



**Česká metrologická společnost, z.s.**

**Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1**

tel/fax: 221 082 254

e-mail: cms-zk@csvts.cz

www.csvts.cz/cms

**Kalibrační postup**

**KP 2.4.1/01/22**

**DEFORMAČNÍ TLAKOMĚRY**

**Praha**

Září 2022

**Vzorový kalibrační postup** byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie

**Číslo úkolu:** PRM/VII/2/22

**Zadavatel:** Česká republika – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, organizační složka státu

**Řešitel:** Česká metrologická společnost, z.s.

## 1 Předmět kalibrace

Tento kalibrační postup se vztahuje ke kalibraci deformačních tlakoměrů s pružným měřicím prvkem (dále deformační tlakoměr). Při kalibraci deformačních tlakoměrů se používá metoda přímého porovnání údajů etalonového a kalibrovaného tlakoměru, kdy jsou oba tlakoměry zatíženy stejným tlakem. Kalibrační postup platí pro kalibraci deformačních tlakoměrů na měření přetlaku, absolutního tlaku a diferenčního tlaku. Mezi měřidla absolutního tlaku patří také deformační barometry (aneroidy). Měřicí rozsah kalibrovaných tlakoměrů je omezen pouze měřicím rozsahem etalonů tlaku kalibrační laboratoře.

## 2 Související normy a metrologické předpisy

	Mezinárodní metrologický slovník VIM 3	[1]
ČSN EN 472	Měřidla tlaku - Terminologie	[2]
ČSN EN 837-1	Měřidla tlaku - Část 1: Tlakoměry s pružnou trubicí - Rozměry, metrologie, požadavky a zkoušení	[3]
ČSN EN 837-3	Měřidla tlaku - Část 3: Membránové a krabicové tlakoměry - Rozměry, metrologie, požadavky a zkoušení	[4]
EA-4/02	Vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci	[5]
OIML R 97	Barometers	[6]
EURAMET Calibration Guide No. 17	Kalibrační postup pro elektromechanické a mechanické manometry	[7]
Gudeline DKD-R 6-1	Kalibrace tlakoměrů	[8]
ECOMET Calibration Guide No 04	Kalibrační postup pro měřidla tlaku	[9]
ASME 40.1	Gauges - Pressure Indicating Dial Type - Elastic Element	[10]
Ing. Zdeněk Faltus	Harmonizace postupů kalibrace tlakoměrů z pohledu dokumentu EURAMET cg-17	[11]
PRM VII/05/21 ČIA	Principy kalibrace v oboru tlaku	[12]
PRM VII/05/18 ČIA	Podklad pro průběžné sjednocování výpočtu CMC v akreditovaných kalibračních laboratořích v oboru tlak	[13]
ČSN EN ISO/IEC 17025	Posuzování shody - Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří	[14]
ILAC-G8:09/2019	Pokyny pro použití rozhodovacích pravidel a uvádění výroků o shodě	[15]

### 3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci tlakoměrů je dána předpisem organizace. Příslušní pracovníci mají být seznámeni a proškoleni s tímto postupem. Doporučuje se certifikace odborné způsobilosti těchto pracovníků.

### 4 Názvosloví, definice

Názvosloví a definice použité v kalibračním postupu jsou obsaženy v příslušných normách (viz čl. 2), zejména v Mezinárodním metrologickém slovníku VIM 3, ČSN EN 472 a v dalších publikacích věnovaných metrologické terminologii.

Tlakoměry vyrobené podle americké normy ASME 40.1 mají přesnost deklarovanou podle tabulky 1:

Třída přesnosti	Dovolená chyba		
	První čtvrtina měřícího rozpětí	Druhá a třetí čtvrtina měřícího rozpětí	Poslední čtvrtina měřícího rozpětí
4A (laboratorní tlakoměry)	±0,10 % měřícího rozpětí		
3A (zkušební tlakoměry)	±0,25 % měřícího rozpětí		
2A (procesní tlakoměry)	±0,25 % měřícího rozpětí		
1A (průmyslové tlakoměry)	±1 % měřícího rozpětí		
A (průmyslové tlakoměry)	±2 % měřícího rozpětí	±1 % měřícího rozpětí	±2 % měřícího rozpětí
B (komerční tlakoměry)	±3 % měřícího rozpětí	±2 % měřícího rozpětí	±3 % měřícího rozpětí
C (komerční tlakoměry)	±4 % měřícího rozpětí	±3 % měřícího rozpětí	±4 % měřícího rozpětí
D (komerční tlakoměry)	±5 % měřícího rozpětí		

TABULKA č. 1: Přesnost tlakoměrů dle ASME 40.1

## 5 Prostředky potřebné pro kalibraci

### 5.1 Při kalibraci deformačních tlakoměrů se používají:

- *referenční a pracovní etalony tlaku*, tj. pístové tlakoměry, kapalinové tlakoměry, indikační tlakoměry s deformačním členem, elektrické tlakoměry s analogovou nebo digitální indikací, snímače a převodníky tlaku, kalibrátory tlaku – vše s odpovídajícím rozsahem měření,
- *pomocné měřicí přístroje*, které slouží k měření parametrů okolního prostředí – teploměr, vlhkoměr, příp. stopky na měření těsnosti kalibrační sestavy
- *pomocná měřicí zařízení*, tj. zdroje tlakového média, regulátory, redukční ventily, vývěvy, filtry, odlučovače nečistot, oddělovače tlakového média, montážní nářadí, závitové redukce vnějších i vnitřních závitů, propojovací potrubí (kovové trubičky, gumové nebo plastové hadičky), zkušební komory na zkoušení otevřených barometrů bez možnosti připojení impulsní hadičky apod.

### 5.2 Přístroje použité při kalibraci musí vyhovovat následujícím podmínkám:

- musí mít zaručenou metrologickou návaznost a platný kalibrační list,
- v každém zkoušeném tlakovém bodě přesnost etalonu tlaku použitého při kalibraci vyjádřená ve formě rozšířené nejistoty s pravděpodobností pokrytí asi 95 % má být menší nebo rovna jedné čtvrtině přesnosti (největší dovolené chyby) kalibrovaného tlakoměru.

## 6 Obecné podmínky kalibrace

### 6.1 Referenční podmínky:

Referenční podmínky definované v jednotlivých předpisech nejsou zcela jednotné, což si ukážeme na příkladu referenční teploty a její tolerance.

*Požadavky na teplotu dle [L3 a L4]:*

Teplota prostředí ( $20 \pm 2$ ) °C v případě kalibrace tlakoměrů tříd přesnosti (TP) 0,1 až 0,6; pro ostatní (horší) TP musí být teplota udržována v rozpětí ( $20 \pm 5$ ) °C.

*Požadavky na teplotu dle [L7, L8 a L9]:*

Teplota při kalibraci musí být udržována v rozmezí (18 až 28) °C, během kalibrace nesmí změna teploty překročit interval  $\pm 1$  °C.

*Požadavky na teplotu dle [L6]:*

Barometry se kalibrují při pracovní teplotě, která by měla být uvedena v manuálu měřidla (obvykle je referenční teplota 20 °C). Během kalibrace nesmí změna teploty překročit interval  $\pm 1$  °C. Podle zrušené ČSN 25 7201 nesměla změna teploty prostředí v průběhu jedné série měření překročit:

- |            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| $\pm 1$ °C | pro třídu přesnosti 0,1 až 0,25; |
| $\pm 2$ °C | pro třídu přesnosti 0,4 až 1;    |
| $\pm 3$ °C | pro třídu přesnosti 1,6 až 6.    |

Teplotní koeficient deformačního tlakoměru uvádějí výrobci jen výjimečně. Podle [L3] je max. teplotní koeficient pro tlakoměry s pružnou trubicí 0,04 %/K, podle [L4] je max. teplotní koeficient pro krabicové tlakoměry 0,06 %/K a pro membránové tlakoměry 0,08 %/K. Pomocí těchto koeficientů je možné akceptovat takovou změnu teploty během kalibrace (jednoho cyklu), která nezpůsobí chybu větší než 10 % dovolené chyby tlakoměru.

Jestliže by mohla nejistota měření ovlivnit hustota vzduchu (vliv vztlaku při použití etalonových pístových tlakoměrů), musí být měřena i relativní vlhkost vzduchu a barometrický tlak. Limitní hodnoty těchto veličin předpisy nestanovují, běžně jsou akceptovány rozsahy (20 až 80) % relativní vlhkost vzduchu a (80 až 110) kPa barometrický tlak.

Vliv teploty je nutné respektovat i při temperaci měřidla před vlastní kalibrací. Doba temperace vyplývá z vlastností měřidla (hmotnost, citlivost, použité materiály apod.) a z rozdílu teplot mezi laboratoří a okolím. Obvykle je doporučena temperační doba min. 6 hodin, pro barometry doporučuje [L6] až 10 hodin stabilizace při laboratorní teplotě.

Vibrace, rázy, vnější elektrická a magnetická pole a další ovlivňující veličiny je nutno vyloučit nebo minimalizovat jejich vliv na měření (rozkmit ukazovatele nesmí být větší než 0,1 velikosti dílku stupnice tlakoměru).

## 7 Rozsah kalibrace

Při kalibraci deformačních tlakoměrů se provádějí:

- vnější prohlídka a příprava ke kalibraci (viz čl. 8.1, 8.2),
- zkouška správnosti
- zkouška polohy ukazovatele na nulové značce (viz čl. 8.4.1),
- zkouška rovnoměrnosti pohybu ukazovatele (viz čl. 8.4.2),
- měření metrologických parametrů (viz čl. 9).

## 8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

### 8.1 Kontrola měřidel dodaných ke kalibraci – vnější prohlídka

Při přebírání tlakoměru ke kalibraci je třeba, aby odpovědný pracovník kalibrační laboratoře posoudil, zda dodaný předmět kalibrace odpovídá údajům uvedeným v objednávce nebo dodacím listu. Současně se provede vnější prohlídka, při které se kontroluje zda je tlakoměr v bezchybném a čistém stavu, nejeví známky koroze, poškození a znečištění. Závit přípojky musí být bezchybný, na skle nesmí být kazy, praskliny, změny barvy a jiné chyby, které ztěžují čtení údajů. V případě, že byly zjištěny závažné nesrovnalosti nebo technické nedostatky, tlakoměr se dále nezkouší, dokud se závady neodstraní. Současně kontrolujeme údaje, které by měly být na tlakoměru (nebo v technické dokumentaci) uvedeny. Patří mezi ně zejména:

- název nebo označení výrobce;

- výrobní číslo nebo obdobné identifikační označení (např. metrologické číslo, evidenční číslo atd.),
- měřicí rozsah včetně měřicí jednotky,
- třída přesnosti,
- značka pracovní polohy (pokud je odlišná od vertikální),
- nápis nebo označení prostředí při speciálním použití přístroje,
- povinné značky při použití speciálních médií (kyslík, acetylén, argon apod.),
- korekční teplotní koeficient u barometrů.

Zákazník může požadovat rozsah kalibrace odlišný od celkového měřicího rozsahu tlakoměru. V tom případě uvedeme do kalibračního listu celkový i kalibrovaný rozsah.

## 8.2 Příprava měřidel ke kalibraci

Tlakoměr se umístí do prostředí s teplotou a vlhkostí vzduchu dle čl. 6 na dobu potřebnou pro vyrovnání teplot, přičemž se zohlední především počáteční rozdíl teplot.

Tlakoměr se připraví ke kalibraci, v souladu s jeho technickou dokumentací se provede tlakové zapojení. Při instalaci kalibrovaného tlakoměru je nutné dodržet tyto zásady:

- instalovat kalibrované měřidlo co možná nejbližší etalonovému tlakoměru do polohy specifikované výrobcem, číselník musí být ve jmenovité poloze  $\pm 3^\circ$ ,
- použít propojení tlakoměrů vhodné k aplikovanému tlaku, co nejkratší a s dostatečným vnitřním průměrem na zabezpečení přenosu tlakového média,
- zajistit čistotu a těsnost tlakového rozvodu; v případě znečištěných tlakoměrů použít oddělovací komoru nebo odlučovač nečistot, které zajistí ochranu etalonu před znečištěním,
- při práci s plynným médiem používat čistý a suchý inertní plyn (např. vzduch, dusík) o teplotě blízké teplotě okolí,
- očistit použité tlakové spojení od případné kapaliny uvnitř,
- při práci s kapalným médiem použít kapalinu doporučenou výrobcem příp. používanou zákazníkem (pokud je to možné),
- použít čisté tlakové spojení, odvzdušnit tlakový rozvod,
- minimalizovat výškovou diferenci referenčních úrovní kalibrovaného měřidla a etalonu; referenční úroveň kalibrovaného měřidla a etalonu musí být v ideálním případě ve stejné výšce. Pokud není možno tuto podmínku splnit, je třeba změřit odlehlost mezi referenční úrovní etalonu a kalibrovaného měřidla a vypočítat hydrostatický tlak  $p_h$  (Pa):

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

kde  $\rho$  je hustota tlakového média ( $\text{kg/m}^3$ );  
 $g$  místní tíhové zrychlení ( $\text{m/s}^2$ );  
 $h$  rozdíl referenčních úrovní etalonu a kalibrovaného měřidla (m).

Pokud je tlakoměr umístěn výše než referenční úroveň etalonu, hodnota  $p_h$  se odečte od hodnoty etalonu. Naopak, pokud je umístěn níže, hodnota  $p_h$  se připočítá k hodnotě etalonu. Odlehlost referenčních úrovní  $h$  nesmí způsobit chybu větší než 10 % dovolené chyby tlakoměru, velikost závisí na použitém tlakovém médiu (plyn, kapalina).

### 8.3 Zkouška těsnosti uzavřeného barometru

Těsnost uzavřeného barometru se zkouší měřením poklesu tlaku, v závislosti na čase při horní nebo dolní mezi měřicího rozsahu, vytvořeného v barometru při uzavřeném přívodu, přičemž pokles tlaku se zjišťuje z údajů barometru. Po vytvoření zkušební tlaku a uzavření přívodu zkušební média do barometru se po 5 minutách výdrže čtou údaje barometru ve třech dvouminutových intervalech, dohromady čtyřikrát.

Údaje zjištěné při zkoušce těsnosti se vyhodnocují tak, že z naměřených hodnot tlaku  $p_i$  se stanoví rozdíly dvou po sobě jdoucích údajů

$$\Delta p_i = p_i - p_{i+1} \quad (2)$$

Ze zjištěných hodnot se vypočítá střední hodnota poklesu tlaku za minutu  $\Delta p_s$  podle vztahu (3).

$$\Delta p_s = \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta p_i}{6} \quad (3)$$

Hodnota poklesu tlaku v barometru při zkoušce těsnosti má být menší než mezní hodnota dovolené chyby kalibrovaného barometru za minutu.

### 8.4 Zkouška správnosti

Před vlastní kalibrací se provede trojí postupné zatížení tlakem v celém měřicím rozsahu kalibrovaného měřidla v každém směru. [L7] požaduje min. dvojí postupné zatěžování, [L8 a L9] má počet předběžných zatěžovacích cyklů vázaný na TP tlakoměru (TP < 0,1 ... tři zatěžovací cykly; TP = (0,1 až 0,6) ... dva zatěžovací cykly; TP > 0,6 ... jeden zatěžovací cyklus).

#### 8.4.1 Zkouška polohy ukazovatele na nulové značce

V případě, že je tlakoměr vybaven zařízením na nastavení nuly, ukazovatel tlakoměru se nastaví. U tlakoměrů vybavených zarážkou ukazovatele se kontroluje, zda se ukazovatel tlakoměru v nezatíženém stavu dotýká zarážky ukazovatele. U tlakoměrů s volnou nulou musí ukazovatel ležet na nulové značce v mezích dovolené chyby dle TP.

#### 8.4.2 Zkouška rovnoměrnosti pohybu ukazovatele

Při rovnoměrném zvyšování nebo snižování tlaku se kontroluje plynulost pohybu ukazovatele. Ukazovatel musí překrývat 1/10 až 9/10 délky nejkratší čáry značky malého dílku.

#### 8.4.3 Justáž

Je-li zákazníkem požadováno nastavení tlakoměru, zaznamená se indikace měřidla před nastavením minimálně ve 3 bodech (obvykle 0 %, 50 % a 100 % kalibračního rozpětí). Odečet se provede při ustálené hodnotě tlaku. Podle charakteru a průběhu odchylek se provede nastavení (justáž) měřidla podle návodu v technické dokumentaci. U deformačních tlakoměrů se nastavení obvykle provádí přesazením ukazovatele nebo nastavením citlivosti převodového mechanismu tlakoměru. Údaje měřidla před nastavením musí být uvedeny v kalibračním listu měřidla.



## 9 Postup kalibrace

Metodika kalibrace, která se zabývá počtem kalibračních bodů a určováním opakovatelnosti, také není v jednotlivých běžně používaných předpisech zcela jednotná.

### 9.1 Metodika kalibrace dle [L3 a L4]

Při kalibraci je určována odchylka tlakoměru od jmenovité hodnoty (zkouška přesnosti) a hystereze tlakoměru. Použitý etalon by měl mít meze dovolené chyby čtyřikrát menší než meze zkoušeného tlakoměru. Zkušební metoda smí buď srovnávat vybranou indikaci s tlakem použitým k této indikaci (tlak je nastaven přesně na odpovídající značku číselníku kalibrovaného měřidla) nebo srovnávat vybraný tlak s výslednou indikací kalibrovaného tlakoměru (jmenovitou hodnotu tlaku nastavujeme na etalonu). Každý bod musí být zkoušen při stoupajícím i klesajícím tlaku.

Počet zkušebních bodů volíme podle TP tlakoměru a musí být rovnoměrně rozdělen po celé stupnici následovně:

pro třídu přesnosti 0,1 až 0,6	minimálně 10 bodů;
pro třídu přesnosti 1 až 2,5	minimálně 5 bodů;
pro třídu přesnosti 4 až 6	minimálně 4 body.

Po plynulém zvyšování tlaku do horní meze měřicího rozsahu se tlakoměr ponechá 5 minut na tomto tlaku, potom se tlak plynule snižuje na hodnotu odpovídající nulové značce. Mezi zkušební body patří vždy největší údaj stupnice, nula je zkušebním bodem, pokud je to volná nula. U tlakoměrů s opěrným kolíkem volíme místo nuly vhodný bod co nejbližší nulové hodnotě vyznačený na číselníku v lineární části stupnice. **Čtení musí být získáno po lehkém poklepání na pouzdro tlakoměru** a musí být interpolováno mezi 1/4 až 1/10 vzdálenosti mezi dvěma značkami stupnice, což v praxi znamená rozdělení dílku stupnice při čtení hodnoty tlaku na 4, 5 nebo 10 částí. Hystereze je vypočtena z rozdílu tlaků určeného na stejné hodnotě při klesajícím a stoupajícím tlaku. [L3 a L4] neřeší otázku opakovatelnosti, pouze uvádí, že zkoušku přesnosti a hystereze je výhodné provádět více sériemi měření.

### 9.2 Metodika kalibrace dle [L7]

Při kalibraci je určována linearita, a hystereze a opakovatelnost tlakoměru. Nejistota použitého etalonu by měla být lepší než kalibrovaného tlakoměru, poměr nejistot by měl být roven nebo lepší než 2. Před zahájením měření by měl být tlakoměr nastaven na nulu, pokud je to možné. Nastavení tlaku mezi dvěma body by mělo být plynulé, a ne kratší než 30 s, odečet by měl být proveden nejdříve 30 s po dosažení měřeného bodu. Po dosažení horní meze měření by měl být odečet ve směru odlehčování proveden po pěti minutách stabilizace tlaku po odečtu ve směru zatěžování. Odečet nulového tlaku při odlehčování by měl být proveden 30 s po úplném odlehčení tlakoměru. Při opakovaných sériích bychom měli nastavovat tytéž hodnoty jako v první sérii měření s maximální odchylkou 1 % kalibrovaného rozsahu. Ostatní podmínky odpovídají odstavci 9.1.

Počet zkušebních bodů volíme podle předpokládané velikosti rozšířené nejistoty měření při kalibraci  $U$  (pro  $k = 2$ ). Rozeznáváme tři způsoby kalibrace (kompletní cyklus = zatěžování i odlehčování měřidla):

**Základní (BASIC) kalibrační procedura** – určena pro měřidla s očekávanou hodnotou  $U \geq 0,2 \%$  FS (Full Scale ... měřicí rozsah). Při kalibraci se provede měření jednoho kompletního cyklu v 6 bodech rovnoměrně rozdělených v rozsahu měřidla. Opakovatelnost se zjišťuje měřením dvou bodů ve třech cyklech (přednostně 0 % FS a střed rozsahu tj. 40 % FS nebo 60 % FS) pouze ve směru zatěžování. Max. hodnota opakovatelnosti je použita pro výpočet nejistoty ve všech měřicích bodech. Výsledná nejistota kalibrace nesmí být menší než 0,2 % FS.

**Standardní (STANDARD) kalibrační procedura** – určena pro měřidla s očekávanou hodnotou  $0,05 \% \text{ FS} \leq U < 0,2 \%$  FS. Při kalibraci se provede měření jednoho kompletního cyklu v 11 bodech rovnoměrně rozdělených v rozsahu měřidla. Opakovatelnost se zjišťuje měřením čtyř bodů ve třech cyklech (přednostně 0 % FS, 20 % FS, 50 % FS a 80 % FS) pouze ve směru zatěžování. Max. hodnota opakovatelnosti ze dvou krajních bodů intervalu je použita pro výpočet nejistoty ve všech mezilehlých bodech intervalu. Výsledná nejistota kalibrace nesmí být menší než 0,05 % FS.

**Úplná (COMPREHENSIVE) kalibrační procedura** – určena pro měřidla s očekávanou  $U < 0,05 \%$  FS. Při kalibraci se provede měření tří kompletních cyklů v 11 bodech rovnoměrně rozdělených v rozsahu měřidla. Opakovatelnost se zjišťuje pro všechny měřené body. Výsledná nejistota kalibrace není limitována.

### 9.3 Metodika kalibrace dle [L8]

Přístup k metodice je podobný jako v odstavci 9.2, jednotlivé kategorie jsou ale nastaveny poněkud jinak (jak z hlediska nejistoty, tak počtu měřicích cyklů). Základní tři procedury jsou označeny velkými písmeny A, B a C a jejich realizace vyplývá z tabulky 2 (Z ... zatěžování; O ... odlehčování). **[L8] je jediným předpisem, který se zabývá kalibrací manovakuometrů.** U tlakoměrů, které jsou kalibrovány pozitivním a negativním přetlakem, by podle tohoto dokumentu měly být kalibrovány alespoň dva body v negativním rozsahu (např. -1 bar a -0,5 baru); zbývající body měření by měly být kalibrovány v kladném rozsahu.

Sekvence	Požadovaná nejistota (% FS)	Min. počet kalibračních bodů Z/O	Počet předběžných zátěží	Rychlost změny zátěže a doba zátěže před odečtem (s)	Výdrž na horní mezi měření (min)	Počet úplných sérií měření	
						Z	O
A	< 0,1	9	3	> 30	5	2	2
B	0,1 až 0,6	9	2	> 30	5	2	1
C	> 0,6	5	1	> 30	5	1	1

TABULKA č. 2: Základní kalibrační procedury podle [L8]

I v tomto případě platí omezení celkové rozšířené nejistoty měření pro jednotlivé sekvence:  
kalibrační sekvence A ... bez omezení,  
kalibrační sekvence B ...  $U \geq 0,04 \%$  FS,  
kalibrační sekvence C ...  $U \geq 0,3 \%$  FS.

### 9.4 Metodika kalibrace dle [L9]

Jednotlivé sekvence jsou velmi podobné odstavci 9.3, navíc je jednoznačně definováno určení opakovatelnosti.

**Základní (BASIC) kalibrační procedura** – určena pro měřidla s očekávanou hodnotou  $U \geq 0,6$  % FS. Při kalibraci se provede měření jednoho kompletního cyklu v 6 bodech rovnoměrně rozdělených v rozsahu měřidla. Opakovatelnost se zjišťuje měřením jednoho bodu ve třech úplných cyklech (přednostně 50 % FS). Max. hodnota opakovatelnosti je použita pro výpočet nejistoty ve všech měřicích bodech. Limita výsledné nejistota kalibrace není uvedena.

**Standardní (STANDARD) kalibrační procedura** – určena pro měřidla s očekávanou hodnotou  $0,10$  % FS  $\leq U < 0,60$  % FS. Při kalibraci se provede měření jednoho kompletního cyklu v 11 bodech rovnoměrně rozdělených v rozsahu měřidla. Opakovatelnost se zjišťuje měřením čtyř bodů ve třech úplných cyklech (přednostně 0 % FS, 20 % FS, 50 % FS a 80 % FS). Max. hodnota opakovatelnosti ze dvou krajních bodů intervalu je použita pro výpočet nejistoty ve všech mezi-  
lehlých bodech intervalu. Limita výsledné nejistota kalibrace není uvedena.

**Úplná (COMPREHENSIVE) kalibrační procedura** – určena pro měřidla s očekávanou  $U < 0,1$  % FS. Při kalibraci se provede měření tří kompletních cyklů v 11 bodech rovnoměrně rozdělených v rozsahu měřidla. Opakovatelnost se zjišťuje pro všechny měřené body. Výsledná nejistota kalibrace není limitována.

### 9.5 Metodika kalibrace barometrů dle [L6]

Počet kalibračních bodů se volí podle zkušenosti v závislosti na přesnosti barometru. Pro určení korekce barometru volíme nejméně čtyři měřicí body. Při kalibraci by interval mezi body neměl být větší než 5 kPa. Povinným měřeným bodem je absolutní tlak 100 kPa. Kalibrace se opět provádí ve směru zatěžování i odlehčování tlaku, tlak nastavujeme plynule s maximální rychlostí 0,5 kPa za minutu. Každý bod by měl být odečítán po pětiminutové stabilizaci.

Z ekonomického i technického hlediska je uvedená metodika poměrně pracná (uvedený dokument nebyl od roku 1990 revidován). Pětiminutová stabilizace je akceptovatelná na horní mezi měření podobně jako u ostatních deformačních tlakoměrů. Pro kalibraci lze doporučit následující postup:

- při kalibraci barometrů TP 0,02 provést tři kompletní měřicí cykly, mezi jednotlivými cykly respektovat 5 minut prodlevu;
- při kalibraci barometrů TP 0,05 provést měření jednoho kompletního cyklu, druhá a třetí série měření je omezena na kalibraci v tlakových bodech 0 % FS, 50 % FS a 100 % FS;
- při kalibraci barometrů TP  $\geq 0,1$  se provede měření v jednom kompletním cyklu, druhá a třetí série měření je omezena na kalibraci v jednom tlakovém bodě (50 % FS).

Opakovatelnost se určuje podobně jako v předchozích případech.

### 9.6 Zpracování naměřených údajů

#### 9.6.1 Výpočet chyby a hystereze kalibrovaného tlakoměru

Chyba kalibrovaného tlakoměru  $\delta_j$  v  $j$ -tém tlakovém bodě se rovná

$$\delta_j = p_{klj} - p_{etj} \quad (4)$$

kde  $p_{klj}$  je údaj (průměrná hodnota údajů) kalibrovaného tlakoměru v j-tém tlakovém bodě;  
 $p_{etj}$  údaj (průměrná hodnota údajů) etalonového tlakoměru v j-tém tlakovém bodě.

*Poznámka:* Chyba deformačního tlakoměru se vyjadřuje ve formě relativní chyby v % z rozpětí měřicího rozsahu. Pokud zákazník požaduje nastavení tlakoměru, tlakoměr nastavení umožňuje a zjištěná maximální chyba údaje měřidla je větší než požadovaná, provede se justáž tlakoměru tak, aby vyhověl TP ve všech měřených bodech, je-li to možné. Vlastní kalibrace podle čl. 9 se po nastavení opakuje a údaje před nastavením se uvedou na kalibrační list Pro účel nastavení tlakoměru je možné měřit ve zkráceném cyklu (např. tři body).

Chyba hystereze je maximální údaj z absolutních hodnot rozdílů ( $p_{\uparrow j} - p_{\downarrow j}$ ), kde

$p_{\uparrow j}$  je údaj (průměrná hodnota údajů) kalibrovaného tlakoměru v j-tém tlakovém bodě při zvyšování tlaku;

$p_{\downarrow j}$  údaj (průměrná hodnota údajů) kalibrovaného tlakoměru v j-tém tlakovém bodě při snižování tlaku.

## 9.6.2 Stanovení nejistoty měření v souladu s [L5]

### 9.6.2.1 Všeobecně

Při rozboru nejistot je potřeba uvažovat následující zdroje dílčích nejistot:

- nejistota hodnoty tlaku měřeného (generovaného) etalonovým tlakoměrem  $u_p$ ;
- opakovatelnost (nejistota stanovená metodou typu A)  $u_A$ ;
- nejistota údaje kalibrovaného tlakoměru  $u_t$  způsobená odchylkou teploty okolí od referenční teploty;
- nejistota  $u_d$  charakterizující chybu čtení kalibrovaného tlakoměru;
- nejistota  $u_h$  charakterizující nekorigovanou odlehlost referenčních úrovní etalonového a kalibrovaného tlakoměru;
- nejistota  $u_{odd}$  charakterizující rozdíl hodnot tlaku působících na etalonový a kalibrovaný tlakoměr. Tento rozdíl může způsobit např. chyba oddělovače tlakového média, filtru, netěsnost systému apod;
- jestliže je absolutní tlak (např. u barometrů) měřený na přetlakovém rozsahu kalibrátoru s využitím barometrické reference (nebo nezávislým etalonovým měřením barometrického tlaku), musí být do nejistoty měření zahrnuta nejistota tlaku obou etalonových měřidel.

Model kalibrace (v j-tém tlakovém bodě)

$$\delta_j = p_{klj} - p_{etj} - \delta_{pj} + \delta_{Aj} + \delta_{tj} + \delta_{dj} + \delta_{hj} + \delta_{oddj} \quad (5)$$

kde  $\delta_{pj}$  korekce na nejistotu etalonu (-ů)

$\delta_{Aj}$  vliv nejistoty typu A

$\delta_{tj}$  korekce způsobená teplotní závislostí kalibrovaného tlakoměru;

$\delta_{dj}$  korekce způsobená chybou odečtu kalibrovaného tlakoměru;

$\delta_{hj}$  korekce způsobená odlehlostí referenčních úrovní tlakoměrů;

$\delta_{oddj}$  korekce způsobená necitlivostí oddělovače tlakového média, filtru apod.

### 9.6.2.2 Nejistota stanovená metodou typu A

Standardní nejistota  $u_{Aj}$  stanovená metodou typu A v j-tém tlakovém bodě se určí podle vztahu

$$u_{Aj} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (p_{ij} - p_j)^2} \quad (6)$$

kde  $p_{ij}$  je i-tý údaj zkoušeného tlakoměru v j-tém tlakovém bodě;  
 $p_j$  aritmetický průměr 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 (6) v každém kalibrovaném bodě. Když byla opakovaná měření provedena v omezeném počtu bodů, postupujeme dvěma možnými způsoby:

- největší hodnota  $u_A$  je považována za typickou pro všechny kalibrované body. Když měření nebylo provedeno v opakovaných cyklech, nejistota  $u_A$  se nevyhodnocuje;
- s opakovatelností se počítá podle kapitoly 9.2 tohoto postupu.

Pro počet opakovaných měření menší než 10 je potřeba posoudit spolehlivost nejistoty  $u_A$  při stanovení koeficientu pokrytí rozšířené nejistoty, viz odstavec 9.6.2.5.

### 9.6.2.3 Nejistota stanovená metodou typu B

#### 9.6.2.3.1 Etalonový tlakoměr

Standardní nejistotu hodnoty tlaku měřeného etalonovým tlakoměrem  $u_p$  určíme na základě kalibračního listu etalonového tlakoměru vydělením příslušné rozšířené nejistoty koeficientem rozšíření  $k$  a vhodným zahrnutím vlastností etalonu. Při respektování přesnosti etalonu získáme odpovídající nejistotu vydělením největší dovolené chyby v daném tlakovém bodě  $\sqrt{3}$  (rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti). U etalonového měřidla musíme sledovat také dlouhodobou stabilitu, tj. drift etalonu. Přehledné je např. grafické zpracování průběhu odchylek jednotlivých tlaků, které získáme z opakovaných kalibračních listů. Trend průběhu nám umožní odhadnout roční drift etalonu. Standardní nejistotu etalonu můžeme určit jako kombinaci nejistoty kalibrace (normální rozdělení pravděpodobnosti) a driftu (rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti). Jestliže se odchylky etalonu při jeho kalibraci blíží max. dovolené chybě a tlakoměr je justován, je vhodné zahrnout do nejistoty jmenovitou přesnost etalonu, příp. zvážit zkrácení kalibrační lhůty.

#### 9.6.2.3.2 Teplotní chyba kalibrovaného tlakoměru

Teplotní chyba deformačního tlakoměru  $k_t$  je dána vztahem:

$$\delta_t = K_t \cdot R \cdot (t - t_{ref}) \quad (7)$$

kde  $t$  je teplota okolního vzduchu při kalibraci ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $t_{ref}$  referenční teplota, standardně  $20^{\circ}\text{C}$  nebo hodnota dle zvolená dle kap. 6.1;  
 $K_t$  teplotní součinitel podle dokumentace tlakoměru ( $\%/^{\circ}\text{C}$ );  
 $R$  horní mez měřicího rozsahu kalibrovaného tlakoměru (pokud pracujeme s relativní chybou, neuplatní se).

Nejistotu  $u_t$  určíme vydělením příslušné teplotní chyby  $\sqrt{3}$  (rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti):

$$u_t = \frac{\delta_t}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

*Poznámka:* V případě, že údaj o teplotním součiniteli kalibrovaného tlakoměru není uveden, je možné vycházet z největší dovolené hodnoty podle [L3 a L4] – viz kapitola 6.1.

#### 9.6.2.3.3 Chyba odečtu kalibrovaného tlakoměru

Standardní nejistota  $u_d$ , charakterizující chybu odečtu kalibrovaného tlakoměru, určíme vydělením  $1/4$  až  $1/10$  velikosti dílku stupnice  $\sqrt{3}$  (rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti). Rozdělení dílku na  $1/4$  až  $1/10$  zvolí pracovník provádějící kalibraci podle provedení (velikosti) číselníku a odečítacího zařízení zkoušeného tlakoměru.

Standardní nejistota  $u_d$  je rovna

$$u_d = \frac{d}{r \cdot \sqrt{3}} \quad (9)$$

kde  $d$  je velikost dílku stupnice kalibrovaného tlakoměru;  
 $r$  počet částí, na který se rozdělí dílek tlakoměru při odečtu.

#### 9.6.2.3.4 Odlehlost referenčních úrovní

Standardní nejistota  $u_h$ , charakterizující nejistotu vyplývající z nekorigované odlehlosti referenčních úrovní etalonového a kalibrovaného tlakoměru při kalibraci, je rovna (rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti):

$$u_h = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

kde  $\rho$  je hustota tlakového média ( $\text{kg/m}^3$ );  
 $g$  hodnota místního tíhového zrychlení ( $\text{m/s}^2$ );  
 $h$  odlehlost (rozdíl) referenčních úrovní etalonového a kalibrovaného tlakoměru (m).

*Poznámka:* Při kalibraci deformačního tlakoměru plyným médiem (mimo tlakoměry absolutního tlaku) je  $u_h$  obvykle zanedbatelná.

#### 9.6.2.3.5 Vliv oddělovače média, filtru apod.

Tato zařízení se používají např. při kalibraci tlakoměrů určených pro kyslík. V oddělovači je vak ze speciální gumy (viton), který odděluje nevhodné médium (olej) od inertního média (líh, voda). Takové zařízení má od výrobce deklarovaný vliv na měřenou hodnotu (např. oddělovač fy Budenberg má uveden přídatný vliv 0,006 % měřené hodnoty). Standardní nejistota  $u_{odd}$ , charakterizující nejistotu způsobenou necitlivostí oddělovače tlakového média, je určena (rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti)

$$u_{odd} = \frac{\delta_{odd}}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

kde  $\delta_{odd}$  je chyba způsobená zapojeným oddělovačem médií.

#### 9.6.2.4 Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovanou standardní nejistotu měření v  $j$ -tém tlakovém bodě získáme sloučením výše uvedených standardních nejistot podle vztahu:

$$u_j = \sqrt{(u_A^2 + u_p^2 + u_t^2 + u_d^2 + u_h^2 + u_{oda}^2)} \quad (12)$$

*Poznámka:* Význam symbolů uvedených ve vztahu (7) vyplývá z předchozího textu. Z důvodů zachování přehlednosti není u každé složky nejistoty uveden index  $j$ , který značí, že se jedná o nejistotu v  $j$ -tém tlakovém bodě.

#### 9.6.2.5 Rozšířená nejistota

Rozšířená nejistota  $U_j$  v  $j$ -tém tlakovém bodě je daná vztahem

$$U_j = k \cdot u_j \quad (13)$$

kde  $k$  je koeficient rozšíření odpovídající pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %. Pro počet měření  $n \geq 10$  při stanovení nejistoty metodou typu A předpokládáme normální rozdělení pravděpodobnosti rozšířené nejistoty a koeficient rozšíření je  $k = 2$ . Pro počet měření  $n < 10$  předpokládáme  $t$ -rozdělení. Koeficient rozšíření stanovíme podle tabulky 3.

Efektivní stupně volnosti $\nu_{\text{eff}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Koeficient rozšíření $k$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,32	2,28
Efektivní stupně volnosti $\nu_{\text{eff}}$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Koeficient rozšíření $k$	2,25	2,23	2,21	2,20	2,18	2,17	2,16	2,15	2,14	2,13
Efektivní stupně volnosti $\nu_{\text{eff}}$	25	30	35	40	45	50	$\infty$			
Koeficient rozšíření $k$	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,00			

TABULKA č. 3: Koeficient rozšíření v závislosti na stupni volnosti dle [L5].

Odhad efektivních stupňů volnosti  $\nu_{\text{eff}}$  provedeme v souladu s [L5] podle Welch-Satterthwaitova vztahu:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(\delta_j)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(\delta_j)}{\nu_i}} \quad (14)$$

kde  $u_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) je příspěvek k nejistotě stanovení chyby tlakoměru od vstupní veličiny  $x_i$  (tyto příspěvky považujeme za nekorelované),  $\nu_i$  jsou efektivní stupně volnosti příspěvku nejistoty  $u_i$ . Pro standardní nejistotu stanovenou metodou typu A platí stupně volnosti  $\nu_i = n - 1$ . Pro standardní nejistoty tlakoměru stanovené metodou typu B předpokládáme  $\nu_i \rightarrow \infty$ . Pokud vypočítaná hodnota  $\nu_i$  není celé číslo, což je běžné, zaokrouhlíme vypočítanou hodnotu na nejbližší menší v tabulce.

Při kalibraci deformačních tlakoměrů (počet měření  $n = 3$ ) je možné vztah (14) vyjádřit na základě výše uvedeného ve tvaru:

$$v_{eff} = \frac{2 \cdot u^4(\delta_j)}{u_A^4(\delta_j)} \quad (15)$$

V případě jedné dominantní složky nejistoty s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti je koeficient rozšíření odpovídající pravděpodobnosti pokrytí 95 % rovný 1,65. Uvedený koeficient se použije v případě, že podíl „kvadratického součtu“ nedominantních složek nejistoty  $u_R$  k dominantní složce  $u_d$  není větší než 0,3 (viz příklad S9 v dokumentu [L5]).

$$\frac{u_R(y)}{u_d(y)} \leq 0,3 \quad (16)$$

$$u_R = \sqrt{(u_A^2 + u_p^2 + u_t^2 + u_h^2 + u_{odd}^2)} \quad (17)$$

Podmínka ve vztahu (16) je splněna, když nejistota stanovená metodou A je nulová z důvodu omezeného rozlišení kalibrovaného tlakoměru, resp. při kalibraci nebyla provedena opakovaná měření, a dominantní složkou nejistoty je nejistota  $u_d$  vyplývající z chyby odečtu.

*Poznámka:* V průběhu výpočtu nejistot jsou všechny složky nejistot vyjádřeny v jednotkách tlaku. V závěru výpočtu se výsledné nejistoty vyjádří obvykle relativně v procentech z rozpětí kalibrovaného tlakoměru. Z hlediska symboliky se relativní nejistota měření označuje písmeny  $w$  (standardní kombinovaná) a  $W$  (rozšířená).

### 9.6.3 Stanovení nejistoty měření v souladu s [L7]

#### 9.6.3.1 Všeobecně

Dokument cg-17 uvádí pro deformační tlakoměry následující rozbor nejistot:

- nejistota hodnoty tlaku měřeného (generovaného) etalonovým tlakoměrem;
- nejistota způsobená chybou nuly;
- nejistota způsobená opakovatelností;
- nejistota způsobená reprodukovatelností, pokud byla aplikována (při standardní kalibraci se obvykle reprodukovatelnost nezjišťuje, jedná se např. o porovnání měření různými etalony, různými pracovníky, při různém způsobu montáže apod.);
- nejistota charakterizující nekorigovanou odlehlost referenčních úrovní etalonového a kalibrovaného tlakoměru;
- nejistota charakterizující konečné rozlišení (odečitelnost) kalibrovaného tlakoměru;
- nejistota způsobená hysterezí kalibrovaného tlakoměru.

Dokument uvádí dva způsoby prezentace výsledků kalibrace, a sice samostatná prezentace výsledků pro stoupající a klesající hodnoty tlaku (běžný způsob uvádění hodnot na kalibrační list)



nebo uvedení výsledků kalibrace ve formě průměru (uvedeny pouze průměrné hodnoty jednotlivých měřených tlaků vypočtené ze stoupající a klesající hodnoty). V prvním případě je zjištěná hystereze uvedena na kalibrační list spolu s max. chybou tlakoměru, ve druhém případě je nutno zahrnout do stanovení nejistoty příspěvek z hystereze  $H$ :

$$u_h = \frac{H}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (18)$$

V případě tlakoměrů často ovlivněných hysterezí se počítá nejistota stanovená způsobem A z malého počtu hodnot ( $n = 3$ ) a díky tomu není při statistickém výpočtu často splněn předpoklad o normálním rozdělení pravděpodobnosti. Dokument cg-17 nabízí volitelné řešení v podobě veličin  $f_0$ ,  $b'$ ,  $b$ , které nejsou statistickými odhady, ale jsou stanoveny na základě zkušenosti a nahrazují směrodatné odchylky. Jejich použití je volitelné, nejistotu kalibrace lze tedy stanovit jak podle [L5], tak podle [L7].

### 9.6.3.2 Chyba nulový $f_0$

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 přetlaku spojení s barometrickým tlakem). Nulová chyba se vypočítá následovně:

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

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).

### 9.6.3.3 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):

$$b'_{up,j} = \max\{|(p_{ind,3,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ind,1,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,3,j} - p_{ref,3,0}) + (p_{ref,1,j} - p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,5,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,1,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,5,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,1,j} - p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,5,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,3,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ref,5,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,3,j} - p_{ref,3,0})|\} \quad (20)$$

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

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

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

$$b'_{up,j} = |(p_{ind,3,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ind,1,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,3,j} - p_{ref,3,0}) + (p_{ref,1,j} - p_{ref,1,0})| \quad (21)$$

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

#### 9.6.3.4 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:

$$b_{up,j} = \max\{ |(\rho_{ind,5,j} - \rho_{ind,5,0}) - (\rho_{ind,1,j} - \rho_{ind,1,0}) - (\rho_{ref,5,j} - \rho_{ref,5,0}) + (\rho_{ref,1,j} - \rho_{ref,1,0})|, |(\rho_{ind,5,j} - \rho_{ind,5,0}) - (\rho_{ind,3,j} - \rho_{ind,3,0}) - (\rho_{ref,5,j} - \rho_{ref,5,0}) + (\rho_{ref,3,j} - \rho_{ref,3,0})| \} \quad (22)$$

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

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

#### 9.6.3.5 Hystereze (reverzibilita) $h$

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

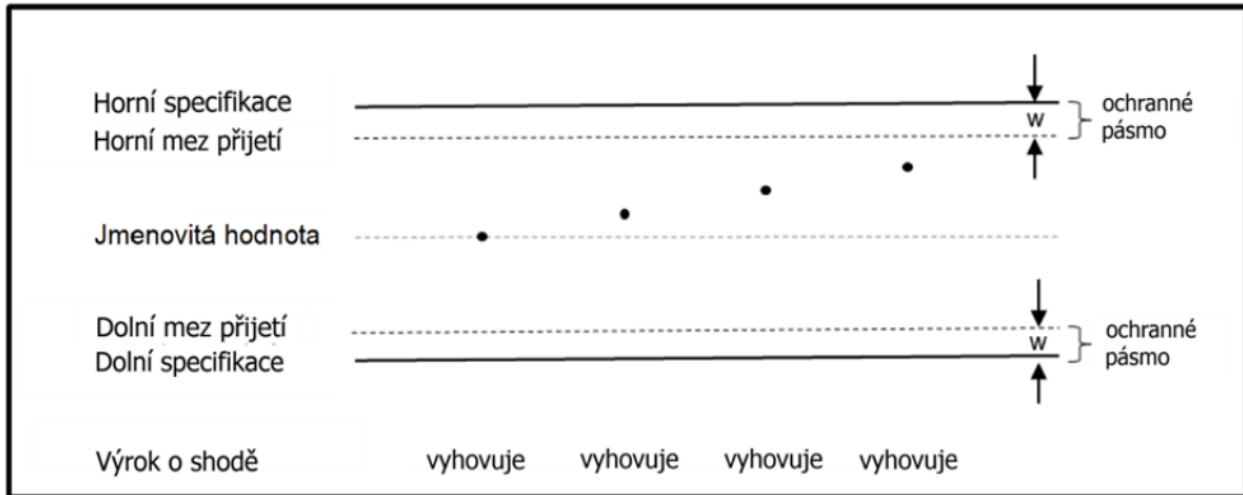
$$h_j = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \left[ (\rho_{ind,2m,j} - \rho_{ind,2m-1,0}) - (\rho_{ind,2m-1,j} - \rho_{ind,2m-1,0}) - (\rho_{ref,2m,j} - \rho_{ref,2m-1,0}) + (\rho_{ref,2m-1,j} - \rho_{ref,2m-1,0}) \right] \quad (23)$$

Proměnná  $n$  označuje počet úplných měřicích cyklů  $m$ .

## 10 Vyhodnocení kalibrace

### 10.1 Postup vyhodnocení

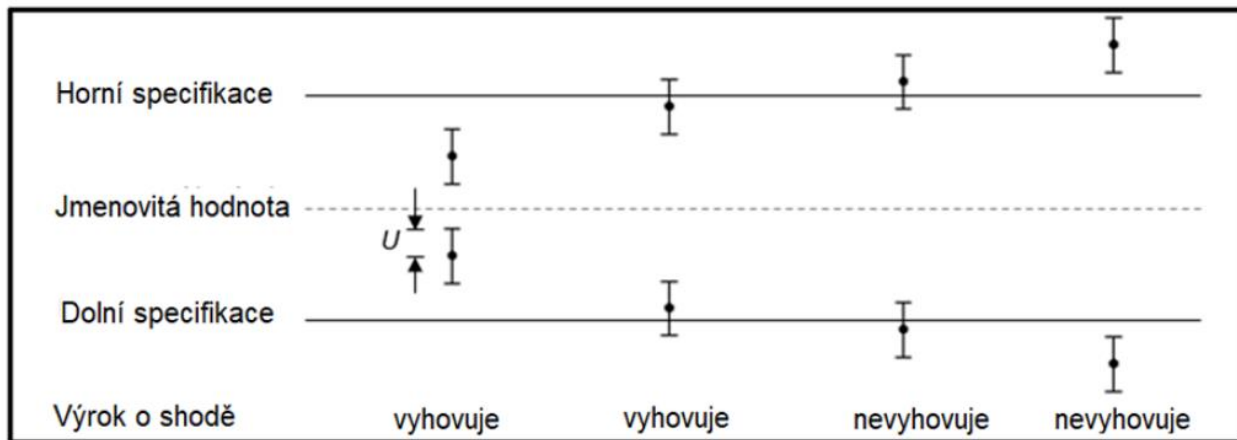
Deformační tlakoměry mají obvykle definovanou třídu přesnosti (max. dovolená chyba tlakoměru v procentech měřicího rozpětí). Podle [L3 a L4] musí být měřená chyba i hystereze tlakoměru max. rovna TP. Jestliže je při kalibraci požadováno vyhodnocení shody se specifikací tlakoměru, musí akreditovaná laboratoř postupovat v souladu s dokumentem [L15]. Při vyhodnocení musí být určeno tzv. ochranné pásmo, které omezuje pravděpodobnost nesprávného rozhodnutí o shodě. V podstatě jde o bezpečnostní faktor vložený do procesu rozhodování, který sníží mez přijetí pod mez specifikace/tolerance (v našem případě pod hodnotu, vyplývající z TP) – viz obr. 1.



Obr. č. 1: Grafické znázornění ochranného pásma dle [L15]

**10.1.1 Binární výrok pro pravidlo jednoduchého přijetí ( $w = 0$ )**

Ochranné pásmo může být v nejjednodušším případě  $w = 0$ . V tom případě posuzujeme pouze naměřené odchylky jednotlivých tlaků a pokud leží v pásmu vymezeném TP, je tlakoměr vyhodnocen jako vyhovující. Tento způsob vyhodnocení se nazývá binární výrok s pravidlem jednoduchého přijetí. Jednoduché přijetí se také nazývá tzv. sdíleným rizikem, protože pokud se výsledek nachází přesně na toleranční mezi specifikace, může pravděpodobnost, že skutečná chyby tlakoměru bude ležet mimo toleranční mez, dosáhnout až 50 % - viz obr. 2.

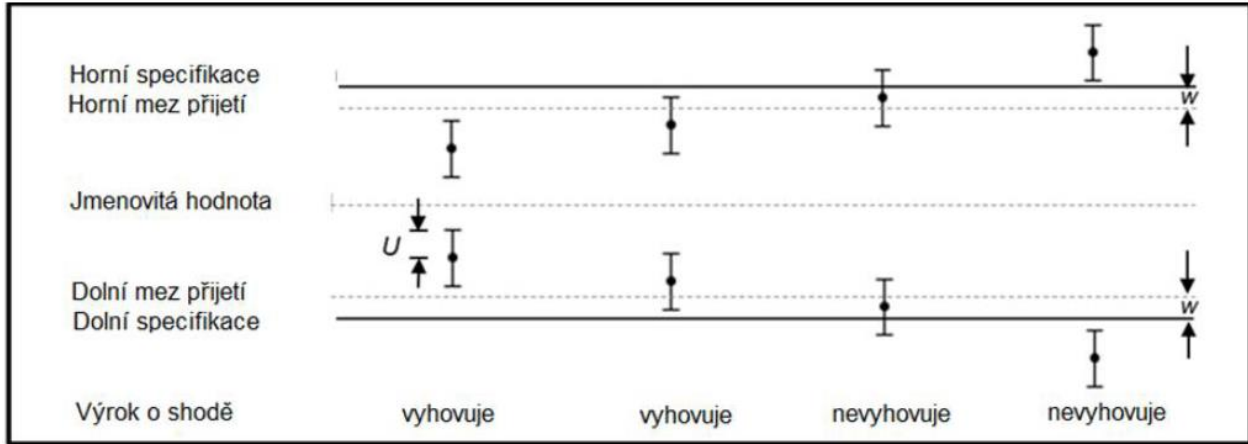


$U = 95\%$  rozšířená nejistota měření

Obr. č. 2: Grafické znázornění binárního výroku – jednoduché přijetí dle [L15]

**10.1.2 Binární výrok s ochranným pásmem**

V tomto případě měřidlo vyhovuje, pokud naměřené chyby leží v pásmu vymezeném horní a dolní mezí přijetí, které je ohraničeno podmínkou TP a respektováním ochranného pásma – viz obr. č. 3.

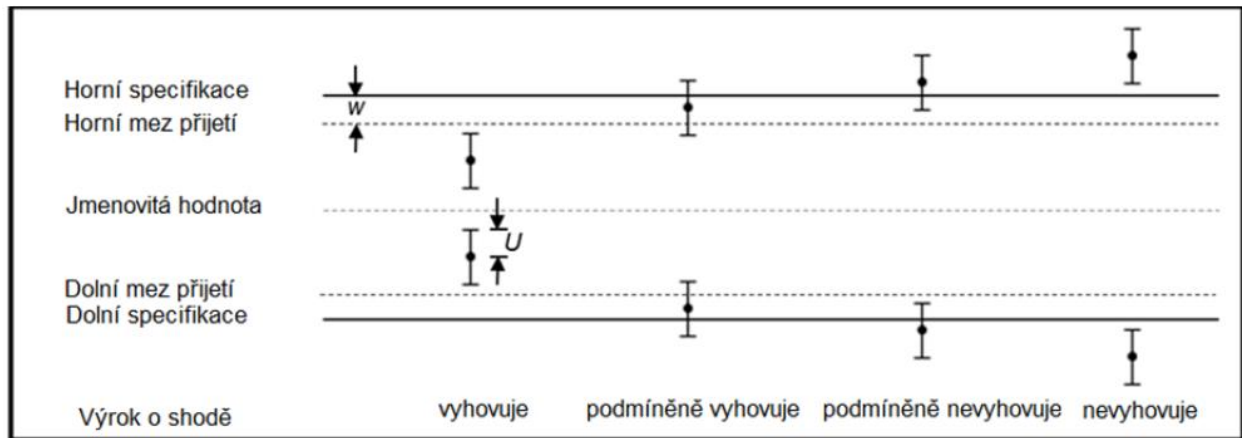


$U = 95\%$  rozšířená nejistota měření

Obr. č. 3: Grafické znázornění binárního výroku s ochranným pásmem dle [L15]

### 10.1.3 Nebinární výrok s ochranným pásmem

V tomto případě měřidlo opět vyhovuje, pokud naměřené chyby leží v pásmu vymezeném horní a dolní mezí přijetí, které je ohraničeno podmínkou TP a respektováním ochranného pásma. Jestliže jsou chyby v pásmu vymezeném ochranným pásmem, je výsledek klasifikován jako podmíněně vyhovující (pod mezí specifikace), resp. podmíněně nevyhovující (nad mezí specifikace). Velikost ochranného pásma si může určit zákazník např. podle požadovaných tolerancí výrobního procesu. Akreditované kalibrační laboratoře běžně pracují s ochranným pásmem o velikosti nejistoty měření, pokud není zákazníkem určeno jinak. Pro vyhodnocení je tedy použita hodnota  $|\delta_j| + U_j$ , kde  $|\delta_j|$  ... absolutní hodnota chyby tlakoměru v  $j$ -tém tlakovém bodě a  $U_j$  ... rozšířená nejistota měření v  $j$ -tém tlakovém bodě – viz obr. 4.



$U = 95\%$  rozšířená nejistota měření

Obr. č.. 4: Grafické znázornění nebinárního výroku s ochranným pásmem dle [L15], kdy  $w = U$ .

Vyhověl-li tlakoměr zvolenému typu vyhodnocení, může kalibrační laboratoř vydat kalibrační list obsahující prohlášení o shodě, ve kterém je uvedeno, na které hodnoty se prohlášení vztahuje, jaká metrologická specifikace je splněna (TP) a jaké bylo použito rozhodovací pravidlo dle [L15].

Na kalibrační list se také uvádí médium použité při zkoušce. Byl-li tlakoměr zkoušený olejem, je vhodné umístit na zadní stěnu tlakoměru štítek s nápisem: ZKOUŠENO OLEJEM.

### 10.2 Postup v případě neshody

U nevyhovujících tlakoměrů je vhodné kontaktovat zákazníka. Na kalibrační list je možné uvést nevyhovující hodnocení při respektování pravidel dle předchozích odstavců nebo vyjádření neuvádět. O dalším použití tlakoměru si pak rozhodne zákazník.

## 11 Kalibrační list

### 11.1 Náležitosti kalibračního listu

Obsah kalibračního listu by měl odpovídat požadavkům [L14] a měl by obsahovat především:

- a) název a adresu kalibrační laboratoře,
- b) pořadové číslo kalibračního listu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- c) jméno a adresu zadavatele, popř. zákazníka,
- d) místo provedení kalibrace,
- e) název, typ, výrobce a identifikační znak tlakoměru (výrobní nebo identifikační číslo),
- f) datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- g) určení specifikace uplatněné při vyjádření shody a označení použitého kalibračního postupu,
- h) podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňujících veličin apod.),
- i) obecný odkaz na návaznost měřidel použitých při kalibraci resp. vyjádření o návaznosti výsledků měření,
- j) výsledky měření a s nimi spjatou rozšířenou nejistotu měření, nebo prohlášení o shodě s určitou metrologickou specifikací,
- k) jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, identifikaci kalibrační laboratoře.

Součástí kalibračního listu je též prohlášení, že uvedené výsledky se týkají pouze kalibrovaného tlakoměru a kalibrační list nesmí být bez předběžného písemného souhlasu kalibrační laboratoře reprodukován jinak než celý.

### 11.2 Protokolování

Originál kalibračního listu se předává objednateli kalibrace. Jeho kopii si ponechává kalibrační laboratoř a archivuje ji v souladu se svým archivačním řádem, obvykle nejméně po dobu 5 let. Doporučuje se archivovat kalibrační záznamy a kalibrační listy chronologicky. Výsledky kalibrace se mohou v souladu s případnými podnikovými metrologickými dokumenty místo do kalibračního listu uvádět do metrologické evidenční karty měřidla nebo ukládat do paměti počítače.

### 11.3 Umístění kalibrační značky

Po provedení kalibrace se přístroj opatří kalibrační značkou – štítkem, na němž je uvedeno datum provedené kalibrace a identifikace kalibrační laboratoře.

V případě, že je výsledek kalibrace nevyhovující, označí se měřidlo štítkem NEVYHOVUJE. Kalibrační štítek je třeba na přístroj umístit viditelně.

## 12 Péče o kalibrační postup

Originál kalibračního postupu je uložen v písemné nebo elektronické formě u jeho zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku na titulní straně. Změny, popř. revize kalibračního postupu je oprávněn provádět jeho zpracovatel, změny schvaluje vedoucí zpracovatele (vedoucí kalibrační laboratoře nebo metrolog organizace).

## 13 Rozdělovník, úprava a schválení, revize

### 13.1 Rozdělovník

Výtisk číslo	Obdrží útvar	převzal		
		jméno	podpis	datum

### 13.2 Úprava a schválení

Kalibrační postup	jméno	podpis	datum
Upravil			
Schválil			

### 13.3 Revize

strana	popis změny	zpracoval	schválil	datum

## 14 Stanovení nejistoty měření (příklad výpočtu)

Údaje o kalibrovaném deformačním tlakoměru:

Měřicí rozsah (0 až 100) kPa absolutní tlak

Třída přesnosti 1,6

Dílek tlakoměru	2 kPa
Teplotní součinitel $K_t$	0,04 % rozsahu/°C
Referenční teplota	20 °C

Údaje o použitém etalonu (číslicový tlakoměr s barometrickou referencí):

Měřicí rozsah přetlak	(-1 až 2) bar
Přesnost	0,1 % měřicího rozpětí
Nejistota kalibrace (-60 kPa)	10 Pa (pro $k = 2$ )
Měřicí rozsah barometr. refer.	(80 až 120) kPa abs
Přesnost	50 Pa
Nejistota kalibrace	20 Pa (pro $k = 2$ )

Podmínky při kalibraci:

Teplota okolí	20 °C ± 2 °C
Rozdělení dílku při odečtu na	5 částí

Rozdíl referenčních úrovní etalonového a kalibrovaného tlakoměru je nulový, stanovený s chybou do 5 mm (zanedbatelné). Tlakoměry jsou spojeny přímo – bez oddělovacích membrán a filtrů. Výpočet je proveden v souladu s [L5]. Výsledek měření a vyhodnocení jednoho měřeného bodu viz tabulky 4 a 5. Výpočet je proveden pro absolutní tlak 40 kPa.

údaj etalonu	údaj kalibrovaného tlakoměru – absolutní tlak					
	1. série		2. série		3. série	
absolutní	nahoru	dolů	nahoru	dolů	nahoru	dolů
tlak						
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
20,0	20,0	20,4				
40,0	40,0	40,4	40,0	40,4	40,0	40,4
60,0	60,0	60,8				
80,0	80,0	80,4				
100,0	99,6	100,0				

TABULKA č. 4: Naměřené údaje

Největší naměřená chyba tlakoměru	0,80 % měřicího rozpětí
Max. hystereze tlakoměru	0,80 % měřicího rozpětí
Rozšířená nejistota (výpočet následuje)	0,56 % měřicího rozpětí
Největší hodnota součtu absolutní hodnoty chyby a nejistoty	1,36 % měřicího rozpětí

veličina	odhad	standardní nejistota	pravděpodobnostní rozdělení	citlivostní koeficient	příspěvek k nejistotě
$X_i$	$x_i$	$u(x_i)$		$c_i$	$u_i(y)$
$p_{kl}$	40,4 kPa	0,000 kPa	normální	1,0	0,000 kPa
$p_{et1}$	40,0 kPa	0,173 kPa	rovnoměrné	-1,0	-0,173 kPa
$\delta_{kalet1}$	0,010 kPa	0,005 kPa	normální	-1,0	-0,005 kPa
$p_{et2}$	100,0 kPa	0,029 kPa	rovnoměrné	-1,0	-0,029 kPa
$\delta_{kalet2}$	0,020 kPa	0,010 kPa	normální	-1,0	-0,010 kPa
$\delta_t$	0 kPa	0,046 kPa	rovnoměrné	1,0	0,046 kPa
$\delta_d$	0 kPa	0,231 kPa	rovnoměrné	1,0	0,231 kPa
$\delta_h$	0 kPa	0,000 kPa	rovnoměrné	1,0	0,000 kPa
$\delta_{odd}$	0 kPa	0,000 kPa	rovnoměrné	1,0	0,000 kPa
$E_x$	0,40 kPa				0,294 kPa

TABULKA č. 5: Výpočet nejistoty pro tlak 40 kPa abs odlehčování

Opakovatelnost měření je nulová, v tabulce 5 jsou navíc patrné dvě dominantní složky s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti. První vyplývá z přesnosti použitého přetlakového etalonu ... 0,1 % z měřicího rozpětí 300 kPa, což odpovídá hodnotě  $a_1 = 0,3$  kPa. Druhá složka vyplývá z odečitelnosti kalibrovaného tlakoměru ... 1/5 velikosti dílku 2 kPa tj.  $a_2 = 0,4$  kPa. Tento případ odpovídá příkladu **S10 podle [L5]**. Jestliže dva dominantní příspěvky mají rovnoměrné rozdělení a jejich poloviční šířky jsou  $a_1$  a  $a_2$ , pak výsledné rozdělení vznikne jejich konvolucí a má symetrické lichoběžníkové rozdělení popsané polovinou šířky základny ...  $a = a_1 + a_2$  a horní strany ...  $b = |a_1 - a_2|$ . V našem případě je tedy  $a = 0,7$  kPa a  $b = 0,1$  kPa. Koeficient rozšíření pro pravděpodobnost pokrytí rovnou 95 % vhodný pro lichoběžníkové rozdělení s parametrem stran  $\beta < 0,95$  se vypočte ze vztahu:

$$k = \frac{1 - \sqrt{(1-p)(1-\beta^2)}}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}} \quad (24)$$

$p$  ... pravděpodobnost pokrytí (95 % tedy 0,95),

$\beta$  ... poměr stran lichoběžníku  $b/a$  ( $0,1/0,7 = 0,143$ ).

Dosazením do vzorce (24) vypočteme koeficient rozšíření  $k = 1,89$ . Rozšířená standardní nejistota měření je tedy  $U = k \cdot u = 1,89 \cdot 0,294 = 0,56$  kPa.

Při absolutním tlaku 40 kPa je chyba údaje tlakoměru rovna  $(0,40 \pm 0,56)$  kPa.

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření  $k = 1,89$ , který byl odvozen z předpokládaného lichoběžníkového pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem [L5].



## 15 Validace

Metody použité v tomto kalibračním postupu byly validovány. Doklad o validaci je uložen v České metrologické společnosti.

### Upozornění

Tento kalibrační postup byl zpracován a posouzen v rámci úkolu rozvoje metrologie, řešeného pro Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví pod číslem PRM/VII/2/22. Šíření a využívání tohoto kalibračního postupu nebo jeho částí jakýmkoli komerčním způsobem je nepřipustné.

Tento kalibrační postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby jej organizace přizpůsobila svým požadavkům a doplnila s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky kalibrace.

### Změny proti předchozímu vydání z roku 2008

Kalibrační postup byl sloučen s postupem pro deformační barometr (KP 2.4.1/02/06/N) vzhledem k podobnému principu obou měřidel a obdobné metodice kalibrace. Pro kalibraci deformačních tlakoměrů lze použít různé zdrojové dokumenty s obecnou platností, které se poněkud odlišují jak v metodice kalibrace, tak ve způsobu stanovení nejistot měření. Proto byly do postupu zařazeny používané postupy několika evropských dokumentů (viz seznam literatury) a laboratoře mohou posoudit, která z metodik je pro ně nejpřijatelnější. Stanovení nejistot je přepracováno v souladu s dokumentem EA - 4/02M:2022. Kalibrační postup uvádí nový příklad stanovení nejistoty měření při kalibraci tlakoměru absolutního tlaku, který lze využít i u barometrických měřidel při použití etalonů uvedených v příkladu.