často z oxidu hlinitého Al_2O_3 , nanesena tenká vrstva odporového materiálu technologií síto-tisku v tloušťce cca 0,01 mm. Mimo zónu tlakového namáhání jsou na membránu doplněny kompenzační součástky. Problémem těchto snímačů je nízká odolnost proti agresivním měřeným médiím a prosakování měřeného média keramikou deskou. V takovém případě je nutné desku řádně utěsnit nebo chránit jiným pracovním médiem, které měřený tlak přenesou na membránu zprostředkovaně. Takovým médiem může být například silikonový olej působící přes oddělovací membránu. [13]



Obr. 24: Wheatsův můstek [4]



Obr. 25: Tenzometr [4]

2.5.5 Speciální snímače tlaku

Rezonanční snímač tlaku

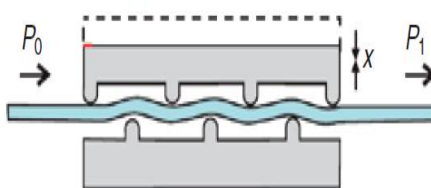
Snímač pracuje na principu závislosti vlastní frekvence mechanického kmitání a mechanického napětí. Snímač obsahuje kmitající komponentu (rezonanční prvek) jako je struna, membrána, u moderních snímačů se používá speciální mikromechanický prvek. Rezonanční prvek je rozkmitán elektromagneticky. Působením měřeného tlaku se mění mechanické napětí na rezonanční prvek, které ovlivňuje rezonanční kmitočet. V praxi je často využívána oddělovací mezi-membrána s pracovním médiem, které zprostředkuje účinek měřeného tlaku na rezonanční prvek. [3] [13]

Optický snímač tlaku

Tento generačně nový typ snímače využívá pro zachycení tlaku fotony. Jeho konstrukce je pro výrobu náročnější než u tradičních snímačů. [13]

1. Vlákenný optický snímač

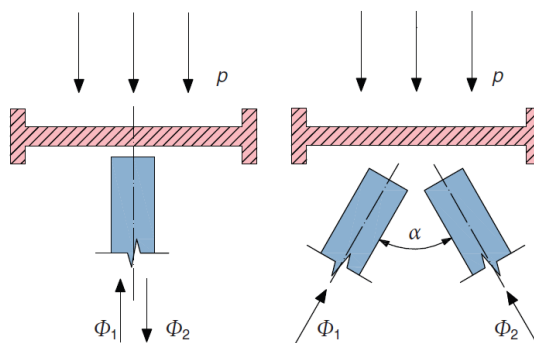
Snímač využívá světelný paprsek, v aktuálních modelech optické multi-vidové vlákno, které prochází mezi speciální horní a dolní čelistí (obr. 26). Snímač využívá mikroohyby optického vlákna, která vznikají z důvodu tlaku čelistí působením měřeného tlaku. Ohyb způsobí konverzi vidů, což má za následek změnu měřeného optického výkonu za snímačem z výkonu P_0 na výkon P_1 . [13]



Obr. 26: Vlákenný optický snímač [13]

2. Reflexní optický snímač

Tlak působí na membránu, která je na straně směrem k optickým vláknům vybavena reflexní vrstvou. (obr. 27) Tlak p ji vychyluje směrem ke konci optického vlákna a toto vychýlení má za následek změnu intenzity výstupního světelného toku z hodnoty světelného toku Φ_1 na Φ_2 . [13]



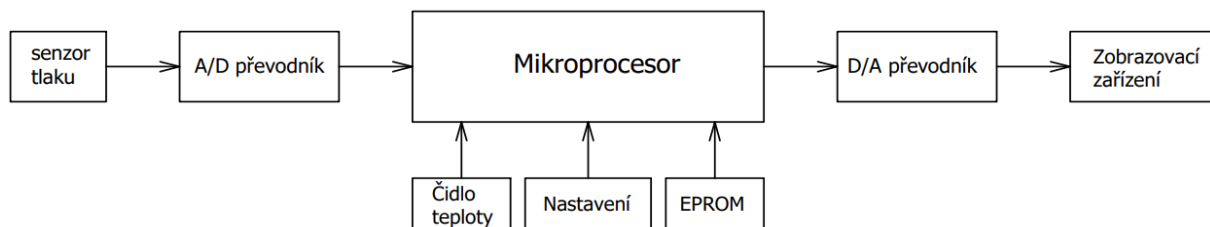
Obr. 27: Reflexní optický snímač [13]

2.5.6 Inteligentní převodníky tlaku

V případě inteligentních převodníků tlaku se jedná o „chytré“ tlakoměry, které jsou schopné měnit režim měření (absolutního tlaku, přetlaku a tlakové diference) a obsahují některé prvky měřicího řetězce. Mezi jejich další vlastnosti patří rovněž možnost korigovat vliv teploty a měnit rozsah měření. [3] [4]

Tyto převodníky používají pro snímání tlaku vždy senzory s elektrickým výstupem. Tento výstupní elektrický signál je následně zpracován mikroprocesorem. Inteligentní snímače jsou rovněž vybaveny číslicovým A/D převodníkem, analogovým D/A převodníkem a semi-permanentní pamětí EPROM (Erasable Programmable Read-Only Memory), v nichž mohou být uloženy korekční a kalibrační tabulky. Výhodou tohoto snímače je možnost korekce vlivů teploty a dalších parametrů, díky čemuž vykazují vysokou přesnost. Inteligentní převodníky je možno připojit k průmyslovým směrnicím. [3] [4]

Principiálně putuje elektrický signál ze senzoru přes analogově-digitální převodník dále do mikroprocesoru. Do mikroprocesoru paralelně vstupuje signál z měřidla teploty pro cílenou teplotní kompenzaci hodnot. V mikroprocesoru tak dochází k teplotní korekci změřeného tlaku. Na mikroprocesoru jsou také nastaveny parametry, jako je nulový bod a rozsah měření. Z procesoru je signál distribuován do číslicově analogového převodníku, kde dochází k převodu signálu zpět na analogový. Tento signál následně putuje přes přenosovou síť do zobrazovacího zařízení (obr. 28). [3] [4]

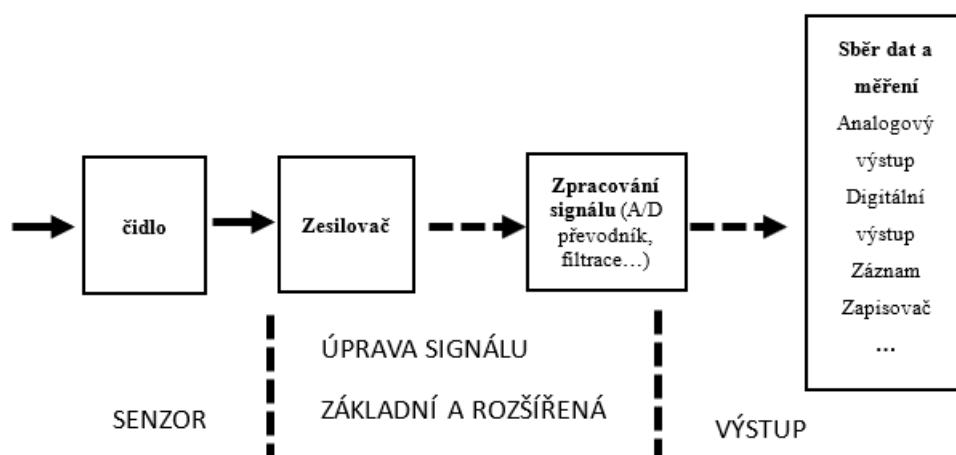


Obr. 28: Inteligentní převodník tlaku [3]

3 ZAČLENĚNÍ MĚŘENÍ TLAKU DO MĚŘICÍHO ŘETĚZCE

Měřicí řetězec v obecné rovině označuje řadu komponent, které se ve vzájemné vazbě používají k měření fyzikální veličiny, jako je teplota, tlak nebo průtok. Měřicí řetězec (obr. 29) se obvykle skládá ze senzoru případně převodníku, elektroniky pro úpravu signálu a zařízení pro sběr dat. [1] [15]

Měřicí řetězec je složen z diskrétních navzájem spojených členů, nebo se jedná o kombinované sub-celky, které plní úlohu několika členů nebo měřicího řetězce jako celku. To je případ inteligentního senzoru („*smart sensor*“), jehož výstupem bývá obvykle již digitalizovaný signál na standardizované sběrnici. [1] [15]



Obr. 29: Měřicí řetězec [1] [15]

3.1 Části měřicího řetězce

Senzor je první součástí měřicího řetězce. Senzor detekuje změny nebo stavy fyzikálních veličin (teplota, tlak nebo intenzita osvětlení) a převádí tyto stavy na elektrický signál. [1] [15]

Elektronika pro úpravu signálu je druhou součástí měřicího řetězce. Slouží ke zpracování elektrického signálu ze senzoru a jeho přípravě pro další zpracování. Úprava signálu ve většině případů zahrnuje zesílení signálu. Rozšířená úprava zahrnuje navíc filtrování signálu, převod analogového signálu na digitální signál pomocí A/D převodníku. Upravený signál je přenášen do zařízení pro sběr a vizualizaci dat. Zařízení pro sběr a vizualizaci dat je poslední součástí měřicího řetězce. Slouží k zachycení, vizualizaci a k záznamu zpracovaného elektrického signálu ze snímače. [1] [15]

Celkově platí, že správné sestavení měřicího řetězce hraje klíčovou roli pro dosažení přesného měření fyzikálních veličin. Správný výběr a správná integrace senzorů, elektroniky pro úpravu signálu, zařízení pro přenos a pro sběr dat jsou zásadní pro zajištění přesných a spolehlivých měření. [1] [15]

Architektura měřicího řetězce je také významně ovlivněna požadavkem na maximální latenci systému a spolehlivost přenosu a definuje následující třídy: [25]

- Bezpečnostní a dozorové řízení vyžaduje propojení s minimální latencí do 10 ms a prakticky nulovou ztrátou paketů z důvodu bezpečnostních důsledků například v případě přetlakových ventilů, senzorů plynů apod.
- Uzavřená regulační smyčka představuje standardní regulaci systému a vyžaduje propojení s latencí do 100 ms.
- Monitorování a kontrola představuje přenosy pro kalibrační účely a opravy a latence do 1 000 ms není pro tuto úroveň považována za kritickou.

3.2 Instalace snímačů tlaku do měřicího řetězce

Po výběru snímače je nutné provést jeho integraci do měřicího řetězce systému a ta je realizována prostřednictvím níže uvedených kroků:

Místo montáže

Je nutné určit vhodné umístění snímače tlaku. Pozice závisí na typu aplikace a typu měřeného tlaku. Je-li požadavkem systému měřit statický tlak, není vhodné umístit snímač do prostoru (například na potrubí), kde budou hodnoty ovlivněny dynamickým tlakem proudícího média. Chceme-li zajistit vysokou spolehlivost výsledků, je vhodné umístit snímač do oblasti laminárního proudění a mimo zónu teplotního namáhání apod.

Armatura

Snímač tlaku musí být připojen k systému pomocí vhodných armatur. Je vybírána správná velikosti a typ armatury pro zajištění bezpečného a zejména nepropustného spojení.

Kabeláž

Snímač tlaku bude připojen kabely, které je třeba nainstalovat a připojit k ostatním prvkům měřicího systému a k napájení. Kabeláž vybíráme dle specifikace snímače, požadavků na stínění, typu sběrnice apod.

Kalibrace snímače tlaku

Před uvedením snímače do provozu je nutné snímač zkalibrovat, aby bylo zajištěno přesné měření. Kalibrace probíhá způsobem, při kterém je porovnávána výstupní hodnota snímače se známým standardem, referenčním tlakem, a to na hodnotách rozsahu snímače, respektive provozních hodnotách tlaku. Součástí kalibrace je rovněž seřízení parametrů snímače pro úpravu signálu.

Test měřicího řetězce

Po kalibraci snímače bude měřicí řetězec otestován, aby bylo zajištěno, že jednotlivé prvky systému fungují správně. Kontrola zahrnuje ověření výstupních signálů za různých provozních podmínek a porovnání signálů s očekávanými hodnotami.

3.3 Výběr snímačů tlaku a jejich výhody

Fungování snímačů, respektive fungování primárních senzorů, je založeno na různých principech a jsou konstruovány za použití různých technologií. Tyto faktory předurčují použití snímačů k určitým aplikacím a je nutné brát výhody, respektive nevýhody konkrétního typu senzoru, při sestavování měřicího řetězce na zřetel.

3.4 Trendy v oblasti snímačů tlaku

Níže uvedený seznam popisuje základní vlastnosti jednotlivých, v praxi používaných typů a demonstruje rozdíly mezi jednotlivými typy: [3] [35]

Kapalinové, hydrostatické tlakoměry

Výhody:

- Jsou přesné, což souvisí mimo jiné s minimem převodníků vyvolávajících vždy nepřesnost.
- Jsou jednoduché, spolehlivé, nezávislé na napájení.

Nevýhody:

- Neposkytují elektrický výstup pro další zpracování a přenos.
- Mají omezený rozsah použití z důvodu prostředí, polohy umístění (viz tíhová síla) a velikosti.
- Vzhledem k viskozitě a setrvačnosti jsou pomalejší.

Pístové tlakoměry

Výhody:

- Poskytují vysokou přesnost měření.
- Mají široký rozsah použití i pro velké tlaky.

Nevýhody:

- Při provozu je nutná manipulace se závažím.
- Cena zařízení je vysoká.
- Má omezené použití, primárně pro kalibraci deformačních tlakoměrů.

Deformační snímače

Výhody:

- Snímače mají velký měřicí rozsah a jsou robustní.
- Umožňují variantní nastavení.
- Jsou jednoduché a spolehlivé.
- Z důvodu mechanického převodníku membrána – stupnice je nezávislý na elektrické energii.

Nevýhody:

- Elastické dopružování membrány způsobuje hysterezi.
- Snímač je náchylný na přetížení, které může způsobit deformaci a zničení membrány a tím i snímače.
- Výsledky, z důvodu působení na materiál membrány, ovlivňuje okolní teplota.
- Kalibrace je nutné provádět častěji.

Kapacitní snímače

Výhody:

- Pro tyto snímače je typická vysoká stabilita a velmi dobrá přesnost v hodnotách cca 0,1 % až 0,25 % plného rozsahu.
- Snímač má malou hysterezi.
- Typickou vlastností je malý drift nuly označující postupnou změnu nebo posun ve výstupu čidla, i když vstupní nebo okolní podmínky zůstávají konstantní.
- Rychlá odezva a nízká teplotní závislost.
- Je vhodný pro porovnání tlaků a k měření vakua.
- Snímač má malou spotřebu energie (prakticky nulový průchod proudu).
- Jednoduchá a kompaktní konstrukce snímače ve srovnání s tenzometrickými snímači.

Nevýhody:

- Citlivost na parazitní kapacity přívodů a elektromagnetické rušení.
- Snímač je citlivý na vibrace.

Tenzometrický odporový snímač

Výhody:

- Snímače jsou velmi přesné v hodnotě cca 0,1 % až 0,5 % plného rozsahu a jsou stabilní.
- Snímače mají velmi rychlou reakci na změnu tlaku a jsou předurčeny k použití v měření dynamických změn.
- Snímače vykazují vysoký stupeň linearity.

- Snímače mají malé rozměry a tato vlastnost umožňuje vysoký stupeň kompaktnosti.
- Snímače s piezorezistivní technologií (polovodičovou technologií) vykazují minimální hysterezi.
- Senzory snímačů je možné v inteligentním provedení snímače efektivně kompenzovat proti vlivu prostředí.

Nevýhody:

- Snímače jsou náchylné na poškození, snímací prvek je obvykle vyroben z tenké kovové fólie nebo drátu, který může být náchylný k poškození přetlakem nebo vnějšími vibracemi. Dále není ve standardním konstrukčním řešení vhodný pro měření tlaku agresivního média a je tak nutné funkční membránu chránit mezimembránou (platí zejména pro piezorezistory).

Piezoelektrický snímač**Výhody:**

- Snímače mají vysokou citlivost a detekují velmi malé změny tlaku.
- Snímače mají velmi rychlou odezvu a jsou vhodné pro měření velmi rychlých dynamických změn.
- Umožňují měřit i vysoké tlaky za vysokých teplot při zachování spolehlivosti.
- Snímače mají malou velikost a nízkou hmotnost.
- Senzor snímače funguje bez externího napájení (generování náboje za podmínky mechanického namáhání).

Nevýhody:

- Snímače jsou citlivé na přetížení.
- Snímače vyžadují použití zesilovače.
- Snímače pracují s vysokým vstupním odporem.
- Vzhledem k principu funkce vytváření náboje při deformaci nejsou příliš vhodné pro měření statických tlaků.
- U senzoru snímače je časem možné zaznamenat stárnutí polarizace způsobující nepřesnost nebo drift snímače.

Rezonanční snímače**Výhody:**

- Snímače vybavené mikroprocesorovým řízením jsou schopni měřit statický tlak i rozdíl tlaků při vysoké přesnosti a stabilitě.
- Snímač generuje na výstupu frekvenční signál, který je stabilní s nízkým stupněm šumu a s jednoduchou možností převodu na digitální signál.
- Snímač má minimální hysterezi.

Nevýhody:

- Snímače mají velkou teplotní závislost, kterou je nutné kompenzovat.

- Snímače jsou vzhledem k principu kmitání náchylné na rušivé vibrace.
- Snímače nejsou dostatečně rychlé, a tak nejsou vhodné na dynamické aplikace.

3.5 Metodika výběru snímače tlaku

Výběr správného senzoru, respektive snímače, a jeho začlenění do měřicího řetězce závisí vždy na konkrétní aplikaci. Výběr tlakového snímače tak podléhá posouzení dle strukturovaných požadavků a souvisejících parametrů:

Tab. 1: Parametry pro výběr snímače tlaku

| Požadavek / parametr | Popis |
|-------------------------------|--|
| Typ veličiny tlaku | <ul style="list-style-type: none"> • bude měřen přetlak, vakuum, rozdílové měření tlaku |
| Rozsah měřených hodnot | <ul style="list-style-type: none"> • určení teoretické minimální a maximální měřené hodnoty |
| Měřené médium | <ul style="list-style-type: none"> • měření kapaliny, plynu, vody, agresivní látky apod. |
| Mechanická kompatibilita | <ul style="list-style-type: none"> • typ šroubení • pozice senzoru, bez expozice vysokých teplot a vnějších vibrací • umístění tlumiče nebo omezovače tlaku |
| Přesnost měření | <ul style="list-style-type: none"> • výběr snímače, který postihuje příslušné přesnosti vyžadované v rámci měření • eliminace vysokých teplotních rozdílů, například výběrem pozice snímače |
| Citlivost | <ul style="list-style-type: none"> • jeden z opomíjených parametrů; jedná se o reakci snímače na malou změnu tlaku |
| Rozlišení | <ul style="list-style-type: none"> • minimální změna hodnoty tlaku |
| Doba odezvy | <ul style="list-style-type: none"> • zachycení změny hodnoty tlaku snímačem; rychlost reakce snímače |
| Prostředí – provozní podmínky | <p>Do posouzení patří zejména oblasti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • požadovaná provozní teplota (pro průmysl běžně $-40\text{ °C} \div +70\text{ °C}$) • Odolnost proti vibracím • Odolnost proti vlhkosti prostředí • Odolnost proti chemikáliím • IP ochrana snímače |
| Prostředí – EMC | <ul style="list-style-type: none"> • posouzení snímače z pohledu EMI (<i>Electromagnetic Interference</i>) and EMS (<i>Electromagnetic Susceptibility</i>) • posouzení prostředí z pohledu stávajícího elektromagnetického rušení a funkčních sítí |

| Požadavek / parametr | Popis |
|----------------------|--|
| Typ přenosu | <ul style="list-style-type: none"> • přenos informace vodičem (určení protokolu, typ kabelu apod.) • bezdrátový přenos (určení protokolu, směrovačů apod.) |
| Spotřeba energie | <ul style="list-style-type: none"> • kalkulovaná maximální spotřeba energie pro účely stanovení zdrojů (napájecí měniče, baterie) |
| Cena | <ul style="list-style-type: none"> • srovnání ceny alternativních produktů |

Vzhledem k širokému rozsahu typů snímačů a jejich kombinací na trhu, kdy prakticky neexistuje pouze jedna správná volba, musí návrhvatel uvážit příslušné parametry snímače a párovat je s hodnotami, které jsou v navrhované aplikaci požadovány.

Jako příklad kolize lze uvést použití snímače typu tenkovrstvého tenzometru v agresivním prostředí, kdy hrozí vsakování měřeného média do keramické membrány mající za následek její degradaci.

Ochrana měřicího řetězce souvisí mimo jiné se správným dimenzováním snímače. Je důležité dimenzovat senzor s membránou tak, aby provozní zatížení bylo podstatně nižší než maximální zatížení membrány senzoru, respektive snímače dle jeho technické specifikace. Stálé zatížení je z tohoto pohledu provozně bezpečné do cca 3/4 provozního rozsahu snímače. Je tedy například nevhodné pro měření tlaku v úrovni cca 13 barů použít snímač s rozsahem do 15 barů.

Pro extrémní aplikace, tj. aplikace s vysokými tlaky, je vhodné volit snímač s dorazem membrány, aby v případě překročení limitu nedošlo k poškození membrány. Pokud takové provedení nelze použít, například v případě menších keramických membrán nebo rozdílových snímačů s vysokým jednostranným tlakovým zatížením, lze využít způsob zprostředkování měřeného tlaku pracovním médiem (silikonový olej). Tento pracovní okruh může být konstruován s bezpečnostní pojistkou, která nedovolí zvyšování tlaku nad stanovenou limitní mez.

Je vždy výhodnější využít již existující řešení snímače než realizovat dodatečné úpravy snímače nebo jeho periferií například jak je tomu v případě teplotní kompenzace.

Hodnoty tlaku, respektive relevantních elektrických hodnot generovaných tlakovým snímačem, je dále nutné často pro zpracování upravovat nebo filtrovat. Příkladem z praxe jsou níže uvedené grafy přeplnění motoru kompresorem u vozidla Mazda MX-5 ND s kompresorem. Grafy zobrazují hodnoty tlaku v sacím potrubí za kompresorem v závislosti na čase při akceleraci s plně otevřenou škrticí klapkou. Obr. 30 demonstruje průběh hodnot tlaku generovaný snímačem v periodě 100 ms. Obr. 31 demonstruje průběh hodnot tlaku již upravených řídicí jednotkou, aby byl eliminována nepřesnost a odstraněny chybové extrémní hodnoty (například průměrováním).



Obr. 30: Výstup hodnot tlaku ze snímače



Obr. 31: Upravené hodnoty tlaku

3.6 Oblíbené moderní snímače tlaku

V automobilovém průmyslu nebo v průmyslových aplikacích podobných prostředí „*automotive*“ se využívají zejména membránové typy snímačů, mezi které, ne výlučně, patří níže uvedené typy. Jedná se o typy, který využívají efektivně kombinaci materiálů, moderní technologie kontaktování materiálu a miniaturizaci provedení: [3]

1. Piezoelektrický polovodičový tenzometr

Odporový senzor využívá přednosti obohaceného polovodiče v oblasti změny vodivosti. [17] Podobně jako u ostatních membránových senzorů jsou i zde využívány varianty s oddělovací membránou pro agresivní prostředí, zejména kapalných médií a hydrauliky nebo bez oddělovací membrány pro plynná média, zejména stlačený vzduch.

2. Tenkovrstvý senzor s nerezovou membránou

Odporový senzor využívá přednosti nerezového materiálu v tenkovrstvé variantě membrány případně kombinované s DMS fólií (*Dilute magnetic semiconductors*).

3. Keramický tlustovrstvý senzor

Odporový senzor je vybavený čelní membránou nebo jsou konstruovány v monolitickém provedení. Sensory využívány často pro agresivní média nebo viskózní kapaliny.

4. Kapacitní keramický senzor

Kapacitní senzor využívající keramiku jako dielektrikum. Tyto senzory jsou trvanlivé, s minimálním driftem nuly a odolnější vůči teplotním změnám.

3.7 Příklad výběru tlakového snímače

Jako konkrétní příklad použití moderních snímačů pro měření tlaku lze uvést měření tlaku v automobilu (vzduch, palivo, brzdový systém apod.), Zde jsou používány s významným stupněm preference právě odporové snímače tlaku proti například piezoelektrickým snímačům.

Odporové snímače tlaku mají vysokou citlivost a poskytují přesné a stabilní výstupní signály v širokém teplotním rozsahu ve srovnání například s piezoelektrickými snímači tlaku. Kromě toho jsou odporové snímače tlaku z dlouhodobého hlediska nákladově efektivnější a spolehlivější, zejména v náročných podmínkách automobilového prostředí, kde jsou snímače vystaveny vibracím, vysokým změnám tlaku, vlhkosti a nízkým nebo vysokým teplotám.

Tab. 2: Typické snímače a jejich zdůvodněné použití

| TYP | KATEGORIE | POUŽITÍ | DŮVOD |
|--------------------------------|------------------------------|---|---|
| Pístový tlakoměr | Tlakoměry se silovým účinkem | - laboratoře - kalibrace | - přesnost - absence převodníků |
| Tlakoměr s bourdonovou trubicí | Deformační tlakoměry | - stavový tlakoměr na potrubí pro monitoring | - nezávislost na elektrické energii |
| Odporový tlakový snímač | Elektrické tlakové snímače | - automotive - sledování namáhání - tlaky v potrubí | - nízká hystereze - vysoká linearita - snáší vibrace - polovodičová membrána |
| Kapacitní tlakový snímač | Elektrické tlakové snímače | - komparace tlaků | - univerzálnost (přetlak i vakuum) |
| Piezoelektrický tlakový snímač | Elektrické tlakové snímače | - automotive - hydraulické systémy | - velmi rychlá odezva |

4 PŘENOS DAT ZE SNÍMAČE

Senzorová technologie zahrnuje senzory s drátovou i bezdrátovou (*wireless*) technologií. Drátové senzory jsou připojeny k centrálnímu monitorovacímu systému prostřednictvím fyzických metalických nebo optických kabelů, zatímco bezdrátové senzory využívají vysokofrekvenční, infračervené nebo jiné bezdrátové komunikační technologie k přenosu dat do centrálního monitorovacího systému nebo do specifických zařízení určených například k automatickému vyhodnocení hodnot apod.

4.1 Analogově digitální převodník

Součástí konstrukce snímače obecně bývá A/D převodník. A/D převodník typicky odebírá výstupní analogový signál ze senzoru a převádí je na binární číslo tedy provádí digitalizaci signálu. Převodník zajišťuje tento převod na digitální signály z důvodu jednoduchého přenosu digitálního signálu po sběrnici, typicky po sériové lince, nebo bezdrátovou technologií. [2]

Základními parametry A/D převodníku je ekvidistantní vzorkování (tj. počet vzorků analogového signálu analyzovaný v čase t) a kvantování tzv. bitová hloubka (tj. přesnost digitalizované hodnoty analyzovaného vzorku) Přesnost A/D převodníku tak určuje počet diskrétních kroků mezi minimální a maximální hodnotou, kterou lze senzorem změřit. [2]

4.2 Proudová a napěťová smyčka

Základním typem propojení senzoru a vyhodnocovacího zařízení v měřicím řetězci je proudová a napěťová smyčka. [18]

Výhodou proudové smyčky je větší odolnost proti rušení, neměnnost hodnoty proudu v celé smyčce a rychlá a jednoznačná detekce přerušení linky. Používá se v rozsahu 0 mA – 20 mA anebo častěji a typičtěji v rozsahu 4 mA – 20 mA. Smyčka je realizovaná s určitou minimální impedancí, běžná hodnota, speciálně s HART protokolem (Highway Addressable Remote Transducer Protocol), je 250 ohmů. [18]

Proudová smyčka je využívána:

- V analogovém režimu, kde jsou hodnoty vyjádřené proudem smyčky v rozsahu 4 mA – 20 mA.
- V digitálním režimu je hodnotě log 0 přiřazena hodnota 4 mA a log 1 hodnota 20 mA.

Významnou pozitivní roli hraje možnost integrace protokolu HART do analogové proudové smyčky, přičemž je tento kodifikovaný protokol v případě moderních snímačů masivně podporován a zvyšuje bezpečnost a spolehlivost přenosu. [18]

Napěťová smyčka využívá konstantní napětí k přenosu signálu ze snímače do řídicího systému. Signál je reprezentován jako hodnota napětí mezi 0 V – 10 V, přičemž 0 V představuje minimální signál a 10 V představuje maximální signál. Napěťové smyčky jsou preferovány pro

aplikace, které vyžadují přenos signálu s vysokým rozlišením, protože napětíový signál lze přesněji měřit, řídit a škálovat. Tento typ přenosu je vhodný pro laboratorní prostředí a prostředí bez nežádoucího vnějšího rušení (tj. neprůmyslové prostředí). [18]

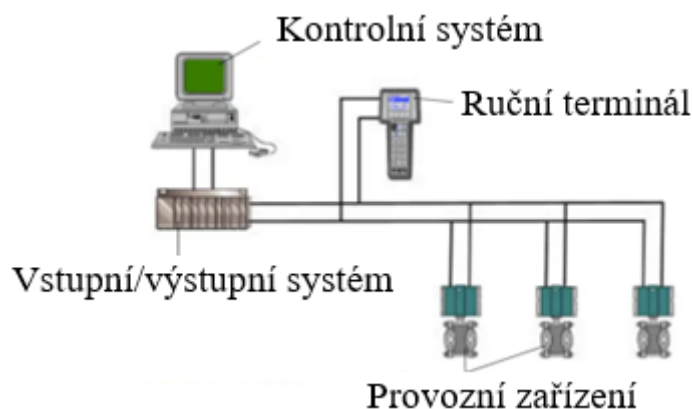
4.3 Technologie přenosu dat vodičem za použití protokolu

Použití systému technologie přenosu dat vodičem společně s A/D převodníkem poskytuje spolehlivý, bezpečný a přesný způsob přenosu dat snímačů přes přenosovou síť. Použití digitalizovaného signálu také umožňuje sofistikovanější způsob zpracování signálu. [48] [49]

Mezi nejběžnější typy používaných sběrnic snímačů patří jednoznačně HART protokol. Mezi další použitelné sběrnice a protokoly řadíme SPI (*Serial Peripheral Interface*), a to zejména RS422 a RS485, I2C (*Inter-Integrated Circuit*) a CAN (*Controller Area Network*). Výběr a použití těchto sběrnic potažmo kabeláže závisí na implementačním prostředí a v úvahu se bere požadovaná rychlost přenosu, vzdálenost přenosu, odolnost proti rušení apod. Použití protokolů sériové sběrnice umožňují připojení více zařízení k jedné sběrnici, což může zjednodušit rozsah kabeláže a snížit tak náklady na instalaci. Mezi základní protokoly řadíme: [48] [49]

- I2C (*Inter-Integrated Circuit*) je dvoudrátový protokol sériové sběrnice pro nižší rychlosti přenosu, který se běžně používá pro připojení senzorů k mikrokontrolerům. Je relativně jednoduchý na používání a podporuje více zařízení na jedné sběrnici. I2C dokáže přenášet data rychlostí až 3,4 Mbps.
- SPI (*Serial Peripheral Interface*) je čtyřdrátový protokol sériové sběrnice, který se běžně používá pro vysokorychlostní komunikaci mezi mikrokontrolery a periferiemi, jako jsou senzory. Podporuje plně duplexní komunikaci, která umožňuje současně odesílat a přijímat data. SPI dokáže přenášet data rychlostí až 50 Mbps.
- UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) je dvoudrátový protokol sériové sběrnice, který se běžně používá pro připojení senzorů k počítači nebo mikrokontroleru. Jedná se o jednoduchý protokol v několika variantách jako je RS422 nebo RS485, který podporuje komunikaci typu bod-bod (*point-to-point*), což znamená, že každé zařízení vyžaduje vlastní sadu vodičů. UART může přenášet data rychlostí až 115,2 kbps.
- CAN (*Controller Area Network*) je protokol sériové sběrnice, který se běžně používá v automobilových a průmyslových aplikacích. Jedná se o dvouvodičovou sběrnici, která podporuje více uzlů, což umožňuje komunikaci mezi různými zařízeními ve stejné síti. CAN je navržen pro provoz v náročných prostředích a může podporovat vysoké přenosové rychlosti.
- HART Protokol HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) je komunikační protokol používaný v průmyslové automatizaci pro přenos digitálních a analogových signálů mezi inteligentními zařízeními systému a řídicími strukturami. Digitální datový komunikační protokol založený na principu modulace FSK Bell 202 je navrstven na tradičním analogovém signálu 4 mA – 20 mA a umožňuje získávat dodatečné informace

z inteligentních periférií sledovaného systému. Logické 1 odpovídá signál o frekvenci 1,2kHz, logické 0 odpovídá signál 2,2 kHz. Pro provoz využívá pár vodičů proudové smyčky (*current loop*), kterými jsou distribuovány ze sensorů do řídicího systému nebo koncentrátoru dat analogové signály, přičemž na datovou linku je možné připojit až 15 sensorů. Komunikace jednotlivých prvků probíhá v periodických smyčkách na základě předávání „oprávnění“, tzv. *tokenu*. Komunikace funguje na principu *master-slave* (žádost-odpověď). Mezi základní funkce protokolu HART patří čtení měřených dat, diagnostika, nastavení snímače, čtení chybových hlášení. Příklad zapojení protokolu HART je zobrazen na obr. 32. [19]



Obr. 32: Příklad HART zapojení [20]

- PROFIBUS (*Process Field Bus*) je komunikační protokol *fieldbus* od společnosti Siemens široce používaný v průmyslových automatizačních systémech. Jedná se o standardizovaný otevřený komunikační systém, který propojuje různá průmyslová zařízení různých výrobců včetně kategorie snímačů. PROFIBUS je sériový komunikační protokol, který může fungovat přes různá fyzická média, včetně RS-485, optická vlákna a Ethernet. Poskytuje vysokorychlostní přenos dat rychlostí až 12 Mbit/s a podporuje komunikační režimy *master-slave* i *peer-to-peer*. [29]

4.4 Typy vodičů

Existuje několik různých typů vodičů a kabelů, které lze použít k odesílání dat ze sensorů. Mezi takové kabely řadíme: [47]

- 1) kabely s kroucenými páry
- 2) koaxiální kabely
- 3) kabely z optických vláken

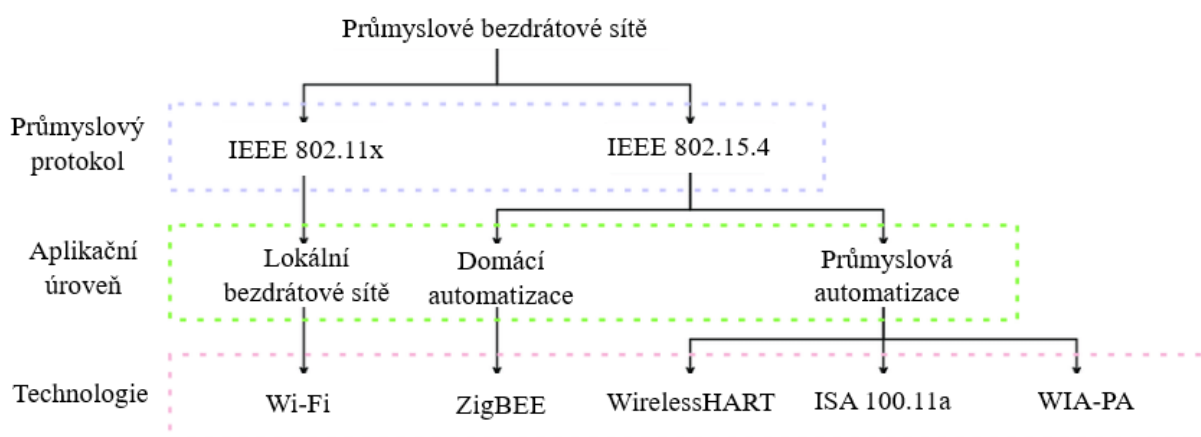
Každý z těchto typů kabelů má jiné vlastnosti, díky kterým je vhodný pro různé typy sensorů, přenosů a aplikací. [47]

- Kabely s kroucenými páry se běžně používají pro nízkorychlostní přenos dat, například pro teplotní senzory, tlakové senzory, protože jsou levné a snadno se s nimi pracuje.

- Koaxiální kabely se na druhé straně používají pro přenos dat vyšší rychlostí, například pro video signály nebo obrázky s vysokým rozlišením, protože poskytují lepší stínění proti rušení.
- Optické kabely jsou oblíbené přenosové médium pro přenos dat ze senzorů na velké vzdálenosti, protože jsou vysoce odolné vůči elektromagnetickému rušení a mohou přenášet data velmi vysokou rychlostí. Jsou cenově dražší (nutná instalace optických převodníků) a vyžadují specializované vybavení pro instalaci a následnou údržbu.

4.5 Bezdrátová technologie přenosu dat ze snímače

Přenos dat do centrálního řídicího systému včetně stavů tlakového senzoru je možný rovněž prostřednictvím bezdrátových sítí a relevantních komunikačních protokolů. Rozdělení těchto bezdrátových sítí a protokolů je znázorněno na obr. 33. Bezdrátová technologie je velmi často integrována jako nedílná součást snímače a umožňuje tak jednoduchou integraci do řídicího nebo monitorovacího systému. Napájení je realizováno z vnějšího zdroje, případně jsou dnešní snímače pro účely napájení vybaveny miniaturní baterií například velikosti CR2023. Bezdrátové snímače tlaku dat mohou využívat různé bezdrátové komunikační protokoly.



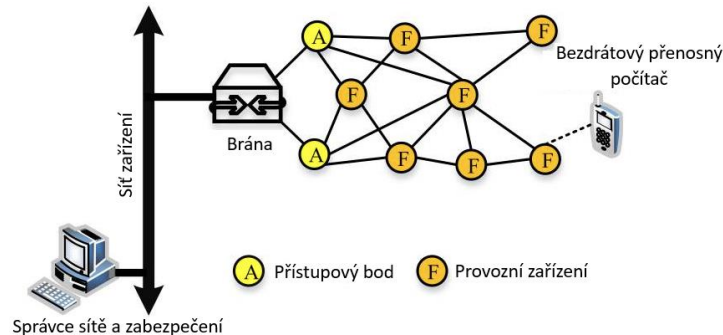
Obr. 33: Klasifikace bezdrátových senzorových sítí [25]

Mezi nejrozšířenější bezdrátové sítě pro přenos dat snímačů patří zejména:

WirelessHART síť – průmyslový standard

- WirelessHART je bezdrátový komunikační protokol navržený pro aplikace průmyslové automatizace a řízení procesů a navazuje na technologii HART.
- Síť pracuje v pásmu 2,4 GHz ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*), uznávané frekvenční pásmo pro průmyslové, vědecké a lékařské aplikace.
- WirelessHART využívá technologii FHSS (*Frequency-Hopping Spread Spectrum*) jako ochranu proti rušení z jiných bezdrátových zařízení pracujících ve stejném frekvenčním pásmu v sítích jako je Bluetooth nebo Wi-Fi. [25]

- WirelessHART síťový řídicí systém (obr. 34) obsahuje:
 - přípojné body (*field device*)
 - bezdrátové ruční zařízení používané pro diagnostiku, konfiguraci, kalibraci
 - bránu (*gateway*) zajišťující připojení aplikací a provozních zařízení
 - správce sítě a zabezpečení zajišťující konfiguraci, bezpečnostní klíče a sledování sítě [40]



Obr. 34: WIRElessHART síťový řídicí systém [25]

WIA-PA síť – průmyslový standard

- WIA-PA (*Wireless Networks for Industrial Automation - Process Automation*) je bezdrátový komunikační protokol navržený, podobně jako WirelessHART, pro použití v aplikacích průmyslové automatizace.
- Pracuje v pásmu obvyklém pro sítě, 2,4 GHz a používá technologii FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*).
- WIA-PA využívá topologii hvězdicové sítě a podporuje integraci snímače, ručního zařízení, směrovače a brány. WIA-PA patří do skupiny *mesh* sítí (přenos informace do centrály i prostřednictvím jiných prvků sítě jako směrovačů).
- WIA-PA podporuje širokou škálu senzorů a akčních členů, včetně teplotních senzorů, tlakových senzorů, průtokových senzorů, hladinových senzorů apod. [27]

ISA 100:11A síť – průmyslový standard

- ISA 100:11A je další bezdrátový protokol pro průmyslové aplikace.
- Standard ISA 100:11A nespécifikuje konkrétní frekvenci provozu. Definuje pouze architekturu protokolu, datové formáty a komunikační mechanismy, které lze použít v různých frekvenčních pásmech, jako je například používané pásmo 2,4 GHz.
- Standard specifikuje protokol obecně a nepostupuje podle OSI (*Open Systems Interconnections*), vychází ze standardu 802.15.4 podobně jako Bluetooth, Wi-Fi a využívá metodu přístupu k médiu TDMA (*Time Division Multiple Access*).
- Verze "11A" označuje revizi protokolu a určuje konkrétní vydání. [30] [31]

Bluetooth protokol

- Komunikace v pásmu 2,4 GHz využívající techniku FHSS pro přepínání přenosových kanálů pro zvýšení spolehlivosti přenosu.
- Umožňuje koexistenci s jinými bezdrátovými zařízeními, nicméně jejich vysoký počet způsobí přetížení přenosového prostředí a sníží výkonnost přenosu.
- Ideální řešení pro propojení na tablet, notebook nebo mobilní telefon.
- K dispozici je aktuálně verze Bluetooth verze 6.x. [41]

Zigbee síť – obecný standard pro průmyslové aplikace

- Zigbee je bezdrátový komunikační protokol v pásmu 2,4 GHz s provozně nízkou spotřebou, nízkou rychlostí přenosu dat a nízkonákladovou alternativou k protokolům, jako jsou Wi-Fi a Bluetooth.
- Je vhodný pro aplikace s velkým množstvím zařízení, což bývá případ průmyslového řízení a inteligentního měření.
- Zigbee funguje na standardu IEEE 802.15.4, který definuje fyzickou a MAC (*Media Access Control*) vrstvu protokolu.
- Podporuje datové rychlosti až 250 kbps na vzdálenost několika stovek metrů.
- Zigbee umožňuje každému zařízení fungovat jako směrovač (*mesh network*) a předávat zprávy dalším zařízením v síti, což umožňuje vytváření rozsáhlých sítí a fungovat i v náročných prostředích.
- Zigbee má integrované bezpečnostní funkce, včetně šifrování a ověřování, které chrání před neoprávněným přístupem do sítě.
- Zigbee je použitelný při vývoji zařízení pro internet věcí IoT (*Internet of Things*), vyžadující bezdrátovou komunikaci s nízkou spotřebou a nízkými náklady [42]

LoRaWAN síť – obecný standard

- LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) je bezdrátový protokol pro přenos dat na velké vzdálenosti s nízkou potřebou energie.
- Určený pro použití v aplikacích IoT (*Internet of Things*) a M2M (*Machine to Machine*). Je založen na modulační technologii LoRa (*Long Range*) vyvinuté společností Semtech.
- LoRaWAN pracuje na nelicencovaných rádiových pásmech, v Evropě se jedná o pásmo 868, respektive také 915 MHz. Vzhledem k nízké hodnotě frekvence oproti frekvencím 2,4 GHz se snadněji šíří přes překážky a poskytuje komunikaci na velké vzdálenosti s nízkou spotřebou energie.
- Využívá modulaci s rozprostřeným spektrem, a tak je odolnější vůči rušení.
- LoRaWAN je navržen pro podporu velkého počtu zařízení s nízkou spotřebou energie a dokáže přenášet data na vzdálenost několika kilometrů i v zahuštěných v městských oblastech a až desítky kilometrů v otevřeném prostoru.
- Protokol využívá síťovou topologii typu *star-of-stars*, kde koncová zařízení komunikují s bránami, které předávají data síťovému serveru. Síťový server poté data zpracuje a předá data aplikačnímu serveru nebo cloudové platformě.
- Je vhodný pro zařízení napájená bateriemi, která potřebují pracovat po dlouhou dobu.
- Má také silné bezpečnostní funkce, včetně šifrování a ověřování, které chrání před neoprávněným přístupem do sítě. [28]

Wi-Fi síť – obecný standard

- Populární standard umožňující velkému množství zařízení respektive uživatelů připojit se prostřednictvím přístupových bodů, tzv. směrovačů, zejména routerů, k internetu nebo k jiným zařízením ve stejné síti.
- Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) je bezdrátová síťová technologie, která umožňuje zařízením připojit se k internetu a dalším zařízením bez potřeby fyzických kabelů. K přenosu dat mezi zařízeními využívá rádiové frekvence v pásmu 2,4 GHz a 5 GHz, a podporuje teoretickou přenosovou rychlost až několik gigabitů za sekundu (standardně 100 Mbs nebo 1 Gbs). Wi-Fi protokol se opírá o rodinu standardů

IEEE 802.11., přičemž se v průběhu let vyvíjel zejména v oblasti rychlosti přenosu nebo frekvenčního pásma s cílem poskytnout vyšší komfort a spolehlivost bezdrátového spojení.

- Wi-Fi umožňuje zařízením vzájemně komunikovat a přistupovat k internetu odkudkoli v dosahu sítě.
- Jeho nespornou výhodou je vysoký stupeň standardizace, rozšíření a související jednoduché nastavení. [49]

Mobilní síť 4G nebo 5G – obecný standard

- Síť je určena zejména pro přenos shromážděných dat.
- Jedná se o síť s minimalizovanou latencí sítě (prodleva mezi akcí a reakcí v síti internetu).
- Síť 4G nabízí přenosovou rychlost až 1 Gbs využívající technologii LTE (*Long Term Evolution*).
- V případě požadavku na přenos v reálném čase je vhodnější 5G síť, která proti síti 4G nabízí ještě vyšší rychlosti až do 20 Gbs, nižší latenci a zvýšenou kapacitu.
- Nevýhodou této formy přenosu dat je závislost přenosu dat na providerovi a stavu sítě, která je globálně sdílená. [49]

4.6 Trendy a využití bezdrátové technologie přenosu

Neexistuje jednoznačné stanovisko, který typ bezdrátového spojení je pro oblast komunikace snímačů ideální. Podmínky jako jsou požadavky na objem dat, rychlost spojení, minimální latenci, na nízkou ztrátu paketů nebo počet stanic rozhodují o dané volbě.

Použití sítě ZigBee bylo směřováno na aplikace „*smart house*“ a různé domácí automatizace. Využití ZigBee v průmyslových sítích a regulaci naráží na omezení z důvodu nižší spolehlivosti přenosu. Proto nejsou vhodné pro aplikace třídy bezpečnostního a dozorového řízení a uzavřené regulační smyčky. Další uvedené technologie, jako je Wi-Fi, Bluetooth a LoRaWAN nabízí spíše specifické výhody. Wi-Fi může nabídnout vysokou přenosovou rychlost, LoRaWAN je alternativou pro aplikace, kde je požadován velký dosah. WirelessHART byl navržen na základě standardu HART s cílem podpory tříd pro dohledové a regulační aplikace s uzavřenou smyčkou. ISA100.11a a WIA-PA nabízí univerzálnost pro pokrytí všech tříd průmyslových procesů.

Výše uvedené protokoly jsou založeny na průmyslovém protokolu IEEE 802.15.4 v úrovni fyzické vrstvy a současně používají stejný počet kanálů v rámci linkové vrstvy MAC (*Medium Access Control*). Je nutné zdůraznit, že systémy třídy bezpečnostního a dozorového řízení vyžadují nízkou latenci do 10 ms a spolehlivý přenos dat, a tyto podmínky jsou běžnými bezdrátovými sítěmi obtížně splnitelné.

WirelessHART vzhledem ke svým technickým vlastnostem a rozšířenosti po celém světě je jednoznačnou volbou mezi bezdrátovými sítěmi v oblasti průmyslové automatizace.[25] Jeho přínos souvisí mimo jiné s jeho možností integrovat do sledovaného systému řídicí funkce. Druhou volbou bezdrátové sítě bývá jednoznačně ISA100:11a.

Významnou pozornost při analýze bezdrátových sítí pro průmyslovou automatizaci je také nutno věnovat použití *real-time* procesům. V praxi probíhají testy WirelessHART protokolů modifikovaných pomocí *super frame-time slotů*. Testy WirelessHART protokolu v porovnání s drátovou variantou HART vykazovaly slibné výsledky. [25]

Výběr nejlepší bezdrátové technologie pro konkrétní průmyslové senzory v konkrétních aplikacích závisí na konkrétních požadavcích, jak je uvedeno v tabulce 2, a pro určení nejlepšího řešení je nutné pečlivé porovnání různých dostupných technologií.

Tab. 3: Použití bezdrátových sítí

| Sít' | Priority | Jednoznačná preference použití |
|---------------------|--|---|
| Zigbee | - nízká spotřeba energie - nižší datová rychlost - podpora <i>mesh</i> topologie | - pro aplikace automatizace budov - domácí automatizace |
| WirelessHART | - nízká spotřeba energie - nižší datová rychlost - technologie FHSS | - pro aplikace třídy bezpečnostní a dozorové řízení - pro aplikace třídy uzavřené regulační smyčky |
| Wi-Fi | - vysoká přenosová rychlost | - přenos dat do datových center |
| LoRaWAN | - aplikace s velkým dosahem | N/A |
| ISA 100:11a | - univerzálnost pro použití ve všech třídách procesů | N/A |
| WIA-PA | - univerzálnost pro použití ve všech třídách procesů | N/A |
| Bluetooth | - pro přenos k chytrým zařízením (laptop, tablet) | N/A |

4.7 Srovnání přenosu dat vodičem a bezdrátové technologie

Srovnání technologie přenosu dat vodičem a bezdrátové technologie spočívá ve vyhodnocení výhod a nevýhod, respektive stanovení silných a slabých stránek příslušného typu přenosu. Závěry porovnání jsou promítnuty do níže uvedených výhod řešení.

Výhody přenosu dat vodičem

1. Spolehlivý přenos signálu

Kabelové připojení nabízí spolehlivý přenos signálu mezi snímačem a systémem sběru dat. Zejména v případě použití stíněné kabeláže nedochází k rušení jinými signály a ztráta signálu je minimální. Právě elektromagnetické rušení přenosu, výpadky paketů a zpoždění přenosu jsou zásadními nedostatky *wireless* technologie. Zahlcení prostoru, kde jsou provozovaná čidla umístěna, jiným signálem jiné bezdrátové sítě

může způsobit interference a následné komunikační výpadky. Nicméně i z těchto důvodů používají bezdrátové přenosové standardy nástroje, jak vzájemné rušení sítí eliminovat jako je například metoda FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*).

2. Stabilita

Kabelová připojení jsou stabilnější než bezdrátová připojení, při výběru správného typu spojení nebývá útlum signálu limitem přenosu. Dále automaticky odpadají problémy s přímým dohledem směrovače nebo překážkami, jak je tomu u *wireless* technologie. U kabelové technologie odpadá rovněž potenciální zdroj poruchy, které vysílač snímače, jako technické zařízení, představuje.

3. Náklady na provoz a údržbu

Pomineme-li cenu senzorů, propojovací kabely jsou dnes velmi drahou položkou v rozpočtových nákladech výstavby systému. Cena kabelů je relativně vysoká a prodražuje stavbu. Nicméně proti bezdrátovým technologiím, kde je nutné ověřovat spojení, zajisti výměnu vnitřních zdrojů apod. jsou následné náklady na provoz a údržbu minimální.

4. Zabezpečení přenosů

Kabelová připojení jsou bezpečnější než připojení bezdrátová, kabelová připojení nelze vzdáleně napadnout jako například v případě hackerského útoku u bezdrátových sítí.

5. Troubleshooting a odstraňování problémů

Diagnostika spojení u sensorové sítě s kabelovým připojením je snazší než s bezdrátovým připojením. Kabelové připojení nabízí přímé a nepřetržité spojení mezi senzorem a systémem sběru dat.

6. Kompatibilita

Kabelová připojení jsou kompatibilní se širokou škálou senzorů a systémů pro sběr dat. Tento typ přenosu je tak velmi univerzální a všestranně použitelný.

Tradiční technologie přenosu dat vodičem vítězí v přenosech na krátkou vzdálenost, v oblastech, kde je možné instalovat kabeláž a je požadováno zabezpečené a spolehlivé řešení nebo v lokalitě s výskytem elektromagnetického rušení potažmo jiných podobných sítích s hrozbou interferencí.

Výhody bezdrátového přenosu

1. Flexibilita

Jednoznačná výhoda bezdrátového připojení je flexibilita. Možnost přesunutí senzoru bez nutnosti jakkoliv zasahovat do řešení jeho připojení k systému je velmi výhodná. Současně tato flexibilita umožňuje, byť omezený, nicméně provozně možný pohyb senzoru. Sensory lze také umístit na místa, která jsou obtížně dostupná pomocí kabelového připojení.

2. Kratší doba instalace a náklady na výstavbu

Bezdrátová připojení eliminují potřebu kabelů a další infrastruktury, což výrazně zkracuje dobu instalace potažmo její náklady, které jsou nižší až o 60 % oproti drátovým variantám. [25] Například senzory založené na Wi-Fi připojené k síťovému routeru nabízejí oproti kabelovým sensorům snadnější instalaci a schopnosti přenášení dat na delší vzdálenosti.

3. Škálovatelnost

Bezdrátové připojení lze snadno škálovat nahoru nebo dolů, upravovat konfiguraci přenosu, aby vyhovovalo měnícím se potřebám, bez potřeby další infrastruktury.

4. Vzdálený přístup

Díky bezdrátovému připojení lze přistupovat k senzoru na dálku, což umožňuje sledovat data a ovládat snímač z jednoho nebo více vzdálených míst.

5. Mobilita

Bezdrátové připojení lze použít v aplikacích, kde je požadována mobilita. Tento režim lze kabelovým připojením zajistit jen velmi omezeně a na předem určené omezené dráze.

Využití bezdrátových senzorů tlaku je výhodné v aplikacích, kde je prioritou mobilita, flexibilita, kde není vhodné prostředí pro instalaci kabeláže anebo kde již existuje spolehlivá bezdrátová síť. Je nutné vždy zvážit bezpečnostní důsledky a zajistit dostatečnou úroveň zabezpečení.

Tab. 4: Porovnání přenosu vodičem a bezdrátového přenosu

| Parametr | Řešení vodičové | Bezdrátové řešení |
|------------------------------|-----------------|-------------------|
| Spolehlivost přenosu | X | |
| Bezpečnost provozu | X | |
| Kapacita přenosu | | X |
| Omezení prostředí | X | |
| Flexibilita přenosu a řešení | | X |
| Náklady na výstavbu | | X |
| Náklady na provoz | X | |

5 KALIBRACE TLAKOVÝCH SNÍMAČŮ

Podle Mezinárodního metrologického slovníku TNI 01 0115 je kalibrace proces, který za určitých podmínek nejprve určuje vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření. Poté se v druhém kroku využívají tyto informace k určení vztahu pro získání výsledku měření z indikace. [42]

Kalibraci provádíme přímým porovnáním údajů z etalonu a kalibrovaného měřidla. Kalibrace a nastavení snímače jsou důležité pro zajištění přesného a spolehlivého měření a pro detekci jakéhokoli posunu nebo změn ve výsledcích snímače v průběhu času. Korektní kalibrace tak mohou pomoci minimalizovat chyby a zajistit, že senzor bude po celou dobu své životnosti poskytovat přesná a spolehlivá data. [1]

Požadavek na kalibrace měřidel nebo ověření stanovených měřidel vychází rovněž z legislativy vázané na určitou oblast měření. Činnosti kalibrace a ověření provádí akreditované zkušebny. Kalibrace realizovaná zástupcem akreditované zkušebny korektními metodami garantuje přesnost a spolehlivost snímače, případně odhalí vadu snímače vedoucí k jeho vyřazení z provozního stavu. Kalibrační laboratoře využívají při zpracování výsledků měření rovněž dostupné vědecké poznatky a ověřené zkušenosti, které společně potvrzují správnost výsledků měření. [1] [37]

5.1 Metrologické dokumenty a zodpovědné organizace

Z pohledu metrologie je nutné rozlišovat mezi kalibrací a ověřením. Zatímco kalibrace souvisí s porovnáním výstupů kalibrovaného snímače s výstupy standardizovaného etalonu, ověření souvisí s posouzením shody metrologických parametrů a metrologických vlastností s úředně stanovenými požadavky, jako jsou maximálně přípustné odchylky, a výstupem ověření je ověřovací list nebo značka. [21] [34]

Důležitým pojmem v oblasti kalibrace je metrologická návaznost, která v rámci systému kalibrací a ověření zajišťuje nepřerušovaný řetězec návaznosti měřeného zařízení v jednotlivých stupních k vyšším a vyšším etalonům včetně uvedení příslušných nejistot. [21]

Z těchto výše uvedených principů se odvíjí i kategorie měřidel včetně tlakových snímačů:

- Stanovená měřidla: podléhají dle vyhlášky číslo 345/2002 Sb. schválení typu nebo ověření ze strany ČMI (Český metrologický institut) nebo akreditovanou organizací. Důvod tohoto stupně kalibrace a ověření se odvíjí primárně z veřejného zájmu, jako je ochrana zdraví, bezpečnost provozu apod. [39]
- Pracovní měřidla: na rozdíl od stanovených měřidel, podléhají pouze kalibraci.

Kalibrační laboratoře jsou v České republice akreditované podle normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2018 Českým institutem pro akreditaci (ČIA). Akreditace mimo jiné zajišťuje i mezinárodní platnost kalibračních certifikátů příslušných výrobků.

Do legislativy metrologie, jehož součástí jsou i kalibrační činnosti, zasahuje na vrcholové úrovni Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), podléhající přímo Ministerstvu průmyslu a obchodu ČR. Jeho náplní je zabezpečení úkolů vyplývajících

ze zákonů České republiky a z oblasti technických norem v rámci evropské unijní legislativy. Dále, prostřednictvím příspěvkové organizace Česká agentura pro standardizaci (ČAS) zřízené ze strany ÚNMZ, je předmětem činnosti tvorba, vydávání a distribuce technických norem.

ČMI, podléhající stejně jako ÚNMZ Ministerstvu průmyslu a obchodu ČR, je v systému metrologie zodpovědný za jednotnost měřidel, přesnost měřidel a měření ve všech oborech vědecké, technické a hospodářské činnosti. Jeho rolí je uchovávání státních etalonů, provoz kalibračních laboratoří nebo registrace subjektů opravujících stanovená měřidla dle § 19 zákona č. 505/1990 Sb. [37]

Řídící legislativou v oblasti metrologie jsou aktuálně:

- Oblast přesnosti měřidel a nejistot měření se legislativa, principy a pravidla odvíjí z důvodu standardizace od vrcholového dokumentu, evropské směrnice „*Guide to Expression of the Uncertainty of Measurement*“ (známou pod zkratkou GUM) vydanou evropskými organizacemi činnými v oblasti standardizací. [26]
- Zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii.
- Vyhláška č. 262/2000 Sb., která zajišťuje jednotnost a správnost měřidel a měření. [34]
- Pro tlakové snímače je dále uplatňováno Opatření obecné povahy ČMI evidované pod číslem 0111-OOP-C057-15 stanovující technické a metrologické požadavky a předpisy pro ověřování stanovených měřidel „měřicí převodníky tlaku“. [38]
- Dále se jedná o metrologický technický předpis ÚNMZ číslo 4654-01 – Měřicí převodníky tlaku; technické a metrologické požadavky, z roku 2002 a dále předpis číslo 4655-01 - Měřicí převodníky tlaku; metody zkoušení při ověřování, z roku 2002. Tyto předpisy definující například povinné údaje umístěné na snímačích tlaku.

Níže uvedené předpisy, distribuované ze strany ČMI, jsou důležité pro stanovení a uplatňování pravidel výpočtu nejistot při procesech kalibrace a ověření v kalibračních laboratořích:

- TPM 0050 – 92 „Etalony - Vyjadřování chyb a nejistot.
- TPM 0051 – 93 Stanovení nejistot při měření (1. a 2. díl).
- EA 4/02 – Vyjadřování nejistot měření při kalibracích.
- EA 4/16 – Směrnice EA (*European co-operation for Accreditation*) vyjadřování nejistoty v kvantitativním zkoušení.
- MP025 – Metrologický předpis - Měřicí převodníky tlaku, postup zkoušení při ověřování. V případě ověřování tlakového snímače ze strany ČMI nebo autorizovaných organizací dle zákona o metrologii je metrologický předpis MP025 závazný stejně jako dokument EA 4/02. [22]

Poznámka: EA (*European co-operation for Accreditation*) je organizace pověřená Evropskou komisí k udržování multilaterálních dohod o vzájemném uznávání a jehož členem je za Českou republiku ČIA.

Požadavky na standardizaci a především harmonizace podmínek v určování nejistot se dále promítají do výstupů sdružení a skupin jako je například EURAMET, jehož členem je ČMI. Takovým výstupem je kalibrační směrnice „*EURAMET Calibration Guide No. 17*“, pojednávající o podmínkách kalibrace, přičemž obsahuje kapitolu věnující se stanovení nejistoty

uplatnitelné na oblast metrologie snímačů. Obecně se jedná o doporučující nepovinná pravidla. [24]

Na základě rozhodnutí EA, jsou kalibrační laboratoře, akreditované členy EA, povinné uvádět rozšířenou nejistotu měření U , kalkulovanou ze standardní nejistoty $u(y)$ odhadu výstupní veličiny y násobenou koeficientem rozšíření k . Například v případě normálního rozdělení pravděpodobnosti měřené veličiny a z důvodu spolehlivého výpočtu standardní nejistoty odhadu výstupní veličiny je tak nezbytné použít standardní koeficient rozšíření $k = 2$ odpovídající pokrytí pravděpodobnosti minimálně v rozsahu 95 %. [23]

5.2 Proces kalibrace

Proces kalibrace zahrnuje aplikaci známého tlaku na senzor a současné měření výstupu senzoru. Tento naměřený výstup je poté porovnán s očekávanou hodnotou, která je kalkulována na základě známého referenčního tlaku. Nepřesnost mezi naměřeným a očekávaným výstupem senzoru je zaznamenána a použita pro výpočet chyby, respektive přesnosti. Kalibrační proces kromě zajištění chyby může také zahrnovat úpravu nastavení senzoru nebo provedení jiných úprav vedoucích ke zlepšení jeho přesnosti. [26]

Kalibrace tlakoměrů

- za standardních podmínek se provádí přímým porovnáním kalibrovaného a etalonového tlakoměru za podmínky zatížení obou tlakoměrů stejným tlakem (například pístovým tlakoměrem). [10]

Kalibrace tlakových převodníků (snímačů)

- při kalibrace tlakového snímače se za standardních podmínek porovnává naměřený výstupní signál kalibrovaného snímače s ideální hodnotou výstupního signálu, který vypočteme z charakteristiky kalibrovaného snímače pro hodnotu tlaku, který udává při měření etalon. [33]

Při kalibraci je nutné postupovat zejména v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013 a metrologickým předpisem MP025.

Četnost kalibrace závisí vždy na několika faktorech jako je legislativa, prostředí a podmínky provozu. Některé senzory mohou vyžadovat kalibraci před každým použitím, zatímco jiné mohou vyžadovat kalibraci pouze periodicky, většinou jednou za dva roky.

Kalibrace je realizována dle níže uvedeného postupu: [22]

1. Kalibrační standard

- Pod pojmem kalibrační standard nebo také etalon je chápáno referenční zařízení nebo přístroj se známou přesností, které se používá k porovnání naměřených hodnot tlaku kalibrovaného snímače.
- Kalibrační standardy pro tlak jsou obvykle certifikovány podle mezinárodních a národních technických standardů. V Evropě jsou používány zejména standardy ISO (*International Standard Organization*) s výstupem v podobě kalibračního certifikátu a ověřovacího listu.
- Použité etalony musí garantovat metrologickou návaznost.

- Nejistota měření etalonu a měřicí aparatury musí při koeficientu $k = 2$ být menší než $1/4$ největší chyby měřeného tlakového převodníku.

2. Připojení

- Kalibrovaný snímač je připojen k referenčnímu standardu způsobem, aby byl tlak šířen rovnoměrně, bez úniků.
- Před kalibrací je nutné použitou technologii teplotně stabilizovat, aby se eliminovala chyba vycházející z teplotních rozdílů.
- Připojení elektrického snímače, převodníku tlaku k měřicímu kalibračnímu řetězci je realizováno přes zátěž o velikosti 250Ω .
- Test je realizován za standardizovaných podmínek například teplotě $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, stejný tlak apod.
- Kalibrační laboratoř musí vzít v potaz referenční hodnoty měřeného snímače například referenční teplota apod.

3. Aplikace

- Tlak je aplikován na kalibrovaný snímač v jednotlivých krocích, přičemž údaje se odečítají při každé úrovni tlaku.
- Kalibrace tlaku se provádí obvykle ve třech po sobě následujících tlakových cyklech, kdy jsou měřeny hodnoty ve stejných, minimálně šesti tlakových bodech při změnách tlaku nahoru a dolů.

4. Záznam hodnot

Jsou zaznamenány naměřené hodnoty jak kalibrovaného snímače, tak referenčního standardu, tj. etalonu nebo ideálního výstupu v případě kalibrace elektrického snímače. Odečty mohou být prováděny ručně nebo automaticky pomocí softwaru nebo jiných zařízení pro sběr dat.

5. Výpočet chyby

- Rozdíl mezi naměřenými hodnotami ze snímače tlaku a referenčního standardu se vypočítá pro každou úroveň tlaku a změnách tlaku nahoru a dolů. Tyto rozdíly se používají k určení kalibrační křivky snímače, která udává vztah naměřené hodnoty tlaku ze snímače a skutečného tlaku.
- Naměřené hodnoty jsou použity pro výpočet nejistoty typu A, typu B, kombinované a rozšířené nejistoty dle příslušných interních směrnic kalibrační laboratoře.

6. Úprava snímače

Pokud je chyba mimo přijatelný rozsah, je nutné snímač upravit. Toto nastavení může zahrnovat například změnu zesílení, změnu nulového offsetu nebo jiných parametrů snímače.

7. Ověření kalibrace

Po provedení úprav je nutné snímač rekalibrovat, a tak ověřit, že naměřené hodnoty jsou již v přijatelném rozsahu.

5.3 Kalibrační standardy

Kalibračních standardů je celá řada a bývají ve velké míře kombinovány (měřidlo pro měření tlaku, teploty a elektrických parametrů...).

5.3.1 Laboratorní kalibrační přístroje

Mezi nejpoužívanější laboratorní kalibrační zařízení řadíme zejména následující typy: [1]

Pístové kalibrátory

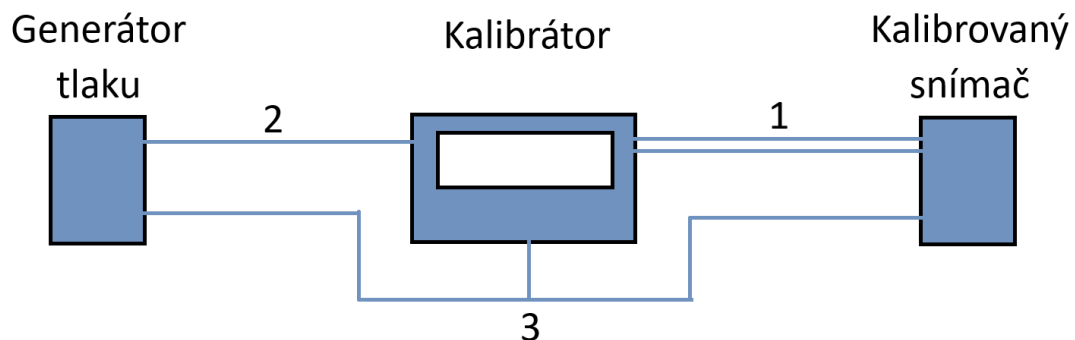
- Pístové kalibrátory (*dead weight testery*) používající kalibrovaného závaží k aplikaci známého tlaku na píst.

Tlakové komparátory

- Tato zařízení používají hodnoty z kalibračního snímače k porovnání výstupu testovaného, tj. kalibrovaného snímače pro účel určení jeho přesnosti.
- Obecně se tlakový komparátor skládá z tlakového zařízení, obvykle z primární pumpy a přesné pumpy (princip píst-válec), tlakové komory, určené pro nastavení referenčního tlaku, rezervoáru na médium (olej), druhé měřící větve s přípojnými body pro snímače a s přepouštěcími ventily.

Elektronické kalibrátory tlaku

- Tato zařízení využívají elektronické obvody ke generování známého tlaku, který se pak používá ke kalibraci tlakového senzoru. Schéma zařízení je na obr. 35.
- Elektronické regulátory tlaku jsou vysoce přesné a lze je automatizovat, takže jsou ideální pro sériové kalibrační práce. Měřicí sestavu tvoří generátor tlaku (automatický generátor nebo ruční pumpa), vlastní kalibrátor (ideálně s displejem) a kalibrovaný tlakový snímač.



- 1 – napájení snímače se zpětnou vazbou procházejícího proudu
 2 – drátové propojení generátoru tlaku s kalibrátorem (UART, USB...)
 3 – tlakové propojení z generátoru do kalibrátoru snímače

Obr. 35: Schéma zapojení elektronického regulátoru a testeru tlaku

5.3.2 Kalibrační přenosné přístroje

Klíčovým faktorem výběru kalibračního přístroje je místo kalibrace, tedy zda kalibrace probíhá v provozním řešení, tj. v terénu, nebo se snímačem vyjmutým z pracovní pozice. Z tohoto úhlu pohledu jsou pro měření v terénu primárně používány:

Manometr s certifikátem

- Manometru je kalibrován před uvedením na trh a má kalibrační certifikát, který určuje a garantuje jeho přesnost. Používá se pro kontrolu a kalibraci tlakových senzorů v terénu.

Digitální tlakoměr s funkcí kalibrace

- Digitální tlakoměr s kalibračním certifikátem vybavený funkcí kalibrace je přenosný elektronický přístroj, který slouží k měření tlaku v různých aplikacích a zároveň umožňuje kalibraci tlakových senzorů. Tyto přístroje jsou obvykle vybaveny digitálním displejem, který zobrazuje aktuální hodnotu tlaku.
- Funkce kalibrace umožňuje uživateli kalibrovat snímač na určitých hodnotách, aby se zajistila přesnost měření. To se děje nastavením referenčního tlaku na základě kalibračního certifikátu nebo kalibrační paměti a porovnáním výsledků měření s referenčním tlakem.
- Před použitím digitálního tlakoměru s funkcí kalibrace je nezbytné zkontrolovat, zda splňuje přesnost, kterou v rámci kalibrace nebo nastavení požadujeme.

6 CHYBY SNÍMAČŮ TLAKU

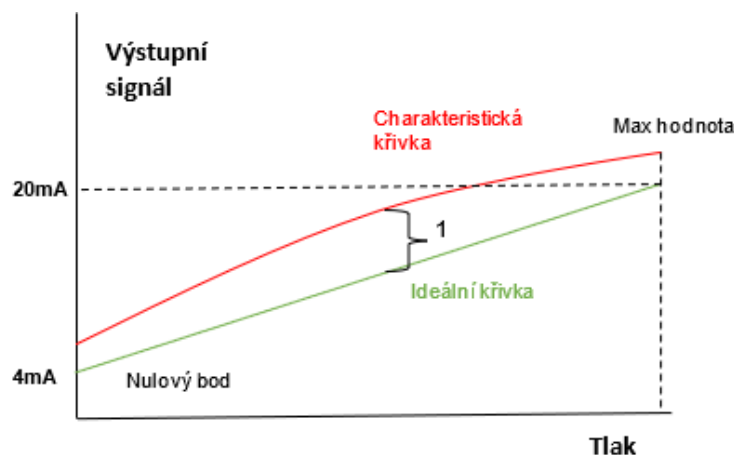
V praxi neexistuje snímač, který by zajistil naprosto přesné opakovatelné měření fyzikální veličiny a v případě korektního snímače se výsledky pohybují v určitém tolerančním pásmu.

V praxi jsou přístroje včetně snímačů řazeny do tříd přesnosti T s hodnotami 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0. Třída přesnosti definuje maximální relativní chybu přístroje v procentech nejvyšší hodnoty měřicího rozsahu a popisuje nedokonalost měřidla. [1] [6]

Při výpočtu a deklaraci přesnosti jsou používány některé metody distribuce výsledku, které odráží lineární i nelineární závislosti přesnosti výstupní informace na referenční hodnotě tlaku. Přesnost snímače totiž není celkově popsatelná pouze jednou proměnnou. Je důležité nezaměňovat pojmy přesnost a nelinearita snímače. [6]

Problematika přesnosti souvisí s ideální odezvou snímače a odezvou skutečnou, respektive vzájemnou pozicí ideální křivky a křivky skutečné odezvy. [6]

Ideální odezva snímače tlaku je vynesena jako přímka od nulového bodu (dolní bod rozsahu) k hornímu bodu rozsahu snímače tlaku. Tato relace je označována jako ideální čára. V reálném prostředí výstupy snímače tlaku neodpovídají průběhu této ideální křivky. Skutečná odezva je vykreslena jako mírně zakřivená čára, označovaná jako charakteristická křivka (obr. 36). [6]



Obr. 36: Přesnost snímače [6]

Mezi standardní zdroje chyb, které generují relevantní nejistoty snímače řadíme: [6]

- chyby nelinearity (*non-linearity error*)
- chyba posunutí nuly (*zero offset error*)
- chyba nastavení rozsahu (*span setting error*)
- chyba hystereze (*hysteresis error*)
- chyba neopakovatelnosti (*non-repeatability error*)
- chyby teplotního koeficientu nulové hodnoty a hodnoty plného rozsahu (*Zero and span temperature coefficient errors*)

Chyby vázané na sestavu snímač – etalon při kalibraci tlakového snímače: [22]

- chyba etalonu
- chyba měření výstupního analogového signálu měřeného zařízení

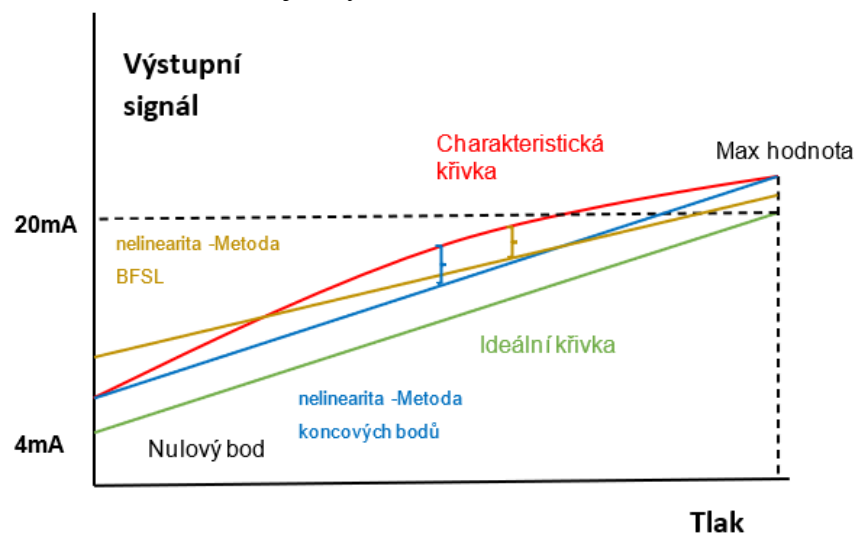
- chyba způsobená rozlišením přístroje měřícího výstupní signál měřeného zařízení
- chyba způsobená odchylkou napájecího napětí od předepsaného
- chyba nekorigované odlehlosti referenčních úrovní etalonu a měřeného snímače
- chyba způsobená rozdílem tlaku působícího na etalon a měřený snímač

Typické provozní chyby snímače:

1) Nelinearita

Nelinearita je největší odchylkou mezi skutečnou odezvou snímače a referenční hodnotou tlaku. Existují dvě běžné metody vyjádření nelinearity:

- **Metoda koncového bodu** (obr. 37) (*endpoint method*) vykresluje přímku od skutečného nulového bodu ke skutečnému koncovému bodu. Vzhledem k tomu, že je tato metoda založena na koncových bodech charakteristické křivky tlaku, je pravdivějším vyjádřením nelinearity snímače tlaku. [6]
- **Metoda přímé čáry** (obr. 37) (*best fit straight line – BFSL*) je přímka, která zůstává v určité procentuální odchylce od charakteristické křivky nebo skutečné odezvy. U této metody nemají koncové body křivky žádný smysluplný vztah ke křivce BFSL. Průběh křivky BFSL vychází z dat zajištěných při kalibraci, kdy je testován snímač na několik známých referenčních hodnotách tlaku. Po změření těchto kalibračních tlakových bodů jsou body aproximovány přímkou při využití metody nejmenších čtverců. Hodnoty metody BFSL jsou obvykle poloviční než hodnoty koncové metody, což znamená, že snímač tlaku s nelinearitou $\pm 0,25\%$ BFSL umožňuje chybu $\pm 0,50\%$. [6]



Obr. 37: Nelinearita [6]

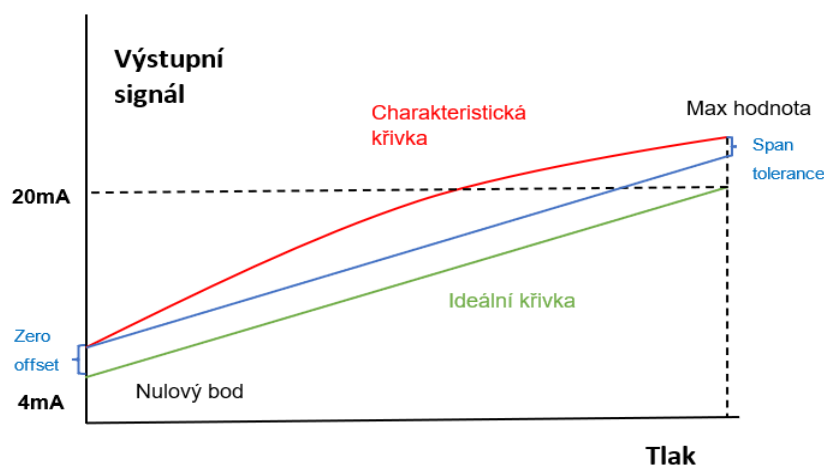
2) Posun nuly a tolerance rozsahu

Posun nuly (*zero offset*) uvedená na obr. 38 je odchylka mezi nulovým bodem ideální čáry a nulovým bodem charakteristické křivky tlaku. [6]

Tolerance rozsahu (*span tolerance*) uvedená na obr. 38 je proti tomu odchylka charakteristické křivky v maximální hodnotě a ideální křivky v maximální hodnotě protažené z nulového bodu charakteristické křivky. Tolerance rozsahu nesouvisí s nulovým offsetem a musí být k offsetu přidána. [6]

Nastavení nuly a rozsahu se používá k recalibraci výstupu senzoru. Obvykle se tato nastavení provádějí pomocí potenciometrů nebo například jazýčkových spínačů s magnetem pro doladění výstupního signálu snímače v bodech měření nuly a plného rozsahu. [6]

Nastavení výstupního signálu snímače u nulové hodnoty a hodnoty plného rozsahu koriguje chyby výstupního signálu způsobené driftem snímače po dlouhé době provozu nebo počtu tlakových cyklů. [6]



Obr. 38: Posun nuly a tolerance rozsahu [6]

3) Hystereze

Hystereze je prodleva mezi změnou tlaku a odpovídající změnou výstupního signálu snímače tlaku. Je to údaj o tom, jak rychle nebo pomalu reaguje snímač tlaku na změny vstupu. Pokud je kalibrace realizovaná metodou zvyšování a snižování tlaku, nejistota vyplývající z chyby hystereze se do výsledku nezahrnuje. [6]

4) Neopakovatelnost

Neopakovatelnost je maximální rozdíl ve výstupním signálu snímače tlaku pro stejný aplikovaný referenční tlak měřený alespoň třikrát za sebou ve stejných podmínkách v relativně krátkém časovém intervalu stejným pozorovatelem. Hodnota vykazuje vlastnost snímače duplikovat totéž měření pro stejný tlak. Hodnota je také označována jako chyba neopakovatelnosti. Podobně jako hystereze, neopakovatelnost se považuje za kumulativní chybu. [6]

5) Teplotní koeficient nulové hodnoty a plného rozsahu

Chyby teplotního koeficientu nulové hodnoty a hodnoty rozsahu jsou běžné, když je senzor provozován mimo jeho referenční teplotu. K vyloučení této chyby, je nutné přezkoumat, zda snímač splňuje podmínky přesnosti v předpokládaných provozních teplotách. [6]

Chyby vázané na sestavu snímač – etalon při kalibraci tlakového snímače:

1) Chyba etalonu tlaku

Chyba je generována z nejistoty etalonu. Etalon, stejně jako každé kalibrované měřidlo je charakterizováno určitou přesností, která zprostředkovane ovlivňuje přesnost měření. [22]

2) Chyba měření výstupu signálu

Chyba a související nejistota je dána typem výstupního signálu a způsobem měření. Pokud je výstupem analogový signál, je chyba dána mezní chybou použitého měřidla. [22] [33]

3) Chyba rozlišitelnosti přístroje měřícího výstupní signál

Tato chyba hraje roli především v případě odečtu u deformačních tlakoměrů nebo tlakoměrů s číslicovým budíkem. V případě elektrických snímačů tlaku, které jsou měřeny například multimetrem je tato chyba již zanesena do přesnosti tohoto přístroje pro měření výstupu. [22] [33]

4) Chyba odchylky napájecího napětí od předepsaného

Chyba je generována z přesnosti napájecího zdroje udávaného výrobcem. V případě stabilizovaných zdrojů je tato chyba velmi malá. Důležitější je tato chyba způsobující nejistotu v případě, kdy kvantitativním výstupem převodníku tlaku je napěťová úroveň. [22] [33]

5) Chyba nekorigované odlehlosti referenčních úrovní etalonu a měřeného snímače

Chyba vychází z nekorigované odlehlosti referenčních úrovní etalonu a měřeného snímače. [22] [33]

6) Chyba rozdílu tlaku působícího na etalon a měřený snímač

Chyba vychází z rozdílu tlaku na sensoru měřeného snímače a etalonu a souvisí s netěsností kalibračního systému, nebo spádem tlaku apod. [22] [33]

7 PŘÍSPĚVKY K NEJISTOTĚ MĚŘENÍ TLAKU

7.1 Rozdělení nejistot

Nejistota měření je statický parametr popisující přesnost snímače. Nejistotou měření nazýváme parametr, který vymezuje interval, ve které se s určitou, dostatečně vysokou pravděpodobností vyskytuje skutečná hodnota měřené veličiny. Nejistota měření je kombinovaný parametr a je součtem, respektive kombinací několika dílčích nejistot.

Nejistota typu A

Jedná se o chyby vniklé při samotném měření. Pro přesnější měření provádíme měření jedné veličiny vícekrát, přičemž se nám jednotlivé změřené hodnoty více či méně odchyľují. Nejistota měření typu A se počítá z rozptylu těchto naměřených hodnot dle vzorce 7.1. [1]

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (7.1)$$

\bar{X} – Průměrná hodnota naměřených hodnot

X_i – Naměřené hodnoty v jednotlivých měřeních

n – Počet měření

Nejistota typu B

Jedná se o chyby způsobené známými i náhodnými příčinami a související s vlastním snímačem. Tyto chyby tedy v žádném případě nesouvisí s počtem měření. Do nejistoty typu B řadíme přesnost měřicích přístrojů případně nejistotu, která je udávána výrobcem a bývá uvedena na měřicím přístroji. Do této kategorie chyb patří dále chyby vzniklé použitou metodou (např. nepřesnost použitých konstant), chyby vzniklé lidskou stránkou (např. nedodržení metodiky měření), vlivy okolního prostředí (vlhkost, teplota) a náhodné vlivy (např. chybné odečítání z měřicího zařízení) a jedná se tak o soubor nejistot, který je konstruován podle odborného úsudku. [1]

Velikost nejistoty typu B se určuje z velikostí nejistot jednotlivých složek chyby typu B dle vzorce 7.2.

$$u_B = \sqrt{\sum u_{Bi}^2} \quad (7.2)$$

u_{Bi} – Nejistoty jednotlivých složek

Standardní kombinovaná nejistota

Standardní kombinovaná nejistota u_c slučuje nejistoty typu A a nejistoty typu B. Tato nejistota se počítá dle vztahu 7.3. Při sestavování nejistoty je nutné zohlednit a vyloučit případný korelovaný vztah jednotlivých chyb, respektive příspěvků nejistot, které musí být navzájem statisticky nezávislé.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (7.3)$$

Rozšířená nejistota

Tato nejistota označovaná jako U je zavedena z důvodu požadavku na vyšší pravděpodobnost výskytu výsledku ve vypočteném intervalu, a to na hodnotu rovnající se nebo převyšující 95 %, protože standardní nejistota pravděpodobnosti vycházející ze směrodatné odchylky normálního rozdělení v úrovni pravděpodobnosti pokrytí 68 % je nedostatečná. Z tohoto důvodu je standardní kombinovaná nejistota násobena koeficientem k .

$$U = k \cdot u_c \quad (7.4)$$

Malý počet měření

Pokud počet měření není dostatečně vysoký, tj. výpočet nejistoty není realizován z 10 a více měření, je nutné stanovit hodnotu k dle Welch-Satterthwaitova vztahu pro odhad počtu efektivních stupňů volnosti V_{eff} . Výpočet se provádí dle vztahu 7.5. [22]

$$V_{\text{eff}} = \frac{u^4 \cdot (\delta)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4 \cdot (\delta)}{v_i}} \quad (7.5)$$

- u kombinovaná nejistota
- u_i příspěvek k nejistotě typu B (nekorelovaný)
- δ odhad výstupní veličiny
- v_i se rovná hodnotě $n - 1$, kde n je počet opakování, a představuje stupně volnosti pro standardní nejistoty měření vyhodnocené způsobem A (nejistota typu A), pro nejistoty měření vyhodnocené způsobem B (nejistota typu B) se předpokládá $v_i \rightarrow \infty$,

V případě kalibrace tlakových snímačů, kdy je měření realizováno ve třech cyklech a příspěvky nejistot typu B se předpokládají zcela nekorelované je vztah pro výpočet V_{eff} upraven do zjednodušené formy (vzorec 7.6).

$$V_{\text{eff}} = 2 \cdot \frac{u^4 \cdot (\delta)}{u_A^4 \cdot (\delta)} \quad (7.6)$$

- 2 hodnota rovnající se počtu měření $n - 1$

Hodnota k je následně odvozena z hodnoty V_{eff} dle tabulky hodnot. Jako příklad lze uvést mezní hodnoty z tabulky pro $V_{\text{eff}} = 1 : k = 13,97$ nebo $V_{\text{eff}} = \text{nekonečno} : k = 2$.

7.2 Předpisy a pravidla pro výpočet nejistoty

Oblast stanovení nejistot v rámci procesu kalibrace je aktuálně podřízena pravidlům definovaným především v dokumentech:

- dokument organizace EA (*European co-operation for Accreditation*) číslo EA - 4/02 M: 2013 – Vyjádření nejistoty měření při kalibraci
- metrologický předpis MP025 – Měřicí převodníky tlaku, postup zkoušení při ověřování z roku 2021

Výpočet nejistoty u tlakových snímačů obsahuje standardní postupy, tedy postupný výpočet nejistoty typu A, typu B, kombinované nejistoty a rozšířené nejistoty. Určovat nejistotu

snímače tlaku formou rozšířené nejistoty je mandatorní podmínkou dle měřicího předpisu MP025.

Jak je v kapitole 7.1 uvedeno, standardní kombinovaná nejistota v případě normálního rozdělení pravděpodobnosti je deklarována s nedostatečnou pravděpodobností pokrytí 68 %. V případě tlakových snímačů i jiných měřidel je tato pravděpodobnost nedostatečná a je nutné ji zvýšit minimálně na 95 %. Proto je u stanovených měřidel tlaku deklarována vždy rozšířená nejistota. Koeficient k vychází vždy z odhadu rozdělení pravděpodobnosti konkrétní chyby generující nejistotu. V praxi se většinou pro 95 % pravděpodobnost normálního rozdělení pravděpodobnosti použije koeficient k v hodnotě 2, pro 97 % pravděpodobnost má koeficient k hodnotu 3. Pro rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti je k rovno hodnotě 1,65 nebo se používá hodnota $\sqrt{3}$, a to odpovídá pokrytí 95 %. [23]

7.3 Přesnost snímače a nejistota

Pro účely výpočtu (dle vzorce 7.7) nejistoty typu B (u_{Bs}) u tlakového snímače vycházíme zpravidla z parametru přesnosti určeného výrobcem snímače.

$$u_{Bs} = \frac{\Delta}{k} \quad (7.7)$$

Symbol Δ představuje polovinu intervalu přesnosti, tj. rozdíl horní meze a dolní meze podělený dvěma (například přesnost $\pm 0,20$ mV prezentuje hodnotu 0,20) a koeficient k vychází z rozdělení pravděpodobností, které zvolenému snímači přísluší. Koeficient k musí výrobce uvádět v kalibračního listu snímače. [1] [23]

7.4 Chyba v tlakovém bodě

Stanovení chyby kalibrovaného zařízení v tlakovém bodě se vypočítá dle vztahu 7.8. [33]

$$\delta_j = I_{klj} - I_{idj} + \delta_{dj} + \delta_{tj} + \delta_{napj} + \delta_{hystj} + \delta_{hj} + \delta_{oddj} \quad (7.8)$$

I_{klj} skutečná hodnota výstupního signál

I_{idj} ideální hodnota signálu

δ_{dj} chyba odečtu

δ_{tj} teplotní chyba

δ_{napj} chyba způsobená napájením

δ_{hystj} chyba hystereze

δ_{hj} nekorigovaná odlehlost referenčních úrovní etalonu tlaku a kalibrovaného snímače

δ_{oddj} rozdíl tlaku působících na etalon a kalibrovaný snímač

Hodnoty I_{klj} a I_{idj} jsou průměrnými hodnotami z naměřených hodnot, ostatní hodnoty nejsou předmětem měření a jsou nulové. Odhadům jsou následně přiřazovány nejistoty.

7.5 Nejistota typu A u tlakového snímače

Jak bylo uvedeno výše, kalibrační cyklus se provádí minimálně v šesti tlakových bodech v režimu zvyšování a snižování tlaku, celkem ve třech tlakových cyklech. Měřená data jsou průměrována zvlášť pro režim zvyšování (zatěžování – z) a režim snižování tlaku (odlehčování – o). Výpočet nejistot typu A pro zatěžovací režim u_{Az} (vzorec 7.9) a odlehčovací režim u_{Ao} (vzorec 7.10) je proveden dle níže uvedených vzorců. [1]

$$u_{Az} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Xz} - Xz_i)^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (7.9)$$

$$u_{Ao} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Xo} - Xo_i)^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (7.10)$$

Nejistota typu A je logicky kalkulována pro každý tlakový bod zvlášť.

7.6 Nejistota typu B u tlakového snímače

Nejistota typu B je dána odbornou analýzou a expertní zkušeností. Je totiž nutné určit relevantní zdroje chyb a tím i jednotlivé příspěvky nejistot. Hodnota této nejistoty se počítá dle vztahu 7.11. [22]

Dále je nutné z dostupných zdrojů (kalibrační list apod.) k přesnostem zajistit i příslušné rozdělení pravděpodobností příspěvků nejistot, respektive jejich koeficienty rozšíření k . [22]

Důležitým parametrem je také citlivostní koeficient A příspěvku nejistoty, jehož hodnota je kalkulována z parciálních derivací funkce kalibrace. [22]

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_B} A_i^2 \cdot \left(\frac{z_i}{k_i}\right)^2} \quad (7.11)$$

A_i^2 - citlivostní koeficient daný parciální derivací funkce kalibrace příspěvku

k_i - koeficient rozdělení pravděpodobnosti příspěvku nejistoty typu B

z_i - kvalifikovaný odhad příspěvku nejistoty typu B

V případě snímače tlaku s elektrickým výstupem, respektive převodníku tlaku kalkulujeme například s níže uvedenými příspěvky nejistoty typu B: [22]

Pro převodníky s analogovým elektrickým výstupem uvažujeme:

- nejistotu etalonu
- nejistotu multimetru
- nejistotu rozlišení odečtu měřeného výstupního signálu
- nejistotu etalonového odporu
- nejistotu daná odlehlostí referenčních úrovní zkoušeného a etalonového snímače tlaku

Chyba měření je dána vztahem 7.12.

$$\Delta = p_I - p_{et} + k_M + k_d + k_R + k_h \quad (7.12)$$

p_I – indikace zkoušeného měřidla

p_{et} – indikace etalonu (případně hodnota ideálního výstupního tlaku)

k_M – korekce stanovení výstupního signálu

k_d – korekce způsobená rozlišením odečtu výstupního signálu

k_R – korekce způsobená nepřímým odečtem výstupního signálu

k_h – korekce způsobená odlehlostí referenčních úrovní etalonu a zkoušeného měřidla

Pro převodníky s digitálním elektrickým výstupem uvažujeme:

- nejistotu etalonu
- nejistotu rozlišení odečtu měřeného výstupního signálu
- nejistotu daná odlehlostí referenčních úrovní zkoušeného a etalonového snímače tlaku

Chyba měření je dána vztahem 7.13.

$$\Delta = p_I - p_{et} + k_d + k_h \quad (7.13)$$

p_I – indikace zkoušeného měřidla

p_{et} – indikace etalonu (případně hodnota ideálního výstupního tlaku)

k_d – korekce způsobená rozlišením odečtu výstupního signálu

k_h – korekce způsobená odlehlostí referenčních úrovní etalonu a zkoušeného měřidla

Výše uvedené nejistoty, které souvisí s určením nejistoty typu B u převodníků tlaku, kalkulujeme dle níže uvedených vztahů a postupů: [25]

• Nejistota etalonu

Platí pro převodníky s analogovým i digitálním výstupem a je daná vztahem 7.14.

$$u_{et} = \frac{U_{et}}{k_{et}} \quad (7.14)$$

U_{et} – rozšířená nejistota měření z kalibračního listu

k_{et} – koeficient rozšíření

V případě, že kalibrační list s uvedenou nejistotou etalonu není k dispozici, lze určit nejistotu u_{et} z největší dovolené chyby v daném tlakovém bodě δ_{et} . Nejistota měření etalonového tlakoměru je potom dána vztahem 7.15.

$$u_{et} = \frac{\delta_{et}}{\sqrt{3}} \quad (7.15)$$

Současně je nutné vypočítat citlivostní koeficient A_{et} , jehož výpočet je odlišný pro snímač tlaku s analogovým elektrickým výstupem (vzorec 7.16) a pro snímač tlaku s digitálním elektrickým výstupem (vzorec 7.17).

$$A_{et} = \frac{\partial \Delta_{pi}}{\partial P_{ei}} = \frac{(I_{max} - I_{min})}{(P_{max} - P_{min})} \quad (7.16)$$

$(I_{max} - I_{min})$ – rozsah výstupní veličiny (v tomto případě proud)

$(P_{max} - P_{min})$ – rozsah měřeného tlaku

$$A_{et} = \frac{\partial \Delta_{pi}}{\partial P_{ei}} = -1 \quad (7.17)$$

- **Nejistota multimetru**

Platí pro převodníky s analogovým výstupem. Při výpočtu nejistoty multimetru se doporučuje použít udávanou maximální dovolenou chybu δ_M vydělenou $\sqrt{3}$ (vzorec 7.19). Tento postup je aplikován, protože u digitálních multimetrů bývá nejistota nízká ve srovnání s jejich dovolenou chybou.

$$u_M = \frac{\delta_M}{\sqrt{3}} \quad (7.19)$$

V úvahu bereme nejistoty z kalibračního listu etalonu, do kterých náleží i dlouhodobá stabilita měřidla, nebo maximální dovolená chyba multimetru.

Citlivostní koeficient A_M je dán vztahem 7.18.

$$A_M = \frac{\partial \Delta}{\partial u} = \frac{1}{R} \quad (7.18)$$

R – hodnota etalonového odporu

- **Nejistota rozlišení odečtu měřeného výstupního signálu**

Platí pro převodníky s analogovým i digitálním výstupem a je daná vztahem 7.20.

$$u_d = \frac{d}{\sqrt{3}} \quad (7.20)$$

kde d je rozlišení odečtu měřeného výstupního signálu. Hodnota d většinou odpovídá poslední platné číslici výstupního signálu. Jestliže se indikace tlakově zatíženého měřidla mění více než poslední platná číslice, použije se jako rozlišení odečtu d tato indikace.

Citlivostní koeficient A_d pro převodníky s analogovým elektrickým výstupem je roven A_M , který se počítá dle vzorce 7.18. Pro převodníky s digitálním elektrickým výstupem se výpočet A_d provádí dle vztahu 7.21.

$$A_d = \frac{\partial \Delta}{\partial u} = 1 \quad (7.21)$$

- **Nejistota měření daná rozdílem referenční úrovně zkoušeného snímače a etalonu:**

Platí pro převodníky s analogovým i digitálním výstupem a je daná vztahem 7.22.

$$u_h = \frac{h \cdot \rho \cdot g}{\sqrt{3}} \quad (7.22)$$

h – rozdíl referenčních úrovní zkoušeného a etalonového tlakoměru

ρ – hustota tlakového média

g – tíhové zrychlení

Citlivostní koeficient A_h pro převodníky s analogovým elektrickým výstupem je roven citlivostnímu koeficientu A_{et} , který se počítá dle vzorce 7.16. Pro převodníky s digitálním elektrickým výstupem se výpočet A_h provádí dle vztahu 7.23.

$$A_h = \frac{\partial \Delta}{\partial u} = 1 \quad (7.23)$$

- **Nejistota etalonového odporu**

Platí pro převodníky s analogovým výstupem. Uplatňuje se pouze při proudovém výstupu měřidla a při nepřímé závislosti měřeného úbytku napětí na etalonovém odporu. Počítá se dle vztahu 7.24.

$$u_R = \frac{U_R}{k} \quad (7.24)$$

U_R – nejistota hodnoty etalonového odporu (uvedená v kalibračním listu)

k – koeficient rozšíření

Citlivostní koeficient A_R se počítá dle vztahu 7.25.

$$A_R = \frac{\partial \Delta}{\partial R} = -\frac{u_i}{R^2} \quad (7.25)$$

u_i – hodnota měřeného úbytku napětí na etalonovém odporu v daném zkušebním bodě

R – hodnota etalonového odporu

Při stanovení koeficientu k je nutné věnovat pozornost stanovení příslušného rozdělení pravděpodobnosti chyby. Pokud nemáme jistotu, že vyšší hustota výskytu hodnot se nachází v blízkosti středu intervalu hodnot, což ukazuje na normální rozdělení pravděpodobnosti, je vhodnější použít například rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.[23]

8 VLASTNÍ ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Obor měření tlaku, v automatizaci nebo dalších průmyslových oblastech, se podobně jako ostatní obory vyvíjí na základě dostupných technologií a dále na základě poptávky trhu a aktuálních trendů. Na základě informací uvedených v této práci považuji níže uvedené body za klíčové a důležité při konstrukci systému měření tlaku nové generace:

- **Přesnost a spolehlivost** – velmi důležité parametry, které jsou alfa a omega zajištění technické úrovně a efektivity řízení a automatizace. Výrobci na základě moderních technologií zvyšují přesnost a spolehlivost tlakových senzorů. Miniaturizované senzory dnes vyráběné pracují s přesností o řád nebo o dva vyšší než senzory dříve vyráběné klasickou tradiční technologií (0,1 % oproti 1 %).
- **Bezdrátová konektivita** – bezdrátové sítě hrají v oblasti snímačů čím dál významnější roli. Logika tkví v požadavcích na rychlé nebo real-time informace, vzdálenou správu z více monitorovacích bodů a s možností měnit vzdáleně parametry snímače. Důležitou roli v tomto trendu hraje (IoT), který stojí na požadavku bezdrátového přenosu.
- **Miniaturizace** – tlakové senzory jsou konstruovány menší a kompaktnější, což umožňuje přesnější měření ve stísněných prostorech. Trend je řízen mimo rostoucí poptávkou po mobilních zařízeních a přenositelných aplikacích. Součástí miniaturizace je rovněž integrace technologie označované jako MEMS („*Micro-Electro-Mechanical Systems*“), která integruje mikro elektronické komponenty na bázi polovodiče, elektrické komponenty a mechanické komponenty v celek o velikosti řádu milimetrů. Jako typický příklad lze uvést piezoelektrický nebo kapacitní MEMS sensor.
- **Pole senzorů** – moderním trendem je integrace tlakových senzorů s jinými typy senzorů (například senzorem teploty). Důvodem je komplexnost přístupu ke sběru dat z důvodu přesnější analýzy a efektivnějšímu řízení.
- **Vyjádření nejistoty** – harmonizační požadavky vyžadují vytvářet srovnatelné výstupy kalibrací, mezi které patří rovněž standardizace vyjádření nejistot tak, aby byly výpočty v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013. Harmonizace je důležitá zejména v oblasti integrace nejistoty typu B a korektní používání koeficientů rozšíření nejistot ve výpočtech nejistoty měření.

Integrace bezdrátových sítí do měřicích řetězců, záměr zvyšovat jejich bezpečnost a spolehlivost pro použití ve třídě bezpečnostních a dozorových řízení je dnes nezpochybnitelným trendem stejně jako standardizace a harmonizace stanovení nejistot při zpracování výsledků kalibračních procesů.

9 ZÁVĚR

Měření tlaku je základní fyzikální veličinou, existuje v přirozeném prostředí a figuruje jako monitorovaná veličina jak v přírodě, tak v celé řadě průmyslových procesů.

Tlak je měřen tlakoměrem nebo tlakovým snímačem, který vždy obsahuje tlakový sensor zprostředkovávající interakci hodnoty měřeného tlaku.

Výběr tlakoměru, respektive snímače je významně poplatný oblasti použití a požadavkům, které jsou na snímač kladeny. Klíčovými parametry je například dostupnost elektrické energie v místě snímače, požadavek na přenos dat nebo požadavek na řízení, druh měřeného média, požadovaný měřicí rozsah, dynamika tlakových změn měřeného média, stav prostředí, kde bude systém provozován apod. Práce deklaruje kritéria, která jsou pro výběr vhodného čidla klíčová. Práce dále vyhodnocuje, že v dnešní době jsou v průmyslových aplikacích preferovány moderní odporové, zejména polovodičové sensory a dále kapacitní senzory. Piezoelektrické senzory jsou jednoznačně preferované u procesů, u kterých je nutné zachytit rychlé dynamické změny tlaku.

Měřicí řetězec musí být sestaven v souladu s požadavky na způsob vyhodnocení signálu. Klíčové je rozhodnutí, zda bude využita tradiční technologie přenosu dat snímače vodičem nebo moderní bezdrátová technologie. Při tomto rozhodnutí je nutné brát do úvahy třídu procesu, tedy zda se jedná o bezpečnostní řízení nebo jen o monitorování stavu tlaku a kontrolu. Práce potvrzuje, že v tradičním provedení přenosu dat ze snímače vodičem je stále v relaci proudová smyčka, ideálně vybavená HART protokolem. V bezdrátových sítích je preferovanou variantou WirelessHART, a to z důvodu vysokého stupně rozšíření na trhu v celé škále wireless snímačů a dále z důvodu parametrů tohoto protokolu, který splňuje požadavky průmyslové automatizace. Důležitou roli dalšího rozvoje bezdrátových sítí v průmyslové automatizaci hraje rozšiřování a dodržování standardizace IEEE 802.15.4. Je nutné zdůraznit, že využívání bezdrátových sítí v porovnání s tradiční architekturou přenosu vodičem průběžně posiluje a tento trend bude pokračovat.

Přesnost snímačů je monitorována případně korigována kalibrací nebo ověřením snímače, v případě stanovených měřidel. Snímače při provozu obvykle generují několik druhů chyb, které práce popisuje, například chyby z důvodu nelinearity snímače, jeho hystereze nebo teplotní závislosti snímače. Proto je při kalibraci a vyhodnocení nutné postupovat dle stanoveným doporučení vycházejících z evropských standardů, zejména vrcholového dokumentu Guide to Expression of the Uncertainty of Measurement (GUM), promítnutých do českých normativů.

Bakalářské práce obsahuje několik na sebe navazujících témat, které jsou propojeny napříč jednotlivými obory. Hlubší analýza jednotlivých cílů ve větším detailu, například použití bezdrátové technologie v bezpečnostních aplikacích, v oblasti super-frame time slotů, detailnější porovnání bezdrátové technologie vycházející z průmyslového standardu IEEE 802.15.4 nebo širší rešerši postupů výpočtu příspěvků nejistot typu B snímače, si vzhledem k jejich rozsahu říká o samostatné studii.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÁK, Martin. *Technická měření: Physics, Designs, and Applications*. 5th ed. 2016. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.
- [2] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. 5th ed. 2016. Imprint: Springer, 2016. ISBN 978-331-9193-038.
- [3] KADLEC, Karel. Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití [online]. 2007-10 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36290.pdf>
- [4] Měření tlaku [online]. [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/f4/f4k42-tlak.htm>
- [5] Mechanika tekutin [online]. [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~bebrl/mechtekutin_linhart.pdf
- [6] LUKAT, Robert. Pressure Transmitter Accuracy and Pressure Transmitter Non-Linearity: Not the Same Thing. *Wika.us* [online]. 2018-11-09 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: https://blog.wika.us/knowhow/pressure-transmitter-accuracy-and-non-linearity/?doing_wp_cron=1680892454.1798388957977294921875
- [7] MARTIN, Sam. How accurate is your accuracy statement?. *Shcroft.eu* [online]. 2015- 07-15 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: https://ashcroft.eu/wp-content/uploads/accuracy_whitepaper.pdf
- [8] *AMETEK Sensors, Test & Calibration (STC)* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.ametekcalibration.com/products/pump-systems/pressure-comparators/p-series-hydraulic-pressure-comparator>
- [9] *Wikipedia* [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_communication
- [10] *Instrumentationtools* [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: https://instrumentationtools.com/dead-weight-tester/?utm_content=cmp-true
- [11] TRESSLER, James F., Sedat ALKOY a Robert E. NEWNHAM. JOURNAL OF ELECTROCERAMICS. *Piezoelectric Sensors and Sensor Materials* [online]. 1998 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1009926623551>
- [12] UEBERSCHLAG, Pierre. PVDF piezoelectric polymer. *Emerald insight* [online]. 2001-06-01 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: doi:10.1108/02602280110388315
- [13] BEJČEK, Ludvík a Jan VACULÍK. Snímače tlaku. *Automa* [online]. 2011 [cit. 2023- 04-10]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/snimace-tlaku-2011_01_42719_4920/
- [14] AVNET ABACUS. *Pressure sensors: The design engineer's guide* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/>

- [15] VDOLEČEK, František. *AUTOMATA. Měřící technika v automatizaci* [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/merici-technika-v-automatizaci-2003_12_29005_309/
- [16] BD SENSORS. *Kalibrace měřidel tlaku* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.bdsensors.cz/kalibrace/akreditovana-kalibracni-laborator>
- [17] VOJÁČEK, Antonín. *Polovodičové tenzometry – princip, provedení, použití, historie* [online]. 2006-11-16 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006111601>
- [18] VOJÁČEK, Antonín. *Proudová smyčka 4-20mA – obecný popis* [online]. 2014-06-04 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/proudova-smycka-4-20-ma-obecny-popis>
- [19] VOJÁČEK, Antonín. *HART – Digitální komunikace po proudové smyčce* [online]. 2007-09-09 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/hart-digitalni-komunikace-po-proudove-smycce>
- [20] *What is HARD Protocol?* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://instrumentationtools.com/what-is-hart-protocol/#>
- [21] ČESKÝ METEOROLOGICKÝ INSTITUT. *Kalibrace* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/faq>
- [22] ČESKÝ METEOROLOGICKÝ INSTITUT. *Metrologický předpis* [online]. 2021-02 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/MP%20025_web%20-%20kopie.pdf
- [23] ČESKÝ INSTITUT PRO AKREDITACI. *Dokument EA* [online]. 2014-04 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: https://www.cai.cz/wp-content/uploads/2019/02/01_08-P001_EA_04_02_M_201404301.pdf
- [24] EURAMET. *Calibration Guidelines* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines>
- [25] DEVAN, P. Arun Mozhi, Fawnizu Azmadi HUSSIN, Rosdiazli IBRAHIM, Kishore BINGI a Faroog Ahmad KHANDAY. PUBMED CENTRAL. *A Survey on the Application of WirelessHART for Industrial Process Monitoring and Control* [online]. 2021-07-21 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8347440/>
- [26] BIPM. *Sborník technické harmonizace* [online]. 2012 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/GUM%20-%20celeky%20-DEF.pdf>
- [27] ZHONG, Tang, Mei ZHAN, Zeng PENG a Wang HONG. IEEE XPLORE. *Industrial wireless communication protocol WIA-PA and its interoperation with Foundation Fieldbus* [online]. 2010 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5541074/citations#citations>
- [28] MADRIN, Davide, Martina CAPUZZO, Andrea ZANNELLA, Lorenzo VANGELISTA a Michele ZORZI. IEEE XPLORE. *Performance Analysis of LoRaWAN in Industrial*

- Scenarios* [online]. 2020-12-15 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z:
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9294099/authors#authors>
- [29] BELAI, Igor a Peter Drahoš. *THE INDUSTRIAL COMMUNICATION SYSTEMS PROFIBUS AND PROFInet* [online]. 2009-01 [cit. 2023-04-21]. Dostupné na:
https://www.researchgate.net/profile/Igor-Belai/publication/229018407_THE_INDUSTRIAL_COMMUNICATION_SYSTEMS_PROFIBUS_AND_PROFINet/links/549169880cf214269f284762/THE-INDUSTRIAL-COMMUNICATION-SYSTEMS-PROFIBUS-AND-PROFINet.pdf
- [30] INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. *ISA Standards by Category* [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/list-of-all-isa-standards>
- [31] FOSTER, Landon D. *IoT Protocols You Need to Know: ISA100.11a* [online]. 2022-01-17 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z:
<https://www.cb nuggets.com/blog/technology/networking/iot-protocols-you-need-to-know-isa100-11a>
- [32] FALTUS, Zdeněk. BD SENSORS S.R.O. *Metody stanovení rozšířené nejistoty měření v praxi kalibrační laboratoře* [online]. 2013 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z:
https://www.bdsensors.cz/fileadmin/user_upload/Kalibrieren/2015_%C4%8CKS_-_Metody_stanoven%C3%AD_roz%C5%A1%C3%AD%C5%99en%C3%A9_nejistoty.pdf
- [33] FALTUS, Zdeněk. BD SENSORS S.R.O. *STANOVENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ PŘI KALIBRACI SNÍMAČE TLAKU V SOULADU S DOKUMENTEM EA - 4/02 M:2013* [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z:
https://www.bdsensors.cz/fileadmin/user_upload/Kalibrieren/2017_%C4%8CKS_-_Nejistoty_m%C4%9B%C5%99en%C3%AD_p%C5%99i_kalibraci_sn%C3%ADma%C4%8De_tlaku.pdf
- [34] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Úplné pracovní znění vyhlášky č. 262/2000 Sb., kterou se zajišťuje jednotnost a správnost měřidel a měření, ve znění vyhlášky č. 344/2002 Sb., vyhlášky č. 229/2010 Sb. a vyhlášky č. 125/2015 Sb.* [online]. 2015 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z:
<https://www.unmz.cz/files/metrologie/%C3%BApln%C3%A1%20pracovn%C3%AD%20zn%C4%9Bn%C3%AD%20p%C5%99edpis%C5%AF/262-2000Sb-2015.pdf>
- [35] FORMÁNEK, Josef. *Poklady k principu měření tlaku (podtlak, přetlak)* [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/ivk-mt-soubory/10-F.pdf>
- [36] ERHART, Jiří. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Základy piezoelektřiny pro aplikace* [online]. 2011-12-02 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z:
http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_06_1112.PDF
- [37] ZÁKONY PRO LIDI. *Zákon č. 505/1990 Sb.* [online]. [cit. 2023-05-01]. Dostupné z:
<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1990-505#p19>

- [38] ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT. *Opatření obecné povahy* [online]. [cit. 2023- 05-01]. Dostupné z: https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/Uredni_deska/OOP/OOP57-15.pdf
- [39] ZÁKONY PRO LIDI. *Vyhláška č. 345/200 Sb.* [online]. [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2002-345>
- [40] VOJÁČEK, Antonín. *Bezdrátová průmyslová komunikace WirelessHART – Úvod* [online]. 2022-11-13 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/bezdratova-prumyslova-komunikace-wirelesshart-uvod.html>
- [41] ČEPIČKA, David. *Základy technologie Bluetooth: původ a rozsah funkcí* [online]. 2009-02-10 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.pcworld.cz/clanky/zaklady-technologie-bluetooth-puvod-a-rozsah-funkci/>
- [42] KRAJÍČEK, Tomáš. *Moderní bezdrátová technologie – Zigbee* [online]. 2009 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17393
- [43] ČMI. *Co je to kalibrace?* [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/9>
- [44] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE*. AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2005. ISBN 80-214-3070-2.
- [45] KEJŘOVÁ, Stanislava a Jan KREJČÍ. *Klíčové experimenty ve fyzice* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/jaro2014/FY2BP_VFE/um/ProInspiraci_KlicoveExperimentyVeFyzice.pdf
- [46] JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02138-6.
- [47] ŠIMÍČEK, Vladimír, Jitka DRÁPALOVÁ a Václav ILČÍK. *Spojovací technika*. Brno: Code Creator, 2015. ISBN 978-80-88058-14-4.
- [48] FARNELL. *Communication Network protocols* [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://fr.farnell.com/communication-network-protocols-trc-ar?ICID=I-CT-TECH-CALC-JUN_22-WF2924710.
- [49] G. VARGHESE, Susan, Ciji PEARL KURIAN a Vadakekkara ITTY GEORGE. *A study of communication protocols and wireless networking systems for lighting control application* [online]. 2016-02-25 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: doi: 10.1109/ICRERA.2015.7418618

SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků

- Obr. 1: základní definice tlaků a vzájemné vztahy [35]
- Obr. 2: U – trubicový tlakoměr [1]
- Obr. 3: Nádobkový tlakoměr se šikmou trubicí [1]
- Obr. 4: Nádobkový tlakoměr se šikmou trubicí [1]
- Obr. 5: Betzův tlakoměr [5]
- Obr. 6: Prstencový tlakoměr [5]
- Obr. 7: Gay-Lussacův barometr [44]
- Obr. 8: Fortinův Barometr [45]
- Obr. 9: Kompresní vakuometr [1]
- Obr. 10: Bourdonova trubice [4]
- Obr. 11: Membránový snímač tlaku [4]
- Obr. 12: Vlnovcový snímač tlaku [1] [4]
- Obr. 13: Krabicový snímač tlaku [4]
- Obr. 14: Pístový tlakoměr [1]
- Obr. 15: Zvonový tlakoměr [1]
- Obr. 16: Potenciometrický snímač tlaku [35]
- Obr. 17: Indukčnostní tlakoměr [13]
- Obr. 18: Piezoelektrické kompozitní sensory [11]
- Obr. 19: Piezoelektrický snímač [4]
- Obr. 20: Princip piezoelektrického jevu [2]
- Obr. 21: Kapacitní snímač [4]
- Obr. 22: Kapacitní snímač k měření podtlaku a přetlaku [14]
- Obr. 23: Piezorezistivní snímač tlaku [14]
- Obr. 24: Wheatsův můstek [4]
- Obr. 25: Tenzometr [4]
- Obr. 26: Vlákenný optický snímač [13]
- Obr. 27: Reflexní optický snímač [13]
- Obr. 28: Inteligentní převodník tlaku [3]
- Obr. 29: Měřicí řetězec [1] [15]
- Obr. 30: Výstup hodnot tlaku ze snímače
- Obr. 31: Upravené hodnoty tlaku
- Obr. 32: Příklad HART zapojení [20]
- Obr. 33: Klasifikace bezdrátových sensorových sítí [25]
- Obr. 34: WIRElessHART síťový řídicí systém [25]
- Obr. 35: Schéma zapojení elektronického regulátoru a testeru tlaku
- Obr. 36: Přesnost snímače [6]
- Obr. 37: Nelinearita [6]

Obr. 38: Posun nuly a tolerance rozsahu [6]

Seznam tabulek

- Tab. 1: Parametry pro výběr snímače tlaku
- Tab. 2: Typické snímače a jejich zdůvodněné použití
- Tab. 3: Použití bezdrátových sítí
- Tab. 4: Porovnání přenosu vodičem a bezdrátového přenosu