



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

KALIBRACE TLAKOMĚRŮ

CALIBRATION OF PRESSURE GAUGES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB SCHWARZ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jakub Schwarz

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

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

Kalibrace tlakoměru

v anglickém jazyce:

Calibration of pressure gauges

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro zaručení potřebné přesnosti měření je třeba veškerou měřicí techniku pravidelně kalibrovat. V praxi je velmi čtenou úlohou měření tlaku. Práce se proto zaměřuje na problematiku kalibrace tlakoměru a jedním z výstupů je také modelové laboratorní pracoviště.

Cíle diplomové práce:

Práce bude zaměřená na rozbor metod a prostředků kalibrace tlakoměru. Vedle teoretických základů se zaměří také na modernější pojetí kalibrace s jistými prvky automatizace zpracování výsledku. Její součástí bude návrh a realizace modelového pracoviště kalibrace manometru včetně rozboru nejistot měření.

Doporučená osnova práce:

1. Měření tlaku
2. Metody a prostředky kalibrace tlakoměrů
3. Návrh a realizace modelového pracoviště
4. Analýza nejistot

Seznam odborné literatury:

CHUDÝ, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických veličín : 1.vydání Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.

PALENCÁR R.; Modely merania pri zabezpečovaní kvality. :1. vydání Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1998. 140 s. ISBN 80-227-1170-5.

ŠINDELÁR, V.; Synác, J : Tlak, jeho měření a jednotky. I. vydání. Praha: Vydavatelství ÚNM,1988. 200.

Související normy

Firemní literatura a internetové zdroje

Vedoucí diplomové práce: Ing. František Vdoleček, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne

L.S.


Ing. Jan Koupecký, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Droupovský, CSc., dr. h. c.
Ředitel

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou měření tlaku, popisuje přístroje k tomu určené - tlakoměry. Základem správného měření tlaku je znalost chování použitého tlakoměru. Tuto znalost získáme pomocí kalibrace a s ní spojenými úkony. Mezi tyto úkony patří analýza chyb nejistot měření a zpracování kalibrační listiny. Kalibrace proběhla na modelovém pracovišti pro měření tlaku.

Abstract

This diploma thesis is dealing with pressure measurement. It describes instruments dedicated to purpose - pressure gauges. Basic of correct pressure measurement is knowledge of behaviour of used pressure gauge. This knowledge is acquired by calibration. With calibration is associated also analysis of errors and uncertainty of measurement and creation of calibration list. Calibration takes place on model workspace pressure measuring in laboratory.

Klíčová slova

Měření tlaku, kalibrace, chyby měření, nejistoty měření.

Keywords

Pressure measurement, calibration, errors of measurement, uncertainty of measurement

Prohlášení o originalitě

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Kalibrace tlakoměru vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladu, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně 28.5.2014

.....
Bc. Jakub Schwarz

Bibliografická citace

SCHWARZ, J. *Kalibrace tlakoměrů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Vdoleček, CSc..

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Vdolečkovi, Csc. za mnoho moudrých rad při tvorbě této práce. I přes shon posledních týdnů si našel čas ke konzultaci. Další poděkování jde firmě D-Ex instruments a hlavně Ing. Petru Moravcovi za pomoc při seznamování se s funkcemi tlakoměru XP2i.

Obsah:

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	2
Abstrakt.....	3
1 Úvod	9
2 Měření tlaku.....	10
2.1 Tlak definice a jednotky	11
2.2 Tlakoměry a měření tlaku	12
2.2.1 Kapalinové tlakoměry.....	14
2.2.2 Deformační tlakoměry.....	16
2.2.3 Tlakoměry s elektrickým výstupem	20
3 Metody a prostředky kalibrace tlakoměrů	24
3.1 Kalibrační souslednost	25
3.2 Kalibrační postupy	27
4 Chyby a nejistoty měření	28
4.1 Chyby měření.....	28
4.1.1 Náhodné chyby	29
4.1.2 Systematické chyby	29
4.2 Nejistoty měření.....	31
4.2.1 Zákon šíření nejistot	32
4.2.2 Standardní nejistota typu A	33
4.2.3 Standardní nejistota typu B	34
4.2.4 Standardní kombinovaná nejistota	38
4.2.5 Rozšířená nejistota měření	38
5 Modelové pracoviště pro měření tlaku	40
5.1 Použité přístroje	41
5.1.1 Digitální referenční tlakoměr XP2i	41
5.1.2 Analogový referenční tlakoměr Omega	43
5.1.4 Ruční zdroj tlaku Beamex	44
5.2 Modelová kalibrace.....	44
5.2.1 Kalibrační postup.....	45
5.2.2 Tlakoměr Omega	46
5.2.3 Tlakoměr XP2i	46
5.2.4 Vyhodnocení nejistot a kalibrační listina	48
5.3 Možnosti modelového pracoviště pro měření tlak.....	51
5.3.1 Komunikace s PC	51
5.3.2 Návrh úloh ke cvičení.....	53
6 Závěr.....	54
Seznam použité literatury	55
Seznam příloh	56

1 Úvod

U všech kreativních lidských činností je důležité znát informace o řešeném problému. V technické praxi se takové informace mimo jiné získávají měřením. K nejčastěji měřeným veličinám patří tlak. Informace o tlaku potažmo stavu rozličných médií používaných ve výrobních procesech jsou velmi důležité, neboť chyby v měřeních tlaku mohou vést k nebezpečným situacím, ohrožení zdraví a majetku.

Tato práce pojednává o problematice měření tlaku a kalibraci přístrojů k tomu používaných. V kapitole 2 jsou popsány nejčastější fyzikální principy, jež jsou využívány při měření tlaku a k nim vztahující se používané měřicí přístroje.

S problematikou měření a měřících přístrojů jde ruku v ruce i otázka přesnosti získaných výsledků. Mezi způsoby jak zajistit spolehlivé výsledky v dlouhodobém měřítku patří kalibrace. Kapitola 3 zmiňuje metodologii kalibrace tlakoměru a některé používané postupy.

Úspěšná kalibrace je spjata s vyhodnocením metrologických vlastností kalibrovaného objektu a to zejména vyjádření chyb měření a vyjádření nejistot měření. Kapitola 4 se zabývá touto problematikou. Popisuje vznik chyb měření a možnosti jejich korekcí. Nejistoty měření jsou nedílnou součástí výsledku měření, je proto důležité vědět jak s nimi pracovat.

Praktická část se zaměřuje na plnění úkolů na modelovém pracovišti pro měření tlaku, které vzniklo za podpory D-Ex instruments. Hlavním cílem je provést kalibraci analogového tlakoměru Omega, jako etalon poslouží digitální tlakoměr XP2i. Výstupem práce je kalibrační list, který obsahuje zpracování naměřených hodnot, vyjádření chyb měření, vyjádření nejistot pocházejících z různých zdrojů pro oba přístroje, vyhodnocení celkové nejistoty měření, grafické znázornění výsledů a kalibrační křivky.

Výsledky a metody použité v této práci mohou posloužit jako vzor pro studenty při prací na modelovém stanovišti pro měření tlaku.

2 Měření tlaku

Tlak je jednou ze základních fyzikálních veličin používaných v technické praxi. Určuje vlastnosti většiny kapalných nebo plynných látek, jejich energetický obsah a další.

Existuje několik způsobů jak porovnávat a vyhodnocovat měřený tlak. Nejčastěji se měřený tlak vztahuje k absolutnímu nulovému tlaku nebo k barometrickému tlaku.

Absolutní nulový tlak (absolutní vakuum) je teoretický nulový tlak v prostoru dokonale zbaveném jakýchkoli hmotných částic [1].

Absolutní tlak je naměřený tlak vztažený k absolutní tlakové nule [1].

Rozdílový tlak (tlaková diference) je rozdíl dvou tlaků, přičemž ani jeden z nich se neshoduje s barometrickým tlakem [1].

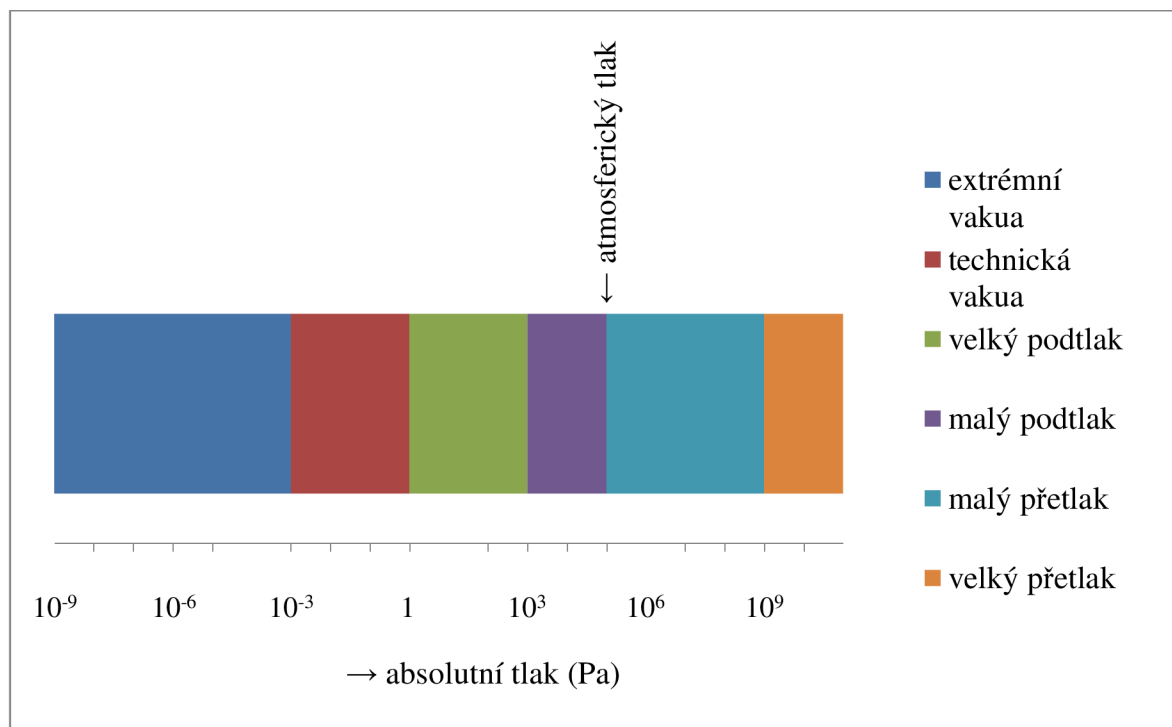
Přetlak se definuje jako

$$p_e = p - p_0 \quad (2.1)$$

kde

p je naměřený absolutní tlak,
 p_0 je barometrický tlak [1].

Přetlak může být kladný nebo záporný, podle toho je-li naměřený absolutní tlak p větší než barometrický tlak p_0 . Záporný přetlak se nazývá podtlak. Přístroj na měření přetlaku i podtlaku se nazývá manometr a funguje na principu rozdílového měření tlaku, kdy je na jeden vstup přiveden měřený tlak a druhý vstup je volně propojen do okolní atmosféry.



Obr. 2.1 Rozdělení tlaků v technické praxi[1]

2.1 Tlak definice a jednotky

V běžné technické praxi se tlak definuje jako podíl elementární síly dF , která působí ve směru normály na element plochy s plošným obsahem dS [1].

$$p = \frac{dF}{dS} \quad (2.2)$$

Tato definice vyhovuje pro tlak plynů a kapalin. Pevné tělesa nemají styčnou plochu ideálně hladkou, proto takto určený tlak pro ně představuje jakousi průměrnou hodnotu. Tato hodnota se nazývá specifický tlak [1].

Jednotkou tlaku je jeden pascal Pa . Podle definice tlak $1 Pa$ vyvolá síla $1 N$, rovnoměrně rozložená na ploše s obsahem $1 m^2$. Platí

$$1 Pa = 1 N \cdot m^{-2}$$

V praxi často pracujeme s násobky této jednotky – kPa a MPa.

Všeobecně může působit v kapalinách tlak statický a dynamický.

V tekutině, která je v klidu, působí pouze hydrostatický tlak p_s . Je stejný ve všech směrech a jeho velikost je úměrná výšce vodního sloupce tekutiny

$$p_s = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.3)$$

kde

p_s je hydrostatický tlak,
 ρ je hustota tekutiny,
 g je místní tíhové zrychlení,
 h je výška vodního sloupce tekutiny [1].

V proudících kapalinách je třeba uvažovat kromě hydrostatického tlaku i o tlaku kinetickém p_k a dynamickém p_d .

Kinetický tlak je funkcí rychlosti proudění a představuje tlakový účinek proudící tekutiny s danou hustotou

$$p_k = \frac{w^2 \cdot \rho}{2} \quad (2.4)$$

kde

p_k je kinetický tlak,
 w je rychlost proudění tekutiny,
 ρ je hustota proudící tekutiny [1].

V stlačitelných tekutinách se v důsledku jejich stlačitelnosti s mění kinetický tlak p_k na dynamický tlak p_d .

$$p_d = p_k \cdot s \quad (2.5)$$

V nestlačitelných kapalinách je stlačitelnost $s = 1$ a dynamický tlak se shoduje s kinetickým.

$$p_d = p_k \quad (2.6)$$

Celkový tlak proudícího média p_c , který působí v daném bodě a směru, získáme součtem statického a dynamického tlaku [1].

$$p_c = p_k + p_d \quad (2.7)$$

Tlak je rovněž významnou stavovou veličinou. Na základě stavové rovnice se pomocí něho definuje stav plynů a par kapalin

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.8)$$

kde

- p je tlak,
- V je objem,
- n je látkové množství v molech,
- R je univerzální tlaková konstanta $R = (8,31441 \pm 0,0012) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- T je termodynamická teplota [1].

V reálné praxi se však pracuje s reálnými plyny. K modifikaci chování ideálního plynu na reálné podmínky se používá kompresní faktor Z. Jde o poměr molárním objemem V_m reálného plynu a molárním objemem V_{mid} ideálního plynu [8].

$$Z = \frac{V_m}{V_{mid}} = \frac{pV_m}{RT}$$

Podobně jako v případě jiných veličin se pro vyjádření tlaku ve světě používají různé jednotky. Některé převody mezi nimi jsou znázorněny v tabulce 2.1 [1].

Tab. 2.1 Převody jiných jednotek na pascaly

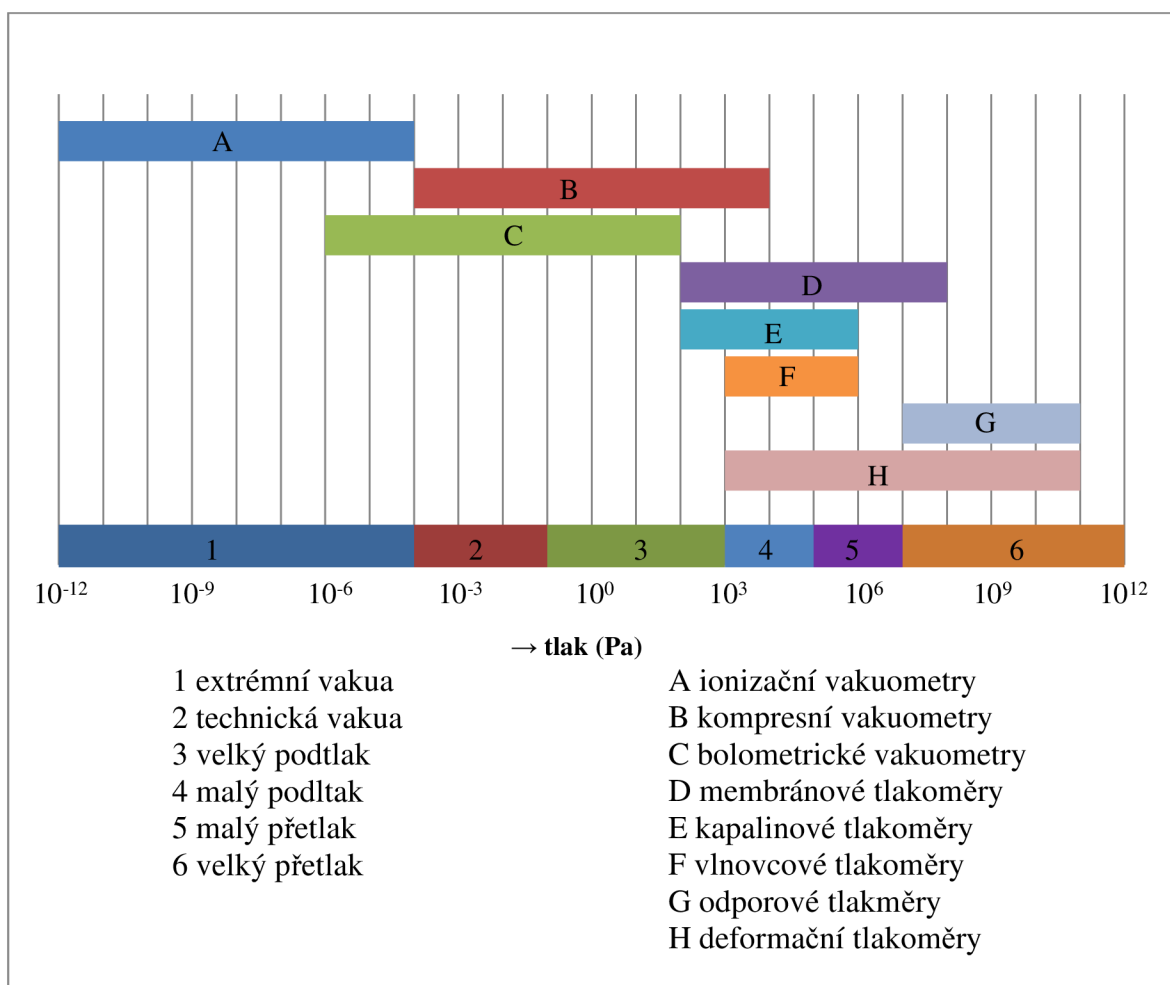
Jednotka	Pascal
Atmosféra	$1,013 \cdot 10^5$
Bar	$1,000 \cdot 10^5$
Dyne/cm ²	$1,000 \cdot 10^{-1}$
Palce vodního sloupce (4 °C)	$2,491 \cdot 10^2$
Palce rtuťového sloupce (0 °C)	$3,386 \cdot 10^3$
kg/m ²	9,807
Pond/inch ² (PSI)	$6,895 \cdot 10^3$
Pond/foot ²	$4,788 \cdot 10^1$
Torr (mm rtuti 0 °C)	$1,333 \cdot 10^2$

2.2 Tlakoměry a měření tlaku

Přístroje na měření tlaku se nazývají tlakoměry. Běžně používané tlakoměry využívají nejčastěji dva principy určování neznámého tlaku. První vychází ze základního vztahu (2.2). Druhý princip je založen na snímání deformace citlivého prvku tlakoměru a z toho pak určuje působící tlak.

Do první skupiny se řadí tlakoměry kapalinové zvonkové a pístové. Do druhé skupiny patří tlakoměry s různými deformačními členy. Změna geometrie citlivého členu se může na stupnici přenášet mechanicky nebo může být snímána elektronicky.

V technické praxi se nejčastěji měří tlaky v rozsahu od 10^{-12} do 10^{12} Pa. Žádný tlakoměr nemůže měřit v celém tomto rozsahu. Proto se tlakoměry rozdělují do skupin, které se vzájemně překrývají a umožňují tak vybrat vhodný typ tlakoměru pro každý měřený rozsah (obr. 2.2).



Obr. 2.2 Rozdělení tlakoměrů podle jejich měřících rozsahů [1]

Tlakoměry můžeme rozdělit podle různých hledisek. Časté rozdělení je podle použití:

- Manometry slouží jako měřidla přetlaků (kladných i záporných)
- Barometry slouží k v měření tlaku ovzduší
- Manovakuometry měří přetlaky a podtlaky
- Diferenční tlakoměry slouží k měření tlakového rozdílu[1].

Rozdělení podle třídy přesnosti:

- Kontrolní tlakoměry měří s dovolenou chybou 0,04 až 0,8 % měřícího rozsahu
- Provozní tlakoměry měří s dovolenou chybou 0,8 až 2,5 % měřícího rozsahu
- Tlakoměry na hrubé měření měří s dovolenou chybou 2,5 % měřícího rozsahu [1].

2.2.1 Kapalinové tlakoměry

Princip měření tlaku pomocí kapalinových tlakoměrů spočívá v nastavení rovnováhy mezi silou vyvozenou měřeným tlakem a sloupcem tlakoměrné kapaliny. Přitom se využívá platnost základní definice (2.2). Nejjednodušší kapalinový tlakoměr je trubice ve tvaru U (U-trubice) na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 Jednoduchá U-trubice

Mezi kapalinové tlakoměry seřadí různé druhy manometrů, barometrů a vakuometrů. Jedná se o přístroje velmi jednoduché, spolehlivé a poměrně přesné. Využívají se hlavně v laboratořích na měření tlakové difference, nejčastěji se používají na měření přetlaku a podtlaku vzhledem k barometrickému tlaku [1].

Na metrologické vlastnosti kapalinových tlakoměrů má vliv kromě konstrukce také jejich náplň. Ta ovlivňuje rozsah, citlivost a spolehlivost tlakoměrů. Tlakoměrné kapaliny musí být stálé, nesmí být citlivé na okolní prostředí, ani s ním reagovat. Nejčastěji se používá voda, rtuť, etylalkohol, metylalkohol, toluen, tetrachlormetan a tribrommetan [1].

Mezi další faktory ovlivňující měření pomocí U-trubice patří teplota měřené látky a okolí, kapilární jevy. Oba zmíněné jevy lze korigovat výpočtově podle následujících vztahů.

Změny teploty se projevují dvojným způsobem. První je vliv teplotní délkové roztažnosti na stupnici měření, od které se odečítá výška hladiny. Druhý se projevuje jako změna hustoty tlakoměrné kapaliny, tato změna způsobuje větší nepřesnosti než teplotní délková roztažnost. Změna hustoty se dá opsat vztahem

$$\rho_t = \rho_0 \cdot \left[1 - A \cdot \frac{t}{100} - B \cdot \left(\frac{t}{100} \right)^2 - C \left(\frac{t}{100} \right)^3 - D \left(\frac{t}{100} \right)^4 \right] \quad (2.9)$$

Kde

- ρ_t je hustota tlakoměrné kapaliny při teplotě t
 ρ_0 je hustota tlakoměrné kapaliny při teplotě $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
 t je teplota tlakoměrné kapaliny
 A, B, C, D jsou bezrozměrné koeficienty v tab. 2.2 [1].

Kapalina	$\rho_0 \cdot 10^3 \text{ (Nm}^{-1}\text{)}$	$\rho_0 \text{ (kgm}^{-3}\text{)}$	A	B	C	D
Etylalkohol (C ₂ H ₆ O)	0,204	806,3	0,1011	0,0125	0	0
Voda (H ₂ O)	0,712	999,8	-0,01058	0,15488	-0,40081	0,45992
Tetrachlor metan (CCL ₄)	0,306	1635,5	0,1158	0,0046	0	0
Bromoform (CHBr ₃)	0,306	2947	0,098	0,003	0	0
Rtuť	4,88	13595	0,01818	0,00008	0	0

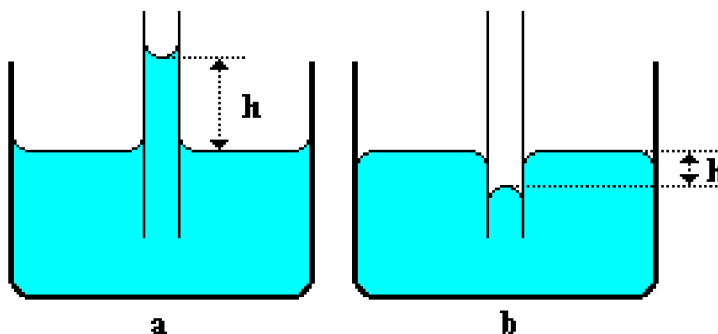
Tab. Koeficienty na korekci hustoty tlakoměrné kapaliny

Velikost kapilární elevace respektive deprese se vyjadřuje vztahem

$$\Delta h = \frac{4\sigma \cdot \cos\delta}{d \cdot \rho \cdot g} \quad (2.9)$$

Kde

- σ je povrchové napětí měřené kapaliny
 δ je úhel smočení měřené kapaliny
 ρ je hustota měřené kapaliny
 d je vnitřní průměr kapiláry
 g je místní tíhové zrychlení [1].



Obr. 2.4 a) kapilární elevace b) kapilární deprese

Všeobecně jsou kapalinové tlakoměry různě upravené z obou dvou stran otevřené U-trubice. Do obou ramen se přivádí rozdílné tlaky a měří se jejich diference. Často se používají tak že na jedno rameno se přivede měřený tlak a druhé rameno je propojena s okolní atmosférou.

U-trubice dostala jméno podle svého charakteristického tvaru. Nejčastěji se vyrábí ze skla, někdy z kovu. Náplň tvoří tlakoměrná kapalina o dané hustotě ρ . Prostor nad hladinami tlakoměrné kapaliny vyplňuje nejčastěji vzduch.

Před měřením působí na hladinu tlakoměrné kapaliny pouze barometrický tlak. Proto jsou obě hladiny ve stejné výšce. Po přivedení měřeného tlaku na jednu nebo obě ramena trubice se hladiny vychýlí. Vychýlení hladin tlakoměrné kapaliny proti rovnovážnému stavu je úměrné tlakovému rozdílu Δp

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot h \quad (2.10)$$

Kde

- h je celková změna výšky hladiny k rovnovážnému stavu
- ρ_1 je hustota tlakoměrné kapaliny
- ρ_2 je hustota média, jehož tlak se měří
- g je místní tíhové zrychlení [1].

Délka jednoduchých U-trubic bývá běžně maximálně 2 m. Díky tomu se rozsah měření při použití rtuť omezuje na maximálně 150 kPa. Existují ještě i propracovanější verze různých druhů kapalinových tlakoměrů, které umožňují měřit i vyšší tlaky. Nicméně při měření těchto tlaků bývá délka měřicí stupnice neúnosně velká. Proto se na měření velkých tlaků používají deformační tlakoměry.

2.2.2 Deformační tlakoměry

Mezi deformační tlakoměr se řadí takové přístroje, které využívají na měření tlaku změnu geometrického tvaru deformačního členu. Tlak se převádí na mechanické napětí, které působí výchylku. Ta se může mechanicky převádět rovnou na stupnici nebo se zaznamenává pomocí elektrických snímačů.

Deformační tlakoměry jsou konstrukčně vcelku jednoduché přístroje navíc spolehlivé a jednoduché na údržbu. Mají mnohostranné využití v technické praxi zejména jako provozní přístroje na měření tlaku. Měřicí rozsahy se volí tak aby pomalu se měnící tlak nepřekročil 2/3 měřicího rozsahu a dynamický se měnící tlak jeho polovinu. Deformační tlakoměry mají většinou malou hmotnost, velký měřicí rozsah a dostatečnou přesnost.

Hlavní nevýhodou deformačních tlakoměrů je elastické dopružování a plastická deformace citlivého prvku. Další nevýhodou je teplotní citlivost deformačního prvku. Se změnou teploty se mění jeho mechanické vlastnosti. To jsou hlavní důvody, proč se musí tlakoměry pravidelně kalibrovat.

Deformační členy

Deformační člen převádí působící tlak na mechanické napětí. Přitom se změní jeho geometrické uspořádání. Tato změna snímá elektrickými nebo mechanickými prostředky. Nejčastěji používanými deformačními členy jsou membrány (tenká, tuhá, zvlněná), vlnovec a trubice (jednoduchá, s vnitřní tyčí, nesymetrická nebo Bourdonova) [1].

Namáhání deformačního členu musí být v rozsahu pružných deformací. Tlakový účinek je v rovnováze s vnitřním napětím materiálu deformačního členu. Velikost deformace je závislá na měřeném tlaku. Všeobecně není tato závislost lineární, což sebou nese určitou nepřesnost měření, navíc se všechny deformační členy vyznačují hysterezí a dopružováním.

Membrány

Pro měření tlaků se používají dva druhy membrán, první je membrána s vlastní tuhostí (kovové) druhý naopak bez vlastní tuhosti (gumové).

V obou případech měření tlaku vychází z vyrovnání silových účinků na membráně. V případě membrán bez vlastní tuhosti se měřený tlak vyrovnává na opačné straně membrány pomocí vnější síly (pružina). Membrána s vlastní tuhostí vyrovnává pomocí vlastní pružné deformace.

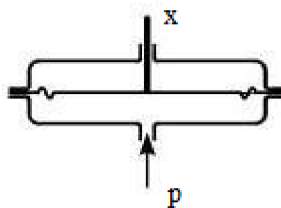
Pro membrány bez vlastní tuhosti platí

$$F = \Delta p S_u = \Delta p S \zeta \quad (2.11)$$

Kde

- F je síla působící na membránu
- Δp je měřený přetlak
- S_u je účinná plocha membrány
- S je plocha membrány
- ζ je účinnost membrány, $\zeta = \frac{S_u}{S}$ [1].

Membrány s vlastní tuhostí se nejčastěji používají v těchto provedeních: tenká membrána, tuhá membrána a zvlněná membrána.



Obr. 2.5 schéma membránových tlakoměrů

Nejcitlivější je tenká rovinná membrána, která se při zatížení lehce deformuje. Tyto membrány se vyrábějí z tenké fólie. Při zatížení tlakem nevykazuje téměř žádné ohybové napětí, pouze tahové. Pro dosažení definované nulové polohy (bez průhybu) a vysoké vlastní frekvence musí se membrána napnout v radiálním směru potřebným napětím.

Průhyb membrány v jejím středu se vypočítá podle vztahu

$$x = \frac{R^2}{4 \cdot \sigma \cdot h} \cdot p \quad (2.12)$$

Kde

- x je průhyb membrány v jejím středu
- R je poloměr membrány
- h je tloušťka membrány
- σ je tahové napětí v membráně
- p je působící tlak [1].

Rezonanční frekvence tenké membrány ve vakuu se vypočítá

$$f_0 = \frac{2,4}{2\pi \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (2.13)$$

Kde

- ρ je hustota materiálu [1].

Průhyb tuhé a zvlněné membrány se počítá podle odlišných vzorců.

Trubice

Do této skupiny deformačních členů patří jednoduché trubice, trubice s vnitřní tyčí, nesymetrické trubice a Bourdonovy trubice.

Při používání jednoduché trubice se využívá její podélná nebo příčná deformace. Při splnění podmínky $D - d \ll D$, pro poměrné prodloužení v podélném směru ε_l a příčném směru ε_t platí vztahy

$$\varepsilon_l = \frac{1-2\mu}{E} \cdot \frac{d^2}{D^2-d^2} \cdot p \quad (2.14)$$

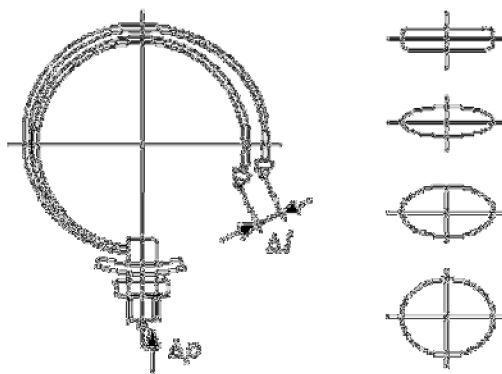
$$\varepsilon_t = \frac{2-\mu}{E} \cdot \frac{d^2}{D^2-d^2} \cdot p \quad (2.15)$$

Kde

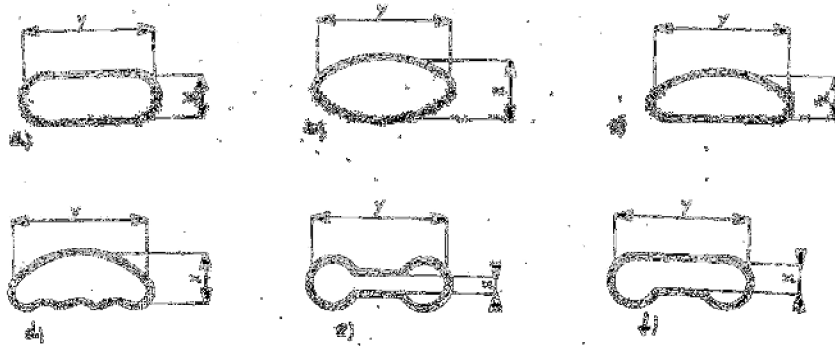
D	je vnější průměr trubice
d	je vnitřní průměr trubice
μ	je Poissonova konstanta
ε_l	je poměrné prodloužení v podélném směru
ε_t	je poměrné prodloužení v příčném směru
E	je modul pružnosti materiálu
p	je měřený tlak [1].

Bourdonova trubice

V praxi jedním z nevíce používaných deformačních členů je Bourdonova trubice. Jedná se o zakřivenou trubici do různých tvarů. Jeden konec trubice je uzavřený, na druhý konec se přivádí tlak. Trubice samotná má různé neokružové průřezy. Po přivedení tlaku se trubice zdeformuje a její uzavřený konec se vychýlí. Tato výchylka se pak mechanicky přenáší na stupnici.



Obr. 2.6 Bourdonova trubice schéma



Obr. 2.7 Používané průřezy Bourdonovy trubice[9]

V manometrech se nejčastěji používá trubice ve tvaru C. Působením tlaku vzniká napětí v jejich vnějších vláknech. Trubice se narovná a zároveň se její nekruhový průřez snaží změnit na kruhový. Délka trubice se nezmění, změní se však vnější poloměr R na R' a vnitřní poloměr r na r' .

Následuje zjednodušený výpočet deformace Bourdonovy trubice. Vztah mezi výchylkou Bourdonovy trubice ve tvaru písmene C a přivedeným tlakem je

$$\Delta l = \frac{r^* \cdot S}{b} \sqrt{1 + \alpha^2} \cdot p \quad (2.16)$$

Kde

- l je posunutí konce Bourdonovy trubice
- r^* je poloměr čáry trubice
- S je vnitřní plocha průřezu trubice
- b je šířka průřezu trubice
- β je úhel natočení konce trubice po přivedení tlaku
- p je působící tlak [1].

Při malé deformaci trubici lze považovat závislost posunutí konce trubice při působení tlaku za lineární, platí

$$\Delta l = k \cdot p \quad (2.17)$$

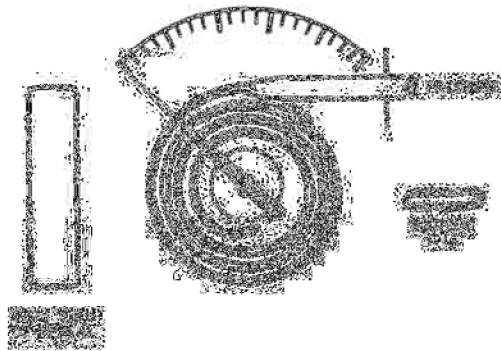
Kde

- k je konstanta Bourdonovy trubice [1]

Výchylku uzavřeného konce Bourdonovy trubice nezpůsobuje silový účinek přivedeného tlaku. Příčinou výchylky je deformace nekruhového průřezu trubice, po té co se se tlakoměrná kapalina snaží zaujmout co největší objem při co nejmenším povrchu trubice [1].

Při elektrickém snímání výchylky lze dosáhnout extrémní přesnosti. Trubice vyrobené z krystalů křemíku mají celkovou chybu 0,005% z měřicího rozsahu [1].

Trubice ve tvaru spirály mají, při mechanickém přenášení výchylky větší citlivost než trubice ve tvaru písmene C. Jsou však citlivé na otřesy a vibrace, proto se umísťují do viskózních kapalin např. silikový olej nebo glycerín [1].



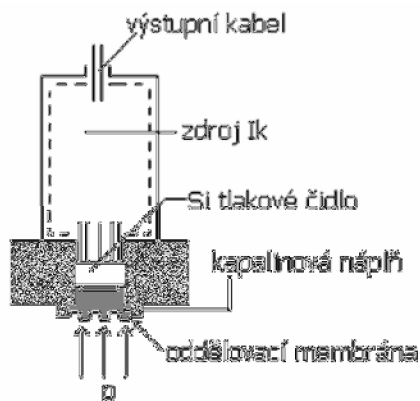
Obr. 2.8 Spirální Bourdonova trubice

Pomocí deformačních manometrů s Bourdonovou trubicí se měří tlaky v širokém rozsahu. Lze měřit malé podtlaky (-120kPa až 0Pa) i velké přetlaky až do 400 MPa . Přístroje většinou měří s dovolenou chybou maximálně 1% měřicího rozsahu. Okolní teplota se může pohybovat v rozmezí $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Laboratorní manometry měří s výrazně lepší chybou maximálně $0,25\%$ měřeného rozsahu, jsou však oproti běžným provozním manometrům několikanásobně dražší [1].

Použití manometrů s Bourdonovou trubicí je všestranné. Využívají se hlavně jako provozní tlakoměry. Měří tlak v pneumatických i hydraulických systémech a jsou vhodné pro měření pomalu i rychle se měnících tlaků. Využívají se rovněž jako tlakové spínače.

2.2.3 Tlakoměry s elektrickým výstupem

Všechny elektrické tlakoměry využívají změnu některé elektrické veličiny, kterou způsobí přiváděný tlak. Ten může na citlivý člen působit přímo nebo přes deformační člen. Podle toho dělíme elektrické tlakoměry na snímače s deformačním členem a snímače s elektricky aktivním tělesem.



Obr. 2.9 Schéma tlakoměrů s elektrickým výstupem

Snímače s deformačním členem měří velikost přiváděného tlaku nepřímo. Používají všechny výše zmíněné deformační členy. Tlak se přivádí na tyto členy a je následně převáděn na napěťový nebo proudový signál. Mezi snímače měřící relativní deformaci patří zejména tenzometrické snímače všech typů. Mezi snímače měřící absolutní deformaci deformačního členu se řadí odporové, kapacitní, indukční a vibrační snímače [1].

U snímačů s elektricky aktivním členem citlivý prvek reaguje změnou svých elektrických vlastností přímo na přivedený tlak bez deformačního členu. Do této skupiny patří piezoelektrické snímače a některé kapacitní a odporové snímače i některé snímače z optických vláken.

Výhodou snímačů tlaku s elektrickým výstupem je jejich velká citlivost, malá dovolená chyba a malé rozměry. Výstupem z nich bývá napěťový nebo proudový signál, který je vhodný k dalšímu digitálnímu zpracování. Nevýhodou je, že vztah mezi měřeným tlakem a elektrickým výstupem není lineární, je nutno ho kompenzovat. Dále jsou snímače s elektrickým výstupem zatíženy hysterezí, při dlouhodobém používání nastává drift nuly a jsou citlivé na změny teploty okolí [1].

Snímače tlaku s elektrickým výstupem nacházejí široké uplatnění v regulační technice i v přesném laboratorním měření. Jejich měřicí rozsah sahá od měření extrémně nízkých a technických vakuí až po měření velkých přetlaků až do několika GPa.

Tenzometrické manometry

Tlakoměry s tenzometrickým snímačem patří mezi velmi rozšířené snímače tlaku. Při svojí činnosti měří relativní deformaci deformačního prvku a tu převádějí na výstupní nejčastěji napěťový signál.

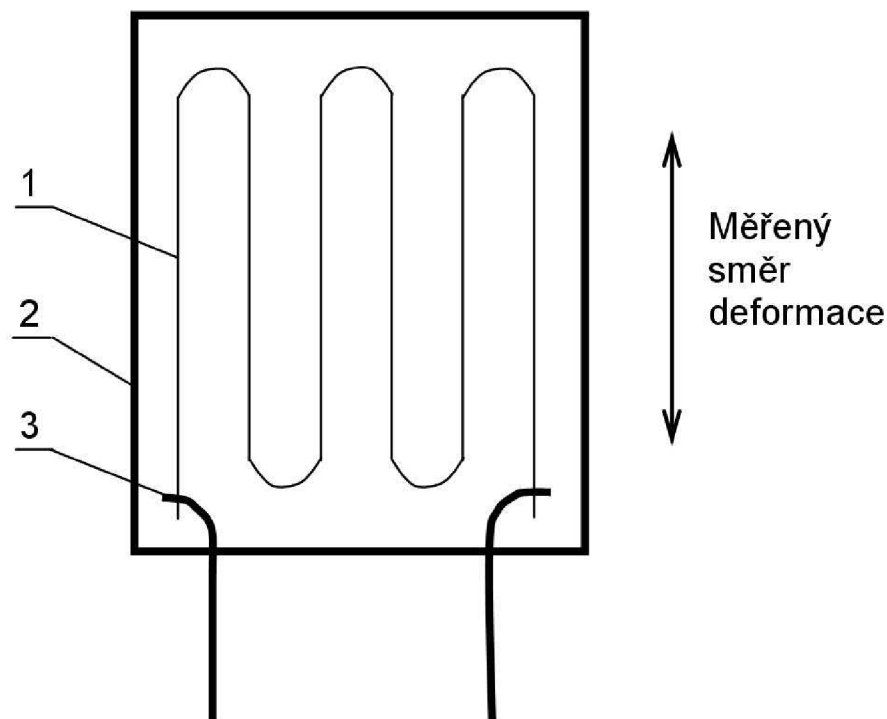
Citlivým prvkem tenzometrických manometrů je tenzometr. Tenzometry pracují na principu změny vodivosti materiálu při jeho namáhání a deformaci. Tenzometry se rozdělují podle materiálu na kovové nebo polovodičové.

Základem odporové tenzometrie je vztah odvozený pro válcový vodič

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2.18)$$

Kde

- R je odpor vodiče
- ρ je měrný odpor materiálu vodiče
- l je délka válcového vodiče
- S je plošný průřez vodiče [1].



Obr. 2.10 drátkový tenzometr

Na obrázku je drátkový tenzometr 1 je odporový drátek, 2 je podklad přenášející deformaci na drátek, 3 je elektrický výstup. Tvary a druhy tenzometru jsou voleny ve vztahu k deformačnímu členu tlakoměru.

Piezoelektrické snímače tlaku

Mezi snímače s přímým měřením tlaku patří piezometrické snímače. Měřený tlak se přivádí přes oddělovací membránu na piezoelektrický krystal. Krystal se nejčastěji vytváří z křemíku. Vlivem tlaku (mechanické deformace) vzniká krystalu elektrická polarizace. V důsledku čehož se na povrchu krystalu vytvářejí zdánlivé náboje, které mohou v přiložených elektrodách vázat nebo uvolňovat skutečné náboje. Jakmile přestane působit mechanické napětí, dielektrikum se vrací do původního stavu.

Síla F , působící kolmo na plochu monokrystalické destičky, způsobuje změnu polarizace P . Na elektrodách nacházejících se na plochách kolmých k směru působení síly vzniká náboj Q a napětí U .

$$Q = P \cdot S = k \cdot F \quad (2.19)$$

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{k \cdot a \cdot F}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S} = k_u \cdot F \quad (2.20)$$

přičemž

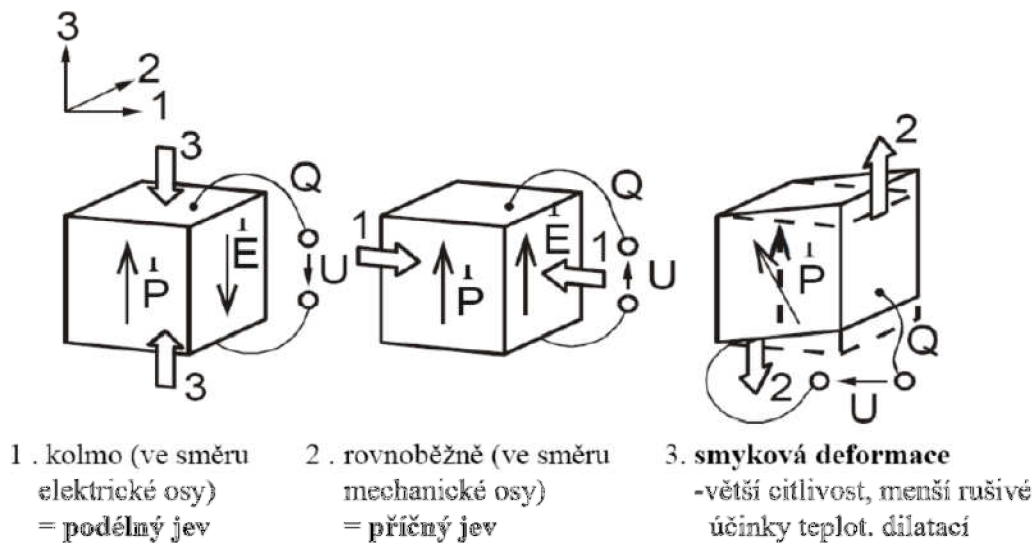
$$P = k \cdot \frac{F}{S}$$

Kde

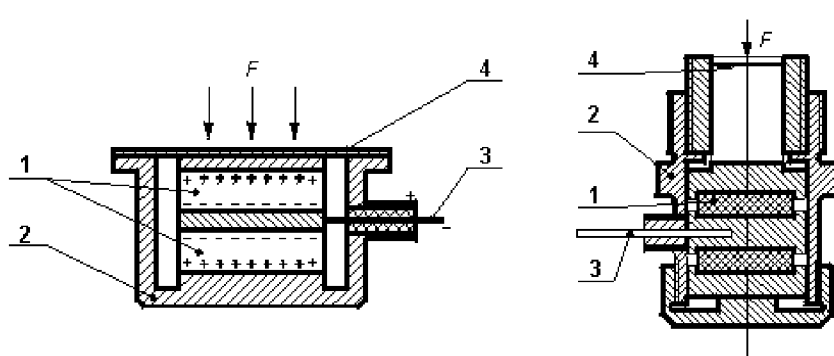
- S je plocha kolmá na směr působící síly
- a je tloušťka destičky
- k je piezoelektrická konstanta
- ϵ_0 je permitivita vakua

ϵ_r je permitivita použitého piezoelektrického materiálu
 k_u je napěťová konstanta snímače ve směru působení síly [1].

V krystalech piezoelektrických snímačů rozeznáváme 3 druhy os optickou osu, elektrickou osu a mechanickou osu. Uvedený vzorec platí pro případ, kdy síla působí v směru elektrické osy a nazývá se podélný piezoelektrický jev.



Obr. 2.11 deformace piezokrystalu [10]



Obr. 2.12 piezoelektrický snímač tlaku

Schéma piezoelektrického snímače tlaku je znázorněno na obr. 2.12. Snímač obsahuje dva piezoelektrické krystaly 1, které jsou zapojeny proti sobě a jejich náboje se sčítají. Kryt snímače 2 je vodivě spojen s vnějšími elektrodami obou krystalů a současně vytváří elektrické i magnetické stínění. Centrální elektroda 3 je vyvedená izolační průchodkou. Přenos tlakové síly na krystal je zprostředkován membránou 4.

Piezoelektrické snímače tlaku se používají na měření rychle se měnících tlaků. Můžou měřit tlaky až do velikosti 100 MPa, vlastní frekvence snímače dosahuje až 400 kHz. Snímač má velký vnitřní odpor a jeho nevýhodou je citlivost na parazitní vibrace [1].

3 Metody a prostředky kalibrace tlakoměrů

Všechny měřidla používané na řízení výroby nebo procesů musí mít známé a ověřené metrologické charakteristiky. Toho se dosahuje kalibrováním zkoušením nebo ověřováním měřidla.

Kalibrace je soubor úkonů, které dávají za určitých podmínek závislost mezi hodnotami indikovanými měřidlem a příslušnými hodnotami veličin realizované referenčním nebo pracovním etalonem. Kalibrace zahrnuje proces navázání kalibrovaného měřidla na etalon, respektive přenos hodnot etalonu na kalibrované měřidlo. Až na některé výjimky se tento proces uskutečňuje pomocí přímého nebo nepřímého porovnávání.

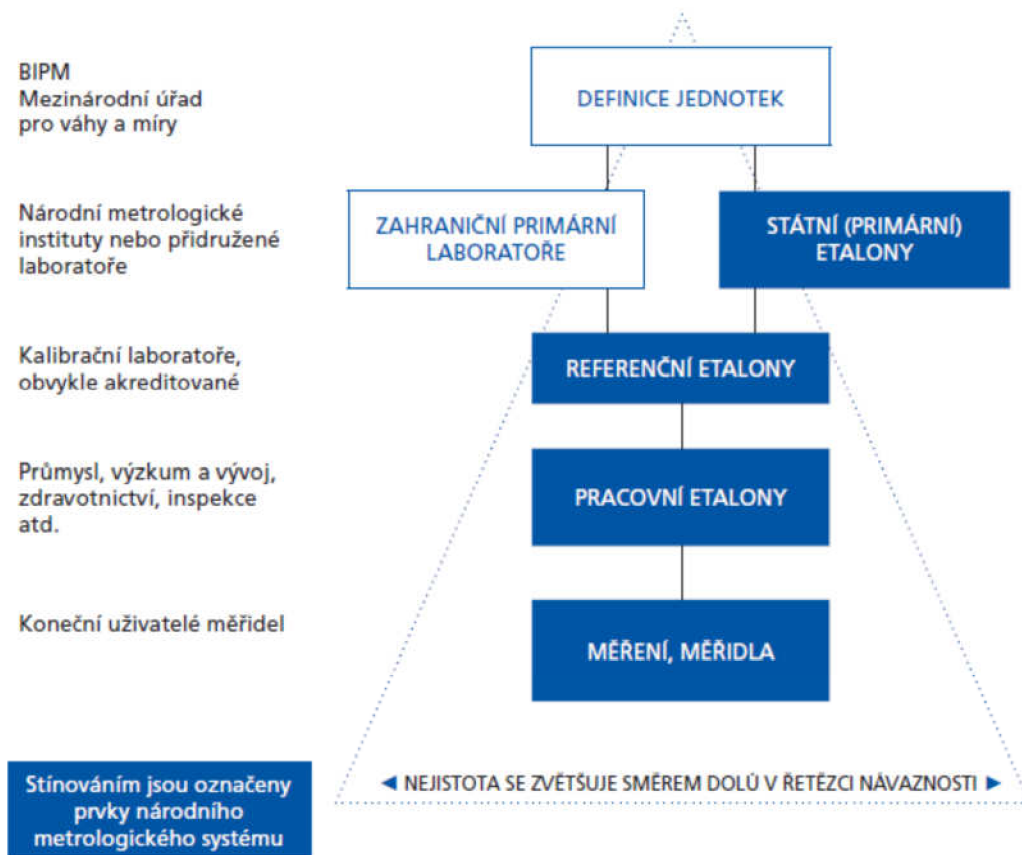
Zkoušením měřidla je souhrn postupů vykonaným za účelem prokázání, že měřidlo splňuje předepsané požadavky. Ověřování je úřední zkouška, ke které se vydává certifikát a měřidlo se opatří značkou.

Pro uživatele měřidla se vydává certifikát (kalibrační list nebo ověřovací list), který obsahuje:

- název, adresu metrologického střediska,
- číslo kalibračního listu,
- identifikace měřidla, které je předmětem kalibrace,
- datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- identifikace kalibrační metody, která byla použita,
- použité etalony,
- výslednou hodnotu měření spolu s nejistotou měření,
- potvrzení platnosti kalibračního listu (jména, podpisy)[2].

Základním předpokladem úspěšné kalibrace je etalon. Etalony existují v několika různých úrovních, jednotlivé úrovně na sebe navazují, jak je zobrazeno na obr. 3.1. Řetězec návaznosti je nepřerušovaný řetězec porovnání, pro něž jsou udány nejistoty. Tím je zajištěno to, že výsledek měření nebo hodnota etalonu jsou vztaženy k referencím vyšší úrovně, nakonec až k primárním etalonům.

Konečný uživatel získává návaznost na nejvyšší mezinárodní úrovni buď přímo cestou národního metrologického institutu, nebo prostřednictvím sekundární kalibrační laboratoře, zpravidla akreditované. Výsledkem různých mezinárodních ujednání o vzájemném uznávání je skutečnost, že návaznost může být zajištěna i prostřednictvím laboratoří mimo vlastní zemi uživatele.



Obr 3.1 řetězec metrologické návaznosti [3]

3.1 Kalibrační souslednost

Kalibrační souslednost je sled úkonů vedoucí k úspěšné kalibraci přístroje. Patří sem kromě samotné kalibrace i přípravné práce, úvodní kontrola, nastavení a uvedení výsledků.

Přípravné práce

Před vlastní kalibrací je nutno vizuálně zkontrolovat vhodné pracovní podmínky kalibrovaného měřidla. Speciálně se jedná o:

- dobrou kvalitu elektrických kontaktů,
- čistotu přístroje.

Doporučuje se vykonat následující operace:

- identifikovat referenční úrovně:
 - etalonového přístroje,
 - kalibrovaného přístroje (na úrovni propojení nebo na úrovni definované výrobcem),
- minimalizovat diferenci výše uvedených úrovní [4].

Úvodní kontrola

Pro určení dlouhodobého driftu přístroje, je nutno uživateli poskytnout příslušné informace o stavu přístroje před jakýmkoli možným nastavením.

Jestliže zákazník nepožaduje kompletní kalibraci před nastavením přístroje, doporučuje se vykonat následující operace:

- zatížit kalibrovaný přístroj nejméně 2x až na úroveň horní meze měření a tlak zde ponechat nejméně po dobu 1 minuty,
- po dobu prvé stoupající série, kontrolovat indikaci přístroje ve vztahu k jeho specifikaci,
- odečíst indikaci přístroje v hodnotách 0%, 50% a 100% jeho měřicího rozpětí [4].

Nastavení

Jestliže odpověď měřidla neodpovídá konvenční hodnotě, tj.:

- u digitálních manometrů s přímým odečítáním je odchylka mezi odečítaným a aplikovaným tlakem,
- u převodníků s elektrickým výstupem je odchylka od konvenčního signálu, (např. 4 až 20 mA), vykoná se nastavení přístroje v souladu s požadavky zákazníka.

V závislosti na možnostech kalibrační laboratoře, nastavení se vykoná pomocí:

- prostředků normálně přístupných uživateli (potenciometry s nulou, resp. s plným nebo středním rozsahem měření),
- pomocí interních justovacích prostředků kalibrovaného přístroje (potenciometry, v paměti uložená kalibrační křivka, atd.), v souladu s informacemi v technickém popisu přístroje, po odsouhlasení zákazníkem.

Jestliže je přístroj opatřen značkami stupnice užitečnými pro uživatele (např. kalibrační body, náhrada kalibrační křivky), doporučuje se určit tyto elementy a uvést je v kalibračním listu.

Hlavní kalibrace

Použitý kalibrační postup se zvolí na základě očekávané nejistoty měření kalibrovaného přístroje.

V každém kalibračním bodu musí být zaznamenána nejméně následující data:

- tlak indikovaný referenčním etalonem, resp. parametry nutné pro výpočet aktuálního měřeného tlaku (např. hodnoty hmotnosti a teploty u pístového tlakoměru),
- indikace kalibrovaného tlakoměru.

Rovněž musí být zaznamenána následující data:

- hodnoty ovlivňujících veličin (teplota, barometrický tlak),
- identifikační parametry kalibrovaného přístroje,
- identifikace přístrojů včetně měřících systémů a/nebo přístrojů použitých pro měření výstupního signálu [4].

Uvádění výsledků

Obecně se doporučuje uvádět výsledky kalibrace ve formě, kterou je možno bez problémů vyhodnotit uživatelem kalibrovaného měřidla. Podstatné je jasné uvádění výsledků kalibrace a metod náhrady nebo interpolace (pokud se metody použijí).

Aby bylo možné vzít do úvahy specifické metody vyhodnocení nejistoty měření a jejího výpočtu, výsledky se mohou uvádět různě, v závislosti na tom zda kalibrovaný přístroj disponuje:

- výstupním signálem v elektrické jednotce (tlakové snímače a převodníky),
- indikací v jednotce tlaku (digitální tlakoměry).

3.2 Kalibrační postupy

Aplikovaný postup závisí na očekávané přesnosti kalibrovaného přístroje, opět ve vztahu k požadavkům zákazníka.

Základní kalibrační postup

Základní kalibrační postup by měl být použit pro přístroje, jejichž očekávaná rozšířená nejistota měření ($k=2$) je $U > 0,2 \%$ měřicího rozsahu (dále zkratka FS – full scale). Kalibrace se vykoná jednou v 6 tlakových bodech při stoupajícím a klesajícím tlaku. Opakovatelnost se vyhodnotí ze tří opakovaných měření v jednom tlakovém bodě (preferenčně 50 % FS) [4].

Standardní kalibrační postup

Standardní kalibrační postup by měl být použit pro přístroje, jejichž očekávaná rozšířená nejistota měření ($k=2$) je 0,05 % FS U 0,2 % FS. Kalibrace se vykoná jednou v 11 tlakových bodech při stoupajícím a klesajícím tlaku. Opakovatelnost se vyhodnotí ze tří opakovaných měření ve čtyřech tlakových bodech (preferenčně 0, 20, 50, 80 % FS) [4].

Rozšířený kalibrační postup

Rozšířený kalibrační postup by měl být použit pro přístroje, jejichž očekávaná rozšířená nejistota ($k=2$) je $U < 0,05 \%$ FS. Kalibrace se vykoná v 11 tlakových bodech ve 3 sériích měření [4].

4 Chyby a nejistoty měření

Hodnotu, která charakterizuje dokonale definovanou veličinu za podmínek existujících v okamžiku měření, nazýváme *pravou hodnotou* měřené veličiny. Je to hodnota, která by šla získat dokonalým měřením. Pravá hodnota veličiny je ideální pojem a kromě několika výjimek nemůže být přesně známá. Každá pravá hodnota je měřením ze své podstaty neurčitelná [1].

Když nelze získat pravou hodnotu měření, lze ji nahradit *konvenčně pravou hodnotou*. Je to hodnota měřené veličiny, která je dostatečně blízká pravé hodnotě a jako takovou ji lze nahradit za pravou hodnotu. Pro získání konvenčně pravé hodnoty se využívá velký počet výsledků měření [1].

Výsledek měření je hodnota vztahující se k měřené veličině a získaná pomocí měření. Rozdíl mezi výsledkem měření a skutečnou hodnotou je *absolutní chyba* měření. V případě neznámé pravé hodnoty se používá konvenčně pravá hodnota. Poměr absolutní chyby ke skutečné hodnotě se je *relativní chyba* měření [1].

Chyby měření podle svého charakteru mohou být náhodné nebo systematické. Náhodná chyba je složka chyby, která se při opakovaných měřeních té samé veličiny mění nepředvídatelným způsobem. Systematická chyba je složka chyby měření, která při opakovaných měřeních zůstává konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem. Systematické chyby mohou být pro konkrétní měření známé nebo neznámé. Stejně jako pravou hodnotu systematickou chybu nelze určit přesně. Známé systematické chyby lze vyloučit z výsledků měření pomocí korekcí. Korekce se rovná záporné hodnotě systematické chyby. Náhodné a neznámé systematické chyby se zohledňují ve výsledku měření jako nejistoty [1].

Nejistota měření je parametr související s výsledkem měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které je možné racionálně přiřadit k měřené veličině. Nejisto měření ve všeobecnosti v sobě zahrnuje několik složek. Některé mohou být statistickým vyhodnocením série měření. Jiné mohou být určené z předpokládaného rozdělení pravděpodobnosti založeného na základě zkušeností nebo jiných informací. Vyjádření výsledku měření je úplné, když hodnotu přiřazenou měřené veličině a nejistotu spojenou s touto hodnotou.

4.1 Chyby měření

Chyba měření je souhrnná hodnota, která zahrnuje řadu chyb, některé se vyskytují systematicky jiné náhodně.

Mezi zdroje chyby měření patří chyby přístroje, chyby instalace, chyby měřících metod, chyby pozorování a chyby výpočtové.

- Přístrojové chyby – jsou chyby vyplývající z nedokonalosti použitých měřících prostředků. Část chyby vzniklé při výrobě (výrobní odchylky dílů, nepřesnost při montáži) se dá odstranit při výrobě (justování). Jiné přístrojové chyby lze odstranit formou korekčních křivek. Ostatní chyby udává výrobce jako maximální dovolenou chybu.
- Chyby instalace – jsou chyby vyplývající z nedostatků zapojení, uložení a nastavení měřidel. Další plynou ze vzájemného ovlivňování měřidla a měřené veličiny.

- Chyby použitých metod – jsou chyby vyplývající z nedokonalosti použitých měřících metod nebo z použití přibližných hodnot fyzikálních konstant.
- Chyby pozorování – jsou chyby způsobené nedokonalostí pozorovatele a lidským faktorem
- Chyby výpočtové – jsou chyby vznikající zpracováním neměřených hodnot (použití přibližných vztahů, chyby interpolace, extrapolace, linearizace) [1].

Chyby měření lze rozdělit podle jejich vlivu na výsledek měření na chyby náhodné, systematické a hrubé. Hrubým chybám se předchází svědomitým vykonáním a zpracováním měření.

4.1.1 Náhodné chyby

Náhodné chyby jsou chyby, u kterých se absolutní hodnota i znaménko mění podle zákona rozdělení pravděpodobnosti. Náhodné chyby nelze vyloučit. Je možné jen odhadovat jejich pravděpodobnostní charakteristiky.

Při opakovaných nezávislých měření té samé veličiny X za stejných podmínek v důsledku náhodných chyb dostaneme různé údaje x_1, x_2, \dots, x_n . jako výsledek měření neboli odhad měřené veličiny se bere aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

Kde

n je počet opakování měření [1].

Rozdíl

$$e_i = x_i - \bar{x} \quad (4.2)$$

je odhad náhodné chyby i -tého měření [1].

Rozptyl údajů opakovaných měření se hodnotí výběrovým rozptylem

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (4.3)$$

Výběrové rozptyly jednotlivých měření $s_{x_i}^2$ a výběrový rozptyl aritmetického průměru $s_{\bar{x}}^2$ jsou [1]:

$$s_{x_i}^2 = s^2 \quad (4.4)$$

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{s^2}{n} \quad (4.5)$$

Rozptyl charakterizuje, jak jsou výsledky měření (náhodné chyby) rozptýlené. Hodnota směrodatné odchylky nebo její násobek vyjadřuje hranici, kterou může náhodná chyba s určitou pravděpodobností překročit nebo nepřekročit. To souvisí s nejistotami měření. Díky nejistotám lze pravděpodobnostně popsat chování náhodných chyb.

4.1.2 Systematické chyby

Hodnota systematické chyby se při stejných podmínkách nemění, je konstantní co do znaménka i velikosti nebo se při změně podmínek mění podle určité známé závislosti.

Na rozdíl od náhodné chyby systematickou chybu nelze charakterizovat na základě opakovaných měření. Systematické chyby nebo jejich odhady se zjišťují a odstraňují následujícími způsoby:

- Odstraněním příčin, které vyvolávají absolutní chybu
- Vhodnou kompenzací
- Uplatněním příslušných korekcí
- Kombinací výše zmíněných

Zjišťování a odstraňování systematických chyb je náročné a nákladné, proto se uskutečňuje jen v nevyhnutelných případech. I při nejlepší snaze lze zjistit jen odhad systematické chyby ne její skutečnou hodnotu. Po odstranění odhadu systematické chyby vždy zůstává nevylučitelná část, jejíž hodnota je neznámá a nazývá se nevylučitelná systematická chyba. Tyto složky systematických chyb mají svoji nejistotu.

Pochází-li systematické chyby z více zdrojů a jsou známé jejich jednotlivé hodnoty $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$, celková hodnota systematické chyby se rovná součtu dílčích hodnot i s ohledem na znaménko [1]

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_m \quad (4.6)$$

V případě, že výsledek měření je funkce jedné nebo více měřených veličin, výsledná chyba se stanovuje pomocí zákona skládání chyb.

Systematická chyba δ_y veličiny y , která je funkcí nezávislých veličin x_1, x_2, \dots, x_n ,

$$y = F(x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (4.7)$$

měřených přímými metodami se vypočítá ze systematických chyb $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$ podle vztahu [1]

$$\delta_y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_i} \delta x_i \quad (4.8)$$

Tento vztah vyplývá z rozvoje funkce (4.7) do Taylorovy řady a zanedbání členů vyšších řádů. Toto zanedbání je přípustné, když funkce (4.7) v uvažovaném bodě není silně nelineární a převodové koeficienty nejsou zanedbatelné [1].

Při přenosu chyb přes sérii za sebe zařazených převodníků, jejichž transformační funkce je

$$y = x \prod_{i=1}^n K_i \quad (4.9)$$

Bude

$$\delta_y = \delta_x \prod_{i=1}^n K_i \quad (4.10)$$

Kde

$$K_i = \frac{\partial F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \Big|_{x_1 = x_1, \dots, x_n = x_n} \quad (4.11)$$

Jsou jednotlivé citlivostní převodové konstanty [1].

Takto vypočítané systematické chyby lze použít na korekci výsledku měření. Nevylučitelné systematické chyby se ohodnocují pomocí nejistot.

4.2 Nejistoty měření

Nejistota měření je parametr související s výsledkem měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které lze racionálně přiřadit k měřené veličině. Nejistota se může dotýkat výsledku měření, hodnot odečítaných z použitých přístrojů hodnot použitých konstant, korekcí a podobně.

Zdroje nejistot

Nejistota výsledku měření odráží nedostatky v dokonalém poznání hodnoty měřené veličiny. Jevy, které přispívají k nejistotě a tím i ke skutečnosti, že výsledek nelze charakterizovat jedinou hodnotou, se nazývají zdroje nejistot. V praxi existuje mnoho zdrojů nejistot při měření:

- Neúplná definice měřené veličiny
- Nedokonalá realizace definice měřené veličiny
- Nereprezentativní výběrový vzorek – měřený vzorek nemusí reprezentovat definovanou měřenou veličinu
- Nedostatečně známé účinky podmínek měření nebo jejich nedokonalé měření
- Subjektivnost odečítání z analogových přístrojů
- Omezená rozlišovací schopnost přístroje a práh rozlišitelnosti
- Nepřesnost etalonů a referenčních materiálů
- Nepřesné hodnoty konstant a jiných parametrů získaných z externích zdrojů a použitých v algoritmu zpracování údajů
- Aproximace a předpoklady zahrnuté v metodě měření
- Změny při opakovaných měřeních měřené veličiny v očividně stejných podmínkách [1].

Tyto zdroje nejistot nemusí být vždy nezávislé.

Při určování nejistot se vychází z teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky, přičemž se předpokládá, že měřené hodnoty jako i chyby mají určité rozdělení pravděpodobnosti, podléhají určitému zákonu rozdělení pravděpodobnosti. Pak má i výsledek měření určité rozdělení pravděpodobnosti.

Základní kvantitativní charakteristikou nejistot je *standardní nejistota* značí se u . Standardní nejistota se rovná směrodatné odchylce příslušného rozdělení pravděpodobnosti [1].

Standardní nejistoty se dělí podle způsobu získání na nejistoty typu A, které se získávají pomocí statistických metod z naměřených údajů a označují se u_a . Nejistoty typu B jsou nejistoty získané jiným způsobem než nejistoty typu A a označují se u_b [1].

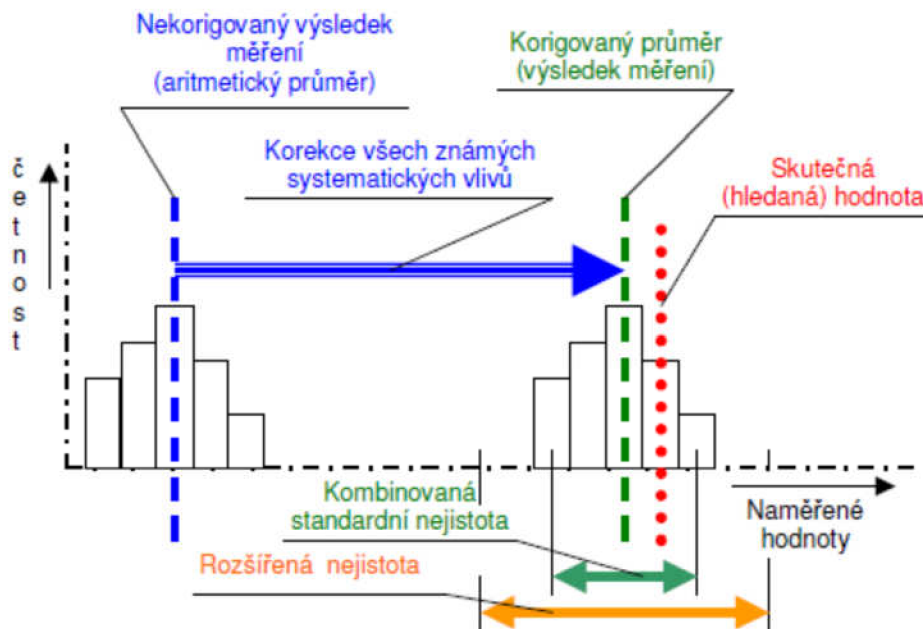
Sloučením nejistoty typu A a nejistoty typu B se získá celková kombinovaná standardní nejistota.

U nejistot typu A jsou příčiny jejich vzniku neznámé. Nejistoty typu B se vážou na známé nebo identifikovatelné zdroje.

Charakteristickým znakem nejistot A je, že s rostoucím počtem opakovaných měření jejich hodnoty klesají. Nejistoty typu B nejsou závislé na počtu měření.

Kromě standardních nejistot, které tvoří interval pokrývající skutečnou hodnotu s danou pravděpodobností, existuje nejistota tvořící interval s větší pravděpodobností

pokrytí skutečné hodnoty. Taková nejistota se nazývá *rozšířená nejistota* a označuje se U [1].



Obr. 4.1 Nejistoty a korekce měřených hodnot [11]

4.2.1 Zákon šíření nejistot

Jedním z problémů postupů určování nejistot je jak určit nejistotu měření, která je funkcí jiných veličin, jejichž odhady a nejistoty jsou známy.

V případě že je hledaná jedna výstupní veličina Y , která je funkcí m vstupních veličin X_1, X_2, \dots, X_m , jejichž odhad i kovarianci je známa a je ve tvaru

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (4.12)$$

f je známá funkce, určuje se odhad y výstupní veličiny Y ze vztahu

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (4.13)$$

Kde

x_1, x_2, \dots, x_m jsou odhady vstupních veličin X_1, X_2, \dots, X_m [1].

Nejistoty odhadu y veličiny Y v případě, že odhady x_1, x_2, \dots, x_m jsou nekorelované, se určují z následujícího vztahu (pouze v případě že funkci f lze linearizovat do Taylorovy řady a zanedbat při tom vyšší členy)

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^m A_i^2 u_{x_i}^2 \quad (4.14)$$

Přičemž pro citlivostní a převodové koeficienty platí [1]

$$A_i = \frac{\partial F(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_i} \Big|_{X_1 = x_1, \dots, X_m = x_m} \quad (4.15)$$

V případě, že odhady x_1, x_2, \dots, x_m jsou korelované, musí se uvažovat i kovariance mezi jednotlivými odhady, které tvoří další složky výsledné nejistoty.

Kovariance mezi odhady jednotlivých veličin určují, jak jsou tyto odhady ovlivněny společnými zdroji nejistot a mohlo to být zohledněno ve výsledné nejistotě. Kovariance můžou výslednou nejistotu zvýšit i snížit, což závisí na jejich charakteru, zdroje mohou působit souhlasně nebo nesouhlasně na dva uvažované odhady.

Pro korelované vstupní veličiny se nejistota výstupní veličiny určuje ze vztahu

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^m A_i^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j<i}^{m-1} A_i A_j u_{x_i, j} \quad (4.16)$$

Kde $u_{x_i, j}$ je kovariance mezi odhady x_i a x_j , která se určuje vztahem

$$u_{x_i, j} = r_{x_i, j} u_{x_i} u_{x_j} \quad (4.17)$$

Kde

$r_{x_i, j}$ je korelační koeficient mezi odhady x_i, x_j
 u_{x_i}, u_{x_j} jsou nejistoty odhadů x_i a x_j [1].

Korelační koeficient vyjadřuje míru stochastické závislosti odhadů x_i a x_j a nabývá hodnoty od -1 do +1. Při silné závislosti se korelační koeficient blíží +1 nebo -1. Pro nezávislé odhady je roven 0 [1].

4.2.2 Standardní nejistota typu A

Vyhodnocení nejistoty typu A se provádí pomocí statistické analýzy naměřených údajů. V případě přímých měření jde o statistické zpracování výsledků opakovaných měření. Hodnoty se získávají opakovaným nezávislým měřením za stejných podmínek.

Naměřené údaje jsou výsledkem n nezávislých měření jedné veličiny. Po n měřeních je k dispozici x_1, x_2, \dots, x_n hodnot.

Odhad měřené veličiny je dán vztahem (4.1).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

Standardní nejistota určená metodou A tohoto odhadu se rovná směrodatné odchylce aritmetického průměru n měření [1].

$$u_{Ax} = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.17)$$

4.2.3 Standardní nejistota typu B

Nejistoty typu B se vážou na známé, identifikované a kvantifikované zdroje. Vyhodnocení typu B vychází z kvalifikovaného úsudku založeného na všech dostupných informacích o měřené veličině X a jejich možných změnách. Zdrojem informací jsou:

- Měření a výsledky získané při předcházejících měřeních
- Zkušenosti a všeobecné znalosti o chování měřeného objektu, měřících metodách, prostředcích a podmínkách měření
- Specifikace získané od výrobců o měřidlech a podmínkách používání
- Údaje z certifikátů, kalibračních listů nebo ověřovacích listů
- Nejistoty referenčních údajů převzaté z různých pramenů

Při určování nejistot typu B se postupuje podle následujícího postupu“

- Vytipují se možné zdroje nejistot Z_1, Z_2, \dots, Z_p .
- Určí se standardní nejistota každého zdroje. Převzetím z certifikátů, technické dokumentace, tabulek, technických norem, kalibračních listů, dokumentace výrobců nebo odhadem pomocí ověřených metod.
- Posoudí se korelace mezi jednotlivými zdroji a stanoví se odhad korelačního koeficientu r_{zij} .
- Určí se vztah mezi veličinou X a jednotlivými zdroji nejistot Z_1, Z_2, \dots, Z_p .

$$X = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_p) \quad (4.18)$$

- Pomocí vztahů 4.15, 4.17 se pro funkci 4.18 vypočítá nejistota u_{bx} [1].

V případě, když není přímo k dispozici nejistota daného zdroje, lze ji získat následujícími metodami.

- Pokud certifikáty, dokumentace nebo jiné zdroje uvádějí rozšířenou nejistotu U a koeficient rozšíření k, určuje se nejistota u_{Bzi} daného zdroje Z_i podle vztahu

$$u_{Bzi} = \frac{U}{K} \quad (4.19)$$

- Pokud je 2U délka intervalu s nějakou konfidenční pravděpodobností (95%, 99%, 99,73%), a je platí předpoklad, že při určování tohoto intervalu se uvažovalo s normovaným normálovým rozdělení, standardní nejistota u_{Bzi} daného zdroje Z_i se určí podle vztahu

$$u_{Bzi} = \frac{U}{k_p} \quad (4.20)$$

Kde

k_p je koeficient rozšíření rovný normovanému normálovému rozdělení pro pravděpodobnost P ($k_p = 1,96$ pro $P = 95\%$, $k_p = 2,58$ pro $P = 99\%$, $k_p = 3$ pro $P = 99,73\%$)

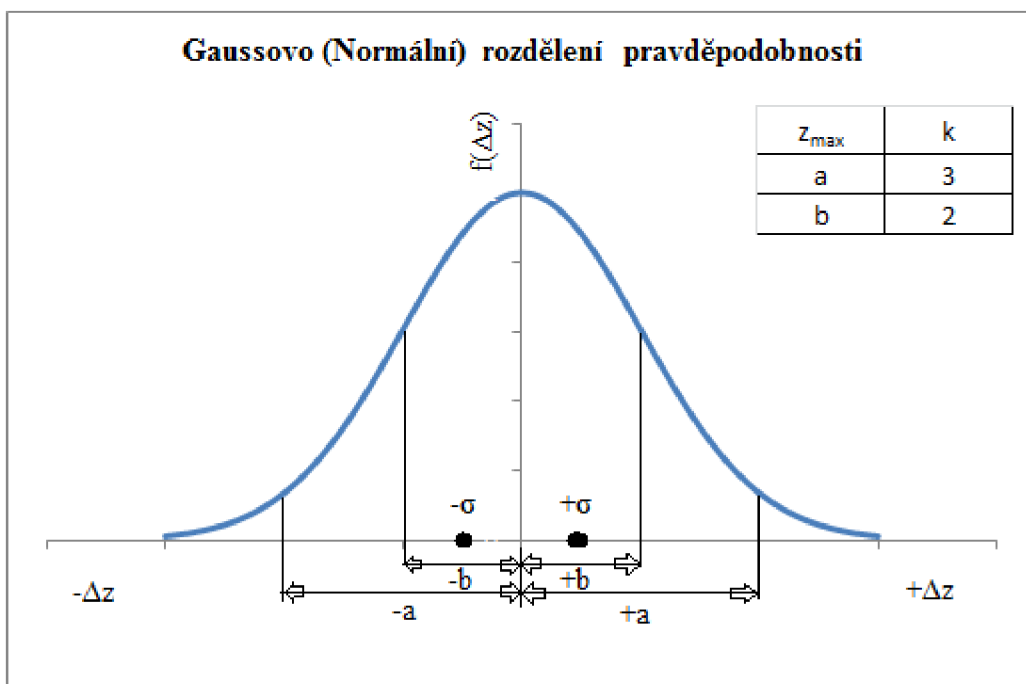
- V případě, že jsou známy pouze hranice, ve kterých se hodnoty veličin nacházejí vlivem působení daného zdroje téměř na sto procent. Postup je následující.
 - Odhadne se rozsah změn odchylek $\pm z_{imax}$ od nominální hodnoty veličiny příslušící uvažovanému zdroji Z_i , jejíž překročení je málo pravděpodobné.
 - Posoudí se rozdělení pravděpodobnosti uvažovaného zdroje odchylek v tomto intervalu a určí se jeho aproximace.
 - standardní nejistota u_{Bz_i} daného zdroje Z_i se určí podle vztahu

$$u_{Bz_i} = \frac{z_{imax}}{k} \quad (4.21)$$

Kde

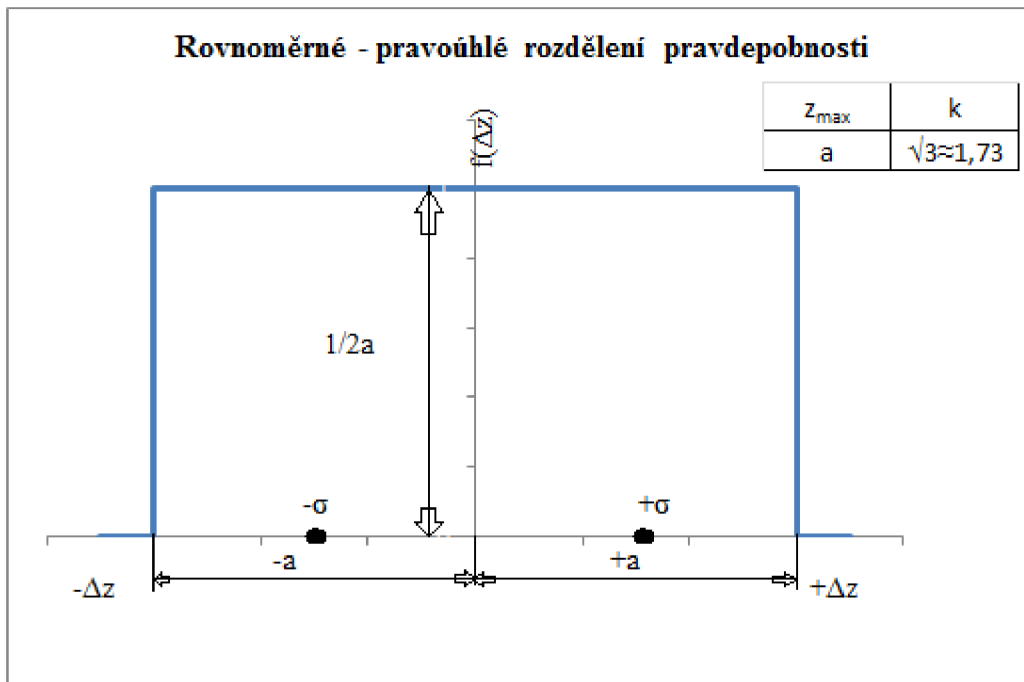
k je hodnota příslušící zvolené aproximaci rozdělení pravděpodobnosti.

Aproximace normálním rozdělením se používá v případech, kdy se častěji vyskytují odchylky od nominální hodnoty malých hodnot a s rostoucí pravděpodobností jejich výskyt klesá. Například zdroj nejistoty je měřicí přístroj od spolehlivého výrobce, jehož výrobky měří s malými chybami.



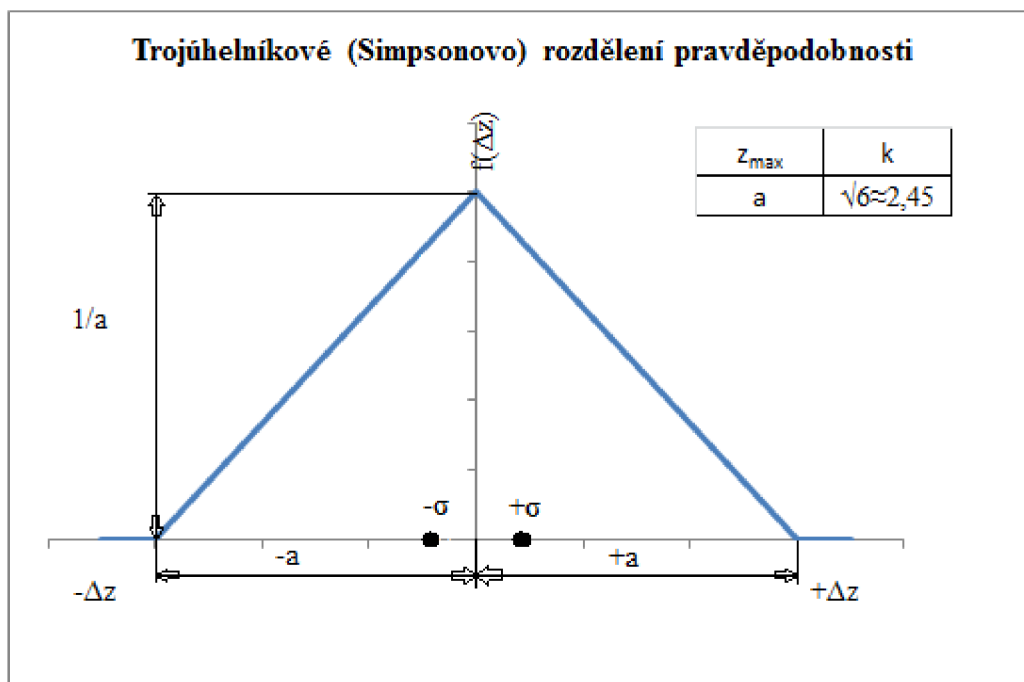
Obr. 4.2 Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti

Aproximace rovnoměrným rozdělením se používá v případech, kdy je stejná pravděpodobnost kterékoli odchylky v daném intervalu $\pm z_{imax}$. Tato aproximace se používá nejčastěji, protože často nesou známé informace o rozdělení pravděpodobnosti výskytu odchylek.



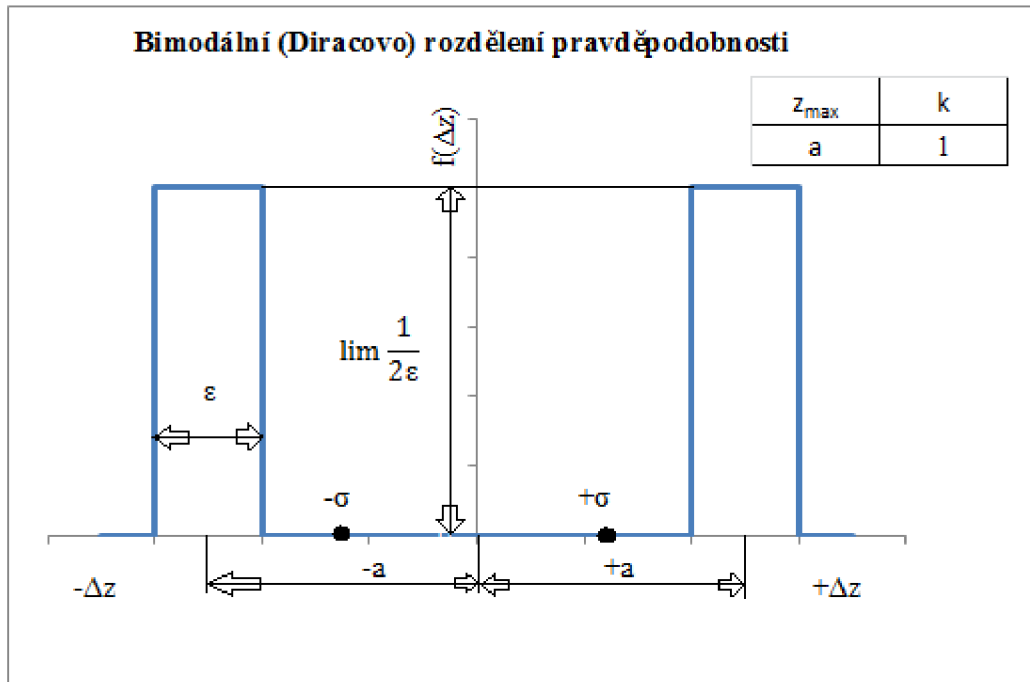
Obr. 4.3 Rovnoměrné - pravoúhlé rozdělení pravděpodobnosti

Aproximace trojúhelníkovým rozdělením se používá v případech podobných jako u normálního rozdělení.



Obr. 4.4 Trojúhelníkové rozdělení pravděpodobnosti

Aproximace bimodálním rozdělením se používá v případech, kdy jsou přístroje rozděleny do různých tříd přesnosti a tím jsou určeny jejich dovolené chyby.



Obr. 4.4 Bimodální rozdělení pravděpodobnosti

- Při použití číslicových měřících přístrojů je jedním ze zdrojů nejistot rozlišitelnost poslední platné číslice. To způsobuje, že i přes neměnění se údaj je při opakovaném měření nejistota nenulová. Odhad nejistoty se v tomto případě zakládá na předpokladu rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti v intervalu vymezeném rozlišitelností δ_{zi}

$$u_{B_{zi}} = \frac{\delta_{zi}}{2\sqrt{3}} \quad (4.22)$$

- Při použití analogových měřících prostředků je odečitelnost dána hodnotou dílku stupnice δ_z . Standardní nejistota $u_{B_{zi}}$ daného zdroje Z_i se potom určí podle vztahu 4.22.
- Často má významný vliv na nejistotu přístroje hystereze. Hystereze se určí z odchylek mezi korespondujícími odečty / výstupní hodnoty měření při stoupajících a klesajících hodnotách měření.

$$u_{B_{zi}} = u_{b_{hyst}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2} \quad (4.23)$$

Kde

- h je aritmetický průměr absolutních hodnot rozdílů stoupajících a klesajících hodnot měření.

$$h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{nahoru_i} - x_{dolu_i}| \quad (4.24)$$

- Dalším významným zdrojem nejistot je chyba měření v nulovém bodě. Chyba nuly může být určována před každým měřicím cyklem, tj. sériemi měření při stoupajícím a klesajícím tlaku. Musí být určena před a po měřicím cyklu. Čtení musí být provedeno po úplném odstranění zatížení. Chyba nuly je vypočtena následovně.

$$u_{B_{zi}} = u_{b_{nula}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{f_0}{2}\right)^2} \quad (4.25)$$

Kde

f_0 je maximum rozdílů absolutních hodnot bez zatížení před a po měření.

$$f_0 = \max \{|x_{nahoru_i} - x_{dolu_i}|\} \quad (4.26)$$

- Mezi zdroje se rovněž řadí chyby související s opakovatelností. Opakovatelnost kalibrační sestavy se určuje z odchylek hodnot měřených veličin odpovídajících sérií měření, korigovaných na nulový signál index j označuje nominální hodnoty tlaku $j = 0$ odpovídá nulovému bodu. Porovnávají se měření před demontáží a po opětovném složení kalibrační soustavy.

$$u_{B_{zi}} = u_{b_{opak}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (4.27)$$

Kde

b je maximum z rozdílů měřených hodnot a nominálního tlaku jednotlivých sérií [1, 4].

$$b = \max \{|(X_{před,j} - X_{před,0}) - (X_{po,j} - X_{po,0})|\} \quad (4.28)$$

4.2.4 Standardní kombinovaná nejistota

V případě, že není žádná závislost mezi zdroji nejistot vyhodnocenými metodou A a metodou B, potom lze v souladu se zákonem šíření nejistot podle vztahu 4.14 vyjádřit kombinovanou nejistotu u_{Cx} [1].

$$u_{Cx}^2 = u_{Ax}^2 + u_{Bx}^2 \quad (4.29)$$

4.2.5 Rozšířená nejistota měření

Standardní nejistoty vytvářejí interval pokrývající skutečnou hodnotu měření s poměrně malou pravděpodobností, v praxi je často potřeba hodnota nejistoty, která by vytvářela interval s pravděpodobností pokrytí skutečné hodnoty blížící se 100%. Taková nejistota se nazývá rozšířená nejistota a označuje se U . rozšířená nejistota se ze standardní nejistoty určí jejím vynásobením koeficientem rozšíření podle vztahu.

$$U = k \cdot u \quad (4.30)$$

Za předpokladu normálního rozdělení výsledku měření, se volí k jako kvantil normovaného normálního rozdělení. Např. pro pravděpodobnost pokrytí 95% bude $k = 2$ [1].

5 Modelové pracoviště pro měření tlaku

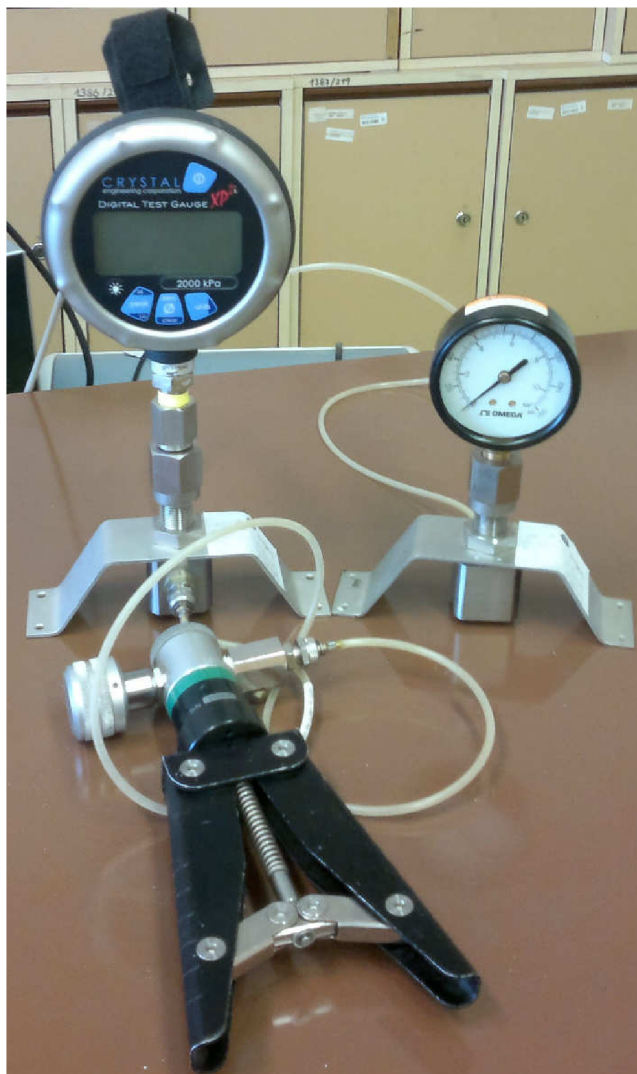
Modelové pracoviště pro měření tlaku vzniklo za podpory firmy D-Ex instruments, která věnovala digitální referenční tlakoměr XP2i. Pracoviště se nachází v místnosti A4/603, kde bude fungovat jako jedno z výukových pracovišť pro předmět VTM Technická měření.

Cílem modelového pracoviště bude seznámit studenty s problematikou měření tlaku, kalibrace tlakoměrů a vyhodnocování chyb a nejistot v rámci možností výukové laboratoře.

Pro účely měření tlaku bude použit digitální referenční tlakoměr XP2i, který rovněž poslouží jako etalon.

Kalibrovaným přístrojem bude analogový referenční tlakoměr Omega. Jedná se o jednoduchý a relativně nepřesný přístroj oproti digitálnímu referenčnímu tlakoměru XP2i. Nicméně pro výukové účely lze tyto přístroje použít.

Jako zdroj tlaku poslouží ruční tlaková pumpa.



Obr. 5.1 Modelové pracoviště pro měření tlaku

5.1 Použité přístroje

5.1.1 Digitální referenční tlakoměr XP2i

Digitální referenční tlakoměr XP2i vyrábí firma CRYSTAL engineering corporation. Jedná se o moderní všestranný tlakoměr. Jeho přesnost je $\pm 0,1\%$ odečtu (měřené hodnoty) což přístroji XP2i dovoluje zastoupit několik deformačních tlakoměrů. XP2i je plně tepelně kompenzován a proto jeho přesnost je zachována v celém teplotním rozsahu.

Vnější plášť XP2i je vyroben z odolné hliníkové slitiny. Těsnění zajišťuje prachotěsnost a vodotěsnost. Konektor RS-323 je rovněž utěsněný. Elektronika je zabudována v pružném plastu absorbujícím nárazy. Baterie jsou po vyjmutí 4 šroubu snadno přístupné. Výdrž 3 baterií typu AA v XP2i činí až 1500 hodin. Mezi další vlastnosti přístroje patří trvalý záznam minimálních a maximálních hodnot, odnímatelné sítko pro zachycení hrubých nečistot.

Nastavení XP2i je možné upravit pomocí programu ConfigXP, který je dostupný na zdarma na webu. Jeho možnosti jsou tyto. Uživatel může definovat vlastní jednotky tlaku nebo blokovat nepoužívané jednotky tlaku. Přístroj může být chráněn heslem proti zneužití. Uživatel může nastavovat přístroj na různou hustotu vody [5].



Obr. 5.2 Digitální referenční tlakoměr XP2i

Na tlakoměru XP2i jsou 4 tlačítka sloužící k ovládání přístroje.

Tlačítko On/Off je nad displejem a slouží k zapnutí/vypnutí přístroje a pro přístup do nastavovacího menu přístroje.

Tlačítko Units slouží k vybírání jednotek tlaku. Je možné vybrat mezi PSI, MPa, kPa, Bar. Vztahy pro převody mezi jednotlivými jednotkami jsou popsány v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Převody jednotek v přístroji XP2i[5]

Univerzální jednotka	Odpovídající jednotka
1kPa	0,145037 PSI
1kPa	4,014707 inch H ₂ O (hustota vody při 4 °C)
1kPa	4,018536 inch H ₂ O (hustota vody při 15,6 °C)
1kPa	4,021756 inch H ₂ O (hustota vody při 20 °C)
1kPa	0,295298 inch Hg (hustota rtuti při 0 °C)
1kPa	7,500566 mmHg (hustota rtuti při 0 °C)
1kPa	101,973516 mmH ₂ O (hustota vody při 4 °C)
1kPa	10,197352 kg/cm ²
1kPa	10 mbar
1kPa	0,01 bar
1kPa	0,001 MPa

Tlačítko Zero slouží k nulování přístroje. Přístroje musí být nastaven na zobrazování aktuálního tlaku a zbaven jakéhokoli zatížení. Pro vynulování přístroje stačí podržet tlačítko po dobu 1-2 s.

Tlačítko Peak slouží k změnám režimu zobrazování tlaku. Lze vybírat mezi zobrazováním maximálního tlaku, minimálního tlaku, průměrného tlaku, režimem tárování, rychlostí změny tlaku a zobrazování aktuálního tlaku.

Měřicí rozsah tlakoměru XP2i je 0 až 10 bar. Přístroj dosahuje přesnosti $\pm 0,1\%$ odečtu (měřené hodnoty) při 20% až 100% z měřicího rozsahu přístroje. Při 0 až 20% měřicího rozsahu přístroje dosahuje přesnosti $\pm 0,02\%$ z rozsahu. Tlakoměr má kompenzovaný pracovní teplotní rozsah -10 až 50 °C. XP2i může pracovat s kapalinami a plyny, které jsou kompatibilní s nerezovou ocelí 316. Přístroj je vybaven konektorem RS-323 pro komunikaci s PC. Rozměry a další informace obsahuje data sheet k tlakoměru XP2i v příloze [5].

Tlakoměr XP2i používá křemíkový state-of-the-art tlakový senzor. Křemíková krystalická struktura se perfektně vrací do původního stavu a proto má snímač vysokou opakovatelnost měření.



Obr. 5.3 Snímač tlakoměru XP2i[6]

5.1.2 Analogový referenční tlakoměr Omega

Referenční tlakoměry Omega řady PGU zajišťují ekonomické a spolehlivé služby v řadě aplikací měření tlaku. Tlakoměry jsou vyráběny v různých rozsahových řadách. Při experimentu je použit tlakoměr s označením PGU-25L-160psi/11bar.



Obr. 5.4 Analogový referenční tlakoměr Omega

Měřicí rozsah použitého tlakoměru je 0-160psi/0-11bar. Přesnost tlakoměru je $\pm 3\%$ v první třetině rozsahu, $\pm 2\%$ v druhé třetině rozsahu a $\pm 3\%$ v třetí třetině rozsahu.

Jako snímač tlaku je použita kovová Bourdonova trubice [7].

Další technické parametry jsou v příloze Omega datasheet.

5.1.4 Ruční zdroj tlaku Beamex

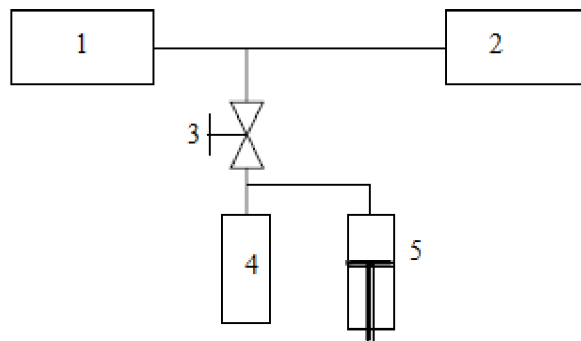
Jednoduchá ruční pumpa sloužící jako zdroj tlaku. Zahrnuje výpustný ventil a má možnost jemně regulovat výstupní tlak pomocí šroubového ventilu.



Obr. 5.5 Ruční zdroj tlaku

5.2 Modelová kalibrace

K modelové kalibraci budou použity tyto přístroje digitální referenční tlakoměr XP2i, analogový referenční tlakoměr Omega a ruční zdroj tlaku. Tyto přístroje se zapojí podle schématu na obr. 5.6 pomocí krátkých spojovacích trubiček. Je vhodné dbát na pečlivé spojení a utažení závitu aby nedocházelo k únikům tlaku.



Obr. 5.6 schéma zapojení přístrojů 1 - kalibrovaný přístroj, 2 – etalon, 3 – výpustný ventil, 4 – zdroj tlaku, 5 – objemový regulátor

5.2.1 Kalibrační postup

Cílem kalibračního úsilí je vyhodnotit chování kalibrovaného tlakoměru na rozsahu měřených hodnot 0 až 10 bar, vytvoření přehledné kalibrační tabulky a zhodnocení zjištěných výsledků. Postup bude spočívat v pečlivém nastavení tlakoměru Omega na nominální hodnotu tlaku a zjištění pravé hodnoty působícího tlaku na tlakoměru XP2i, který bude mít funkci etalonu.

1. Pečlivé sestavení kalibrační soustavy. Kontrola použitých přístrojů, zaznamenání výrobních čísel.
2. Zjištění podmínek měření. Především datum, atmosférický tlak, teplota vzduchu a vlhkost vzduchu.
3. Zatížení kalibrační soustavy na nominální hodnotu 5 bar a ponechání soustavy na této hodnotě po dobu jedné minuty.
4. Provedení 2 sérií porovnávacích měření v 11 tlakových bodech. Každá série je měřena vzestupně v bodech 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 bar. Poté sestupně od maximálního zatížení po nulu.
5. Rozmontování a opětovné sestavení kalibrované soustavy pro kontrolu opakovatelnosti.
6. Provedení 1 série porovnávacích měření v 11 tlakových bodech. Série je měřena vzestupně v bodech 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 bar. Poté sestupně od maximálního zatížení po nulu.
7. Vyhodnocení nejistot tlakoměru Omega.
8. Vyhodnocení nejistot tlakoměru XP2i.
9. Vyhotovení kalibrační listiny.

Tab. 5.2 Naměřené hodnoty

Vzestupné měření [bar]				Sestupné měření [bar]			
Nominální hodnota	1. série	2. série	3. série	Nominální hodnota	1. série	2. série	3. série
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1,026	1,013	1,009	1	1,030	1,025	1,010
2	2,004	2,036	1,996	2	1,995	2,006	1,992
3	3,028	3,030	2,989	3	3,025	3,038	3,023
4	4,012	4,006	4,038	4	4,027	4,031	4,038
5	5,020	5,006	5,031	5	5,019	5,018	5,017
6	6,003	5,995	5,989	6	6,000	6,010	5,986
7	7,018	7,009	7,018	7	7,006	7,020	7,010
8	8,019	8,016	8,000	8	7,999	8,013	7,992
9	9,039	9,055	9,037	9	9,021	9,021	9,019
10	10,073	10,067	10,059	10	10,050	10,029	10,043

5.2.2 Tlakoměr Omega

Jako každý měřící přístroj má i tlakoměr Omega předepsanou určitou přesnost, která způsobuje nejistotu typu B u_{Bet} . Dalším zdrojem nejistoty typu B je odečitatelnost u_{Bode} související s analogovou stupnicí přístroje.

Nejistota, jejímž zdrojem je chyba přístroje, se vypočítá na základě metody známých hranic, v nichž se veličina bude pohybovat. Nejistota se vypočítá ze vztahu 4.21. Rozsah změn odchylek je dán přesností přístroje v daném tlaku. Předpokládá se rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

Jako příklad je uveden nominální tlak 5 bar. Přesnost etalonu v tomto případě je $\pm 2\%$.

$$z_{5max} = 2 \cdot 5 \cdot 0,02 = 0,2 \text{ bar}$$

$$u_{Bet5} = \frac{z_{5max}}{k} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115 \text{ bar}$$

Nejistoty způsobené odečitatelností se vyhodnocují pomocí vztahu 4.22. jeden dílek etalonu odpovídá $\delta_{ode} = 0,5$ bar. Předpokládá se rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

$$u_{Bode} = \frac{\delta_{ode}}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,5}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,144 \text{ bar}$$

Výsledky pro všechny ostatní nominální tlaky jsou uvedeny v tabulce 5.3 a 5.4 v kapitole 5.2.4 vyhodnocení nejistot a kalibrační tabulka

5.2.3 Tlakoměr XP2i

Jako etalonový přístroj figuruje digitální referenční tlakoměr XP2i. U něj se vyhodnocuje standardní nejistota typu A u_A . Z nejistot typu B mají na výsledek vliv nejistota nuly u_{Bnula} , nejistota opakovatelnosti u_{Bop} a nejistota způsobená hysterezí u_{Bhys} .

Nejistoty typu A se vyhodnocují pomocí statických metod, podle vztahu 4.17. aritmetický průměr se určí z 6 hodnot měření v daném nominálním tlaku.

Jako příklad je uveden nominální tlak $x_5 = 5 \text{ bar}$.

$$\bar{x}_5 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{6} (5,02 + 5,006 + 5,031 + 5,019 + 5,018 + 5,017) = 5,018 \text{ bar}$$

$$u_{A5} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} \sum_{i=1}^6 (x_i - 5,018)^2} = 0,008 \text{ bar}$$

Nejistota nuly se vypočítá za pomoci vztahů 4.25 a 4.26. Dosazují se hodnoty z korespondujících sérií měření.

$$f_0 = \max\{|x_{nahoru_i} - x_{dolui}|\} = \max\{|0 - 0|, |0 - 0|, |0 - 0|\} = 0 \text{ bar}$$

$$u_{Bnula} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{f_0}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{0}{2}\right)^2} = 0 \text{ bar}$$

Nejistoty vlivem opakovatelnosti se vyhodnocují pomocí vztahů 4.27 a 4.28. Porovnávají se hodnoty z jedné série měření před demontáží a série měření po opětovném složení.

$$b = \max\{|(X_{pred,j} - X_{pred,0}) - (X_{po,j} - X_{po,0})|\}$$

$$= \max\left\{\begin{array}{l} 0,017; 0,008; 0,039; 0,026; 0,011; 0,014; 0; 0,019; 0,002; 0,014; \\ 0,02; 0,003; 0,011; 0,002; 0,014; 0,004; 0,007; 0,002; 0,007 \end{array}\right\} = 0,039 \text{ bar}$$

$$u_{Bop} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{0,039}{2}\right)^2} = 0,011 \text{ bar}$$

Nejistoty typu B způsobené hysterezí tlakoměru se vyhodnocují pomocí vztahů 4.23 a 4.24. Hystereze se vyhodnocuje pro jednotlivé nominální hodnoty tlaku.

Jako příklad je uveden nominální tlak 5 bar.

$$h_5 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{nahoru_i} - x_{dolui}|$$

$$= \frac{1}{3} \{|5,02 - 5,019| + |5,006 - 5,018| + |5,031 - 5,017|\} = 0,009 \text{ bar}$$

$$u_{bhyst5} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h_5}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{0,009}{2}\right)^2} = 0,003 \text{ bar}$$

5.2.4 Vyhodnocení nejistot a kalibrační listina

Podmínky měření:

Datum	20.5.2014
Teplota vzduchu	24,6 °C
Atmosférický tlak	1015,9 hPa
Vlhkost vzduchu	41%

Použité přístroje:

Digitální referenční tlakoměr XP2i

Výrobní číslo SN443042

Rozsah 0-10 bar

Rozlišení 0,001 bar

Analogový referenční tlakoměr Omega

Výrobní číslo 070258079

Rozsah 0-11 bar

Rozlišení 0,5 bar

Ruční pumpa Beamex

Výrobní číslo 02008

Meteostanice TFA 35.1099

Výrobní číslo 001000208047

Nejistoty vyjádřené v předchozích kapitolách lze skombinovat pomocí zákona šíření nejistot vztah 4.14. Pro přehlednost bude vyjádřena celková nejistota typu A u_a , celková nejistota typu B u_b , kombinovaná nejistota u_c a nakonec rozšířená nejistota U . Výsledky pro všechny nominální hodnoty tlaku budou znázorněny v tabulce 5.3 a 5.4. Výsledky kalibrace budou znázorněny v kalibračním grafu.

Jako příklad bude opět zvolen nominální tlak 5 bar.

Standardní nejistota typu A byla vypočítána v kapitole 5.2.3 a má hodnotu

$$u_{A5} = 0,008 \text{ bar}$$

Standardní nejistota typu B se skládá z několika příspěvků. Příspěvek od etalonu spočívá v nejistotě samotného etalonu u_{Bet} a v nejistotě způsobené odečitelností u_{Bode} . Další nejistoty typu B přináší kalibrovaný přístroj a to v podobě nejistoty nuly u_{Bnula} , nejistoty opakovatelnosti u_{Bop} a nejistota způsobené hysterezí u_{Bhys} .

$$\begin{aligned} u_{B5} &= \sqrt{u_{Bet5}^2 + u_{Bode}^2 + u_{Bnula}^2 + u_{Bop}^2 + u_{Bhys5}^2} \\ &= \sqrt{0,115^2 + 0,144^2 + 0^2 + 0,011^2 + 0,003^2} = 0,185 \text{ bar} \end{aligned}$$

Kombinovaná nejistota se poté vyjádří podle vztahu 4.29

$$u_{c5} = \sqrt{u_{A5}^2 + u_{B5}^2} = \sqrt{0,008^2 + 0,185^2} = 0,185 \text{ bar}$$

Rozšířená nejistota se vyjádří podle vztahu 4.30.

$$U = k \cdot u_{c5} = 2 \cdot 0,185 = 0,371 \text{ bar}$$

Chyba měření e se vypočítá jako rozdíl nominálního tlaku a aritmetického průměru měřeného tlaku.

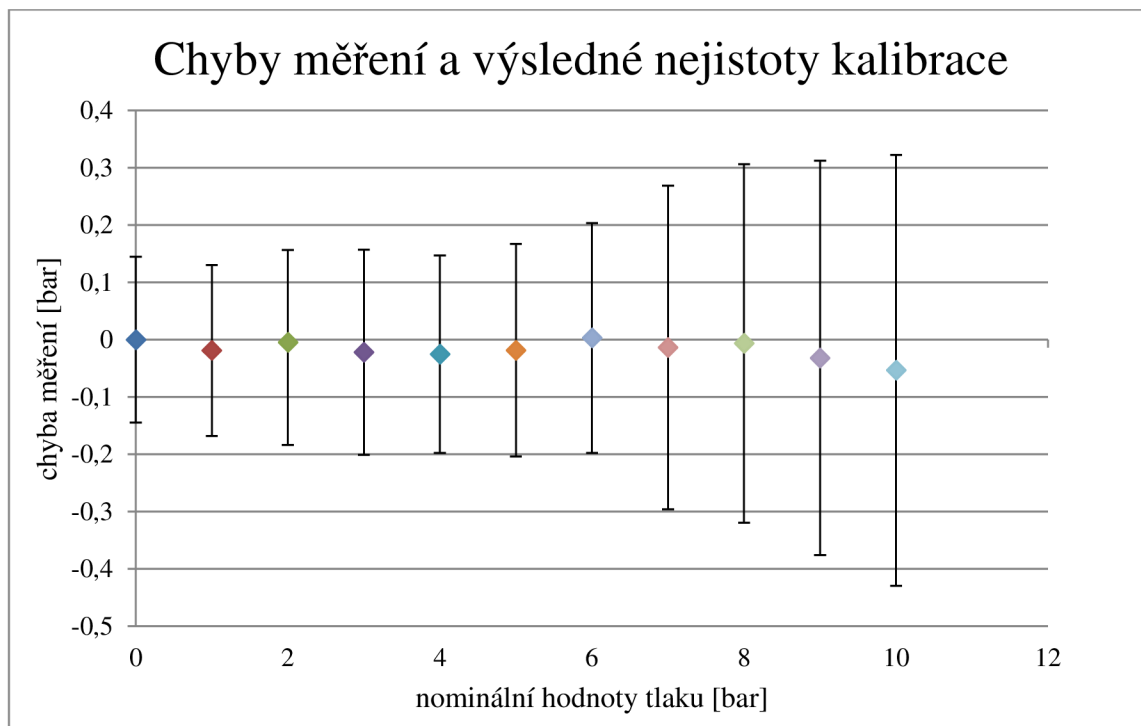
$$e_5 = x_5 - \bar{x} = 5 - 5,018 = -0,018 \text{ bar}$$

Tab. 5.3 Složky nejistoty typu B

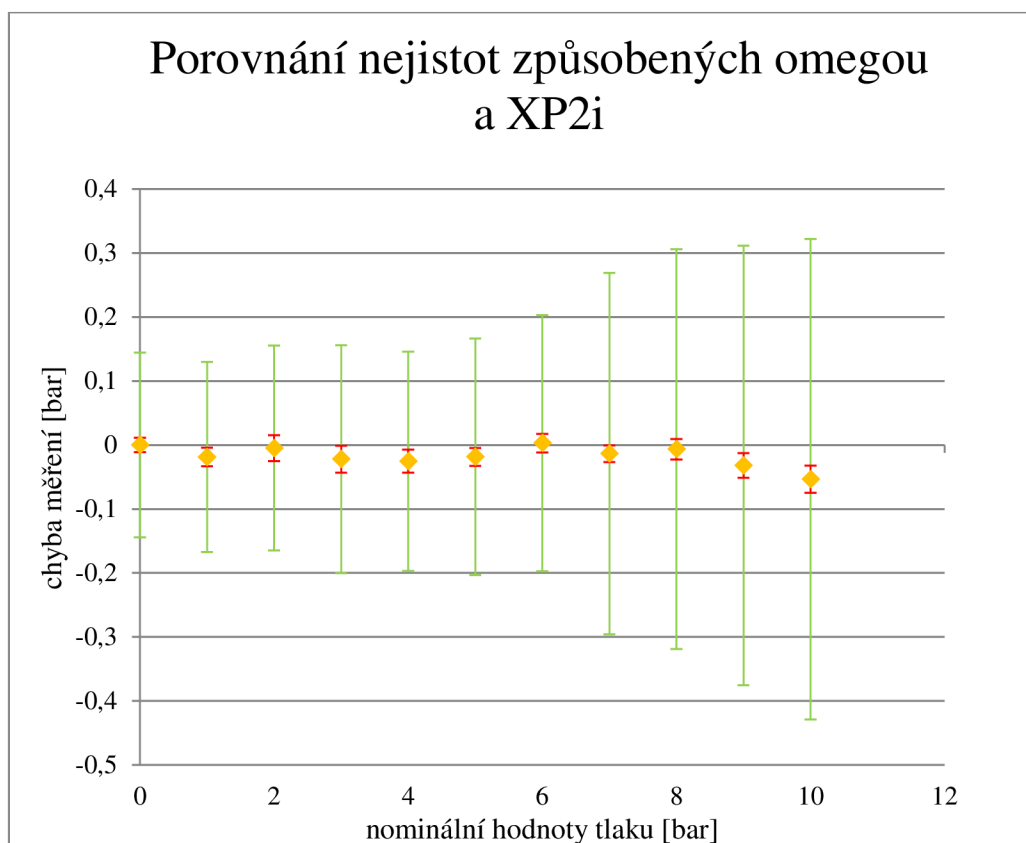
Nominální hodnota [bar]	Složky nejistoty typu B				
	u_{Bet}	u_{Bode}	u_{Bnula}	u_{Bop}	u_{Bhys}
0	0	0,144338	0	0,011258	0
1	0,034641	0,144338	0	0,011258	0,001636
2	0,069282	0,144338	0	0,011258	0,004138
3	0,103923	0,144338	0	0,011258	0,00433
4	0,092376	0,144338	0	0,011258	0,003849
5	0,11547	0,144338	0	0,011258	0,002598
6	0,138564	0,144338	0	0,011258	0,002021
7	0,242487	0,144338	0	0,011258	0,002983
8	0,277128	0,144338	0	0,011258	0,002983
9	0,311769	0,144338	0	0,011258	0,006736
10	0,34641	0,144338	0	0,011258	0,007409

Tab. 5.4 Výsledné vyhodnocení nejistot a chyby měření

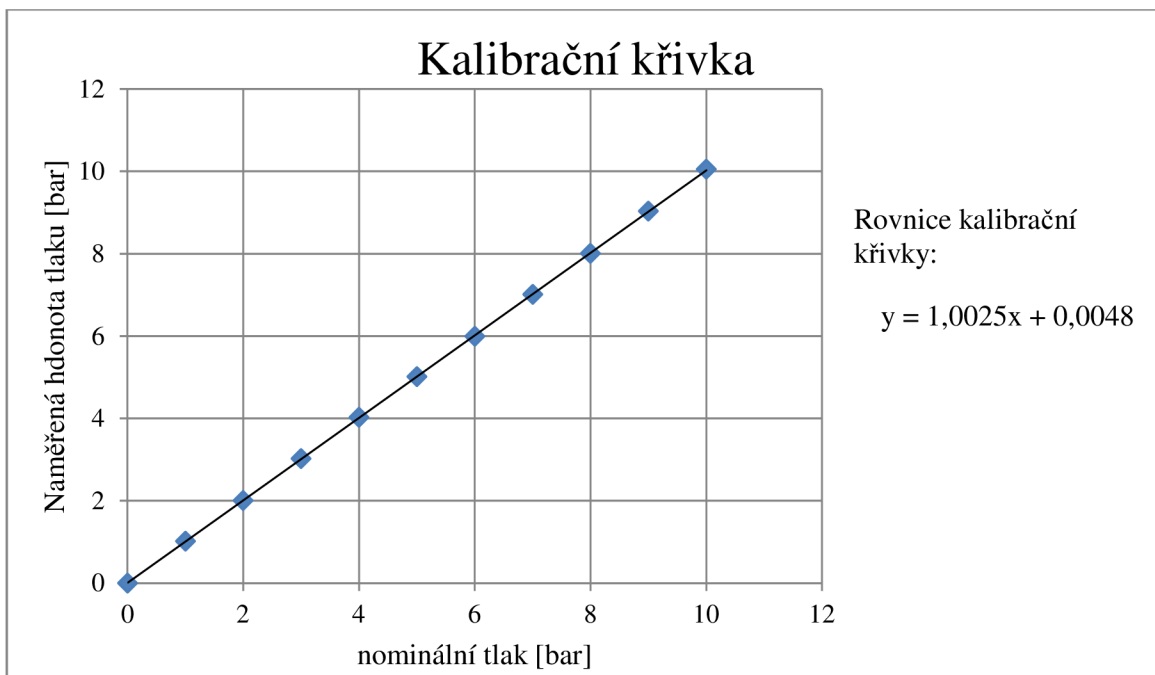
Nominální hodnota [bar]	u_A	u_B	u_C	U	e
0	0	0,144776	0,144776	0,289552	0
1	0,009196	0,148872	0,149155	0,298311	-0,01883
2	0,016204	0,160553	0,161368	0,322737	-0,00483
3	0,017058	0,178266	0,17908	0,358161	-0,02217
4	0,013471	0,17178	0,172307	0,344614	-0,02533
5	0,007969	0,185203	0,185374	0,370749	-0,0185
6	0,008976	0,20041	0,200611	0,401222	0,002833
7	0,005857	0,282434	0,282495	0,564989	-0,0135
8	0,010932	0,31268	0,312871	0,625743	-0,0065
9	0,014241	0,34381	0,344105	0,68821	-0,032
10	0,01622	0,37552	0,37587	0,75174	-0,0535



Obr. 5.7 Chyby měření a výsledné nejistoty kalibrace



Obr. 5.8 Porovnání nejistot způsobených etalonem a kalibrovaným přístrojem



Obr. 5.9 Kalibrační křivka

Výsledky kalibrace jsou zobrazeny na obr. 5.7 a dávají informaci o chování kalibrovaného tlakoměru Omega, jsou znázorněny chyby měření a k nim se vztahující kombinovaná nejistota u_C . Obr. 5.8 srovnává nejistoty způsobené jednotlivými přístroji. Je zřejmé, že nejistoty způsobené přesností a odečitelností tlakoměru Omega jsou majoritní složkou výsledné nejistoty úsečky zelené barvy, zatímco nejistoty přístroje XP2i jsou výrazně menší úsečky červené barvy. Tento výsledek je očekávaný vzhledem k přesnostem jednotlivých přístrojů. Na obrázku 5.9 je kalibrační křivka, která je vyjádření vztahu mezi nominální hodnotou tlaku a odpovídající naměřenou hodnotou tlaku. Kalibrační křivka poskytuje informaci o předpokládaném chování chyby měření v kalibrovaném rozsahu, nejde však o výsledek měření, protože nepřináší žádnou informaci o nejistotě měření.

5.3 Možnosti modelového pracoviště pro měření tlak

Modelové pracoviště pro měření tlaku slouží k seznámení studentů s problematikou měření tlaku, kalibrace tlakoměrů a zpracováním získaných výsledků. Studenti si praktickou cestou ověří výhody a nevýhody při používání digitálních a analogových tlakoměrů.

Zpracování naměřených výsledků je nedílnou součástí technických měření. Studenti získají povědomí o chybách měření, jejich zdrojích a možnostech jak je eliminovat nebo aspoň vyjádřit v podobě nejistot.

5.3.1 Komunikace s PC

Digitální referenční tlakoměr XP2i komunikuje s PC pomocí sériové linky RS-232. Model, který je použit v laboratoři, není vybaven možností ukládání naměřených dat do vlastní paměti, protože se jedná o starší model určený k propagačním účelům. Komunikace s PC je omezena na přenos aktuálních měřených hodnot z tlakoměru do PC.

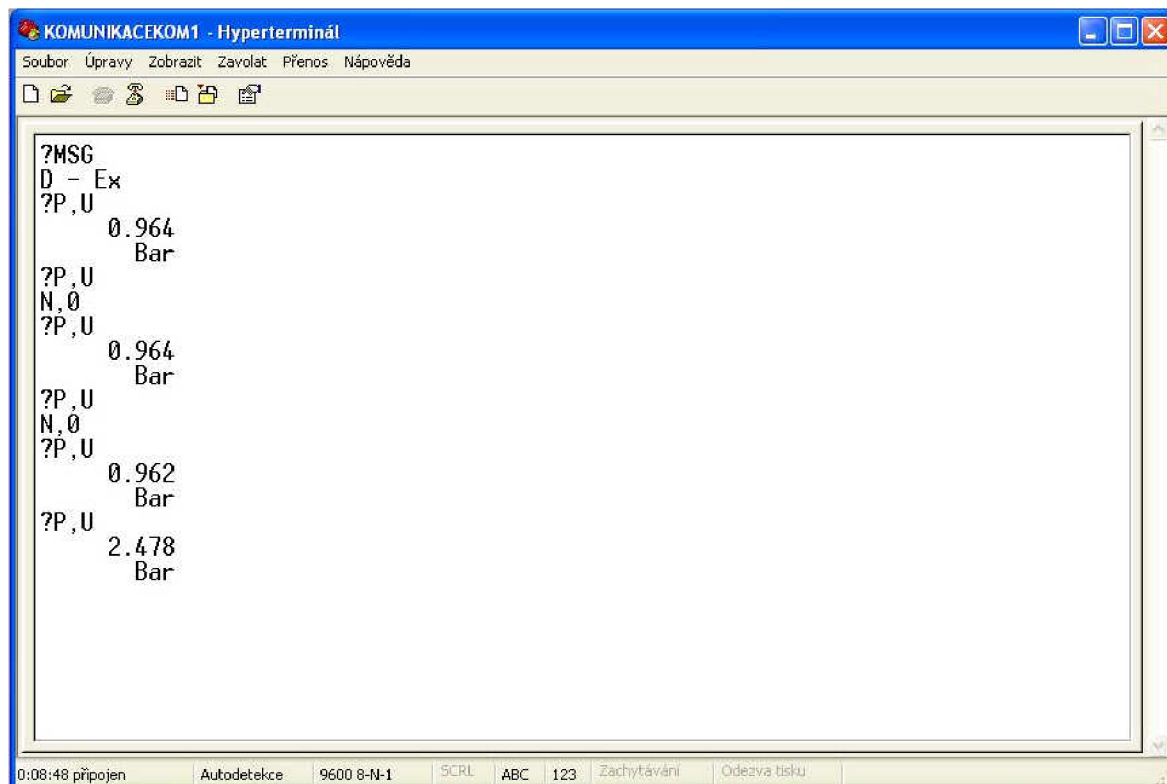
K přenosu dat je použit program Hyperterminal. Před zahájením komunikace je nutné Hyperterminal správně nastavit. Tlakoměr komunikuje portu com1, další nastavení sériového rozhraní je na Obr. 5.10. Poslední krok nastavení souvisí s odesíláním kódu ASCII. V záložce *Nastavení ASCII* je potřeba zatrhnout položku *Odesílat znaky konce řádků s kódem odřádkování*.

BAUD RATE (Přenosová rychlost)	PARITY (Parita)	DATA BITS (Počet bitů)	STOP BITS (Stop bitů)	FLOW CONTROL (Řízení komunikace)
9600	NONE (žádná)	8	1	NONE (žádné)

Obr. 5.10 Nastavení sériového rozhraní v Hyperterminalu

Po úspěšném nastavení může uživatel získávat data dotazováním pomocí příkazů. Všechny dotazy začínají otazníkem (?). Všechny hodnoty tlaku jsou rozděleny do dvou řádků; první obsahuje proměnnou hodnotu, druhý obsahuje název měřicí jednotky. Každý řádek je zarovnán doprava s pevnou šířkou pole 10 znaku. Desetinná tečka je vždy zahrnuta do hodnoty tlaku, i když není na tlakoměru XP2i zobrazena.

Příkaz *?P,U* je dotaz na aktuální hodnotu tlaku na tlakoměru. Seznam dalších příkazů je v příloze *programování_xp2i*.



Obr. 5.11 Komunikace přes Hyperterminal

Po dokončení měření se pak hodnoty jednoduše zkopírují do předpřipravené šablony *kalibrace sablona*, kde se dopočítají nejistoty a graficky znázorní výsledky. Šablona je k nalezení v přílohách.

5.3.2 Návrh úloh ke cvičení

Obsah, výsledky a závěry této práce mohou sloužit jako vzor pro plnění úkolů na modelovém pracovišti pro měření tlaku.

- Popište vlastnosti, princip a výhody kapalinových tlakoměrů
- Popište vlastnosti, princip a výhody deformačních tlakoměrů
- Používané snímače u digitálních tlakoměrů
- Důvody a využití kalibrace
- Popište možné zdroje nejistot na modelovém pracovišti
- Kalibrace tlakoměru podle vzoru v kapitole 5.2

6 Závěr

Tlak je jednou ze základních veličin používaných v technické praxi. Bez přesných a kvalitních informací o tlaku se nelze obejít. V mnohých systémech hraje tlak důležitou roli a při překročení určitých hodnot může způsobit vážné problémy a havárie.

V kapitole 2 jsem popisoval tlak, jeho jednotky, způsoby jeho měření a principy nejčastěji používaných přístrojů. Nejjednodušší přístroje pro měření tlaku jsou kapalinové tlakoměry, další velmi rozšířenou skupinou jsou tlakoměry deformační. V automatizované technice se používají digitální tlakoměry s elektricky citlivými členy.

Kapitola 3 se zabývá problematikou kalibrace, proč je kalibrace nutná a důležitá. Jsou tam popsány kalibrační náležitosti, používání etalonů jejich návaznost od mezinárodních etalonů přes státní, referenční pracovní etalony až po koncová měřidla. V kapitole 3.2 jsou zmíněny obecné postupy pro kalibraci tlakoměrů.

Chyby a nejistoty měření je téma kapitoly 4. Hovořím tam o zdrojích a klasifikaci chyb měření, o možnostech jejich korekcí a o nejistotách. Nejistoty jsou nedílnou součástí technických měření a je důležité vyhodnocovat správně. Zmiňuji tam rozdělení nejistot na nejistoty typu A a B, způsoby jejich vyhodnocování ve vztahu k měření tlaku.

Praktická část v kapitole 5 se zabývá kalibrováním analogového tlakoměru Omega pomocí digitálního tlakoměru XP2i. Úkol je koncipován jako modelové pracoviště, kde se je zkoumáno chování obou tlakoměrů a jsou vyhodnocovány jejich metrologické vlastnosti. Tlakoměr XP2i je výrazně lepší přístroj oproti tlakoměru Omega. Přesnost XP2i je 0,1% z měřené hodnoty, zatímco tlakoměr Omega má přesnost 3% z měřené hodnoty. Rozlišitelnost obou přístrojů rovněž diametrálně odlišná. Měření probíhalo v jednotkách bar, kdy XP2i rozlišuje 0,001 bar, zatímco tlakoměr Omega má velikost jednoho dílku 0,5 bar. Tyto skutečnosti výrazně ovlivnily výsledky. Hodnoty měření jsou zapsané v tabulce 5.2. Vzorové zpracování naměřených hodnot v textu platí pro nominální tlak $p = 5$ bar. Ostatní hodnoty byly zpracovány v excelovém sešitu kalibrační výpočty. Jednotlivé složky nejistoty Typu B pro všechny nominální tlaky jsou zapsány v tabulce 5.3. Výsledné celkové nejistoty typu A a B, kombinovaná nejistota u_C , rozšířená nejistota U a chyba měření je znázorněna v tabulce 5.4. Obrázek 5.7 ukazuje chyby měření s intervalem vymezeným celkovou kombinovanou nejistotou. Na obrázku 5.8 jsem porovnal výsledné nejistoty jednotlivých přístrojů a je zřejmé, že díky rozdílným přesnostem obou tlakoměrů, je podíl nejistot způsobených tlakoměrem Omega výrazně vyšší (zelené úsečky) než podíl nejistot způsobených tlakoměrem XP2i (červené úsečky). Výsledky uzavírá obrázek 5.9, kde je znázorněna kalibrační křivka.

Výsledky práce jsou uspokojivé a přináší dobrý přehled o metrologických vlastnostech obou tlakoměrů. Rovněž mohou posloužit jako vzor pro studenty, kteří si na modelovém pracovišti pro měření tlaku mohou vyzkoušet praktické měření tlaku, kalibraci a vyhodnocování nejistot pocházejících z různých zdrojů.

Seznam použité literatury

- [1] CHUDÝ, V.; Palencár, R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických velicín; 1. vydání Bratislava; Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.
- [2] SEKÉR, R. *Vyjadřování nejistot při kalibraci měřidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.
- [3] EURAMET. *Metrology - in short*. 3. edition. Lyngby: [Danish Fundamental Metrology], 2008. ISBN 978-879-8815-457. Český překlad. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/sborniky-aktualni>
- [4] EA Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers; [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/45273355/EA-10-17-Manometer-Calibration>
- [5] Návod XP2icz.pdf [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.dex.cz/produkty/crystal/referencni_tlakomer_xp2i.html
- [6] XP2i Brochure [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.transcat.com/PDF/XP2iN.pdf>
- [7] Omega PGU Series [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc_eng.asp?ref=PGU_Series&Nav=preg02
- [8] *Perry's chemical engineers' handbook*. 7th ed. Editor Robert H Perry, Don W Green, James O Maloney. New York: McGraw-Hill, c1997, 1 sv. (různé stránkování). Chemical engineering (McGraw-Hill). ISBN 00-704-9841-5.
- [9] VDOLEČEK, František. Technická měření VTM: 4 měření tlaku. [online]. s. 24 [cit. 2014-05-28].
- [10] RIPKA, P. Senzory síly a tlaku. [online]. 2010, s. 55 [cit. 2014-05-28].
- [11] VDOLEČEK, František. Technická měření VTM: 3 Nejistoty měření. [online]. s. 25 [cit. 2014-05-28].

Seznam příloh

1. Kalibrační výpočty
2. Kalibrační šablona
3. Omega PGU series datasheet
4. XP2i-bar Data Sheet
5. XP2i manual cz
6. programovani_xp2i