



Český institut pro akreditaci, o.p.s.
Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3

Celkem 49 stran

Zpracoval:
Ing. Martin Valenta

Datum zpracování:
18.10.2018

Plán standardizace – Program rozvoje metrologie 2018

Číslo úkolu: VII/5/18

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

Název úkolu:

„Podklad pro průběžné sjednocování výpočtu CMC v akreditovaných kalibračních laboratořích v oboru tlak“

Řešitel: Ing. Martin Valenta

Spoluřešitel: Ing. Josef Vojtíšek

Schválil: Ing. Milan Badal

Datum: 18.10.2018

Rozdělovník: 1× ÚNMZ
1× ČIA
2× oponenti

Výtisk č.:



NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN


Český institut pro akreditaci, o.p.s.
Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3

Celkem 49 stran

Zpracoval:
Ing. Martin Valenta


Datum zpracování:
18.10.2018

Tato strana je prázdná záměrně.


 NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

Obsah

1. ÚVOD	5
2. ZKRATKY A TERMÍNY POUŽITÉ V TEXTU	6
3. POPIS ŘEŠENÍ ÚKOLU TECHNICKÉHO ROZVOJE	7
3.1. Cíl úkolu	7
3.2. Východiska	7
3.3. Obecně k vlastnímu řešení	7
4. OBECNÁ PRAVIDLA PRO VYJADŘOVÁNÍ NEJISTOT A SESTAVENÍ ROZPOČTU NEJISTOT PRO STANOVENÍ CMC	9
5. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	11
5.1. Obecně	11
5.2. Zdroje nejistot měřidel používaných jako etalonů tlaku	11
5.2.1. Pístové tlakoměry	11
5.2.2. Kalibrátory / kontroléry tlaku, digitální tlakoměry	17
5.2.3. Převodníky tlaku a tlakové difference	18
5.2.4. Deformační tlakoměry	19
5.2.5. Měřidla elektrických veličin	20
5.3. Rozbor některých zdrojů nejistoty měření	21
5.3.1. Vliv teploty	21
5.3.2. Nejistota typu A (opakovatelnost) u měřidel tlaku, podmínka návaznosti	23
5.3.3. Drift etalonu	25
5.3.4. (Ne)linearita	26
5.4. Přístup k určování nejistoty měření podle [L1]	30
5.4.1. Deformační a digitální tlakoměry	30
5.4.2. Snímače a převodníky tlaku	32
5.4.3. Přístup ke zdrojům nejistoty vyplývajících z měřených hodnot	35
5.5. Návrh doporučení pro stanovení nejnižší udávané nejistoty v oboru tlak	37
5.5.1. Pístový tlakoměr a zdroje nejistot	37
5.5.2. Složky nejistot a nejnižší udávané nejistoty ostatních měřidel	37
6. PŘÍSTUP KE STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ (PŘÍKLAD)	40
6.1. Nejistota hmotnosti	40
6.2. Nejistota efektivní plochy pístu	41
6.3. Vliv tlakové deformace	41

	<p>Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3</p>	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

6.4.	Vliv tlakové deformace na efektivní plochu pístu.....	41
6.5.	Nejistota tíhového zrychlení.....	41
6.6.	Nejistota koeficientu teplotní roztažnosti	42
6.7.	Nejistota měření teploty	42
6.8.	Nejistota hustoty tlakového média	42
6.9.	Nejistota hustoty vzduchu	42
6.10.	Nejistota hustoty závaží.....	43
6.11.	Nejistota měření výstupního signálu DMM	43
6.11.1.	Přímé měření proudu	43
6.11.2.	Nepřímé měření proudu.....	43
6.12.	Vyhodnocení standardní nejistoty převodníku tlaku P1	44
6.13.	Vyhodnocení standardní nejistoty převodníku tlaku P2.....	45
7.	SHRNUTÍ.....	46
8.	ZÁVĚR	47
9.	POUŽITÁ LITERATURA	48


 <small>NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN</small>	<p>Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3</p>	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

1. Úvod

Aktuálně v ČR působí v různých oborech měření celkem 135 akreditovaných kalibračních laboratoří. Kalibrace v oboru tlak s různou mírou nejistoty nabízí 44 laboratoří. Další laboratoře na tomto poli jsou laboratoře zkušební, které tlak měří, celkem cca 130 laboratoří.


Lze se setkat s názorem, že nejsou dostatečně harmonizované postupy hodnocení, zda má AKL správně sestavený rozpočet nejistot, a není tedy zaručeno, že zveřejněná nejnižší udávaná nejistota je pro AKL opravdu dosažitelná a že při sestavování rozpočtu nejistot nebyl zanedbán žádný relevantní vliv.

Stejně jako v dalších oborech, i pro obor tlak je smyslem úkolu připravit odborné veřejnosti základní informace o vhodném způsobu sestavování rozpočtu nejistot, především pro účely stanovení nejnižší udávané rozšířené nejistoty a harmonizaci posuzování takto sestavených rozpočtů nejistot. V delším časovém horizontu se předpokládá postupné sjednocení základní filozofie těchto rozpočtů tak, že jednotlivé CMC laboratoře na nich postavené budou způsobilé ke vzájemnému porovnávání, takže jeho výsledky budou mít dostatečnou vypovídací schopnost a pro širokou veřejnost budou mít vyšší důvěryhodnost.

	<p>Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3</p>	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

2. Zkratky a termíny použité v textu

AC	střídavý (proud nebo napětí)
AKL	akreditovaná kalibrační laboratoř
DC	stejnoseměrný (proud nebo napětí)
digit	nejmenší odečitatelná číslice displeje
DMM	digitální multimetr
DUT	zkoušené zařízení (zde kalibrované měřidlo – device under test)
FS	rozsah měřidla, měřicí rozpětí (full scale)
MH	měřená hodnota
POA	příloha osvědčení o akreditaci
PT	pístový tlakoměr
RDG	měřená hodnota (čtení - reading)
span	nastavené měřicí rozpětí převodníku tlaku s nastavitelným rozpětím
TP	třída přesnosti
u_i	standardní kombinovaná nejistota měření
U_i	rozšířená standardní kombinovaná nejistota měření
CMC	kalibrační schopnost laboratoře
URL	maximální rozpětí převodníku tlaku s nastavitelným rozpětím

 NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

3. Popis řešení úkolu technického rozvoje

3.1. Cíl úkolu

Podrobný a výstižný návod pro zhodnocení všech příspěvků k nejistotě měření v oboru tlak, sjednocující jednotlivé složky, uvažované při rozpočtu nejistot a stanovování udávané CMC laboratoře.

3.2. Východiska

Záměr, cíl, koncepce i řešení úkolu vychází do značné míry z PRM VII/5/17. I proto je v tomto úkolu kladen důraz především na technickou stránku řešení, koncepční témata a vztah k systému akreditace se až na drobnosti od vydání závěrečné zprávy zmíněného úkolu nezměnil. Z toho důvodu jsou úvodní kapitoly pojaty podstatně stručněji.

Výsledek úkolu pak v rámci posuzování ČIA poslouží odborným posuzovatelům jako vodítko, na které prvky rozpočtu nejistot klást důraz a jak k nim přistupovat z hlediska významnosti pro danou, obvykle posuzovanou AKL.

A přestože norma ČSN EN ISO/IEC 17025:2018 za dodržení specifikovaných podmínek připouští neuvažovat nejistotu výsledku měření i v případě porovnávání výsledku se specifikacemi, stále je kvalifikovaný odhad nejistoty měření podstatným prvkem informace pro zákazníka, který řeší výběr laboratoře jako dodavatele kalibrace jeho měřidel.

3.3. Obecně k vlastnímu řešení


Tento úkol navazuje na úkoly PRM č. VII/5/09 a VII/5/17, jeho výstupem podklady pro sjednocení pohledu na vliv příspěvků k nejistotě měření tlaku jak ze strany odborné veřejnosti, tak i všech dalších zainteresovaných osob.

Cílovými skupinami řešení jsou


- pracovníci ČIA, o.p.s., především vedoucí a odborní posuzovatelé,
- kalibrační laboratoře, především akreditované kalibrační laboratoře,
- zkušební laboratoře, především akreditované zkušební laboratoře,
- zákazníci výše uvedených laboratoří,
- odborná veřejnost a zájemci o kalibrace v oboru tlak.

V rámci řešení úkolu

- byly využity Závěrečná zpráva k úkolu č. VII/5/09 z PRM 2009 a Závěrečná zpráva k úkolu č. VII/05/17 z PRM 2017,
- bylo provedeno základní rozčlenění měřidel tlaku,

	<p>Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3</p>	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

- sestaven přehled základních zdrojů nejistot měření tlaku včetně jejich složek,
- vytvořen typový příklad stanovení nejistoty měření a
- vytvořeny podklady pro školení příslušných pracovníků ČIA, o.p.s. a pro informování kalibračních, zkušebních a dalších laboratoří a pro odbornou veřejnost.

	<p>Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3</p>	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

4. Obecná pravidla pro vyjadřování nejistot a sestavení rozpočtu nejistot pro stanovení CMC

Mezi důležité dokumenty, ze kterých lze čerpat informace pro stanovování nejistot měření, můžeme počítat zejména dokumenty ILAC P14:01/2013 „Politika ILAC pro nejistoty při kalibraci“, JCGM 100:2008 „Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření) a EA 04/02 M:2013 „Vyjádření nejistoty měření při kalibraci“. Poslední dokument zařadil ČIA do svého akreditačního systému a interpretuje jej v dokumentu MPA 30-02-13 „Politika ČIA pro metrologickou návaznost výsledků měření“.

Další užitečné informace lze získat například z dokumentů ILAC G24:2007 „Pokyny pro stanovení kalibračních intervalů měřicích přístrojů“ a ILAC G08:03/2009 „Pokyny k uvádění shody se specifikací“ nebo z dokumentu EA 04/16 G:2003 „Směrnice EA o vyjadřování nejistoty v kvantitativním zkoušení“.

Od vydání zprávy z PRM č. VII/5/17 nedošlo ke změně obecných pravidla pro vyjadřování nejistot, zde proto odkazujeme především na jeho kapitulu 3. Nicméně i nadále platí, že


- 1) nejistota je neoddelitelnou vlastností výsledku měření,
- 2) nejistotu je třeba pro každé měření vypočítat samostatně s ohledem na všechny proměnlivé podmínky měření;
- 3) hodnota nejnížší udávané nejistoty, jako součásti CMC dané laboratoře, je vyjádřením předpokládané nejlepší hodnoty nejistoty, která je zákazníkům k dispozici za normálních podmínek v souladu s popisem rozsahu akreditace dané laboratoře udělené signatářem dohody ILAC nebo v souladu s informacemi uveřejněnými v databázi klíčových porovnání BIPM (KCDB), vedené CIPM MRA.

Předchozí text naznačuje určitou změnu pohledu na běžně užívaný pojem CMC. Na základě změny textu v normě ČSN EN ISO/IEC 17011:2018, zdůrazněné připomínkou, která byla vůči ČIA vznesena v průběhu evaluace, je nutné vzít v úvahu, že pojem Calibration and Measurement Capability, známý pod zkratkou CMC, není totožný s nejnížší udávanou nejistotou na příloze osvědčení o akreditaci. Přestože se tato změna ještě většinou do obdobných dokumentů ostatních akreditačních orgánů v rámci EA nepromítla, ČIA připomínku akceptoval a zavedl opatření, kterými byl zpřesněn soulad s požadavky normy ČSN EN ISO/IEC 17011:2018, které jsou definovány takto:

7.8.3 Rozsah akreditace musí přinejmenším obsahovat:

c) Pro kalibrační laboratoře:


- kalibrační a měřicí schopnost (CMC) vyjádřenou jako:
 - měřený parametr nebo referenční materiál,
 - metodu nebo postup kalibrace nebo měření a typ přístroje nebo materiálu, který je kalibrován nebo měřen,
 - rozsah měření a, kde je to možné, další parametry, např. kmitočet přiloženého napětí, a
 - nejistotu měření.

 NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

Je zřejmé, že za CMC lze de facto označit každý řádek tabulky POA (bez jeho pořadového čísla – to slouží pouze lepší orientaci v POA a k usnadnění komunikace), protože teprve celý řádek naplňuje výše uvedenou definici. Nadále není možné jako CMC označovat pouze sloupec nejistoty, jeho název byl proto upraven na „Nejnižší udávaná rozšířená nejistota měření“, který plně vystihuje význam a obsah tohoto sloupce. V běžné komunikaci pak lze používat zkrácený výraz nejnižší nejistota. CMC je pak přiřazeno vždy k celé tabulce pro daný obor, protože právě celá tabulka popisuje schopnost laboratoře pro daný obor.

Stabilní naopak zůstává náhled na uvádění hodnoty pro jednotlivé podrozsahy oboru kalibrací, podrobnější informace jsou také uvedeny ve zprávě z úkolu PRM č. VII/5/17.

Výše uvedené změny a další požadavky se promítly do návrhu nové šablony POA pro kalibrační laboratoře, kterou ČIA začal využívat v souvislosti s přechodem na posuzování podle revidované normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2018. Doplněním informace o principu měření tak zákazník dostává do ruky ucelený přehled schopností dané AKL. Obor tlak je tak dalším oborem, ve kterém budou postupně informace v POA sjednocovány, a tudíž budou navzájem porovnatelné pro různé AKL.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

5. Dosažené výsledky

5.1. Obecně

Technická část úkolu je zpracována pro nejběžnější kalibrace měřidel tlaku, která se objevují v předemných akreditovaných laboratořích – kalibrace deformačních tlakoměrů, číslicových tlakoměrů (obdobně měřících řetězců tlaku) a měřících převodníků tlaku (unifikovaný výstupní signál) nebo snímačů tlaku (nízkoúrovňový výstupní signál). Pro uvedené kalibrace je předpokládáno použití následujících etalonových měřidel:

- pístové tlakoměry,
- kalibrátory tlaku, referenční digitální tlakoměry,
- převodníky tlaku a tlakové difference,
- referenční deformační tlakoměry,

Pro stanovení nejistoty kalibrace (měření) tlaku si definujeme základní zdroje a složky dílčích nejistot, ze kterých je také určena měřicí schopnost laboratoře CMC. Protože metodika kalibrace tlakoměrů se liší v závislosti na očekávané přesnosti kalibrovaného měřidla, obdobným způsobem se liší i důležitost jednotlivých složek nejistoty měření, které zahrnujeme do CMC. Pro jednotlivé metodiky je předložen návrh přístupu ke zpracování CMC laboratoře v závislosti na kalibrovaném měřidle (DUT), použitém etalonu, způsobu měření, ovlivňujících podmínkách apod. Předmětem úkolu nejsou měřidla vakua, speciální měřidla tlaku a měřidla extrémně vysokých tlaků.

5.2. Zdroje nejistot měřidel používaných jako etalonů tlaku


5.2.1. Pístové tlakoměry

V katalogových listech výrobců pístových tlakoměrů (PT) je obvykle uváděna přesnost měřidla v procentech s tím, že se setkáváme s různým vyjádřením, např. $\pm 0,015$ % odečtu (RDG), $\pm 0,005$ % rozsahu či měřicího rozpětí (FS) nebo uvedením hodnoty ($\pm 0,008$ %) bez určení, k čemu jsou procenta vztažena. V některých případech je uvedena i kombinovaná přesnost absolutní a relativní složky, např. $\pm (0,025 \text{ kPa} + 0,005 \text{ \% RDG})$. Standardní specifikace přesnosti PT, která je uváděna na kalibrační listy, rozděluje měřicí rozpětí na dvě části v souladu s [L29]:

- **Přesnost z odečtu** platí v tzv. základním měřicím rozsahu (rozmezí od 10 % do 100 % měřicího rozpětí tlakové měřky, např. $\pm 0,015$ % RDG)
- Pro hodnoty tlaku v tzv. pomocném měřicím rozsahu (pod 10 % rozsahu tlakové měřky) je údaj přesnosti konstantní a je definován jako procento z hodnoty odpovídající 10 % plného rozsahu tlakové měřky (např. $\pm 0,015$ % z 10 % FS).

Při kalibraci měřidel můžeme pracovat s pístovým tlakoměrem trojím způsobem:

- V základním i pomocném měřicím rozsahu pracujeme se jmenovitými hodnotami tlaku, které jsou vyznačeny na závaží (na kalibračním listu je uvedena odpovídající nejistota nastaveného tlaku).

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

- V základním i pomocném měřicím rozsahu pracujeme s hodnotami tlaku, které jsou vypočteny ze skutečných hmotností závaží a efektivní plochy pístu (na kalibračním listu je opět uvedena odpovídající nejistota nastaveného tlaku).
- V základním i pomocném měřicím rozsahu pracujeme s hodnotami tlaku, které jsou vypočteny ze skutečných hmotností závaží a efektivní plochy pístu a nejistota nastaveného tlaku je počítána z dílčích nejistot efektivní plochy, hmotnosti závaží a všech ovlivňujících veličin.

Na sílu vytvořenou závažími, a tím i na přesnost PT, má přímý vliv hodnota tíhového zrychlení, která se mění s geografickou polohou. Každý pístový tlakoměr může být výrobcem justován na hodnotu tíhového zrychlení v místě použití. Standardně se PT justují na normální tíhové zrychlení $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$. Na kalibračním listu se vždy uvádí hodnota tíhového zrychlení, pro kterou byl PT vyhodnocen.

Pro výpočet hodnoty tlaku generovaného na výstupu pístového tlakoměru platí vztah:

$$p = \frac{\sum_i m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) + \gamma C}{A_e \left(1 + (\alpha_p + \alpha_c)(T - T_{REF}) \right)} \quad (1)$$

$A_e \text{ (m}^2\text{)}$ = efektivní plocha pístu při referenční teplotě, uvedena na kalibračním listu, může být funkcí měřeného tlaku (u vyšších tlaků), nejistota plochu je největší zdroj celkové nejistoty pístového tlakoměru

$m_i \text{ (kg)}$ = hmotnost pístu a použitých závaží, získáme ji opět z kalibračního listu, nejistota hmotnosti je druhým největším zdrojem celkové nejistoty pístového tlakoměru

$g \text{ (m}\cdot\text{s}^{-2}\text{)}$ = tíhové zrychlení; měla by být známá místní hodnota v laboratoři, respektujeme přepočít (viz hustota závaží) i nejistotu změřené hodnoty

$\rho_a \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$ = hustota vzduchu obklopujícího závaží (cca $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

$\rho_{mi} \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$ = hustota materiálu závaží, významnost nejistoty hustoty musíme zvážit při konkrétní kalibraci, měla by být respektována při kalibraci hmotnosti závaží, skutečnou hmotnost závaží při aktuálních podmínkách ve vazbě na podmínky referenční lze určit ze vzorce:

$$m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) = m_R g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mR}} \right) \quad (2)$$

kde referenční hodnoty mají index R , aktuální index i . Pokud se navíc liší i hodnota tíhového zrychlení oproti hodnotě uvedené na kalibračním listu, je třeba tuto skutečnost ve vzorci respektovat.

Vztah v závorkách $(1 - \rho_a/\rho_m)$ = korekce na vztlak (150 ppm při měření přetlaku, nulová při měření absolutního tlaku); pro zjištění hustoty vzduchu musíme měřit barometrický tlak, teplotu okolí a relativní vlhkost vzduchu

$\gamma \text{ (N}\cdot\text{m}^{-1}\text{)}$ = povrchové napětí



Český institut pro akreditaci, o.p.s.
Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3

Celkem 49 stran

Zpracoval:
Ing. Martin Valenta

Datum zpracování:
18.10.2018

C (m) = obvod pístu

γ_C = vliv povrchového napětí je nulový pro plynné médium. U pístu o průměru 10 mm v oleji je povrchové napětí ekvivalentní hmotnosti 30 mg.

α_p, α_c (K^{-1}) = teplotní koeficienty materiálu pístu a válce (jestliže je rozdíl teplot $T - T_{REF} = 1$ K, nepřesahuje teplotní vliv 10 ppm, významný může být při teplotě značně odlišné od referenční, pro identický materiál pístu a válce bývá za referenčních podmínek < 1 ppm).

T ($^{\circ}C$) = teplota pístové měřky

T_{REF} ($^{\circ}C$) = referenční teplota (měřidla teploty musí mít platnou návaznost, nejistota $0,1$ $^{\circ}C$ generuje nejistotu 1 ppm hodnoty tlaku)

Vliv rozdílu referenčních úrovní

Jestliže při kalibraci není měřicí rovina etalonu a kalibrovaného měřidla ve stejné výšce, je údaj měřidla ovlivněn hydrostatickým tlakem použitého média, který odpovídá rozdílu výšek měřicích rovin (referenčních úrovní). U pístových tlakoměrů je někdy obtížné dodržet referenční úroveň na stejné výšce (viz obr. 1). Skutečný tlak měřidla můžeme vyjádřit jako:

$$p_T = p_{PG} - (\rho_f - \rho_a)gh \quad \text{Korekce na rozdíl referenčních úrovní} \quad (3)$$

h (m) = rozdíl referenčních úrovní mezi kalibrovaným měřidlem a pístovým tlakoměrem,

ρ_f ($kg \cdot m^{-3}$) = hustota použitého média generujícího tlak,

ρ_a ($kg \cdot m^{-3}$) = hustota okolního prostředí.

Pro **plynná** média odpovídá 1 cm výšky h hodnotě do 1 ppm velikosti měřeného tlaku. Nejistota rozdílu úrovní je zřídka významná. Pro **kapalná** média odpovídá 1 mm rozdílu tlaku cca 9 Pa. Korekce a nejistota rozdílu referenčních úrovní h a hustoty ρ_f jsou významné pro tlaky $p < 10$ MPa, méně významné pro vysoké tlaky.

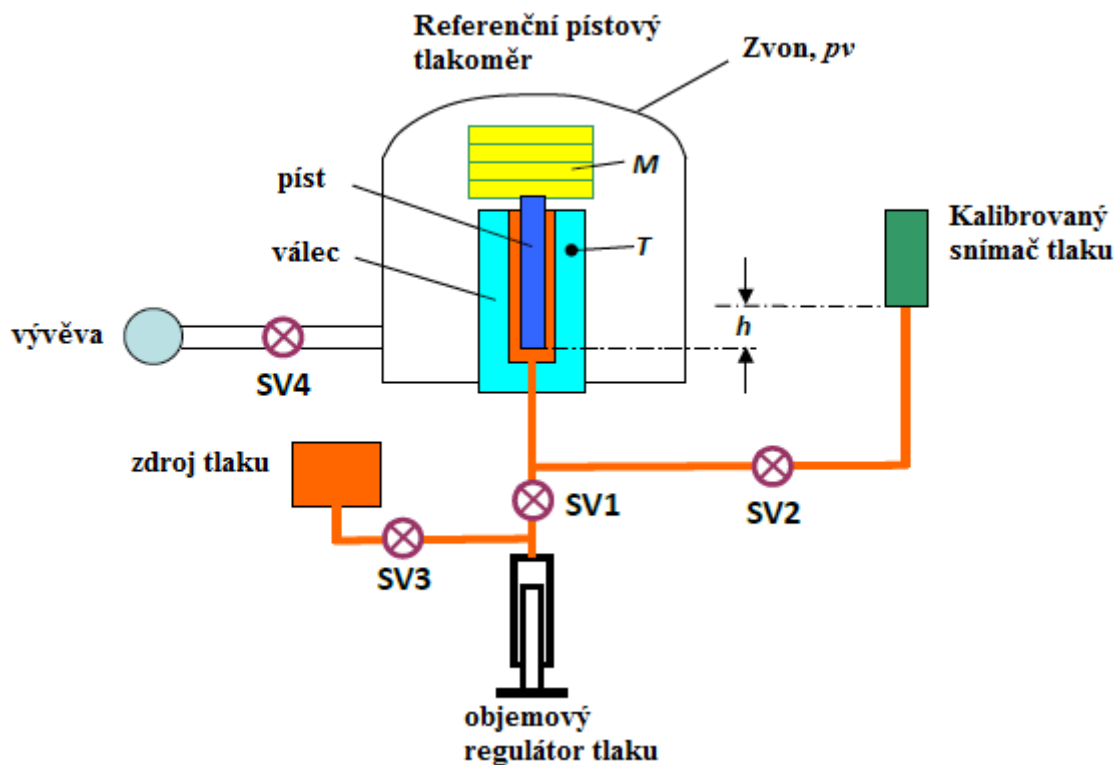
Skutečný tlak generovaný pístovým tlakoměrem na kalibrovaném měřidle lze tedy psát jako:

$$p_T = \frac{\sum_i m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right) + \gamma C}{A_e \left(1 + (\alpha_p + \alpha_c)(T - T_{REF})\right)} + p_V - (\rho_f - \rho_a)gh \quad (4)$$

Nejistoty typu B při použití pístového tlakoměru můžeme tedy shrnout do rovnice:

$$u_B^2(p_T) = u_{A_e}^2 + u_M^2 + u_{\rho_a}^2 + u_{\rho_M}^2 + u_{\gamma}^2 + u_C^2 + u_g^2 + u_a^2 + u_T^2 + u_{\rho_f}^2 + u_h^2 + u_{p_V}^2 \quad (5)$$

Nejistota efektivní plochy a hmotnosti závaží je obvykle nejvýznamnější, vliv povrchového napětí naopak obvykle zanedbatelný. Nejistota tíhového zrychlení ovlivňuje přímo nejistotu měřeného tlaku. Jedno procento nejistoty hustoty vzduchu přispívá v přetlakovém módu hodnotou 1,3 ppm k nejistotě měřeného tlaku.



Obr. 1: Rozdíl referenčních úrovní u pístového tlakoměru

Nejistota efektivní plochy pístu u_{A_e} je uvedena na kalibračním listu pístového tlakoměru a tvoří obvykle největší složku nejistoty. Citlivostní koeficient pro přepočítání nejistoty plochy na nejistotu tlaku je:

$$\frac{\partial p_T}{\partial A_e} = -\frac{p_T}{A_e} \quad (6)$$


Nejistota hmotnosti pístu a závaží u_{MR} je opět uvedena na kalibračním listu závaží (pístového tlakoměru). Předpokládáme korelaci složek, proto při stanovení nejistoty několika použitých závaží uvažujeme raději součet nejistot jednotlivých závaží než součet druhých mocnin:

$$u_{MR} = u_{M1} + u_{M2} + \dots + u_{MN} \quad (7)$$

Přitom potřebujeme vědět, zda byla nejistota hustoty závaží zahrnuta do nejistoty hmotnosti uvedené na kalibračním listu. Citlivostní koeficient pro přepočítání na nejistotu tlaku je:

$$\frac{\partial p_T}{\partial M} = \frac{p_T}{M} \quad (8)$$

Nejistota hustoty vzduchu u_{ρ_a} – vyplývá z nejistoty měření barometrického tlaku $u_{p_{AMB}}$ a z nejistoty měření teploty okolí $u_{T_{AMB}}$. Její hodnota je obvykle menší než $0,01 \text{ kg/m}^3$ a tato

 NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

hodnota způsobí nejistotu tlaku o velikosti 1,3 ppm hodnoty. Citlivostní koeficient pro přepočet na nejistotu tlaku je:

$$\frac{\partial p_T}{\partial \rho_a} = -\frac{p_T}{\rho_m} + gh \quad (9)$$

kde první sčítanec je korekce na vztlak a druhý je korekce na rozdíl referenčních úrovní. Pro absolutní tlak je citlivostní koeficient roven nule.

Nejistota hustoty hmotnosti závaží $u_{\rho M}$ – podle [L30] se uvažuje pro nerezovou ocel hodnota $u_{\rho M} = 70 \text{ kg/m}^3$, pokud není určena měřením. Při měření absolutního tlaku představuje uvedená nejistota 1,3 ppm hodnoty tlaku, při měření přetlaku bývá ignorována. Citlivostní koeficient předpokládá nejistotu hustoty nezahrnutou při kalibraci hmotnosti, přičemž kalibrace hmotnosti byla provedena při atmosférickém tlaku. Pro kalibraci přetlaku je citlivostní koeficient definován:

$$\frac{\partial p_T}{\partial \rho_M} = p_T \frac{(\rho_a - \rho_{a,cal})}{\rho_M^2} \quad (10)$$

Při kalibraci absolutního tlaku platí pro citlivostní koeficient:


$$\frac{\partial p_T}{\partial \rho_M} = -p_T \frac{\rho_{a,cal}}{\rho_M^2} \quad (11)$$

Hustota $\rho_{a,cal}$ je hodnota hustoty vzduchu v době kalibrace hmotnosti závaží. Rozdíl mezi oběma vzorci za stejných podmínek je cca $0,03 \text{ kg/m}^3$, citlivostní koeficient je větší při měření absolutního tlaku. Jestliže byla nejistota hustoty závaží zahrnuta při kalibraci závaží, uvažujeme ji pro měření absolutního tlaku jako nulovou, abychom zabránili dvojímu zahrnutí do celkové nejistoty. U měření přetlaku bychom si měli vyžádat nejistotu hmotnosti bez nejistoty hustoty závaží.

Nejistota tíhového zrychlení u_g může mít významnější vliv než odlehlost referenčních úrovní. Hodnota tíhového zrychlení, pro kterou byl pístový tlakoměr vyhodnocen, je vždy uvedena na kalibračním listu. Jestliže je místní tíhové zrychlení změřeno, může nejistota dosahovat $u_g = 0,2 \text{ ppm}$; u hodnoty neměřené je nejistota podstatně větší. Citlivostní koeficient je definován jako:

$$\frac{\partial p_T}{\partial g} = \frac{p_T}{g} \quad (12)$$

Nejistota teplotního koeficientu a měření teploty u_{α} & u_T – nejistota teplotního koeficientu se často odhaduje ve výši 6 % jeho hodnoty. Teplotní vliv je pochopitelně minimalizován, když je pracovní teplota co nejbližší teplotě referenční. Citlivostní koeficient nejistoty teplotního koeficientu je určen jako:

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

$$\frac{\partial p_T}{\partial \bar{\alpha}} = -p_T(T - T_{REF}) \quad (13)$$

Pro citlivostní koeficient nejistoty teploty platí:

$$\frac{\partial p_T}{\partial T} = -p_T \bar{\alpha} \quad (14)$$

kde $\bar{\alpha}$ je střední hodnota teplotního koeficientu pístu a pouzdra tlakové měřky.

Nejistota hustoty média u_{ρ_f} – u plynného média je nevýznamná, u kapalných médií se předpokládá ve výši 1 % hustoty, pokud není měřena. Vliv eliminujeme minimalizací rozdílu referenčních úrovní h . Při použití oleje generuje rozdíl $h = 0,001$ m přídatný tlak 10 Pa. Tlak může být přičítán nebo odečítán od jmenovité hodnoty podle toho, zda je etalon výš nebo níž než kalibrované měřidlo. Pro tlak nad 10 MPa je vliv nejistoty hustoty nevýznamný. Pro citlivostní koeficient platí:

$$\frac{\partial p_T}{\partial \rho_f} = -gh \quad (15)$$

Nejistota rozdílu referenčních úrovní u_h – při měření plynného média obvykle nevýznamné, při použití kapalného média jde o obdobu předchozího odstavce. Pro citlivostní koeficient platí:


$$\frac{\partial p_T}{\partial h} = -(\rho_f - \rho_a)g \quad (16)$$

Nejistota měření zbytkového tlaku pod zvonem pístového tlakoměru u_{pV} – přichází v úvahu při kalibraci absolutních snímačů tlaku, kdy hodnota etalonového tlaku je nastavována proti evakuovanému prostoru pod zvonem pístového tlakoměru. Jestliže hodnota zbytkového tlaku pod zvonem je např. $p_V = 2$ Pa a nejistota měření např. vakuovou Piraniho měrkou je $u_{pV} = 0,5$ % z hodnoty p_V , je to významné pro měření absolutních tlaků menších než 10 kPa. Protože jde o přímé měření tlaku, je citlivostní koeficient jednoduchý:

$$\frac{\partial p_T}{\partial p_V} = 1 \quad (17)$$

Mezi pístem a pouzdem pístového tlakoměru je ideální vůle o velikosti několika desetin μm , která zaručuje volnou rotaci pístu. U vyšších tlaků může být píst rovnoměrnou zátěží tlakového média rozměrově deformován. Pro velikost plochy pístu ve vzorci (4) pak platí:

$$A_e = A_0(1 + b_1 p) \quad (18)$$

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

kde A_0 je plocha pístu při barometrickém tlaku a referenční teplotě, b_1 je koeficient tlakové deformace a p jmenovitá hodnota tlaku. U pístových tlakoměrů, pracujících ve oblasti vyšších tlaků, je koeficient b_1 uvedený na kalibračním listu včetně jeho nejistoty. Citlivostní koeficient pro výpočet nejistoty efektivní plochy určíme jako:

$$\frac{\delta A_e}{\delta b_1} = A_0 p \quad (19)$$

Protože zahrnutí všech složek nejistot ovlivňujících veličin je u pístových tlakoměrů poměrně pracné, v kap. A.5.8 [L29] najdeme zjednodušující přístup. Do součtu čtverců složek nejistoty jsou zahrnuty dvě největší (nejistota efektivní plochy a hmotnosti, obě vyjádřeny relativně) a ostatní vlivy respektuje desetiprocentní navýšení součtu:

$$U_{(k=2)} = 2 \cdot \sqrt{1,1 \cdot (u_{Aef}^2 + u_M^2)} \quad (20)$$

5.2.2. Kalibrátory / kontroléry tlaku, digitální tlakoměry

U digitálních měřidel tlaku používáme nejčastěji dva typy etalonových měřidel:

- automatický kalibrátor (kontrolér) tlaku, který na základě připojení externího zdroje tlaku automaticky nastavuje zvolený tlak s požadovanou stabilitou a deklarovanou přesností,
- přesný digitální tlakoměr, který slouží pouze k indikaci hodnoty, tlak v systému musí být nastaven samostatným zdrojem tlaku.

Přesnosti **tlakových kalibrátorů** jsou uváděny podobným způsobem jako specifikace digitálních multimetrů (DMM). Jedná se o kombinace absolutních i relativních složek hodnoty veličiny nebo má specifikace vztah k rozlišení digitálního údaje. Příklady specifikací kalibrátorů tlaku jsou:

±(XX ppm RDG + XX ppm FS)

±(XX % RDG + XX % FS)

±(XX ppm RDG + XX digit)


±(XX % RDG + XX digit)

±(XX ppm RDG + XX Pa)

±(XX % RDG + XX Pa)

±(XX % RDG nebo XX % FS) – platí větší z hodnot ... apod.

Kromě základní (roční) specifikace přesnosti je třeba posoudit i ostatní ovlivňující veličiny uvedené v úplné specifikaci měřidla. Použití roční specifikace měřidla má plné oprávnění v případě, že i kalibrační lhůta odpovídá jednomu roku. Digitální měřidla mají často dvouletou kalibrační lhůtu. V tom případě musí být platnost roční specifikace potvrzena výsledky kalibrace, u nových měřidel je možné počítat s hodnotou roční specifikace zvýšenou o (10 až 20) %. Příklad úplné specifikace kalibrátoru tlaku s potenciálními složkami nejistoty typu B si ukážeme na měřidle FLUKE 6270A s modulem absolutního tlaku PM 500, rozsahem

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

tlaku do 2 MPa, referenčním kompenzovaným rozsahem teplot (18 až 28) °C a pracovním rozsahem teplot (15 až 35) °C:

Přesnost = roční přesnost modulu ... 0,01 % RDG nebo 0,005 % FS (platí větší z hodnot)

Drift = roční drift dolní meze měření ... 0,015 % FS

Vliv teploty prostředí: teplotní koeficient v rozsahu (15 až 18 resp. 28 až 35) °C ... 0,003 % FS/°C

Při použití absolutního modulu k měření relativního tlaku je od měřené hodnoty odečítán barometrický tlak, který měří samostatný interní snímač tlaku, tzv. **barometrická reference**. U zmíněného měřidla je nutné počítat s maximální chybou dynamické barometrické reference ve výši ±7 Pa.

Při kalibraci běžných komerčních měřidel tlaku a při kalibracích měřících řetězců tlaku jsou velmi oblíbenými referenčními měřidly **kompaktní přesné digitální tlakoměry**, jejichž tvar, provedení i způsob připojení mnohdy připomíná tlakoměry deformační. Jejich vlastnosti jsou přizpůsobeny očekávanému použití v širokém rozmezí ovlivňujících veličin, především teploty. Typickou specifikaci si můžeme ukázat na příkladu digitálního tlakoměru CRYSTAL XP2i:

Přesnost: 0 až 20 % měřicího rozpětí přetlaku ... ±0,02 % FS

20 % až 110 % měřicího rozpětí přetlaku ... ±0,1 % RDG


Podtlak: (0 až -1) bar ... ±0,25 % FS (za hodnotu FS je v tomto případě považován tlak 1 bar)

Rozlišení displeje: 5½ digitu

Podle údaje výrobce zahrnuje uvedená specifikace celkový vliv linearity, hystereze, opakovatelnosti, teplotní vliv v celém pracovním rozsahu teplot (-10 až 50) °C a stability během jednoho roku. S tlakoměrem je dodáván kalibrační list, ve kterém je uvedeno měření při třech teplotách v rámci pracovního rozsahu teplot. Jestliže je měřidlo (především při práci mimo laboratoř) vystaveno významným změnám v podmínkách prostředí, musí být po každé změně vynulováno, zatíženo maximálním požadovaným tlakem a po odlehčení se musí indikace vrátit do nulového stavu. Z této informace je patrné, jak důležité je prostudování podmínek použití každého měřidla, které garantují přesnost měření zahrnutou do výpočtu nejistoty resp. CMC. Při výpočtu nejistot měření sice pracujeme s údaji výrobce, ale speciálně u takto široce pojatých specifikací musíme dodržet i podmínky, za kterých je specifikace deklarována. Nejde tedy jen o dodržení podmínek prostředí, ale také o způsob použití konkrétního typu měřidla.

5.2.3. Převodníky tlaku a tlakové difference

Ve formě etalonového měřidla se převodníky tlaku nepoužívají tak často jako digitální tlakoměry, nicméně vytvoření kompaktní sestavy tlakového převodníku s vhodným panelovým měřidlem elektrického signálu může být při stejné přesnosti ekonomicky zajímavější než digitální tlakoměr (kalibrátor). U inteligentních převodníků lze navíc využít komunikátor, který umožňuje měření elektrického výstupního signálu stejně jako měření tlaku ve fyzikálních jednotkách nebo v procentech zátěže. Příklad složek nejistot si můžeme ukázat na specifikaci **převodníku tlaku JSP Jičín, model D2610** s přesností 0,1 % FS. Jde o inteligentní snímač s proudovým (4 mA až 20 mA) nebo napěťovým (1 Važ 5 V) unifikovaným výstupním

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

signálem, přestavitelným měřicím rozpětím v rozsahu (10 až 100) % FS, referenčním rozmezím teplot (23 ± 5) °C, měřicím odporem 250 Ω a napájením 24 V_{DC}.

Maximální chyba snímače: $\leq \pm 0,1$ % měřicího rozpětí (v rozmezí ± 10 % až ± 20 % maximálního rozpětí je maximální chyba snímače... $\leq \pm 0,04$ % x max. rozpětí / rozpětí rozsahu)

Nelinearita: $\leq \pm 0,1$ % rozpětí

Hystereze: $\leq \pm 0,1$ % rozpětí

Vliv napájecího napětí: $\leq \pm 0,005$ % rozpětí / V

Vliv teploty okolí na přesnost měření:

Chyba dolní meze rozsahu: $< \pm 0,6$ % max. rozpětí v rozsahu teplot (-20 až +85) °C (odpovídá cca 0,006 % / °C)

Chyba rozpětí: $< \pm 0,8$ % nastaveného rozpětí v celém rozsahu teplot (-20 až +85) °C (odpovídá cca 0,008 % / °C)

Dlouhodobá stabilita: $\leq \pm 0,1$ % max. rozpětí za 1 rok

Převodníky tlakové diference se primárně používají k měření tlakových ztrát při měření průtoku, ale malé rozsahy diferencí lze s výhodou použít pro měření velmi nízkých tlaků (podtlaků) proti barometrickému tlaku (kalibrace měřidel tlaku v technice prostředí). Specifikace těchto měřidel může být poměrně rozsáhlá. Příklad si uvedeme na převodníku ROSEMOUNT 3051 s přestavitelným měřicím rozpětím.

Přesnost: $\pm 0,04$ % nastaveného rozpětí; pro měřicí rozpětí menší než 10 : 1 je přesnost definována vzorcem:

$$\pm \left[0.015 + 0.005 \left(\frac{URL}{Span} \right) \right] \% \text{ of Span} \quad (21)$$

kde URL je maximální nastavitelné rozpětí (jmenovitý rozsah) a Span je aktuální nastavené rozpětí převodníku.

Roční drift: max. $\pm 0,02$ % URL

Vliv statického tlaku: vliv na nulovou hodnotu max. $\pm 0,05$ % URL / 1000 psi (cca 70 bar), odpovídá jednotkové hodnotě $\pm 0,0007$ % URL / 1 bar; vliv na rozpětí $\pm 0,1$ % span / 1000 psi (cca 70 bar), což odpovídá jednotkové hodnotě $\pm 0,0015$ % span / 1 bar

Teplotní vliv: $\pm (0,0125$ % URL + $0,0625$ % span) celkový vliv pro rozmezí teplot ± 50 °F (28 °C), referenční teplota 74 °F (24 °C)


Vliv pracovní polohy: $\pm (3$ až $6)$ mbar dle rozsahu; hodnotu lze potlačit nulováním (platí u robustních měřidel tlakové diference pro vysoké statické tlaky; čidlo svou hmotností samo ovlivňuje nulový výstupní signál při manipulaci se snímačem)

Vliv napájení: max. $\pm 0,005$ % kalibrovaného rozpětí / 1 V

Minimální zatěžovací odpor: 250 Ω .

5.2.4. Deformační tlakoměry

U deformačních tlakoměrů je základním kvalitativním údajem třída přesnosti, která je vesměs uvedena na číselníku tlakoměru. Třída přesnosti udává největší dovolenou chybu tlakoměru v procentech, vztaženou k rozsahu stupnice (měřicímu rozpětí tlaku). Na číselníku

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

nejpřesnějších tlakoměrů může být uvedena i referenční teplota včetně jejího rozmezí, ke kterému je TP vztažena. Při použití tlakoměrů pro média, jejichž teplota je proměnlivá, může být uvedena i maximální teplota použitého média. Přesnost tlakoměru je limitována velikostí průměru stupnice, nejpreciznější tlakoměry mají průměr stupnice 250 mm. Oproti ostatním typům tlakoměrů může být odečtená hodnota tlaku deformačního tlakoměru ovlivněna schopností odečtu pracovníka. Proto je stupnice referenčních tlakoměrů opatřena zrcátkem pro snadnější odečet a tenkým nožovým ukazatelem. Pro zajištění dlouhé životnosti a plynulého pohybu mechanismu jsou u referenčních tlakoměrů vyrobeny části podléhající opotřebení z argantanu (slitina niklu, zinku a mědi – alpaka). Schopnost odečtu z tlakoměru je ovlivněna nejen velikostí vlastní stupnice, ale také velikostí dílku stupnice, tloušťkou ukazatele, příp. použitím pomocných prostředků (lupa, kamerový odečet). Etalonové deformační tlakoměry se volí ze tříd přesnosti 0,06 až 0,6. Jako příklad specifikace etalonového deformačního tlakoměru můžeme uvést tlakoměr WALLACE&TIERNAN, model 62-050, série 1500 / 215 mm průměr stupnice:

Přesnost: 0,066 % FS

Citlivost: 0,01 % FS

Hystereze: max. 0,05 % FS

Teplotní koeficient: max. $\pm 0,1$ % FS / 10 K odchylky od referenční teploty 23 °C.

5.2.5. Měřidla elektrických veličin


S měřidly elektrických veličin pracujeme při kalibraci převodníků tlaku a jejich kvalitativní ukazatele mohou významně ovlivnit nejistotu měření. Obecná zásada návaznosti požaduje 2× až 4× přesnější etalon, v případě kalibrace převodníků platí podmínka návaznosti pro celý měřicí systém (etalon tlaku včetně měřidel elektrických veličin). Při této kalibraci připadají v úvahu především DMM a odporové normály.

DMM – používáme je pro měření nízkoúrovňových výstupů (tenzometrické snímače tlaku s rozsahem do 100 mV výstupního napětí) a unifikovaných výstupních signálů (proudová smyčka, zesílené výstupní napětí obvykle do 10 V). Specifikace DMM obvykle obsahuje tři hodnoty přesnosti:

- Přesnost v intervalu 24 hodin při teplotě (23 ± 1) °C
- Přesnost v intervalu 90 dnů při teplotě (23 ± 5) °C
- Přesnost v intervalu 1 roku při teplotě (23 ± 5) °C

Při použití DMM ke kalibracím se při výpočtu nejistoty i stanovení CMC zásadně uvažuje roční údaj přesnosti, pokud nejsou opakovanou kalibrací zjištěny výrazně lepší vlastnosti. V tom případě by bylo možné místo roční specifikace výrobce zahrnout její poměrnou část, která odpovídá skutečnému driftu DMM (např. 40 % specifikace). Na příkladu multimetru FLUKE 8846A si můžeme ukázat přehled složek nejistoty DMM při měření stejnosměrného napětí na rozsahu 10 V (odpovídá kalibraci proudové smyčky při velikosti použitého měřicího odporu 500 Ω) a při měření stejnosměrného proudu na rozsahu 100 mA (přímé měření proudové smyčky 4 mA až 20 mA).

Stejnoseměrné napětí 10 V_{DC}, referenční rozsah teplot (18 až 28) °C

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

Roční specifikace ...0,0024 % RDG + 0,0005 % FS

Rozlišení (zobrazení 6 ½ dig) ... 10 μV

Teplotní koeficient (v rozsahu 0 °C až 18 °C a 28 °C až 55 °C) ... 0,0005 % RDG + 0,0001 % FS

Linearita A/D převodníku ... 0,0002 % RDG + 0,0001 % FS

Stejnoseměrný proud 100 mA_{DC}, referenční rozsah teplot (18 až 28) °C:

Roční specifikace ...0,050 % RDG + 0,005 % FS

Rozlišení (zobrazení 6½ dig) ... 100 nA

Teplotní koeficient (v rozsahu 0 °C až 18 °C a 28 °C až 55 °C) ... 0,002 % RDG + 0,0005 % FS

Multimetr musí mít platnou kalibraci, proto k uvedeným složkám nejistoty musíme zahrnout i **nejistotu kalibrace** uvedenou na kalibračním listu.

Poznámka k rozlišení měřidel

Rozlišení měřidel elektrických veličin (dnes také u digitálních tlakoměrů) se obvykle uvádí číslem a případně zlomkem, které charakterizují počet zobrazených míst. Podle konvence ½ digit může zobrazit pouze nulu nebo jedničku a ¾ digit číslo od nuly do dvojky nebo až osmičky (nejčastěji do 3 nebo 5). Neúplný digit je nejvyšším číslem (pozicí) v zobrazované hodnotě, reprezentujícím nejvyšší dosažitelný řád měřené veličiny. Například multimetr 5½ digit bude mít 5 číslic, které budou zobrazovat čísla od nuly do devítky a jedno, které bude zobrazovat jenom nulu nebo jedničku. Takovýto multimetr bude moci zobrazit hodnoty od nuly do 199 999. Pokud bude mít 3¾ displej, tak bude moci zobrazit čísla od 0 do 3999 nebo 5999 v závislosti na výrobci. Z těchto údajů lze snadno odvodit rozlišitelnost měřidel, která je jednou ze složek nejistoty měření.


Odporové normály – pro přesné měření výstupního proudu převodníku používáme nejčastěji nepřímou měřicí metodu tj. měření úbytku napětí na přesném odporu. Výkonová zatížitelnost normálových odporů se předpokládá 1 W na vzduchu a 3 W v olejové lázni. Používaný rozsah hodnot odporů pro kalibrace převodníků tlaku leží mezi (100 až 500) Ω při měření proudové smyčky s max. hodnotou proudu 20 mA není v takovém případě zatížitelnost překročena). Přesnost odporů bývá (0,0001 až 0,05) % jmenovité hodnoty, pro omezení přechodového odporu se vyrábějí výhradně jako čtyřsvorkové. Nejistota kalibrace odporů bývá jednotky až desítky ppm jmenovité hodnoty.

Příklad: Přesné odpory SRL Series výrobce IETLABS mají v rozsahu (100 až 500) Ω deklarovanou přesnost jmenovité hodnoty 2 ppm, roční stabilitu 6 ppm a teplotní koeficient v referenčním rozsahu teplot (18 až 28) °C 3 ppm pro celý rozsah (0,3 ppm/°C). Z těchto hodnot je patrné, že jejich vliv se projeví pouze při kalibraci velmi přesných měřidel.

5.3. Rozbor některých zdrojů nejistoty měření

5.3.1. Vliv teploty

Teplota je pro všechna měřidla, která pracují na základních fyzikálních principech, nejdůležitější ovlivňující veličinou. V oboru tlaku se tento vliv týká v celém rozsahu měření pístových, deformačních a kapalinových tlakoměrů. U digitálních tlakoměrů nebo převodníků

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

tlaku je vliv teploty významný v případě, kdy její hodnota překročí teplotně kompenzovaný rozsah, uvedený ve specifikaci měřidla. Pro každé měření je obvyklé definovat tzv. jmenovitou referenční (vztažnou) teplotu, ke které jsou vyhodnocovány teplotní odchylky okolí (měřidla) při měření. Definice jmenovité teploty v platných předpisech, používaných pro kalibrace měřidel tlaku, je ale nejednotná. [L1] uvádí, že teplota při kalibraci musí ležet v rozmezí (18 až 28) °C a její změna během kalibrace nesmí překročit 1 °C. Střed uvedeného rozmezí představuje hodnotu 23 °C, která je standardně používána jako referenční teplota všech elektronických digitálních měřidel. [L2 a L3] stejně jako [L4 a L5] uvádějí jako referenční teplotu 20 °C a doporučuje její rozmezí (15 až 25) °C. Pro délková měřidla, měřidla hmotnosti a tlaku doporučuje referenční podmínky z hlediska teploty (20 ± 2) °C.

Obdobně je definována referenční teplota pro **deformační tlakoměry** v [L6 a L7] – jmenovitá hodnota 20 °C, referenční rozmezí (20 ± 2) °C pro třídu přesnosti 0,1 až 0,6; referenční rozmezí (20 ± 5) °C pro TP > 0,6. Povolený rozsah teploty okolí i teploty měřeného média pro deformační tlakoměry je (-20 až 60) °C. [L27 a L28] stanovují pracovní rozmezí teplot pro deformační tlakoměry (10 až 35) °C, referenční teplotu 20 °C s tím, že je možné zvolit jinou teplotu. Vliv nově zvolené teploty nesmí překročit 1/5 maximální dovolené chyby tlakoměru. U deformačních tlakoměrů výrobci až na výjimky neuvádějí teplotní koeficient k_t . Vycházíme tedy z údajů v [L6 a L7]:

- Deformační tlakoměry s pružnou trubicí ... $k_t = 0,04 \text{ \% FS} / \text{°C}$
- Deformační tlakoměry krabicové ... $k_t = 0,06 \text{ \% FS} / \text{°C}$
- Deformační tlakoměry membránové ... $k_t = 0,08 \text{ \% FS} / \text{°C}$


Maximální chyba, způsobená odchylkou skutečné teploty od referenční, je pak definována jako:

$$\Delta t = k_t \cdot (t_2 - t_1) \quad (22)$$

kde t_2 je teplota okolí a t_1 je referenční teplota. Z uvedeného je zřejmé, že jakákoliv odchylka od referenční hodnoty teploty deformačních tlakoměrů způsobuje přídatnou chybu, kterou musíme respektovat mezi složkami nejistoty typu B.

Součástí aktuální verze předpisu [L1] jsou i **deformační tlakoměry**, díky tomu je nejasná jednoznačná definice referenční hodnoty teploty. Dnes zrušené normy [L11 až L14] umožňovaly volbu mezi hodnotami 20 °C nebo 23 °C. Pokud chceme sjednotit přístup k měřidlům tlaku, doporučovali bychom uvažovat za referenční hodnotu teploty u deformačních tlakoměrů 23 °C. Vzhledem k výrazné teplotní závislosti deformačních tlakoměrů je stanovení této hodnoty důležité i z pohledu srovnatelných výsledků zkoušení způsobilosti těchto typů měřidel.

U **digitálních tlakoměrů a převodníků tlaku** je situace ohledně referenční teploty příznivější. Přestože [L2 až L5 i L10] pracují s hodnotou 20 °C, výrobci těchto měřidel pracují vesměs s hodnotou 23 °C. Tato referenční teplota platí pro všechna digitální měřidla elektrických veličin, se kterými pracujeme i na výstupu převodníků tlaku. Pokud ale výrobce neuvede teplotní koeficient měřidla, nemáme žádné vodítko ohledně odhadu vlivu teploty okolí. Pomocným nástrojem by mohla být tabulka 1 z [L9], která uvádí maximální dovolenou chybu na každých 10 °C v závislosti na třídě přesnosti tlakoměru (převodníku). Hodnoty se pohybují v rozmezí od 0,01 % FS / °C pro TP 0,1 až do 0,1 % FS / °C pro TP 2,5. [L9] je dnes sice zrušena, ale údaje z uvedené tabulky nebyly do žádného z platných předpisů převzaty.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

Rozsah teplotně kompenzovaných teplot a teplotní koeficient je nutné znát jak u kalibrovaných měřidel, tak u používaných etalonů.

Dodržet referenční rozmezí teplot je obtížné především při kalibracích měřicích řetězců tlaku mimo stálé laboratorní prostory. Při těchto kalibracích je prakticky bez výjimky vliv teploty neznámý. Použití hodnoty koeficientu v rozmezí (0,01 až 0,06) % FS / °C odpovídá očekávané přesnosti většiny elektronických měřidel tlaku.


5.3.2. Nejistota typu A (opakovatelnost) u měřidel tlaku, podmínka návaznosti

Kalibrační postupy měřidel tlaku byly vždy koncipovány tak, že se opakovatelnost zjišťovala ze tří cyklů měření ve směru vzrůstajícího i klesajícího tlaku. Souvisí to také s určením chyby reverzibility (hystereze), která je definována jako absolutní hodnota rozdílu mezi střední hodnotou údaje ve směru snižování a zvyšování tlaku. Obvykle se vyhodnocuje měření obou větví (vzrůstající a klesající hodnoty) samostatně a hystereze je uvedena na kalibračním listu. Pokud bychom ale stanovili průměrnou závislost měřidla z obou směrů zatěžování, musíme uvažovat hysterezi jako jednu ze složek nejistoty typu B.

Pro určení opakovatelnosti se předpokládají úplné tři cykly měření ve všech kalibrovaných bodech pouze u nejpřesnějších měřidel. U nižších přesností se opakovatelnost vyhodnocuje pouze u vybraných bodů charakteristiky, určí se maximální hodnota a ta je uplatněna jako složka nejistoty typu A ve všech měřených bodech. Doporučený počet kalibračních bodů uvádějí všechny platné předpisy, ale ani zde není přístup jednotný.

Detailní postup měření uvádí [L1] takto:

- **Základní kalibrační postup:** určen pro měřidla, jejichž nejistota pro $k = 2$ má hodnotu $U \geq 0,2$ % FS. Úplná kalibrace je provedena v jednom měřicím cyklu v šesti bodech ve směru stoupajícího i klesajícího tlaku. Opakovatelnost se zjišťuje ve třech cyklech pouze u dvou bodů, přednostně 0 % FS a hodnota blízko střední hodnoty měřicího rozpětí. Zjištění opakovatelnosti je provedeno pouze ve smyslu stoupajícího tlaku. Větší z obou hodnot opakovatelnosti je použita pro všechny měřené body. Nejistota kalibrace by neměla být uvedena menší než 0,2 % FS.
- **Standardní kalibrační postup:** určen pro měřidla, jejichž nejistota pro $k = 2$ leží v rozmezí $0,05$ % FS $\leq U < 0,2$ % FS. Úplná kalibrace je provedena v jednom měřicím cyklu v jedenácti bodech ve směru stoupajícího i klesajícího tlaku. Opakovatelnost se zjišťuje ve třech cyklech pouze u čtyř bodů, přednostně (0, 20, 50, 80) % FS. Zjištění opakovatelnosti je provedeno pouze ve smyslu stoupajícího tlaku. V mezilehlých bodech je uvažována vždy vyšší hodnota opakovatelnosti z obou krajních bodů intervalu. Nejistota kalibrace by neměla být uvedena menší než 0,05 % FS.
- **Úplný kalibrační postup:** určen pro měřidla, jejichž nejistota pro $k = 2$ má hodnotu $U < 0,05$ % FS. Úplná kalibrace je provedena ve třech měřicích cyklech v jedenácti bodech ve směru stoupajícího i klesajícího tlaku. Opakovatelnost se tedy zjišťuje v každém měřeném bodě, způsob zjištění (jeden smysl zátěže nebo oba smysly) předpis neuvádí. Nejistota kalibrace není předpisem limitně omezena.

 NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

Počtem kalibračních bodů se zabývají i další platné předpisy. [L2 až L5] uvádějí požadavek tří až pěti úplných kalibračních cyklů v 6 nebo 11 bodech s tím, že opakovatelnost se stanovuje samostatně pro stoupající a klesající hodnoty. Tím je vytvořen předpoklad pro určení hystereze měřidla jako samostatného parametru. Normy platné pro deformační tlakoměry [L6 a L7] odvozují počet bodů od TP tlakoměru takto:

- TP v rozmezí 0,1 až 0,6 ... minimálně 10 kalibračních bodů
- TP v rozmezí 1 až 2,5 ... minimálně 5 kalibračních bodů
- TP v rozmezí 4 až 6 ... minimálně 4 kalibrační body

Opět se předpokládá zkoušení v obou směrech zátěže, počet sérií ale normy neřeší stejně jako určení opakovatelnosti. Uvedena je pouze národní poznámka, která doporučuje pro zkoušku přesnosti a hystereze provést více sérií měření.


[L27 a L28] definuje metodiku měření takto:

- TP v rozmezí 0,06 až 0,6 ... minimálně 8 kalibračních bodů
- TP v rozmezí 1 až 2,5 ... minimálně 5 kalibračních bodů
- TP v rozmezí 4 a 5 ... minimálně 3 kalibrační body

Do hodnoty $TP = 0,2$ jsou doporučeny tři série měření, $TP (0,2 \text{ až } 0,6)$ dvě série měření; opakovatelnost předpisů neřeší.

Vycházíme-li z dosavadní běžné praxe laboratoří, u digitálních tlakoměrů a převodníků tlaku lze vycházet z dokumentu [L1], u deformačních tlakoměrů můžeme respektovat i požadavky norem [L6 a L7] s tím, že opakovatelnost lze určovat pro TP v rozmezí 1 až 6 podle základního kalibračního postupu [L1], pro $0,2 \leq TP < 1$ lze vycházet ze standardního kalibračního postupu [L1] a pro $TP < 0,2$ lze použít úplný kalibrační postu [L1]. Při kalibracích mimo stálé laboratorní prostory bude většinou dostatečný základní kalibrační postup dle [L1].

Mezi dokumentem [L1] a ostatními platnými (i dnes neplatnými) dokumenty je zásadní rozdíl v požadavku na podmínku návaznosti mezi použitým etalonem a kalibrovaným měřidlem. Dokument [L1] předpokládá, že nejistota etalonu (etalonového měřicího řetězce) by měla být lepší než nejistota kalibrovaného měřidla s tím, že poměr nejistot obou by měl být rovný nebo větší než 2. Tento poměr je plně akceptovatelný u měřidel tlaku vysokých přesností (např. $TP 0,02$ a lepší), kde rozhodují kromě technických i hlediska ekonomická. Pro horší přesnosti předpokládáme dosavadní přístup k návaznosti tj. poměr nejistoty měřidla vůči nejistotě etalonu rovný 4. Odpovídá to všem zbývajícím platným předpisům i dokumentu [L1], který tuto možnost připouští. Při kalibraci měřidel tlaku kyslíku se z bezpečnostních důvodů používají tzv. oddělovací členy (odděluje bezpečné médium od oleje). [L28] se jako jediný zabývá dovolenou chybou tohoto zařízení, která nesmí být větší než 10 % maximální dovolené chyby kalibrovaného měřidla.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

Standardní nejistota u_{Aj} stanovená metodou typu A v j -tém tlakovém bodě se určí v souladu s [L17] podle vztahu

$$u_{Aj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{ij} - p_j)^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (23)$$

kde p_{ij} je i -tý údaj zkoušeného tlakoměru v j -tém tlakovém bodě;
 p_j aritmetický průměr ze tří údajů kalibrovaného tlakoměru v j -tém tlakovém bodě;
 n počet měření.

V případě, že byla kalibrace provedena ve třech opakovaných měřicích cyklech, standardní nejistotu u_A vypočítáme podle vztahu (2) v každém kalibrovaném bodě. Když byla opakovaná měření provedena v omezeném počtu tlakových bodů, největší hodnota u_A je považována za typickou pro všechny kalibrované body. Pokud provádíme samostatně vyhodnocení zatěžování a odlehčování tlakoměru, vyhodnocuje se také u_A samostatně pro zatěžování a odlehčování tlakoměru. Protože [L1] pracuje také s charakteristikou, určenou jako průměrnou z hodnot při zatěžování a odlehčování, u_A se v tom případě určí za všech šesti hodnot obou smyslů zátěže. Pro počet opakovaných měření menší než 10 je potřeba posoudit spolehlivost nejistoty u_A při stanovení koeficientu pokrytí rozšířené nejistoty (postup viz L17).

Uvedený vzorec platí pro všechny typy měřidel tlaku, kterými se tento úkol zabývá. Pouze u převodníků tlaku je výstupní veličinou proudová smyčka (4 až 20) mA, místo hodnot tlaku p_{ij} a p_j dosadíme hodnoty měřeného proudu I_{ij} a I_j . Pro vzájemný přepočítání nejistot převodníků tlaku s lineární výstupní charakteristikou je nutné použít citlivostní koeficient, který představuje podíl rozpětí měřeného proudu ku rozpětí měřeného tlaku nebo obráceně:


$$u_I = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{p_{MAX} - p_{MIN}} \cdot u_p \quad (24)$$

$$u_p = \frac{p_{MAX} - p_{MIN}}{I_{MAX} - I_{MIN}} \cdot u_I \quad (25)$$

U převodníků tlaku s napětovým unifikovaným výstupním signálem nebo u snímačů tlaku s nízkoúrovňovým výstupním signálem bude rozpětí měřeného proudu v předmětných vzorcích nahrazena rozpětím měřeného napětí. Unifikované výstupní signály jsou definovány normami [L31 a L32]. Rozpětí nízkoúrovňových signálů musíme stanovit z citlivosti snímačů (mV výstupu / 1 V napájení). Mezi napájecím napětím, které obvykle leží v rozmezí (5 až 12) V_{DC}, a výstupním napětím snímače existuje obvykle lineární závislost. V dalším textu je uveden přístup k opakovatelnosti podle [L1].

5.3.3. Drift etalonu

Drift etalonu (dlouhodobá stabilita) je parametrem, který musí kalibrační laboratoř trvale sledovat a vhodně ho zařadit do složek nejistot měření. Sleduje se nejen u etalonů hlavní měření

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

veličiny (tlak), ale také u všech měřidel, která se přímo podílejí na kvalitativním určení kalibrační křivky měřidla. V oboru tlaku jde zejména o multimetry a elektrické měřicí odpory, používané při kalibracích snímačů a převodníků tlaku. Typický (maximální) drift etalonových měřidel udává obvykle výrobce ve specifikaci měřidla a nejčastěji se jedná o roční stabilitu měřidla. Hodnota ročního driftu deklarovaná výrobcí bývá u digitálních tlakoměrů obdobná hodnotě přesnosti (někdy i horší), u digitálních multimetrů tvoří obvykle poměrnou část specifikované přesnosti, a nejmenší drift vykazují pístové tlakoměry a etalonové elektrické odpory (při měření proudové smyčky 4 mA až 20 mA jsou odpory vystaveny minimální výkonové zátěži a nedochází ke změně vlastností jejich ohřevem). Otázkou je, jak zahrnout zjištěný drift do nejistoty měření ve vazbě na specifikaci měřidla. Můžeme si představit tři modelové situace:

1. Z opakovaných kalibrací (alespoň tři realizovaných) je zřejmé, že měřidlo nemuselo být nikdy dostavováno a jeho odchylky od konvenčně pravých hodnot se pohybují v celém měřicím rozpětí do 30 % dovolené chyby dle specifikace. Zahrnutím celé specifikace do nejistoty měření si významně zhoršíme reálné vlastnosti etalonu. Akceptovatelné je tedy zahrnutí driftu ve výši do 50 % dovolené chyby dle specifikace měřidla.
2. Z opakovaných kalibrací je zřejmé, že měřidlo nemuselo být nikdy dostavováno a jeho odchylky od konvenčně pravých hodnot oscilují v celém měřicím rozpětí mezi 30 % až 70 % dovolené chyby dle specifikace. V tomto případě je vhodné (bezpečné) zahrnutí celé specifikace do nejistoty měření, protože koresponduje s driftem měřidla.
3. Z opakovaných kalibrací je zřejmé, že odchylky měřidla od konvenčně pravých hodnot převyšují v celém měřicím rozpětí 70 % dovolené chyby dle specifikace nebo ji přesahují a měřidlo bylo dostavováno. Do nejistoty musíme zahrnout celou specifikaci a současně je to signálem pro zkrácení kalibrační lhůty.

Kontrola driftu etalonů musí být provedena po každé kalibraci a případná změna vlastností se musí následně promítnout do hodnoty příslušné složky nejistoty měření.


5.3.4. (Ne)linearita

(Zpracováno dle [L26])

Ve specifikaci převodníků (snímačů) tlaku i některých digitálních měřidel často uvádějí výrobci tzv. linearitu. Linearita je uváděna buď jako samostatný parametr nebo je součástí přesnosti (accuracy), která kromě linearit zahrnuje obvykle i hysterezi a opakovatelnost převodníku. Při určování složek nejistot je tedy nutné přesně interpretovat kvalitativní parametry převodníku. Matematický vztah mezi tlakem aplikovaným na snímač a jeho výstupním elektrickým signálem bývá nejčastěji lineární a parametr linearit charakterizuje odchylku od ideální přímkové charakteristiky. Pro převodníky s lineární charakteristikou platí následující rovnice:

$$\frac{p_{MĚŘENÝ} - p_{MIN}}{p_{MAX} - p_{MIN}} = \frac{I_{VÝSTUPNÍ} - I_{MIN}}{I_{MAX} - I_{MIN}} \quad (26)$$

Neznámými v této rovnici budou nejčastěji měřený tlak $p_{MĚŘENÝ}$ a jemu odpovídající výstupní proud $I_{VÝSTUPNÍ}$. Význam zbývajících čtyř konstant je následující:

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

I_{MIN} ... minimální hodnota výstupního signálu převodníku tlaku (např. 4 mA)

I_{MAX} ... maximální hodnota výstupního signálu převodníku tlaku (např. 20 mA)

p_{MIN} ... hodnota měřeného tlaku, při níž převodník tlaku vysílá signál I_{MIN}

p_{MAX} ... hodnota měřeného tlaku, při níž převodník tlaku vysílá signál I_{MAX}

Pro praktické přepočty potřebujeme výpočet velikosti měřeného tlaku na základě známé hodnoty výstupního signálu a naopak, jejich vyjádření vypadá takto:

$$P_{MĚŘENÝ} = P_{MIN} + (P_{MAX} - P_{MIN}) \cdot \frac{I_{VÝSTUPNÍ} - I_{MIN}}{I_{MAX} - I_{MIN}} \quad (27)$$

$$I_{VÝSTUPNÍ} = I_{MIN} + (I_{MAX} - I_{MIN}) \cdot \frac{P_{MĚŘENÝ} - P_{MIN}}{P_{MAX} - P_{MIN}} \quad (28)$$

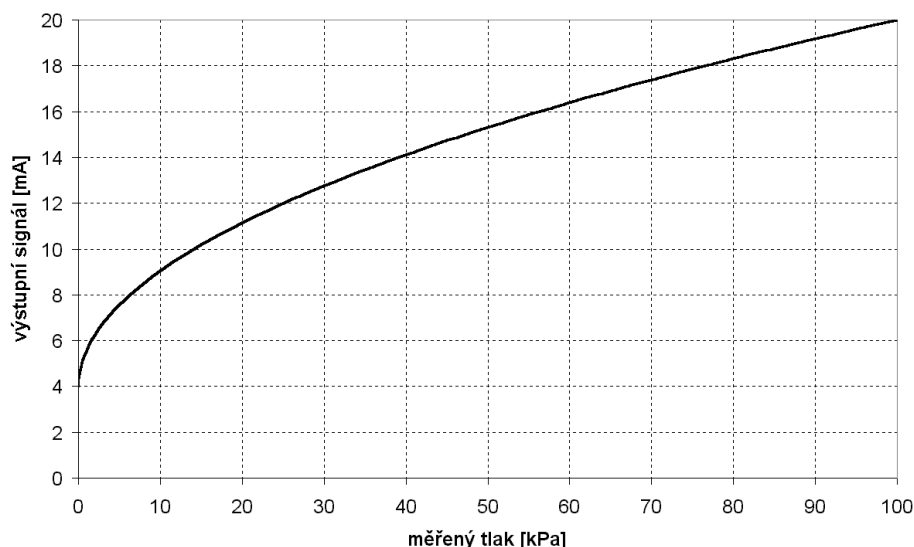
Při měření průtoku se často uplatňují převodníky tlakové difference, které měří diferenční tlak vznikající při průtoku tekutiny např. přes škrticí orgán. Má-li měřená tekutina stálé složení, tlak a teplotu, pak je diferenční tlak vzniklý na cloně úměrný druhé mocnině průtoku. Naopak průtok je tedy úměrný odmocnině z diferenčního tlaku. Proto je možné se v praxi setkat s převodníky diferenčního tlaku s odmocninovou charakteristikou; velikost jejich výstupního signálu je úměrná přímo velikosti průtoku.

Pro převodníky s odmocninovou charakteristikou platí následující rovnice:

$$\frac{P_{MĚŘENÝ} - P_{MIN}}{P_{MAX} - P_{MIN}} = \left(\frac{I_{VÝSTUPNÍ} - I_{MIN}}{I_{MAX} - I_{MIN}} \right)^2 \quad (29)$$

Význam proměnných a konstant je stejný jako v předchozím textu.

Odmocninová výstupní charakteristika snímače tlaku



Obr. 2: Příklad odmocninové výstupní charakteristiky snímače tlaku.

Vyjádříme-li z uvedené rovnice velikost měřeného tlaku a velikost výstupního signálu, dostaneme následující převodní vztahy:

$$P_{MĚŘENÝ} = P_{MIN} + (P_{MAX} - P_{MIN}) \cdot \left(\frac{I_{VÝSTUPNÍ} - I_{MIN}}{I_{MAX} - I_{MIN}} \right)^2 \quad (30)$$

$$I_{VÝSTUPNÍ} = I_{MIN} + (I_{MAX} - I_{MIN}) \cdot \sqrt{\frac{P_{MĚŘENÝ} - P_{MIN}}{P_{MAX} - P_{MIN}}} \quad (31)$$

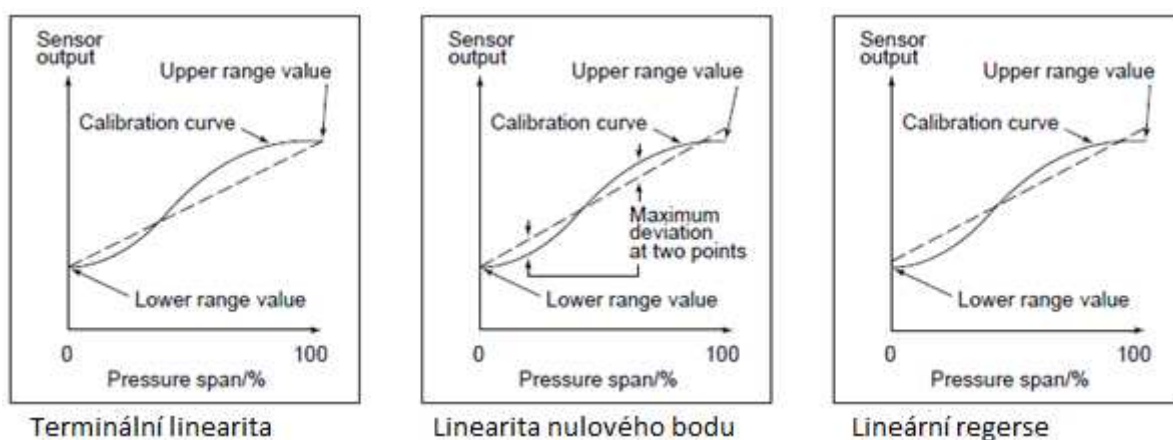
Obě provedení snímačů využívají kondicionování signálu za účelem vytvoření lineárního vztahu mezi aplikovaným tlakem a výstupním signálem. S nelineární (logaritmickou) charakteristikou se setkáme pouze u měřidel vakua, u kterých je nutné zobrazit několik dekád měřeného tlaku v jediné analogové stupnici nebo na displeji s automatickým přepínáním rozlišení.

Všechna přizpůsobení (kondicionování) signálu se budou pouze blížit požadované charakteristice a navíc podléhají časovým změnám. Reálná závislost výstupního signálu na aplikovaném tlaku nebude zcela lineární a rozdíly mezi měřenou funkcí a přímkou udávají nelinearitu, která se obvykle vyjadřuje v procentech měřicího rozpětí (např. $\pm 0,1\%$ FS). Pro určení vztahné přímky, se kterou se porovnává reálná charakteristika snímače, se běžně používají tři způsoby:

1. Terminal linearity – terminální linearita, linearita koncových bodů; ideální přímka protíná oba koncové body nastaveného měřicího rozpětí (dolní a horní mez rozsahu)

2. Zero-based linearity – linearita nulového bodu; přímka vychází z dolní meze měření se sklonem zvoleným tak, aby bylo zajištěno, že maximální kladné a záporné odchylky jsou stejné
3. Best-straight-line linearity – lineární regresní přímka; ideální závislost je stanovena statisticky metodou nejmenších čtverců, proto obvykle neprotíná ani jeden z teoretických koncových bodů rozpětí snímače


Typ nonlinearity se volí podle počtu měřených bodů a skutečného průběhu odchylek měřených bodů (viz obr. 3).



Obr. 3: Druhy linearity převodníků tlaku

V souvislosti s vyhodnocením linearity se zastavme u problematické a diskutované otázky nulování tlakoměru mezi jednotlivými sériemi. Jednoznačný přístup k otázce nulování platí u měřidel absolutního tlaku a u sdužených měřidel podtlaku a přetlaku. V těchto případech je nulování nevhodné, ne-li zcela nemožné. U jednostranně diferenčních nebo přetlakových měřidel je nulování technicky možné – u digitálních tlakoměrů i u převodníků tlaku může jít o jednoduchý způsob (nulovací tlačítko ZERO), nastavení v SW aplikaci nebo mechanické nastavení potenciometrem. Mechanické nastavení je určeno především k nastavení měřidla před zahájením kalibrace, pokud je zjištěna odchylka blízká dovolené chybě nebo odchylka, která překračuje dovolenou chybu měřidla. Během vlastní kalibrace není vhodné měnit mechanické nastavení ani mezi jednotlivými cykly.

Kalibrace s vyhodnocením terminální linearity se provádí následujícím způsobem. Měřidlo zatížíme nulovým tlakem a provedeme jeho nulování. U převodníku tlaku s komunikačním protokolem aktivujeme funkci, která přiřadí nulovému tlaku přesnou hodnotu výstupního proudu 4 mA. Ve druhém kroku zatížíme měřidlo maximálním tlakem a provedeme nastavení rozsahu. U digitálních tlakoměrů to může být tlačítko SPAN, u převodníku tlaku s komunikačním protokolem aktivujeme funkci, která přiřadí maximálnímu tlaku přesnou hodnotu výstupního proudu 20 mA. Proudové výstupy snímačů tlaku kontrolujeme pomocí DMM, některá měřidla umožňují i dílčí nastavení malých odchylek od jmenovité hodnoty. Tento postup opakujeme do doby, než se výstupní údaje maximální blíží jmenovitým a jsou konstantní. Poté následuje vlastní kalibrace, mezi jednotlivými cykly se už nula (ani rozsah) nedostavují.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

Při vyhodnocení zero-based linearity nás zajímá pouze nulový bod, ze kterého vždy vychází kalibrační přímka. Stabilita nuly je tedy kontrolována už během tzv. rozcvičení tlakoměru, nula je nastavena před měřením a je vhodné ji dostavit i mezi jednotlivými kalibračními cykly.

Třetím způsobem vyhodnocení je klasická lineární regrese metodou nejmenších čtverců (best-straight-line). V tomto případě kopíruje přímka skutečný průběh závislosti bez ohledu na nulovou odchylku nebo odchylku rozsahu. Nastavení nuly (rozsahu) před kalibrací je vhodné, ale pokud máme kalibrací postihnout skutečné chování měřidla tlaku při praktickém měření, nulování neprovádíme. [L1] nulování mezi cykly připouští, ale neuvádí ho jako nutnou podmínku kalibračního postupu. V praxi je nulování povinné např. při přemístění měřidla, při změně polohy, po indikovaném přetížení apod.

5.4. Přístup k určování nejistoty měření podle [L1]

5.4.1. Deformační a digitální tlakoměry

Podle [L1] se při vyhodnocování nejistoty měření tlaku deformačních a digitálních tlakoměrů musí zahrnout mezi složky nejistoty:

- Nejistota referenčních etalonů vztažená k podmínkám jejich použití (zahrnutí všech relevantních složek jako přesnost, drift, teplotní vliv atd.)
- Nejistota způsobená chybou nuly kalibrovaného měřidla
- Nejistota způsobená opakovatelností
- Nejistota způsobená reprodukovatelností (pokud je zjišťována)
- Nejistota způsobená hysterezí kalibrovaného měřidla
- Nejistota způsobená konečným rozlišením kalibrovaného měřidla
- Nejistota způsobená odlehlostí referenčních úrovní měřidla a etalonu

Dokument [L1] uplatňuje poněkud odlišný přístup k opakovatelnosti měření. Důvodem je malý počet měření a očekávaná hystereze měřidel. Standardní nejistoty typu A jsou určeny metodami statistické analýzy pro série několika měření, které jsou prováděny za podmínek garantujících opakovatelnost výsledků měření s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Jestliže ale kalibrujeme přístroje, jejichž výstupní hodnoty jsou (mohou být) ovlivněny hysterezí, která se musí vyhodnotit samostatně pro stoupající a klesající tlaky a jestliže navíc máme k dispozici max. tři měřené hodnoty v každém směru zátěže, předpoklad normálního rozdělení pravděpodobnosti není zcela oprávněný. Proto [L1] nepracuje se statistickým vyhodnocením opakovatelnosti, ale používá náhradní výpočet založený na zkušenosti, který rovnocenným způsobem nahrazuje směrodatnou odchylku. Jeho použití je ale nepovinné a nejistotu typu A lze vyhodnocovat standardně dle vzorce (23).

Ve vzorových návodech ke stanovení nejistoty měření dle [L1] není nejistota vyhodnocována pouze samostatně pro zatěžování a odlehčování, což je běžná kalibrační praxe, ale měřidlo tlaku je také vyhodnocováno pro střední hodnotu tlaku, která je určena jak pro etalon $p_{ref.mean}$, tak pro kalibrované měřidlo $p_{ind.mean}$:



Český institut pro akreditaci, o.p.s.
Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3

Celkem 49 stran

Zpracoval:
Ing. Martin Valenta

Datum zpracování:
18.10.2018

$$p_{ind,mean} = \frac{p_{ind,up} + p_{ind,dn}}{2}, \quad p_{ref,mean} = \frac{p_{ref,up} + p_{ref,dn}}{2} \quad (32)$$

Skutečností ale je, že hodnota tlaku etalonu je obvykle v obou smyslech měření identická. Jestliže vyhodnocujeme oba smysly zátěže samostatně, platí pro odchylku měřeného tlaku (symbol **up** ... zatěžování, symbol **dn** ... odlehčování):

$$\Delta p_{up/dn} = p_{ind,up/dn} - p_{ref,up/dn} + \sum_{i=1}^2 \delta p_i = p_{ind,up/dn} - p_{ref,up/dn} + \delta p_{zero} + \delta p_{repeat,up/dn} \quad (33)$$

- $Y = \Delta p_{up/dn/mean}$ odchylka kalibrovaného měřidla
 $X_1 = p_{ind,up/dn/mean}$ údaj kalibrovaného tlakoměru
 $X_2 = p_{ref,up/dn/mean}$ údaj etalonu
 $\delta X_1 = \delta p_{zero}$ nekorigovaná chyba nuly
 $\delta X_2 = \delta p_{repeat,up/down/mean}$ nekorigovaná chyba opakovatelnosti

Do analýzy nejistot současně patří rozlišení měřidla, které je u digitálních tlakoměrů dáno posledním místem údaje na displeji, u deformačních tlakoměrů jde o tzv. odečitelnost, tedy odečitelnou část dílku.

Při vyhodnocení průměrných hodnot tlaku dle rovnice (32) má vzorec pro odchylku tvar:

$$\begin{aligned} \Delta p_{mean} &= p_{ind,mean} - p_{ref,mean} + \sum_{i=1}^3 \delta p_i \\ &= p_{ind,mean} - p_{ref,mean} + \delta p_{zero} + \delta p_{repeat,mean} + \delta p_{hysteresis} \end{aligned} \quad (34)$$

ve kterém přibyla složka

$$\delta X_3 = \delta p_{hysteresis} \dots \text{nekorigovaná chyba hystereze}$$

Jestliže mezi měřicími cykly provedeme demontáž a zpětnou montáž kalibrovaného tlakoměru, zahrnujeme mezi složky nejistoty také reprodukovatelnost měření:


$$\delta X_4 = \delta p_{reprod,up/dn/mean} \dots \text{nekorigovaná chyba reprodukovatelnosti}$$

Obdobně je vyhodnocována rozšířená nejistota měření pro oba způsoby vyhodnocení. Pro vyhodnocení obou smyslů zátěže samostatně platí:

$$U(\Delta p_{up/dn}) = k \sqrt{u_{ref}^2 + u_{ind,up/dn}^2 + u_{zero}^2 + u_{repeat,up/dn}^2} \quad (35)$$

Při vyhodnocení střední hodnoty tlaku platí pro rozšířenou nejistotu měření:

$$U(\Delta p_{mean}) = k \sqrt{u_{ref}^2 + u_{ind,mean}^2 + u_{zero}^2 + u_{repeat,mean}^2 + u_{hysteresis}^2} \quad (36)$$

 NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

Měřidla tlaku jsou ve specifikaci výrobce často charakterizována hodnotou tzv. error span (chyby rozpětí) = maximální chyba mezi měřenou a konvenčně pravou hodnotou tlaku U' . Udává se buď absolutně v jednotkách tlaku nebo relativně ve vztahu k měřené hodnotě nebo vůči rozpětí. Opět může být vyjádřena jako maximum z obou smyslů zatěžování nebo maximum vzhledem ke střední hodnotě tlaku:

$$U'(\Delta p_{\text{up/dn}}) = U(\Delta p_{\text{up/dn}}) + |\Delta p_{\text{up/dn}}| \quad (37)$$


$$U'(\Delta p_{\text{mean}}) = U(\Delta p_{\text{mean}}) + |\Delta p_{\text{mean}}| \quad (38)$$

5.4.2. Snímače a převodníky tlaku

Podle [L1] se při vyhodnocování nejistoty měření tlaku převodníků (snímačů) tlaku musí zahrnout mezi složky nejistoty:

- Nejistota referenčních etalonů vztážená k podmínkám jejich použití (obdoba deformačních a digitálních tlakoměrů)
- Nejistota způsobená nulovou chybou kalibrovaného měřidla
- Nejistota způsobená opakovatelností
- Nejistota způsobená reprodukovatelností (pokud je zjišťována)
- Nejistota způsobená hysterezí kalibrovaného měřidla
- Nejistota měřidel elektrických veličin použitých při kalibraci (napětí, proud, odpor) včetně jejich rozlišení (*poznámka autora*: k těmto měřidlům je třeba přistupovat stejně jako k etalonům tlaku tj. uvažovat jejich přesnost, drift, nejistotu kalibrace apod.)
- Nejistota způsobená ovlivňujícími veličinami
- Nejistota způsobená napájecím napětím převodníků (podstatné především u snímačů tlaku s lineární závislostí napájení na výstupu; důležitá je přesnost nastavení napájecího napětí a krátkodobá stabilita zdroje)
- Nejistota modelové charakteristiky – směrodatná odchylka měřených bodů od reálné charakteristiky (*poznámka autora*: nejistota koeficientů proložené přímky se do nejistoty kalibrace obvykle nezahrnuje, ale je uvedena na kalibračním listě)
- Nejistota způsobená odlehlostí referenčních úrovní měřidla a etalonu

Vzorový postup stanovení nejistoty kalibrace včetně ilustračního příkladu je v [L1] zpracován pro typický výstup tenzometrického snímače tlaku tj. lineární závislost výstupního signálu (mV) na napájecím napětí (V). Nutnost stabilizovaných (drahých) zdrojů napájecího napětí a citlivost nízkourovňových výstupních signálů na parazitní elektromagnetická pole (nutnost stínění) omezily v dnešní době použití těchto snímačů na minimum. Postup stanovení nejistoty v předchozí verzi č. 2 dokumentu [L1] je obdobný jako v současné verzi č. 3 a vychází ze stanovení převodního koeficientu S , který charakterizuje citlivost snímače tlaku (mV výstupu na 1 V napájení) vůči měřenému tlaku – jednotka mV/(V·Pa). Protože předchozí verze dokumentu byla přeložena do českého jazyka, jsou tyto informace dostupné široké veřejnosti. Daleko rozšířenější jsou snímače s unifikovaným výstupním signálem, nejčastěji

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018


(4 až 20) mA (odhadem 80 až 90 % kalibrací). Z hlediska našeho úkolu považujeme znalost stanovení nejistoty těchto měřidel za podstatnější.

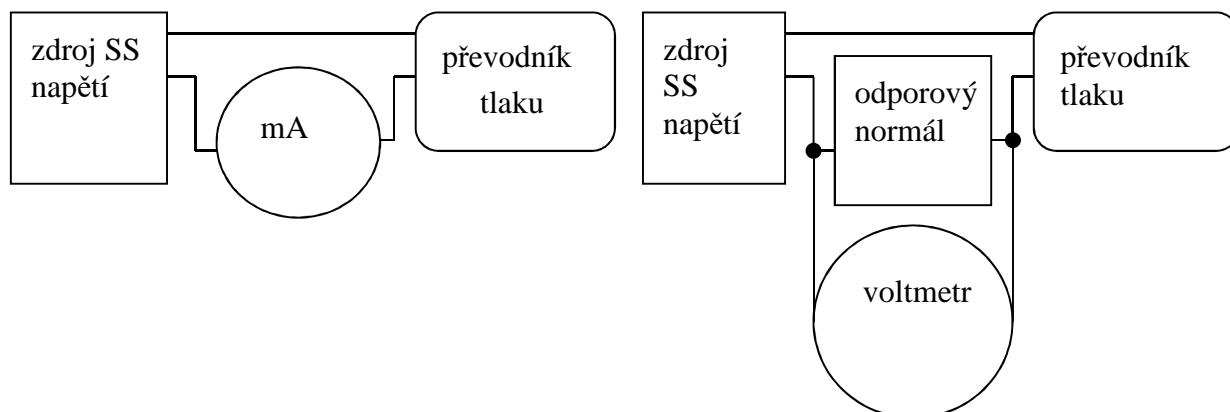
Stejně jako kalibrace jiných měřidel spočívá kalibrace převodníků tlaku v porovnávání indikace etalonu tlaku a kalibrovaného převodníku. Odlišnosti vyplývají ze způsobu, jakým převodníky měřený tlak indikují. Základním výstupem převodníku je analogový výstupní signál (proudová smyčka). Stále větší podíl však tvoří tzv. inteligentní převodníky tlaku, které obsahují některý z komunikačních protokolů (HART, FIELDBUS, PROFIBUS) a které umožňují paralelní digitální i analogovou komunikaci.

Při kalibraci převodníků tlaku s digitálním výstupním signálem potřebujeme pouze pomocný přístroj, jenž je schopný zobrazit informaci o hodnotě měřeného tlaku vysílanou převodníkem tlaku. Může to být ruční komunikátor, osobní počítač či jiný systém. Z metrologických parametrů je důležité dostatečně jemné rozlišení, s nímž přístroj indikovanou hodnotu zobrazuje. Na výsledek kalibrace by eventuálně mohla mít ještě vliv prodleva mezi odečtem tlaku převodníkem a jeho zobrazením na displeji vyhodnocovacího přístroje. Jindy by mohlo být překážkou kalibrace příliš velké „tlumení“ (zobrazovaná hodnota je průměrnou hodnotou měřeného tlaku za určitý předcházející časový úsek; při nastavení příliš velkého tlumení nedojde po skokové změně vstupního tlaku k vyrovnání hodnoty výstupního signálu na odpovídající úroveň), jindy zase příliš malé tlumení projevující se rychlými výraznými změnami indikované hodnoty. Protože inteligentní snímače pracují s nastavitelným rozpětím, nastavíme nejprve pomocí komunikátoru požadované kalibrované rozpětí tlaku. Převodník nejprve zatížíme na dolní mez rozpětí a zkontrolujeme (nastavíme) dolní mez analogového výstupu (4 mA). Totéž provedeme na horní mezi rozpětí s kontrolou (nastavením) hodnoty 20 mA. Ideální nastavení tlumení (časové konstanty) pro kalibraci odpovídá rozmezí (1 až 4) sekundy. Následující kalibrace digitálního výstupu odpovídá kalibraci digitálního tlakoměru.

Kalibrace analogového výstupu s sebou přináší potřebu dalších kalibrovaných etalonů elektrických veličin dle předchozího textu. Nejistoty těchto etalonů mají vliv na nejistotu kalibrace převodníku tlaku. Ze vztahů pro přepočítání velikosti výstupního signálu na hodnotu tlaku a naopak pro převodníky tlaku s lineární výstupní charakteristikou (27) a (28) dostaneme pro přepočítání nejistoty tlaku v daném kalibrovaném bodě na nejistotu výstupního signálu v tomto bodě a naopak tyto vztahy:

$$u_I = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{p_{MAX} - p_{MIN}} \cdot u_p; \quad u_p = \frac{p_{MAX} - p_{MIN}}{I_{MAX} - I_{MIN}} \cdot u_I \quad (39)$$

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018



Obr. 4: Dva způsoby měření proudového výstupního signálu.

Potřebujeme-li změřit velikost výstupního proudového signálu převodníku tlaku, nabízí se jako nejjednodušší řešení přímé měření proudu na proudových svorkách DMM. Měření proudu má ale oproti měření napětí minimálně o řád horší přesnost (vliv odporu bočniců DMM). Měření tedy realizujeme přesnějším způsobem, tj. měřením úbytku napětí na přesném odporovém normálu, kterým prochází měřený proud. Hodnota jeho odporu musí ležet v mezích dovolené ohmické zátěže uvedené ve specifikaci převodníku. Například výstupní proud (4 až 20) mA způsobí na odporovém normálu o velikosti 100 Ω úbytek napětí v rozsahu (0,4 až 2,0) V, který měříme. Při přepočtu měřeného napětí na výstupní proud musíme vzít v úvahu skutečnou velikost odporového normálu z jeho kalibračního listu (např. 100,147 Ω). Vlastní přepočet je pouze aplikací Ohmova zákona, tedy


$$I_{\text{VÝSTUPNÍ}} = \frac{U_R}{R} \quad (40)$$

kde U_R (V) je napětí měřené na normálu a R (Ω) je hodnota odporu normálu dle kalibračního listu. Nejistotu typu A můžeme určit standardním způsobem buď pro hodnoty měřeného (vypočteného) proudu nebo pro hodnoty tlaku, přičemž pro přepočet platí vztahy (27) a (28).

Při měření proudu podle Ohmova zákona (40) se jedná o nepřímou měřicí metodu. Nejistota měřeného proudu je závislá na nejistotě příslušného napěťového rozsahu DMM $u(U_j)$ a nejistotě měřicího odporu $u(R)$. Pro měření v j -tém bodě platí:

$$u_y = \sqrt{\left(\frac{u(U_j)}{R}\right)^2 + \left(\frac{U_j u(R)}{R^2}\right)^2} \quad (41)$$

Mezi složky nejistoty měření elektrických veličin dále patří rozlišení DMM na příslušném rozsahu, nejistota kalibrace napěťového rozsahu DMM a nejistota kalibrace měřicího odporu. Pokud není dodržena referenční úroveň měření, zahrneme nejistotu způsobenou odlehlostí vztahem

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

$$u_{hj} = \sqrt{(\rho_j g u(h))^2 + (h g u(\rho_j))^2 + (h \rho_j u(g))^2} \quad (42)$$

kde h (m) je rozdíl referenčních úrovní, g je místní tíhové zrychlení, ρ_j je hustota tlakového média v j -tém bodě měření. Standardní nejistoty odpovídajících veličin představují hodnoty $u(x)$.

5.4.3. Přístup ke zdrojům nejistoty vyplývajících z měřených hodnot

dle [L1]

5.4.3.1. Rozlišení

U digitálních tlakoměrů odpovídá rozlišení r nejmenšímu digitu displeje za předpokladu, že se údaj tlaku při jeho změně nemění o více, než odpovídá poslednímu digitu. Pro interval změny platí $2a = r$, na složku nejistoty vlivem rozlišení je uplatňováno rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti. Některá měřidla mají digitální odečet potlačený tak, že změna posledního digitu není jednotková, ale např. 20 % nebo 50 % předposledního digitu. Tato hodnota je pak uvažována jako rozlišení displeje. V opačném případě může být rozlišení displeje tak vysoké, že poslední digit (několik digitů) neodečitelně kmitá. Jako rozlišení uvažujeme v tom případě hodnotu, na které jsme schopni odečíst změnu ± 1 digit.

U zařízení s analogovou indikací (deformační tlakoměry) je rozlišení interpolováno vizuálně


jako hodnota mezi dvěma po sobě následujícími značkami stupnice. Nejmenší odečitelný dílek stupnice je nazýván interpolovaným dělením r . Pro analýzu nejistoty se za interval změny považuje $2a = 2r$ opět s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti. Standardní schopnost odečtu bývá $1/2$ až $1/5$ nejmenšího dílku.

5.4.3.2. Chyba nuly f_0

Nulový bod může být nastaven před každým měřicím cyklem, kterým je kompletní měření při zvyšování a snižování tlaku a hodnota musí být zaznamenána před a po ukončení každého měřicího cyklu. Odečet musí být proveden po úplném odlehčení měřidla (bez zátěže; u relativního tlaku propojení s barometrickým tlakem). Nulová chyba se vypočítá následovně:

$$f_0 = \max\{|p_{ind,2,0} - p_{ind,1,0} - (p_{ref,2,0} - p_{ref1,0})|, |p_{ind,4,0} - p_{ind,3,0} - (p_{ref,4,0} - p_{ref3,0})|, |p_{ind,6,0} - p_{ind,5,0} - (p_{ref,6,0} - p_{ref5,0})|\} \quad (43)$$

Indexy udávají naměřené hodnoty $p_{ind, i, j}$ (kalibrovaný tlakoměr) a $p_{ref, i, j}$ (etalonový tlakoměr) v nulových bodech $j = 0$ série M1 až M6 s $i = 1$ až 6 (lichý index ... zatěžování, sudý index ... odlehčování).

 NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

5.4.3.3. Opakovatelnost b'

Jestliže neprovádíme mezi jednotlivými sériemi demontáž a zpětnou montáž kalibrovaného tlakoměru, určuje se opakovatelnost z rozdílu mezi odchylkami naměřenými v odpovídajících sériích měření, korigovanými hodnotou nulového výstupu (index j udává pořadovou hodnotu měřeného tlaku v sérii):

$$b'_{up,j} = \max\{ |(p_{ind,3,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ind,1,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,3,j} - p_{ref,3,0}) + (p_{ref,1,j} - p_{ref,1,0})|, \\ |(p_{ind,5,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,1,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,5,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,1,j} - p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,5,j} - \\ p_{ind,5,0}) - (p_{ind,3,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ref,5,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,3,j} - p_{ref,3,0})| \} \quad (44)$$

$$b'_{dn,j} = \max\{ |(p_{ind,4,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ind,2,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,4,j} - p_{ref,3,0}) + (p_{ref,2,j} - p_{ref,1,0})|, \\ |(p_{ind,6,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,2,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,6,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,2,j} - p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,6,j} - \\ p_{ind,5,0}) - (p_{ind,4,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ref,6,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,4,j} - p_{ref,3,0})| \}$$

$$b'_{mean,j} = \max\{b'_{up,j}, b'_{dn,j}\}$$

Jestliže se třetí série měření provede po reinstalaci tlakoměru (kontrola reprodukovatelnosti), jsou předchozí rovnice nahrazeny tvarem:

$$b'_{up,j} = |(p_{ind,3,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ind,1,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,3,j} - p_{ref,3,0}) + (p_{ref,1,j} - p_{ref,1,0})| \quad (45)$$

$$b'_{dn,j} = |(p_{ind,4,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ind,2,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,4,j} - p_{ref,3,0}) + (p_{ref,2,j} - p_{ref,1,0})|$$

5.4.3.4. Reprodukovatelnost b

Reprodukovatelnost po reinstalaci kalibrovaného tlakoměru se určuje z rozdílu mezi hodnotami naměřenými v odpovídajících sériích měření, mezi nimiž byla opakovaná montáž provedena, korigovaných hodnotou nulového výstupu:


$$b_{up,j} = \max\{ |(p_{ind,5,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,1,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,5,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,1,j} - \\ p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,5,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,3,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ref,5,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,3,j} - p_{ref,3,0})| \} \quad (46)$$

$$b_{dn,j} = \max\{ |(p_{ind,6,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,2,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,6,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,2,j} - \\ p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,6,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,4,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ref,6,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,4,j} - p_{ref,3,0})| \}$$

$$b_{mean,j} = \max\{b_{up,j}, b_{dn,j}\}$$

5.4.3.5. Hystereze (reverzibilita) h

Hystereze se určuje jako rozdíl mezi odpovídajícími odchylkami výstupních hodnot naměřených při stoupajícím a klesajícím tlaku, korigovaných hodnotou nulového výstupu:

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

$$h_j = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \left| (p_{\text{ind},2m,j} - p_{\text{ind},2m-1,0}) - (p_{\text{ind},2m-1,j} - p_{\text{ind},2m-1,0}) - (p_{\text{ref},2m,j} - p_{\text{ref},2m-1,0}) + (p_{\text{ref},2m-1,j} - p_{\text{ref},2m-1,0}) \right| \quad (47)$$

Proměnná n označuje počet úplných měřicích cyklů m .

5.5. Návrh doporučení pro stanovení nejnížší udávané nejistoty v oboru tlak

Předchozí text sumarizoval očekávané zdroje nejistot při měření tlaku tak, aby bylo možné stanovit nejistotu kalibrace při kombinaci etalonů a kalibrovaných měřidel uvedených v úvodu technické části úkolu. Z etalonových měřidel obsahuje nejvíce složek nejistot použití pístového tlakoměru, proto mu věnujeme samostatnou pozornost. Ostatní varianty lze zpracovat souhrnně podle typu měřidla.

5.5.1. Pístový tlakoměr a zdroje nejistot

Při určení zdrojů nejistoty, zahrnutých do CMC při použití etalonového pístového tlakoměru (PT) můžeme vycházet z klasifikace metodik podle [L1] uvedené v kapitole 2.2. Vzhledem k tomu, že většina pístových tlakoměrů je má přesnost $\leq 0,1$ % RDG, mohli bychom do CMC zahrnout tato měřidla následujícím způsobem:

Základní kalibrační postup dle [L1] – do CMC zahrneme přesnost PT, uvedenou na kalibračním listu pro použití jmenovitých hodnot tlaku, které jsou vyznačeny na závaží.


Standardní kalibrační postup dle [L1] – do CMC zahrneme přesnost PT, uvedenou na kalibračním listu pro použití skutečné efektivní plochy pístu a její nejistoty + skutečných hmotností závaží a jejich nejistot. Pro výpočet nejistoty PT by se mohl použít např. vzorec (20).

Úplný kalibrační postup dle [L1] – do CMC zahrneme přesnost PT, uvedenou na kalibračním listu pro použití skutečné efektivní plochy pístu a její nejistoty + skutečných hmotností závaží a jejich nejistot a současně zahrneme všechny relevantní složky nejistoty popsané v kapitole 1.1 s tím, že jejich velikost dosahuje alespoň (5 až 10) % očekávané nejistoty kalibrace.

Na nejistoty efektivní plochy a hmotnosti uplatníme normální rozdělení pravděpodobnosti, na ostatní složky, určené z maximální možné chyby, rozdělení rovnoměrné.

5.5.2. Složky nejistot a nejnížší udávané nejistoty ostatních měřidel


Následující tabulka shrnuje všechny složky nejistot popsané v textu zprávy a spolu s vysvětlujícími odkazy označuje písmenem A složky, které by měly být zohledněny za uvedených podmínek při určování CMC laboratoře.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018


ZDROJ nejistoty	SLOŽKA nejistoty	Rozdělení pravděpodobnosti	CMC	Poznámka
ETALON	Opakovatelnost	Normální, rovnoměrné ¹	A	
	Přesnost dle specifikace	Rovnoměrné, trojúhelníkové ³	A ⁵	
	Drift etalonu	Rovnoměrné	A ⁵	
	Nejistota kalibrace	Normální	A	
	Vliv teploty	Rovnoměrné	A ⁶	
	Rozlišení	Rovnoměrné		
	Vliv napájení	Rovnoměrné	A	
	Nelinearita ²⁾	Rovnoměrné, trojúhelníkové ³	A ²	
	Vliv statického tlaku	Rovnoměrné	A ⁷	
	Vliv pracovní polohy	Rovnoměrné	A ⁷	
	Nejistota měření vakua nebo barometrické reference	Normální, rovnoměrné ³	A ⁸	
DUT	Opakovatelnost	Normální, rovnoměrné ¹		
	Vliv teploty	Rovnoměrné		
	Rozlišení	Rovnoměrné	A ⁹	
	Vliv napájení	Rovnoměrné		
	Vliv statického tlaku	Rovnoměrné		
	Vliv pracovní polohy	Rovnoměrné		
	Chyba nuly	Rovnoměrné		
	Reprodukovatelnost	Rovnoměrné		
	Hystereze	Rovnoměrné ⁴		
Rozdíl referenčních úrovní	Rovnoměrné			
DMM ¹⁰⁾	Přesnost dle specifikace	Rovnoměrné, trojúhelníkové ³	A ⁵	
	Drift	Rovnoměrné	A ⁵	
	Nejistota kalibrace	Normální	A	
	Rozlišení	Rovnoměrné	A	
	Vliv teploty	Rovnoměrné		
MĚŘICÍ ODPOR ¹⁰⁾	Přesnost dle specifikace	Rovnoměrné, trojúhelníkové ³	A ⁵	
	Drift	Rovnoměrné	A ⁵	
	Nejistota kalibrace	Normální	A	
	Vliv teploty	Rovnoměrné		

Vysvětlivky k tabulce:

- 1.....normální rozdělení pravděpodobnosti při stanovení dle [L17], rovnoměrné při stanovení dle [L1]
- 2.....pouze, pokud je samostatně uvedena a není součástí přesnosti
- 3.....podle odhadovaných vlastností, způsobu zjištění
- 4.....uvedeno v souladu s [L1]; vliv hystereze měřidla může být očekáván v plné výši při každém měření, tomu odpovídá bimodální trojúhelníkové rozdělení pravděpodobnosti

 NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

- 5.....možná kombinace zdrojů podle dlouhodobého chování měřidla
- 6.....pouze při očekávaném použití v širokém rozmezí teplot (externí měření)
- 7.....u měřidel tlakové difference (připadá-li v úvahu)
- 8.....měřidla absolutního tlaku
- 9.....rozlišení tzv. nejlepšího měřidla, které je laboratoř schopna kalibrovat
- 10.....převodníky tlaku

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

6. Přístup ke stanovení nejistoty měření (příklad)

Z kapitoly 1 je patrné, že největší počet zdrojů nejistot lze identifikovat při použití etalonového pístového tlakoměru. Jaká je ale významnost jednotlivých zdrojů ve vazbě na očekávanou přesnost kalibrovaného tlakoměru? Přístup k jednotlivým zdrojům si ukážeme na příkladu kalibrace dvou snímačů tlaku s výstupním signálem (4 až 20) mA a rozsahem (0 až 60) MPa. První ze snímačů (**označme P1**) má výrobcem deklarovanou přesnost **0,05 % FS** (rozsahu) a druhý (**označme P2**) má přesnost **0,5 % FS**. Oba snímače budeme kalibrovat stejným etalonem – pístovým tlakoměrem WIKA CPB 5000 v hydraulické verzi s celkovým rozsahem (0,2 až 100) MPa. Zabývat se budeme pouze nejistotou typu B, protože nejistota typu A je exaktní statistickou veličinou a závisí na počtu měření (směrodatná odchylka).

Výrobcem deklarovaná přesnost etalonu WIKA je 0,008 % MH (měřené hodnoty). Kromě hmotností závaží a jejich nejistot uvádí kalibrační list následující hodnoty:

Efektivní plocha tlakové měřky A_{ef}	$(0,0500158 \pm 0,0000035) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
Referenční teplota	20 °C
Koeficient teplotní roztažnosti α	$(2,2 \pm 0,05) \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Koeficient tlakové deformace λ	$(9,8 \pm 1,2) \cdot 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$
Tíhové zrychlení g	$(9,809273 \pm 0,000002) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Hustota závaží a měřky ρ_M	$(7900 \pm 40) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Hustota použitého oleje ρ_o	$(916 \pm 3) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Hustota vzduchu ρ_v	$(1,205 \pm 0,006) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Použitý multimetr (DMM)	KEITHLEY 2010 (rozlišení 7½ dig.)


Jestliže nastavujeme jmenovitý tlak 60 MPa, je celková hmotnost závaží včetně hmotnosti měřky a nakládacího zvonu $M = 30,601446 \text{ kg}$. Vynásobením hmotnosti M uvedeným tíhovým zrychlením g a dělením efektivní plochou měřky A_{ef} dostaneme skutečnou hodnotu tlaku, která činí $p_T = 60,01662235 \text{ MPa}$. Kdybychom vycházeli pouze ze jmenovitých hodnot tlaku, uvedených na jednotlivých závažích, dopustíme se chyby $\delta p = 0,01662235 \text{ MPa}$, která odpovídá 0,028 % MH. U snímače P1 představuje taková chyba 56 % jeho dovolené chyby, musíme tedy vycházet ze skutečných hmotností jednotlivých závaží.

6.1. Nejistota hmotnosti

Rozšířená kombinovaná nejistota celkové hmotnosti závaží je dle údajů na kalibračním listu $U_M = 220 \text{ mg}$. Pro přepočítání na tlak platí citlivostní koeficient dle vzorce (8), nejistota hmotnosti je uvedena s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Odpovídající složka nejistoty tlaku je tedy:

$$u_{pM} = \sqrt{\left(\frac{p_T}{M}\right)^2 \cdot u_M^2} = \sqrt{\left(\frac{60016622}{30,601446}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,000220}{2}\right)^2} = 216 \text{ Pa} \quad (48)$$

V relativním vyjádření představuje nejistota hmotnosti hodnotu 0,00036 % MH tlaku.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

6.2. Nejistota efektivní plochy pístu

Rozšířená kombinovaná nejistota efektivní plochy pístu je dle údajů na kalibračním listu rovna $U_{Aef} = 0,0000035 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Pro přepočet na tlak platí citlivostní koeficient dle vzorce (6), nejistota efektivní plochy je uvedena s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Odpovídající složka nejistoty tlaku je tedy:

$$u_{pA1} = \sqrt{\left(\frac{-p_T}{A_{ef}}\right)^2 \cdot u_{Aef}^2} = \sqrt{\left(\frac{-60016622}{0,0500158 \cdot 10^{-4}}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,0000035 \cdot 10^{-4}}{2}\right)^2} = 2100 \text{ Pa} \quad (49)$$

V relativním vyjádření představuje nejistota efektivní plochy hodnotu 0,0035 % MH tlaku.

6.3. Vliv tlakové deformace

Velikost efektivní plochy pístu je při vysokém tlaku závislá na koeficientu tlakové deformace. Rozšířená kombinovaná nejistota tohoto koeficientu je dle údajů na kalibračním listu rovna $U_\lambda = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$. Pro přepočet na tlak platí citlivostní koeficient dle vzorce (19), nejistota koeficientu tlakové deformace je uvedena s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Odpovídající složka nejistoty tlaku je tedy:

$$u_{p\lambda} = \sqrt{(A_{ef} \cdot p_T)^2 \cdot u_\lambda^2} = \sqrt{(0,0500158 \cdot 10^{-4} \cdot 60016622)^2 \cdot \left(\frac{1,2 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 1000000}\right)^2} \quad (50)$$

$$u_{p\lambda} = 1,8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$$

6.4. Vliv tlakové deformace na efektivní plochu pístu

Jak bylo uvedeno, má rozšířená nejistota efektivní plochy pístu hodnotu $0,0000035 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, tj. $3,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$, normální rozdělení pravděpodobnosti. Spojením u_{Aef} a $u_{p\lambda}$ dostáváme:

$$u_A = \sqrt{(1,75 \cdot 10^{-10})^2 + (1,8 \cdot 10^{-11})^2} = 1,76 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$$


Dosažením této hodnoty do rovnice (49) dostaneme novou hodnotu nejistoty efektivní plochy pístu o velikosti $u_{pA} = 2112 \text{ Pa}$, což odpovídá relativní hodnotě 0,00352 % MH tlaku. Změna je tedy nepatrná.

6.5. Nejistota tíhového zrychlení

Rozšířená kombinovaná nejistota tíhového zrychlení je dle údajů na kalibračním listu rovna $U_g = 0,000002 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Pro přepočet na tlak platí citlivostní koeficient dle vzorce (12), nejistota tíhového zrychlení je uvedena s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Odpovídající složka nejistoty tlaku je tedy:

$$u_{pg} = \sqrt{\left(\frac{p_T}{g}\right)^2 \cdot u_g^2} = \sqrt{\left(\frac{60016622}{9,809273}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,000002}{2}\right)^2} = 6,12 \text{ Pa} \quad (51)$$

V relativním vyjádření představuje nejistota tíhového zrychlení hodnotu 0,00001 % MH tlaku.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

Nejistota tíhového zrychlení je v podstatě nevýznamná. Významná je ale znalost místního tíhového zrychlení a přepočítání hodnoty tlaku na místní hodnotu g_M . Výpočet v kalibračním listu byl proveden pro hodnotu $g = 9,809273 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Hodnota tíhového zrychlení v místě použití je ale $g_M = 9,810076 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Přepočteme-li hodnotu tlaku na místní tíhové zrychlení, dostaneme skutečný tlak o velikosti $p_M = 60021535 \text{ Pa}$. Rozdíl tlaků $p_M - p_T = \delta_{pg} = 4913 \text{ Pa}$, což představuje 0,0082 % MH tlaku. U snímače P1 jde o 16 % jeho přesnosti a je tedy nutné pracovat s přepočtenou hodnotou tlaku na místní tíhové zrychlení.

6.6. Nejistota koeficientu teplotní roztažnosti

Rozšířená kombinovaná nejistota teplotního koeficientu je dle údajů na kalibračním listu rovna $U_\alpha = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Pro přepočítání na tlak platí citlivostní koeficient dle vzorce (13), nejistota teplotního koeficientu je uvedena s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Odpovídající složka nejistoty tlaku je tedy:

$$u_{p\alpha} = \sqrt{(-p_T \cdot (T - T_{ref}))^2 \cdot u_\alpha^2} = \sqrt{(-60016622.5)^2 \cdot \left(\frac{0,5 \cdot 10^{-5}}{2}\right)^2} \quad (52)$$

$$u_{p\alpha} = 750 \text{ Pa}$$

V relativním vyjádření představuje nejistota teplotního koeficientu hodnotu 0,00125 % MH tlaku. Do výpočtu jsme záměrně zahrnuli teplotní rozmezí $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, což je v souladu s požadavkem [L1] – teplotní rozmezí (18 až 28) $^\circ\text{C}$. Kdybychom vycházeli z definičních podmínek používaných u pístových tlakoměrů, tj. z teplotního rozmezí $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, změnila by se hodnota nejistoty na $u_{p\alpha} = 300 \text{ Pa}$.

6.7. Nejistota měření teploty

Pro měření teploty používáme digitální teploměr s rozšířenou kombinovanou nejistotou měření dle údajů na kalibračním listu $U_T = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro přepočítání na tlak platí citlivostní koeficient dle vzorce (14), nejistota měření teploty je uvedena s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Odpovídající složka nejistoty tlaku je tedy:

$$u_{pT} = \sqrt{(-p_T \cdot \alpha)^2 \cdot u_T^2} = \sqrt{(-60016622 \cdot 2,2 \cdot 10^{-5})^2 \cdot \left(\frac{0,2}{2}\right)^2} = 132 \text{ Pa} \quad (53)$$


V relativním vyjádření představuje nejistota měření teploty hodnotu 0,00022 % MH tlaku.

6.8. Nejistota hustoty tlakového média

Nejistota hustoty média je pro tlaky nad 10 MPa nevýznamná. Citlivostní koeficient podle vzorce (15) obsahuje navíc hodnotu rozdílu referenčních úrovní. Při dodržení nulového rozdílu má i nejistota hustoty média nulovou hodnotu.

6.9. Nejistota hustoty vzduchu

Rozšířená kombinovaná nejistota hustoty vzduchu je dle údajů na kalibračním listu rovna $U_{\rho V} = 0,006 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro přepočítání na tlak platí citlivostní koeficient dle vzorce (9) s tím, že

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

rozdíl referenčních úrovní je nulový. Nejistota hustoty vzduchu je uvedena s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Odpovídající složka nejistoty tlaku je tedy:

$$u_{p\rho_V} = \sqrt{\left(-\frac{p_T}{\rho_M}\right)^2 \cdot u_{\rho_V}^2} = \sqrt{\left(-\frac{60016622}{7900}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,006}{2}\right)^2} = 23 \text{ Pa} \quad (54)$$

V relativním vyjádření představuje nejistota hustoty vzduchu hodnotu 0,000 04 % MH tlaku.

6.10. Nejistota hustoty závaží

Podle tabulek můžeme najít hustotu vzduchu pro teplotu 20 °C (kalibrační teplota $\rho_{Vcal} = 1,2047 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a pro pětistupňový rozdíl – pro 25 °C (maximální pracovní teplota) platí hodnota $\rho_V = 1,1845 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Rozšířená kombinovaná nejistota hustoty závaží je dle údajů na kalibračním listu rovna rovna $U_{\rho_M} = 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro přepočítání na tlak platí citlivostní koeficient dle vzorce (10). Nejistota hustoty závaží je uvedena s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Odpovídající složka nejistoty tlaku je tedy:

$$u_{p\rho_M} = \sqrt{\left(p_T \cdot \frac{(\rho_V - \rho_{Vcal})}{\rho_M^2}\right)^2 \cdot u_{\rho_M}^2} = \sqrt{\left(\frac{60016622 \cdot 0,02}{7900^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{40}{2}\right)^2} = 0,39 \text{ Pa} \quad (55)$$

Hodnota je velmi malá, zanedbatelná vůči ostatním složkám.

6.11. Nejistota měření výstupního signálu DMM

Nejistotu měření proudového výstupu snímačů stanovíme pro dva způsoby měření:

- přímé měření proudu DMM
- měření úbytku napětí na přesném odporu a výpočet velikosti proudu dle Ohmova zákona

6.11.1. Přímé měření proudu

Roční specifikace DMM na proudovém rozsahu do 100 mA je dle katalogového listu $\pm(500 \text{ ppm RDG} + 40 \text{ ppm FS})$. Výstupní proud pro hodnotu tlaku 60 MPa je 20 mA. Maximální chyba DMM je tedy:


$\delta_{DMM} = (0,0005 \cdot 20000 + 0,00004 \cdot 10000) = 14 \text{ }\mu\text{A}$, rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti. Drift DMM stejně jako nejistota kalibrace jsou velmi malé a vzhledem k ostatním složkám nejistot jsou zanedbatelné. Odpovídající nejistota měření DMM je tedy

$$u_{DMM} = \frac{\delta_{DMM}}{\sqrt{3}} = \frac{14}{\sqrt{3}} = 8,08 \text{ }\mu\text{A} \quad (56)$$

Rozsah výstupní veličiny převodníku je (4 až 20) mA, měřicí rozpětí pro rozsah 60 MPa je tedy 16 mA. Hodnota u_{DMM} představuje 0,0505 % měřicího rozpětí. Je zřejmé, že tato hodnota koresponduje s přesností převodníku P1, a tento způsob měření je pro přesné převodníky nevhodný.

6.11.2. Nepřímé měření proudu

Specifikace napěťových rozsahů DMM jsou vždy nejméně o řád přesnější než rozsahy proudové. Jestliže zatížíme přesný měřicí odpor proudovým výstupem převodníku tlaku a

	<p>Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3</p>	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

měříme úbytek napětí na tomto odporu, podstatně zvýšíme přesnost měření, jak si ukážeme na následujícím příkladu. Využíváme platnost jednoduchého Ohmova zákona

$$I = \frac{U}{R} \quad (57)$$

I ... měřený proud (A)

U ... úbytek napětí na měřicím odporu (V)

R ... měřicí odpor (Ω)

Protože jde o nepřímé měření, platí dle [L17] pro nejistotu proudového výstupu:

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{\delta I}{\delta U}\right)^2 \cdot u_U^2 + \left(\frac{\delta I}{\delta R}\right)^2 \cdot u_R^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 \cdot u_U^2 + \left(-\frac{U}{R^2}\right)^2 \cdot u_R^2} \quad (58)$$

Pro měření použijeme měřicí odpor o velikosti $R = 500 \Omega$ kalibrovaný s rozšířenou nejistotou pro $k = 2$ (normální rozdělení pravděpodobnosti) ... $U_R = 20$ ppm tj. $0,01 \Omega$. Rozsahu (4 až 20) mA odpovídá při použití uvedeného odporu napěťový výstup (2 až 10) V. Na plném rozsahu snímače tlaku je tedy výstupní napětí $U = 10$ V. Specifikace multimetru pro rozsah napětí do 10 V je $\pm (24 \text{ ppm RDG} + 4 \text{ ppm FS})$. Maximální možná chyba multimetru je tedy:

$\delta_U = 2,8 \cdot 10^{-4}$ V; rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

Dosadíme-li do vzorce (58), dostaneme:

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{1}{500}\right)^2 \cdot \left(\frac{2,8 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(-\frac{10}{500^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,01}{2}\right)^2} = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ A} \quad (59)$$

Standardní nejistota $0,38 \mu\text{A}$ odpovídá $0,0024 \%$ MH. Nepřímé měření tedy zlepšilo hodnotu nejistoty téměř dvacetkrát.

6.12. Vyhodnocení standardní nejistoty převodníku tlaku P1

Vzhledem k očekávané přesnosti převodníku pracujeme se skutečnou velikostí tlaku nastaveného na etalonu, používáme přepočítání na místní tíhové zrychlení, u vysokého tlaku pracujeme s tlakovou deformací pístu a používáme nepřímé měření výstupního proudu. Do nejistoty typu B tedy zahrneme (uvedeno v % z měřené hodnoty):

nejistotu hmotnosti závaží ... $u_{pM} = 0,0025$

nejistotu efektivní plochy pístu s respektováním koeficientu stlačitelnosti ... $u_{pA} = 0,00352$

nejistotu koeficientu teplotní roztažnosti ... $u_{p\alpha} = 0,00125$

nejistotu měření teploty ... $u_{pT} = 0,00022$


nejistotu měření DMM ... $u_I = 0,0024$

Nejistoty hodnoty tíhového zrychlení a hustoty vzduchu jsme sice určili, ale jejich velikost je oproti ostatním složkám nevýznamná. Výsledná standardní nejistota typu B bude:

$$u_B = \sqrt{\sum u_i^2} = 0,0051 \% \text{ MH} \quad (60)$$

Výsledné rozdělení pravděpodobnosti předpokládáme normální ($k = 2$), za předpokladu nulové nejistoty typu A bude rozšířená standardní nejistota:

$$U = k \cdot u_B = 0,01 \% \text{ MH} \quad (61)$$

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

Nejistota kalibrace je tedy pětinou dovolené chyby kalibrovaného snímače, což splňuje obecná pravidla návaznosti.

6.13. Vyhodnocení standardní nejistoty převodníku tlaku P2


Při kalibraci převodníku P2 použijeme jmenovité hodnoty tlaků, které jsou uvedeny na každém závaží. Jak je uvedeno v úvodu kapitoly, dopouštíme se tím maximální možné chyby $\delta_{pM} = 0,028 \%$ MH (rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti). Nerespektováním místního tíhového zrychlení se dle kapitoly 5.5 dopouštíme maximální chyby $\delta_{pg} = 0,0082 \%$ MH (rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti). Měření proudového výstupu provádíme přímo na proudovém rozsahu DMM. Nejistota efektivní plochy a teplotního koeficientu je obdobná jako u P1, ostatní složky jsou zanedbatelné.

Výsledná kombinovaná nejistota typu B je tedy:

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{\delta_{pM}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{pg}}{\sqrt{3}}\right)^2 + u_{pA}^2 + u_{DMM}^2 + u_{p\alpha}^2} \quad (62)$$

Hodnota u_B je po dosazení 0,0534 % MH, rozšířená standardní nejistota kalibrace (při nulové nejistotě typu A) pro normální rozdělení pravděpodobnosti ($k = 2$) je tedy $U = 0,11 \%$ MH. Nejistota kalibrace je tedy opět cca pětinou dovolené chyby kalibrovaného snímače, což splňuje obecná pravidla návaznosti.

Z uvedeného je patrné, jak přistupovat k používání etalonů, resp. jejich deklarované přesnosti, při kalibraci měřidel rozdílných přesností a také při stanovení nejistoty kalibrace. Přestože dokážeme určit řadu složek nejistoty, musíme umět vybrat ty, které mají zásadní vliv, a zanedbat nepodstatné zdroje. Nejistoty stanovujeme způsobem, který vychází jednak z našeho etalonového vybavení, jednak z očekávané nejvyšší přesnosti měřidel, která chceme kalibrovat.

	<p>Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3</p>	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018


7. Shrnutí

Úkol navázal na úkol PRM č. VII/5/17 *Podklad pro průběžné sjednocování výpočtu CMC v akreditovaných kalibračních laboratořích v oboru teplota* a na starší úkol PRM č. VII/5/09 *Zpracování podkladů pro průběžné sjednocování posuzování akreditovaných kalibračních laboratoří tlaku*.

Při řešení úkolu byly shromážděny informace o jednotlivých vlivech na nejistotu měření tlaku. Výsledný dokument je určen jako podklad pro sjednocování pohledu na význam a vliv jednotlivých příspěvků k nejistotě měření tlaku a jejich správné vyhodnocování v kontextu dané laboratoře a má sloužit harmonizační nástroj pro odborné posuzovatele v oboru, laboratoře i jejich zákazníky. Podrobný přehled jednotlivých příspěvků v rozpočtu nejistot je vztažen na konkrétní typy měřidel a i s uvedeným příkladem výpočtu má pomoci pro rychlou orientaci především odborných posuzovatelů a pracovníků kalibračních laboratoří. Obsah zprávy je také základem pro přípravu prezentace pro seminář, který ČIA plánuje uspořádat pro akreditované subjekty a odborné posuzovatele v první polovině roku 2019.


Odborná část textu bude po drobných úpravách použita jako základ části textu článku pro časopis *Metrologie*. Řešitelé předpokládají, že tento článek zahrne i výsledky paralelně řešeného úkolu PRM č. VII/04/18 *Podklad pro průběžné sjednocování výpočtu CMC v akreditovaných kalibračních laboratořích v oboru objem*, jehož východiska a účel a smysl je shodný, ovšem definitivní podoba článku bude záviset na prostoru a podmínkách, které redakce časopisu poskytne.

Jak z předložené zprávy vyplývá, řešení úkolu probíhalo v souladu se zadáním s cílem připravit základní dokumenty pro usnadnění posuzování a vůbec pohledu na stanovování hodnot CMC v oboru teplota, aby bylo možné lépe prokázat jednotný způsob posuzování kalibračních laboratoří a minimalizoval se osobní vliv jednotlivých odborných posuzovatelů, přestože určitá míra individuálního přístupu je nevyhnutelná a zůstane součástí posuzování i nadále.

 <small>NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN</small>	<p>Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3</p>	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

8. Závěr

Takto koncipovaný úkol rozvoje metrologie i jeho řešení lze po oponentním řízení prohlásit za řádně dokončený a naplněný s tím, že je možné uhradit náklady na řešení úkolu čerpané v souladu s návrhem uvedeným v plánovacím listu.

	<p>Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3</p>	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

9. POUŽITÁ LITERATURA

L1: Euramet Calibration Guide No. 17: Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers; Version 3.0 (EURAMET 04/2017)

L2: ČSN EN 61298-1 ed.2: Zařízení pro měření a řízení průmyslových procesů – obecné metody a postupy pro hodnocení vlastností. Část 1: Obecné úvahy (08/2009)

L3: ČSN EN 61298-2 ed.2: Zařízení pro měření a řízení průmyslových procesů – obecné metody a postupy pro hodnocení vlastností. Část 2: Zkoušky při referenčních podmínkách (08/2009)

L4: ČSN EN 60770-1 ed.2: Měřicí převodníky pro řídicí systémy průmyslových procesů. Část 1: Metody hodnocení vlastností (09/2011)

L5: ČSN EN 60770-3 ed.2: Měřicí převodníky pro řídicí systémy průmyslových procesů. Část 3: Metody hodnocení vlastností inteligentních převodníků (03/2015)

L6: ČSN EN 837-1: Měřidla tlaku. Část 1: Tlakoměry s pružnou trubicí – rozměry, metrologie, požadavky a zkoušení (03/1998)

L7: ČSN EN 837-3: Měřidla tlaku. Část 3: Membránové a krabicové tlakoměry – rozměry, metrologie, požadavky a zkoušení (03/1998)

L8: ČSN 18 1002: Měřicí převodníky – všeobecné technické požadavky (03/1982 – dnes neplatná)

L9: ČSN 18 1005: Měřicí převodníky (snímače) tlaku s elektrickými unifikovanými analogovými výstupními signály – všeobecné technické požadavky a metody zkoušek (01/1985 – dnes neplatná)

L10: TPM 4655-01: Měřicí převodníky tlaku – metody zkoušení při ověřování (ČMI 02/2002)

L11: ČSN 25 7201: Provozní deformační tlakoměry – všeobecná ustanovení (10/1985 – dnes neplatná)

L12: ČSN 25 7207: Manometry, manovakuometry a vakuometry indikační – metody zkoušení při úředním ověřování (12/1980 – dnes neplatná)

L13: ČSN 25 7214: Etalonové deformační manometry a vakuometry – technické požadavky (05/1984 – dnes neplatná)

L14: ČSN 25 7215: Manometry, vakuometry deformační; sekundární etalony – metody zkoušení pro úřední ověřování (06/1986 – dnes neplatná)

L15: Doporučení RM AERO 802 41: Kalibrace a použití elektromechanických manometrů (směrnice leteckého průmyslu 08/1993)

L16: TPM 4654-01: Měřicí převodníky tlaku – metrologické a technické požadavky (ČMI 02/2002)


L17: Dokument EA-04/02 M:2013: Vyjádření nejistoty měření při kalibraci (překlad ČIA 04/2014)

L18: Guideline DKD-R 6-1: Calibration of Pressure Gauges; edition 03/2014

L19: Douglas A. Olson: NIST Calibration Services for Pressure using Piston Gauge Standards (NIST Special Publication 250-39 2009; 07/2009)

L20: Douglas A. Olson, R. Greg Driver: SIM Metrology School – PRESSURE (NIST 10/2013)

L21: M. P. Fitzgerald, D. J. Jack: MSL Technical Guide 13 – Pressure Gauge Calibration (MSL Measurements Standards Laboratory of New Zealand 07/2006)

	<p>Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3</p>	Celkem 49 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 18.10.2018

L22: Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum (NPL; Institute of Measurement and Control, ISBN 0 904457 29 X; 1998)

L23: Snímače tlaku a tlakové diference – JSP Měření a regulace (JD 01 – 05/2015)

L24: Jiří Tesař, Dominik Pražák: Pressure Transducers with unified (4 – 20) mA or (10 – 50) mA Output Signal – 4th Draft OIML Recommendation TC10-SC1 (datum neuváděno)

L25: Zdeněk Faltus: Kalibrace deformačních tlakoměrů (Škola tlaku BD Sensors 2005)

L26: Martin Vičar: Kalibrace převodníků tlaku (Škola tlaku BD Sensors 2005)

L27: OIML R 101: Indicating nad recording Pressure Gauges, Vacuum Gauges and Pressure-vacuum Gauges with elastic sensing Elements (Ordinary Instruments – edition 1991)

L28: OIML R 109: Pressure Gauges and Vacuum Gauges with elastic sensing Elements (Standard instruments – edition 1993)

L29: OIML R 110: Pressure Balances (edition 1994)

L30: OIML R 111-1: Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃; Part 1: Metrological and technical Requirements (edition 2004)

L31: ČSN IEC 381-1 (180110) Analogové signály pro systémy řízení procesů. Část 1: Stejnoseměrné proudové signály (12/1997)

L32: ČSN IEC 381-2 (180111) Analogové signály pro systémy řízení procesů. Část 2: Stejnoseměrné napěťové signály (05/1993)

L33: Informační materiály firem FLUKE, EMERSON ROSEMOUNT, YOKOGAWA, HONEYWELL, ENDRESS & HAUSER