



**ČESKÝ INSTITUT PRO AKREDITACI, o.p.s.**

Opletalova 41, 110 00 Praha 1 – Nové Město

---

## **Dokumenty EA**

### **EA - Evropská spolupráce pro akreditaci**

---

**Číslo publikace: EA-4/17 (EAL - G26)**

#### **Kalibrace pístových tlakoměrů**

Tento dokument byl vypracován prostřednictvím EAL za účelem zvyšování harmonizace postupů v oblasti měření tlaku. Pro národní akreditační orgány je podkladem ke stanovení minimálních požadavků pro kalibraci pístových tlakoměrů a kalibračním laboratořím dává návod k zavedení praktických kalibračních postupů.

Dokument obsahuje detailní příklad vyhodnocení příspěvku nejistot pístového tlakoměru, pokud je tento použit pro kalibraci jiného přístroje.

Tento dokument nesmí být dále rozšiřován.

---

březen 1999

**Autor:**

Tato publikace byla zpracována 2. výborem EAL (činnosti v oblasti kalibrací a zkoušení).

**Oficiální jazyk:**

Text může být překládán do dalších jazyků podle potřeby. Verze v angličtině zůstává verzí směrodatnou..

**Copyright:**

Autorské právo k tomuto textu přísluší EAL. Z textu nesmí být pořizovány kopie za účelem dalšího prodeje.

**Krátce k poslání publikace:**

Tento dokument reprezentuje shodu názorů členů EAL na postup pro možnost aplikace odpovídajících článků akreditačních norem v předmětu zájmu tohoto dokumentu. Zvolené přístupy nejsou závazné a slouží jako návody pro akreditační orgány a jejich zákazníky. Dokument byl zpracován s cílem zabezpečení jednotného přístupu při akreditaci laboratoří mezi členy EAL a speciálně pak mezi signatáři Multilaterální dohody EAL.

**Další informace:**

Další informace o této publikaci získáte u vašich národních zástupců v EAL, jejichž telefonní a faxová čísla jsou uvedena dále.

**Český institut pro akreditaci, o.p.s.**  
**Opletalova 41, Praha 1, PSČ 110 00**  
**Telefon: 221 004501**  
**Fax: 221004408**  
**E-mail: mail@cai.cz**

**Obsah**

<b>1 Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2 Rozsah aplikace</b>	<b>2</b>
<b>3 Princip pístových tlakoměrů</b>	<b>2</b>
<b>4 Příprava ke kalibraci</b>	<b>5</b>
4.1 Prostor ke kalibraci	5
4.2 Instalace zařízení	5
4.3 Generování tlaku	6
4.4 Tlaková reference	6
<b>5 Příklady kalibračních postupů</b>	<b>8</b>
5.1 Aplikované metody	8
5.2 Postup metody A	8
5.3 Postup metody B	9
5.4 Proces hydrostatického porovnání	9
<b>6 Vyhodnocení údajů a kalibrační listy</b>	<b>10</b>
6.1 Obecné zásady	10
6.2 Postup metody A	10
6.3 Postup metody B	12
<b>7 Vyhodnocení nejistot</b>	<b>14</b>
<b>8 Reference</b>	<b>16</b>

## 1 ÚVOD

- 1.1 Tento dokument popisuje metody kalibrace pro pístové tlakoměry, včetně příkladů vyhodnocení nejistot při použití těchto přístrojů. Zahrnuje pístové tlakoměry s tlakovým médiem vzduch i kapalina. V obou případech jsou metody srovnatelné. Jestliže je referenčním etalonem rovněž pístový tlakoměr, porovnání je vykonáno metodou hydrostatického porovnání, která je v tomto dokumentu rovněž popsána.
- 1.2 Jsou popsány dvě kalibrační metody:
- metoda první, kde kalibrace určuje tlak generovaný tlakovou měrkou (píst-pouzdro) při specifických podmínkách,
  - metoda druhá, kde kalibrace určuje hmotnost pístu a závaží tlakoměru, a která určuje efektivní plochu měrky (píst-pouzdro).
- 1.3 Dokument nezahrnuje metody jiné, příkladně určení efektivní plochy měrky geometrickým vyhodnocením, nezamezuje však jejich použití pokud je to vhodné.
- 1.4 Dokument popisuje postup aplikovatelný u pístových tlakoměrů, zahrnujících tlakovou měrku (píst-pouzdro), nebo plovoucí kuličku. Vztahuje se k průmyslovým pístovým tlakoměrům, při použití přímého zatížení pístu, nebo kuličky. Nezahrnuje dělicí, nebo multiplikační zařízení a digitální pístové tlakoměry. Zahrnuté typy pístových tlakoměrů jsou typicky charakterizovány následujícími rozsahy:
- pro tlakové médium plyn od 1,5 kPa do 7 MPa v absolutním modu, resp. od 1,5 kPa do 100 MPa v modu přetlaku,
  - pro tlakové médium kapalina, od 0,1 MPa do 500 MPa.

## 2 ROZSAH APLIKACE

- 2.1 Dokument se vztahuje k pístovým tlakoměrům u kterých se předpokládá rozšířená nejistota od  $5 \times 10^{-4} \times p$  do  $5 \times 10^{-5} \times p$  (kde  $p$  je měřený tlak).
- 2.2 Pístové tlakoměry mohou být použity pro kalibraci jakýchkoli typů přístrojů pro měření tlaku. Mohou být rovněž použity pro kalibraci jiných pístových tlakoměrů metodou hydrostatického porovnání.

## 3 PRINCIP PÍSTOVÝCH TLAKOMĚRŮ

- 3.1 Pístový tlakoměr sestává z pístu, který ve vertikální pozici volně rotuje v pouzdře. Tyto dva elementy, velmi dobře mechanicky opracované definují plochu, která se nazývá „efektivní plocha“. Měřený tlak působí na spodek pístu a vytváří směrem nahoru vertikální sílu. Tato síla je vyvážena gravitační silou působící dolů od závaží, při lokální gravitaci. Závaží jsou ukládána na horní část pístu. Píst je částí zatížení.

- 3.2 Někdy, pro praktické účely, speciálně při malém tlaku, pouzdro rotuje namísto pístu. Princip a zkušební metody jsou v tomto případě identické.
- 3.3 Tlak je přenášen k pohyblivému elementu tekutinou, kterou může být plyn (obvykle suchý dusík), nebo kapalina (obvykle olej).
- 3.4 Občas není měřicím elementem měrka (píst-pouzdro): v takovém případě je jím měrka s plovoucí kuličkou. Měrka je kombinací plovoucí kuličky pro ukládání závaží a hemisférického základu pro podporu kuličky. V tomto případě se jedná o průtokový regulátor, který kontroluje průtok plynu ve štěrbině systému. Tento typ tlakoměru se používá pouze pro plyn v případě měření přetlaku.
- 3.5 Jestliže jsou závaží obklopeny vakuem, pak tlakoměr měří absolutní tlak. Zbytkový tlak ve zvonu, kde se závaží nacházejí, vytváří sílu, která působí proti měřenému tlaku. Zbytkový tlak musí být měřen a připočten k měřenému tlaku.
- 3.6 Jsou-li závaží vystaveny atmosférickému tlaku, který rovněž působí na horní část pístu, pak tlakoměr měří přetlak. V některých případech, adaptér umožňuje opačnou montáž systému píst-pouzdro: tlakoměr potom měří záporný přetlak (pod atmosférickým tlakem) a generuje sílu směrem nahoru, proti gravitační síle.
- 3.7 Obecná definice měření tlaku pístovým tlakoměrem se získá analýzou různých složek sil působících na systém. Pro pístový tlakoměr s médiem plyn v modu přetlaku, je definice tlaku následující:

$$p_e = \frac{\sum_i m_i g (1 - \rho_a / \rho_{mi})}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c) (t - t_r)]}$$

kde:

$p_e$  je přetlak měřený naspodu pístu,

$m_i$  je individuální hmotnost každého závaží ukládaného na píst, resp. na všechny plovoucí elementy,

$g$  je lokální gravitační zrychlení

$\rho_a$  je hustota vzduchu

$\rho_{mi}$  je hustota každého závaží

$A_p$  je efektivní plocha měrky (píst-pouzdro) při referenční teplotě  $t_r$  (obvykle 20 °C) a tlaku  $p_e$ . V závislosti na typu a rozsahu tlakoměru, plocha  $A_p$  může být vyjádřena:

a) jako konstanta  $A_o$  rovná průměrné hodnotě všech vyhodnocení

b) pomocí efektivní plochy  $A_o$  při nulovém tlaku a koeficientu tlakové deformace prvního řádu:

$$A_p = A_o (1 + \lambda p)$$

$p$  je aproximační hodnota měřeného tlaku  $p_e$ . Může to být nominální hodnota.

c) eventuelně polynomem druhého řádu, když  $\lambda$  je koeficient tlakové roztažnosti druhého řádu:

$$A_p = A_o(1 + \lambda p + \lambda' p^2)$$

$\alpha_p$  je koeficient lineární teplotní roztažnosti pístu

$\alpha_c$  je koeficient lineární teplotní roztažnosti pouzdra

$t$  je měřená teplota tlakové měrky (píst-pouzdro) v průběhu použití.

Jestliže se použijí všechny veličiny v jednotkách SI bez předpon, tlak  $p_e$  vychází pascálech.

3.8 U pístových tlakoměrů s kapalinou jako tlakovým médiem může být použit podobný výraz, ke gravitační síle však musí být přidána síla od povrchového napětí kapaliny:

$$p_e = \frac{\sum_i m_i g (1 - \rho_a / \rho_{mi}) + \sigma c}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c) (t - 20)]}$$

kde:

$\sigma$  je povrchové napětí kapaliny

$c$  je obvod pístu v úrovni, kdy vystupuje z kapaliny.

*Poznámka:* U některých typů pístových tlakoměrů, jako například u dvojrozsahových přístrojů, je nutno brát do úvahy vztlak kapaliny na píst. Hodnota této korekce může být často vyšší než korekce od povrchového napětí.

3.9 Pro pístové tlakoměry s tlakovým médiem plyn v absolutním modu měření, je tlak vyjádřen jako:

$$p_{abs} = \frac{\sum_i m_i g}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c) (t - 20)]} + \mu$$

kde

$p_{abs}$  je absolutní tlak měřený naspodu pístu

$\mu$  je zbytkový tlak obklopující závaží

$m_i$  je individuální hodnota hmotnosti jednotlivých závaží ukládaných na tlakovou měrku, ve vztahu k vlastní hustotě závaží, ne ke konvenční hustotě.

3.10 Spodek pístu, když je pístový tlakoměr v rovnováze, je uvažován jako referenční úroveň tlakoměru. V některých případech, pro praktické účely, je počáteční závaží výrobcem nastaveno tak, aby referenční úroveň byla vztažena k výstupní přípojce tlakoměru. Při kalibraci těchto typů přístrojů musí být věnována speciální pozornost zvolené kalibrační metodě.

3.11 Jestliže je tlak  $p_m$  vyjádřen v jiné, než referenční úrovni, k výše uvedenému vyjádření tlaku je nutno přidat korekční výraz:

v modu přetlaku, 
$$p_m = p_e + (\rho_f - \rho_a) g \Delta h$$

v absolutním modu, 
$$p_m = p_{abs} + \rho_f g \Delta h$$

kde

$\rho_f$  je hustota měřicí kapaliny

$\rho_a$  je hustota okolního vzduchu,

$\Delta h$  je diference mezi hladinou  $h_1$  referenční úrovně a hladinou  $h_2$  místa, kde je nutno tlak měřit:

$$\Delta h = h_1 - h_2$$

## 4 PŘÍPRAVA KE KALIBRACI

4.1 Kalibrace může být prováděna pouze v tom případě, jestliže je pístový tlakoměr v dobrém stavu. Činnost kalibrovaného pístového tlakoměru a referenčního etalonu tlaku musí být v souladu s kalibračním postupem laboratoře, připraveném dle tohoto dokumentu a dle technického manuálu výrobce.

### 4.1 Prostor ke kalibraci

4.1.1 Ve vztahu k problematice nejistot při procesu kalibrace, je nutno kontrolovat následující typické parametry:

- Okolní teplotu v intervalu 15 °C až 25 °C, stabilizovanou na +/- 2°C. Pro malé hodnoty nejistot, typicky 0,01%, je prioritně nutno měřit teplotu měrky (píst-pouzdro).
- Relativní vlhkost mezi 40 % a 65 %, nebo ji měřit.
- Otevírání dveří a pohyb operátorů pro zabezpečení stabilní atmosféry, ventilaci k zamezení intenzivního proudění vzduchu nad a pod pístovým tlakoměrem.

### 4.2 Instalace zařízení

- Instalovat zařízení mimo zdroje rušivých proudění vzduchu, jako jsou ventilace a klimatizace.
- Kalibrovaný pístový tlakoměr umístit k etalonovému přístroji co možná nejbližší.
- Použít stabilní pevný stůl, který vyhovuje hmotnosti plného rozsahu závaží, a jehož ustavení je zkontrolováno vodováhou.
- Minimalizovat výškovou diferenci mezi referenčními hladinami dvou porovnávaných tlakoměrů.
- Respektovat kolmost ustavení pístu doporučenou výrobcem: použít zamontovanou vodováhu, nebo laboratorní vodováhu uloženou navrhu pístu k minimalizování náklonu. Náklon by měl být zkontrolován i při plném naložení závaží.

- Používat krátká, široce vrtaná spojovací potrubí. Zejména u měření nízkých tlaků.
- Zajistit čistotu a těsnost propojení.
- Instalovat příslušné vypouštěcí (čisticí) prvky ke kontrole stavu kapaliny v trubicích.
- Použít vhodný systém pro měření teploty.

### 4.3 Generování tlaku

#### 4.3.1 Pro měření tlaku plynu:

- Použít čistý a suchý plyn (např. dusík), při teplotě blízké okolní.
- Tlakový vstup nastavit na rozsah porovnávaných přístrojů.
- Trubice vyčistit od jakékoli kapaliny (pro typy s olejovým mazáním).

#### 4.3.2 Pro absolutní tlak:

- Použít čisté čerpadlo, při použití mechanických rotačních čerpadel, použít příslušný filtr.
- Použít příslušnou vakuovou pumpu k zajištění, že okolní zbytkový tlak nad tlakovou měrkou (píst-pouzdro) je menší než typicky 2 Pa, nebo  $1 \cdot 10^{-5}$  z měřeného tlaku (ať má jakoukoli hodnotu), ledaže je výrobcem doporučeno jinak.
- Měřit zbytkový tlak kalibrovanou vakuovou měrkou, přímo připojenou ke krycímu zvonu.

#### 4.3.3 Pro tlak kapalin:

- Použít kapalinu, doporučenou výrobcem.
- Jestliže kapalina v kalibrovaném tlakoměru není stejná jako v etalonu, použít propojovací separátor, který zamezí jakémukoli promíchání těchto dvou kapalin.
- Vyčistit trubice od jakékoli jiné kapaliny.
- Vyčistit kapalinu v trubicích od jakéhokoli možného interního plynu.

### 4.4 Tlaková reference

4.4.1 Referenční tlakoměr obecně používaný pro kalibraci pístových tlakoměrů je jiný pístový tlakoměr. Pro rozsah menší než 300 kPa, etalonovým přístrojem může být sloupcový kapalinový rtuťový tlakoměr. Jiné přístroje mohou být alternativně použity ve speciálních případech (např. pro nízký přetlak).

4.4.2 Kalibrace absolutního pístového tlakoměru může proběhnout v modu přetlaku, s přičtením nejistoty v  $A_o$ .

4.4.3 Ve všech případech musí referenční přístroj použitý pro kalibraci splnit následující podmínky:

- být navázán na Národní etalon s uznaným kalibračním listem,
- mít lepší nejistotu než je předpokládaná nejistota kalibrovaného přístroje. Pro kontrolu této podmínky je nutno kompletovat příspěvek nejistot referenčního etalonu.

## 4.5 Příprava pístového tlakoměru

7.3.3 Kalibrovaný pístový tlakoměr musí být umístěn v laboratoři nejméně 12 hodin před začátkem kalibrace, aby bylo dosaženo teplotního vyrovnání.

- a) Zkontrolovat, že olej je zbaven nečistot. Jestliže ne, vyčistit všechny trubice a vyměnit olej v nádrži.
- b) Při uzavřeném tlakovém okruhu a při naložení poloviny sady závaží, pomocí vřetenového čerpadla se píst musí pohybovat směrem nahoru a dolů. Takto se vyzkouší pohyblivost pístu v celém jeho rozsahu přemístění.
- c) Jestliže je to nutné, s použitím technického manuálu, vyjme se tlaková měrka (píst-pouzdro) a očistí se plochy obou komponentů roztokem jemného mýdla a suchou měkkou látkou, dle doporučení výrobce. Píst a pouzdro se kontrolují z hlediska absence koroze a vrypů na plochách. Znovu se píst namaže čistou kapalinou jestliže měrka operuje v kapalině, resp. když tlakoměr operuje s plynem, ale s tlakovou měrkou mazanou olejem.
- d) Vyzkouší se čas volné rotace (pouze pro pístové tlakoměry roztáčené ručně). Závaží, odpovídající 2/10 maximálního tlaku se umístí na píst. Počáteční otáčky mají být přibližně 30 ot./min. Měří se průběžný čas do zastavení pístu. Tento čas má být nejméně 3 minuty.
- e) Vyzkouší se rychlost poklesu pístu. Rychlost se sleduje při zatížení maximálním tlakem a při rotaci pístu. Měří se časový interval za který píst poklesne z horní do dolní polohy. Tento čas by měl být nejméně 3 minuty.  
*Pozn.:* Hodnoty příslušné pro tyto dva parametry by měly být v souladu s technickými instrukcemi výrobce.
- f) Kalibrovaný tlakoměr se spojí s etalonem.
- g) Stanoví se referenční úroveň obou pístových tlakoměrů. Referenční úroveň by měla být definována výrobcem na úrovni spodní plochy pístu, když je tlakoměr v rovnováze. V případě absence této definice, a když spodní plocha pístu není přístupná, referenční úroveň je obecně definována na úrovni výstupní přípojky tlakoměru. Výšková diference mezi referenční úrovní etalonu a referenční úrovní kalibrovaného tlakoměru má být co nejmenší a má být změřena. V každém případě, výškovou diferencí mezi referenčními úrovněmi etalonu a kalibrovaného přístroje je potřeba změřit a následně aplikovat v příslušné korekci (viz část 3).
- h) Při měření absolutního tlaku je nutno 30 minut čerpat plyn do zvonu pro eliminaci vodní páry. Jako pracovní plyn použít suchý dusík.
- i) Píst nebo pouzdro musí rotovat dle doporučení výrobce.
- j) U tlakoměrů s ručním roztáčením, zkontrolovat vliv směru rotace ve směru a proti směru hodinových ručiček (jestliže existuje), resp. identifikovat směr rotace v kalibračním listě.

## 5 PŘÍKLADY KALIBRAČNÍCH POSTUPŮ

### 5.1 Aplikované metody

5.1.1 Obě následující metody jsou vzájemně komparativní a pozůstávají z porovnání kalibrovaného a etalonového tlakoměru, když oba přístroje jsou vystaveny stejnému tlaku a stejným okolním podmínkám.

5.1.2 Následně tedy, na základě předpokládané přesnosti kalibrovaného přístroje a v závislosti na požadavcích zákazníka, mohou být alternativně použity metody:

#### 5.1.3 Metoda A - Metoda generovaného tlaku

Základem této metody je určení chyby správnosti a opakovatelnosti kalibrovaného tlakoměru. To se vykoná určením generovaného tlaku v návaznosti na dobře identifikovaná jednotlivá závaží. Při této metodě je vážení závaží kalibrovaného přístroje volitelné.

#### 5.1.4 Metoda B - Metoda určení efektivní plochy

Základem této metody je určení:

- hodnot hmotností všech závaží včetně pístu tlakoměru, jestliže se tento dá vyjmout,
- efektivní plochy  $A_p$  vztažené k 20°C měřky (píst-pouzdro) tlakoměru, jako funkce tlaku. Při měření vysokých tlaků může být tato plocha určena z efektivní plochy při nulovém tlaku  $A_0$  a z koeficientu tlakové deformace,
- opakovatelnosti, jako funkce měřeného tlaku.

Podklady pro určení efektivní plochy jsou dány v části 6. Rovnice pro výpočet efektivní plochy jsou uvedeny v Příloze A.

5.1.5 Metoda A se obvykle nepoužívá v případě požadavku menších nejistot.

### 5.2 Postup metody A

5.2.1 Vykonají se tři série měření, každá série minimálně v 5 bodech rovnoměrně rozložených v celém rozsahu měření tlakoměru. U dvojrozsahových pístových tlakoměrů by mělo být nejméně 5 tlakových bodů pro každý rozsah. Tlakové body by měly být zvoleny rovnoměrně v rozsahu kalibrovaného přístroje.

## 5.3 Postup metody B

### 5.3.1 Určení hmotnosti závaží

- Hmotnost každého závaží (včetně plovoucích částí, např. píst, nosič závaží, atd., když je lze odstranit) pístového tlakoměru má být určena v laboratoři, která je akreditována pro měření hmotnosti. Relativní nejistota určení hmotnosti by obvykle neměla překročit 20% celkové nejistoty kalibrovaného tlakoměru. Např., jestliže je předpokládaná rozšířená nejistota pístového tlakoměru  $5 \times 10^{-5}$ , relativní nejistota určení hmotnosti závaží by měla být v intervalu  $1 \times 10^{-5}$  x m.
- Jestliže není možnost určení hmotnosti plovoucích částí vážením, příslušný základní tlak může být určen z výsledků tlakového porovnávacího měření metodou analýzy nejmenších čtverců: v tomto případě by měla být uvedena tárovací hodnota v jednotce tlaku. Metoda  $\Delta p$  uvedená v paragrafu 6.3.3 (c) umožňuje identifikaci této počáteční hodnoty.

### 5.3.2 Určení efektivní plochy

- U pístových tlakoměrů, které jsou vybaveny tlakovými měrkami (píst-pouzdro) pro nízký i vysoký tlak, resp. vymontovatelnými měrkami, by měl být vykonán kompletní proces kalibrace pro každou měrku.
- Efektivní plocha má být určena vykonáním tří až pěti sérií měření, každé série nejméně v 6 tlakových bodech. První bod má být vybrán jako minimální hodnota tlakového rozsahu (hodnota identifikovaná výrobcem, nebo nízká hodnota, která odpovídá vyhovující funkci tlakoměru, viz část 4.5). Další tlakové body mají být rozloženy v celém rozsahu, typicky mezi 1/10 a 10/10 maximální hodnoty tlaku.
- Opakovatelnost měřeného tlaku je vyhodnocena na základě experimentální standardní odchylky vypočítané dle následných měření a určení tlaku v každém tlakovém bodě.

*Poznámka* (platná pro obě metody): Stoupající série měření mohou být uvažovány jako identické k sériím klesajícím. Je to z toho důvodu, že pístové tlakoměry používané pro měření tlaku obvykle nemají významný efekt hystereze.

## 5.4 Proces hydrostatického porovnání

### 5.4.1 Mod přetlaku

- Jestliže se použije pístový tlakoměr jako etalon, metoda hydrostatického porovnání se vykoná v každém tlakovém bodě.
- Uložit závaží na kalibrovaný tlakoměr tak, že hmotnost odpovídá pevnému tlakovému bodu.
- Nastavit tlak pro vyvážení kalibrovaného přístroje.
- Justování vykonat malými závažími na jednom z obou přístrojů (obvykle je jeden z nich více citlivý na změnu hmotnosti), až je dosažena rovnováha. Rovnováha se předpokládá, když je dosažena příslušná rychlost poklesu obou pístů (při absenci úniku kapaliny z propojovacích trubic obou přístrojů). Oba písty musí v průběhu justování rotovat. V případě ručního roztáčení tlakové měrky je nutno zkontrolovat

vliv směru rotace po směru, nebo proti směru hodinových ručiček, resp. rychlost rotace.

- e) Zaznamenat referenční čísla každého ze závaží, použitého na obou přístrojích
- f) Zaznamenat teplotu tlakových měrek (píst-pouzdro) obou pístových tlakoměrů. Jestliže přístroj není vybaven teplotním snímačem, zaznamenat okolní teplotu vzduchu použitím elektronického teploměru, přiloženého do vhodně zvoleného místa tlakoměru. Tato informace má být zahrnuta do kalibračního listu.

#### 5.4.2 Mod absolutního tlaku

- a) Při použití pístového tlakoměru jako etalonu, nemůže být použita metoda hydrostatického porovnání. V tomto případě se použije diferenciální tlakový převodník vybavený by-passem (obtokovým ventilem) pro měření difference tlaku, měřeného oběma pístovými tlakoměry. Pro každý tlakový bod se vykoná:
  - b) Na oba tlakoměry se uloží odpovídající závaží.
  - c) Nastaví se tlak pro vyvážení etalonového tlakoměru.
  - d) Odečte se nula diferenciálního tlakového převodníku.
  - e) Uzavře se by-pass.
  - f) Nastaví se tlak na obou stranách převodníku k vyvážení obou pístových tlakoměrů.
  - g) Zaznamená se odečet převodníku. Jestliže je tlaková difference tak vysoká, že požadovaná nejistota nemůže být dosažena z kalibrace převodníku, opět se nastaví hmotnost na referenčním (etalonovém) pístovém tlakoměru a opakují se 3 poslední operace.
  - h) Zaznamenají se referenční čísla každého ze závaží, uložených na oba tlakoměry.
  - i) Zaznamená se teplota tlakových měrek (píst-pouzdro) obou tlakoměrů. Jestliže tlakoměr není osazen teplotním snímačem, zaznamená se teplota okolního vzduchu.
  - j) Zaznamená se zbytkový tlak ve zvonech obou tlakoměrů.

## 6 VYHODNOCENÍ ÚDAJŮ A KALIBRAČNÍ LISTY

### 6.1 Obecné zásady

6.1.1 Kalibrační list má být vystaven ve shodě s dokumentem EAL-R1.

6.1.2 Po určení hmotností závaží tlakoměru se vystaví zvláštní kalibrační list. Číslo tohoto listu se uvede v listu, který se vztahuje ke kalibraci pístového tlakoměru.

### 6.2 Postup metody A

6.2.1 Následující technická data mají být uvedena v kalibračním listu:

- a) typ pracovní kapaliny,
- b) koeficient lineární teplotní roztažnosti kalibrované tlakové měrky (píst-pouzdro) (pokud není experimentálně definován, měl by být definován zdroj dat, např. příslušná literatura),
- c) koeficient tlakové deformace (pokud je stanoven teoretickou metodou),
- d) referenční úroveň měřeného tlaku,
- e) informace o tom, jak převádět hodnotu tlaku k hodnotě při měření teplotě a při lokálním gravitačním zrychlení.

6.2.2 Obvykle jsou výsledky udávány pro standardní hodnotu gravitačního zrychlení  $9,80665 \text{ m.s}^{-2}$  (ledaže zákazník žádá výsledek při vlastní gravitační konstantě) a pro referenční teplotu  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ve formě tabulky, uvedené jako příklad v části 6.2.3. Tabulka obsahuje:

- tlak, indikovaný kalibrovaným pístovým tlakoměrem ( $p_m$ ),
- referenční tlak měřený etalonovým přístrojem (průměr ze tří měření) v jednotce Pa a v jednotce, kterou udává kalibrovaný přístroj, pokud je jiná ( $p_r$ ),
- směrodatnou odchylku referenčního tlaku  $p_r$ ,
- rozdíl mezi tlakem indikovaným a tlakem referenčním ( $p_m - p_r$ ),
- nejistotu této difference v podmínkách kalibrace. Metoda stanovení této nejistoty má být uvedena v kalibračním listě.

6.2.3 Tabulka, která obsahuje všechny závaží aplikovaná v průběhu kalibrace tlakové měřky pro každý tlakový bod, má být zahrnuta v kalibračním listě.

Indikovaný tlak	Průměr referenčního tlaku	Průměr referenčního tlaku	Experiment. Směrodatná odchylka z	Diference	Relativní diference	Rozšířená nejistota z
$p_m$ v X <sup>(a)</sup>	$p_r$ v Pa <sup>(b)</sup>	$p_r$ v X	$p_r$ v X	$p_m - p_r$ v X	$(p_m - p_r)/p_r$ v %	$p_m - p_r$ v X <sup>(c)</sup>

## Poznámky

- X = Jednotka indikovaná kalibrovaným tlakoměrem
- Tento sloupec může být v kalibračním listě nahrazen přepočtovým faktorem
- Metoda výpočtu nejistoty je uvedena v sekci 7

## 6.3 Postup metody B

6.3.1 V kalibračním listě musí být uvedeny následující technická údaje:

- a) typ pracovní kapaliny,
- b) rovnice, dle které byly vypočteny hodnoty tlaku, uvedené v kalibračním listě,
- c) koeficient lineární teplotní roztažnosti kalibrované tlakové měrky (píst-pouzdro) (pokud není experimentálně definován, měl by být definován zdroj dat, např. příslušná literatura),
- d) referenční úroveň měřeného tlaku.

6.3.2 Výsledky kalibrace po analýze (viz níže):

- a) efektivní plocha a její kombinovaná nejistota
- b) jestliže je to relevantní, koeficient (koeficienty) tlakové deformace a příslušná kombinovaná nejistota.

6.3.3 Výpočet efektivní plochy

- a) Výpočetní metoda obecně majoritně využívaná a detailně popsaná v Příloze A může být použita pro postupný (step-by-step) výpočet efektivní plochy kalibrovaného tlakoměru z hmotností aplikovaných na jeho pístu a z hodnot tlaku udávaných etalonovým přístrojem.
- b) U této metody je efektivní plocha počítána reverzí definiční rovnice tlaku, která je uvedena v části 3.
- c) Není vyloučeno použití jiných metod, např. diferenční metody ( $\Delta p$ - metody) pro eliminaci potenciální chyby v nule, což však vyžaduje při analýze výsledků určité zkušenosti. Speciálně, jestliže je metoda B použita pro určení efektivní plochy pístového tlakoměru s neznámou počáteční hmotností (která nemůže být stanovena vážením), je  $\Delta p$ - metoda pro tento případ jediným použitelným postupem.
- d) Postupné (step-by-step) určování efektivní plochy jako funkce tlaku umožňuje upravovat hodnotu stanovení efektivní plochy. V každém případě, experimentální data a vlivy úprav musí být uvedeny v kalibračním listě, pro zprůhlednění platnosti použité metody.
- e) Výsledky mohou být prezentovány ve formě následující tabulky (ve formě obecného příkladu). Tabulka zahrnuje:
  - referenční tlak, měřený referenčním etalonovým přístrojem v každém tlakovém bodě v jednotce Pa a v jednotce tlaku, kterou udává kalibrovaný přístroj (pokud je jednotka odlišná);
  - korespondující hmotnost aplikovanou na plovoucí element kalibrovaného pístového tlakoměru;
  - příslušnou teplotu tlakové měrky (píst-pouzdro) v průběhu kalibrace;
  - jednotlivé hodnoty efektivní plochy  $A_p$  vypočtené při referenční teplotě a při referenčním tlaku, dle popisu v Příloze A;
  - průměrnou hodnotu efektivní plochy  $A_p$ ;
  - experimentální směrodatnou odchylku aritmetického průměru.

Referenční tlak $p_r$	Hmotnost aplikovaná na píst	Teplota tlakové měřky (píst-pouzdro)	Efektivní plocha ( $t_r, p_r$ )	Aritmetický průměr efektivní plochy ( $n = 5$ )	Experimentální směrodatná odchylka aritm. prům.
kPa	kg	°C	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>
400,096	6,16252	21,28	156,931		
400,083	6,16252	20,86	156,937		
400,083	6,16252	20,88	156,938	156,940	0,003
400,063	6,16252	20,86	156,948		
400,078	6,16252	20,80	156,944		
			---		

f) Následně je efektivní plocha, jako funkce tlaku, analyzována metodou nejmenších čtverců. Mohou být pozorovány tři případy:

- závislost na tlaku není významná ve vztahu ke směrodatné odchylce (to je vždy případ nízkorozsahových pístových tlakoměrů); efektivní plocha  $A_o$  při nulovém tlaku je vypočtena jako aritmetický průměr všech určených hodnot; jestliže je znám teoretický koeficient tlakové deformace, má být použit pro výpočet efektivní plochy; standardní nejistota typu A je vyhodnocena na základě experimentální směrodatné odchylky aritmetického průměru  $A_o$ ,
- závislost na tlaku může být považována za lineární. Efektivní plocha při nulovém tlaku  $A_o$  a koeficient tlakové deformace  $\lambda$  jsou analogicky vypočteny metodou nejmenších čtverců od lineární regresní přímky. Kombinovaná standardní nejistota typu A je vyhodnocena na základě standardních nejistot  $A_o$  a  $\lambda$ ,
- závislost na tlaku nelze považovat za lineární. Efektivní plocha při nulovém tlaku  $A_o$  a koeficienty tlakové deformace  $\lambda$  (prvého řádu) a  $\lambda'$  (druhého řádu) jsou analogicky vypočteny metodou nejmenších čtverců od regresní křivky druhého řádu. Kombinovaná standardní nejistota typu A je stanovena na základě standardních nejistot  $A_o$ ,  $\lambda$  a  $\lambda'$ .

g) Standardní nejistoty každého z parametrů mají být vyhodnoceny na základě odborné literatury o statistice,

h) Kalibrační list má uvádět:

- vypočtenou hodnotu efektivní plochy za referenčních podmínek  $A_o$  a příslušnou nejistotu vyhodnocenou: ze směrodatné odchylky  $A_o$ , příspěvku etalonového přístroje, měřicí hmotnosti aplikované na pohyblivý element a teploty,
- jestliže je to relevantní, koeficient (koeficienty) tlakové deformace a příslušnou nejistotu vyhodnocenou ze směrodatné odchylky  $\lambda$ , resp. nejistotu koeficientu tlakové deformace etalonu.

#### 6.3.4 Výpočet měřeného tlaku

a) Tlak měřený kalibrovaným pístovým tlakoměrem může být vypočten použitím rovnice, uvedené v části 3. Pro uživatele je vhodné mít porovnaný tento měřený tlak s referenčním tlakem etalonu při podmínkách kalibrace.

- b) Výsledky mají být uvedeny ve formě následné tabulky, uvedené jako příklad a obsahující:
- referenční tlak měřený etalonovým přístrojem v jednotkách Pa a v jednotkách tlaku kalibrovaného přístroje, pokud jsou jednotky odlišné,
  - odpovídající tlak měřený kalibrovaným přístrojem a vypočtený z dat (efektivní plocha a koeficient tlakové deformace),
  - diferenci mezi měřeným a referenčním tlakem pro každý bod tlakové rovnováhy, jako následek stanovení efektivní plochy,
  - aritmetický průměr těchto diferencí,
  - experimentální směrodatnou odchylku naměřených diferencí.
- c) Tato tabulka dává informaci o potenciálním zbytkovém tlaku ve vztahu k neznámým silám a o opakovatelnosti pístového tlakoměru jako funkci tlaku. Minimální informace, která je obsažena v této části kalibračního listu, je aritmetický průměr diferencí a experimentální směrodatná odchylka.

Referenční tlak $p_r$	Měřený tlak $p_m$	Diference $p_m - p_r$	Aritmetický průměr diferencí (n=5)	Experimentální směrodatná odchylka $p_m - p_r$
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
600,152	600,159	+ 0,000 6		
600,155	600,161	+ 0,000 6		
600,149	600,161	+ 0,001 1	+ 0,001 8	0,001 7
600,114	600,161	+ 0,004 6		
600,140	600,161	+ 0,002 1		
		-----		

## 7 VYHODNOCENÍ NEJISTOT

7.1 Kombinovaná nejistota měřeného tlaku kalibrovaného tlakoměru má být vyhodnocena shodně s dokumentem EAL-R2. Komponenty nejistot, které je třeba brát do úvahy, jsou následně uvedeny pro obě doporučené metody.

### 7.2 Metoda A

7.2.1 Nejistoty vyhodnocené použitím metody typu A (komponenty  $u_A$ ):

- a) Opakovatelnost pístového tlakoměru, vyhodnocená jako funkce tlaku z hodnot směrodatné odchylky uvedené v tabulce. Dle experimentálních dat, může být vyjádřena v Pa, resp. ve vztahu, který je proporcionální k tlaku, popř. oběma způsoby.

7.2.2 Nejistoty vyhodnocené použitím metody typu B (komponenty  $u_B$ ):

- nejistota hmotnosti,
- nejistota tlaku referenčního etalonu,
- nejistota místního gravitačního zrychlení,
- nejistota ve vztahu k teplotě,
- nejistota z výškového rozdílu referenčních úrovní tlakoměrů,
- nejistota z náklonu (zanedbatelná, v případě kontroly kolmosti),
- nejistota ze vztlakové síly vzduchu, je-li významná,
- nejistota ve vztahu k rychlosti rotace a/nebo eventuálně k jejímu směru,

i) nejistota zbytkového tlaku (pouze v absolutním modu).

7.2.3 Jestliže je standardní nejistota vyjádřena pro každou výše uvedenou složku, potom se kombinovaná nejistota a následně rozšířená nejistota vypočítají ve shodě s publikací EAL-R2.

### 7.3 Metoda B

#### 7.3.1 Nejistoty vyhodnocené použitím metody typu A (komponenty $u_A$ ):

a) Opakovatelnost pístového tlakoměru, vyhodnocená jako funkce tlaku z hodnot směrodatné odchylky uvedené v tabulce. Dle experimentálních dat, může být vyjádřena v Pa, resp. ve vztahu, který je proporcionální k tlaku, popř. oběma způsoby.

#### 7.3.2 Nejistoty vyhodnocené použitím metody typu B (komponenty $u_B$ ):

- a) nejistota hmotnosti,
- b) nejistota měřené efektivní plochy, včetně nejistoty vyhodnocené metodou typu A,
- c) nejistota ve vztahu ke koeficientu tlakové deformace jestliže je to relevantní, včetně nejistoty vyhodnocené metodou typu A,
- d) nejistota místního gravitačního zrychlení,
- e) nejistota vzhledem k teplotě pístového tlakoměru,
- f) nejistota ze vztlakové síly vzduchu,
- g) nejistota z výškového rozdílu referenčních úrovní tlakoměrů,
- h) nejistota z náklonu (zanedbatelná, v případě kontroly kolmosti),
- i) nejistota ve vztahu k rychlosti rotace a/nebo eventuelně k jejímu směru,
- j) nejistota zbytkového tlaku (pouze v absolutním modu).

7.3.3 Jestliže je standardní nejistota vyjádřena pro každou výše uvedenou složku, potom se kombinovaná nejistota a následně rozšířená nejistota vypočítají ve shodě s publikací EAL-R2. Příklad příspěvku nejistot odpovídajících kalibraci pístového tlakoměru metodou B, je uveden v Příloze B.

## 8 REFERENCE

- NBS Monograph, Part. 3, *Piston Gauges* - P.L.M. Heydemann, B.E. Welch - International Union of Pure and Applied Chemistry, 1975.
- The Pressure Balances, Theory and Practice* - R.S.Dadson, S.L.Lewis, G.N. Peggs - NPL, 1982.
- The Pressure Balance, A practical guide to its use* - S. Lewis, G.Peggs - NPL, 2d Ed. (1992).
- La mesure des pressions statiques* - J.C.Legras - Monographie BNM Nr. 12, Ed. Chiron, Paris, 1988.
- Modern Gas-Based Temperature and Pressure Measurements* - F. Pavese, G.F. Molinar - Plenum Publishing Corp., New York and London, 1992.
- Nordtest Method NT MECH 009 (1987-09): *Pressure Balances, Calibration*.
- Nordtest Method NT MECH 023 (1989-11): *Pressure Balances: Gas Medium, Calibration*.
- Recommandation B.N.A.E.RM Aéro 802 21 (March 1991): *Etalonnage et utilisation des balances manométriques* (Pressure Balance Calibration and Use).
- Directive for the calibration of pressure balances within the scope of the German Calibration Service* (D.K.D.-R 3-4 June 1984).
- OIML International Recommendation Nr. 110 - *Pressure Balances* - General Technical Requirements, Verification Methods.
- OIML International Recommendation Nr. 33 - *Conventional value of the results of weighing in air*.
- International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*, 1993.
- Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*, 1993.
- Publication EAL-R1 - *Requirements Concerning Certificates Issued by Accredited Calibration Laboratories*, 1995.
- Publication EAL-R2 - *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, 1997.

**PŘÍLOHA A****Výpočetní metoda použitá k určení efektivní plochy měřky (píst-pouzdro) pístového tlakoměru**

A1 Určení efektivní plochy tlakové měřky (píst-pouzdro) pístového tlakoměru je odvozeno z rovnice používané pro výpočet tlaku definovaného referenčním pístovým tlakoměrem. Tlak měřený pístovým tlakoměrem na jeho referenční úrovni je vyjádřen velmi dobře známou rovnicí, stanovenou analýzou sil působících na píst. Následující výraz je uveden jako příklad. Koresponduje případu pístového tlakoměru s médiem plyn v modu přetlaku. Postup výpočtu by byl stejný pro jiné typy pístových tlakoměrů (viz sekce 4).

$$p_e = \frac{\sum_i m_i g (1 - \rho_a / \rho_{mi})}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c) (t - t_r)]} \quad (\text{A.1})$$

kde:

$p_e$  je přetlak měřený naspodu pístu

$m_i$  je individuální hodnota hmotnosti závaží aplikovaná na pístu, včetně všech plovoucích elementů

$g$  je místní gravitační zrychlení

$\rho_a$  je hustota vzduchu

$\rho_{mi}$  je hustota závaží. Jestliže jsou závaží vyrobena z různých materiálů, je nutno brát ohled na různé hustoty

$A_p$  je efektivní plocha tlakové měřky (píst-pouzdro) při referenční teplotě  $t_r$ , jako funkce tlaku

$\alpha_p$  je lineární koeficient tepelné roztažnosti pístu

$\alpha_c$  je lineární koeficient tepelné roztažnosti pouzdra

$t$  je teplota tlakové měřky (píst-pouzdro).

A2 Při použití metody hydrostatického porovnání, měří dva porovnávané tlakoměry za vyrovnaných podmínek stejný tlak. Tak, pro každý bod kalibrace označený indexem  $j$ , korespondující známé hmotnosti  $\sum m_i$ , je z rovnice (A1) vypočten referenční tlak  $p_{rj}$ , udávaný referenčním přístrojem s užitím jeho známých charakteristik. Potom se efektivní plocha  $A_{pj}$  kalibrovaného pístového tlakoměru pomocí tohoto tlaku  $p_{rj}$ , při referenční teplotě (obvykle 20 °C) určí pro každý tlak  $p_{rj}$  vztahem:

$$A_{pj} = \frac{\sum_i m_i g (1 - \rho_a / \rho_{mi})}{p_{rj} [1 + (\alpha_p + \alpha_c) (t - t_r)]} \quad (\text{A.2})$$

V tomto případě je  $\sum_i m_i$  celková hmotnost,  $t_j$  teplota a  $\alpha_p$ ,  $\alpha_c$ ,  $\rho_{mi}$  jsou charakteristiky kalibrovaného přístroje.

Z analýzy průměrných výsledků  $A_p = f(p_r)$  mohou vyplynout tři případy:

- 1 Efektivní plocha je na tlaku nezávislá. V tomto případě je efektivní plocha za referenčních podmínek rovná průměru všech stanovení.
- 2 Efektivní plocha je lineární funkcí tlaku; jestliže se výrazem  $A_0$  označí efektivní plocha při nulovém tlaku a  $\lambda$  je koeficient tlakové deformace měřky (píst-pouz-

dro), potom:

$$A_p = A_o (1 + \lambda p_r) \quad (\text{A.3})$$

$A_o$  a  $\lambda$  jsou vypočteny metodou nejmenších čtverců od lineární regresní přímky.

3 Efektivní plocha je vyjádřena polynomem druhého řádu

$$A_p = A_o (1 + \lambda p_r + \lambda' p_r^2) \quad (\text{A.4})$$

$A_o$ ,  $\lambda$  a  $\lambda'$  jsou rovněž vypočteny metodou nejmenších čtverců.

*Poznámka:* Zvláštní pozornost musí být u tohoto modelu věnována experimentálním datům. Je třeba se ujistit, že model polynomu druhého řádu dle vztahu (A.4) nevyplývá z nesprávných experimentálních výsledků (např. z difference výškového rozdílu referenčních hladin pístových tlakoměrů).

## PŘÍLOHA B

### Příklad vyhodnocení nejistot při použití pístových tlakoměrů

#### B1 Presentace měření

Tento příklad se vztahuje k určení rozšířené nejistoty tlaku generovaného průmyslovým pístovým tlakoměrem s tlakovým médiem olej, který je použit pro kalibraci jiného měřidla. Vyhodnocení je založeno na postupu měření, na datech obsažených v kalibračním listě pístového tlakoměru (za předpokladu že kalibrace byla vykonána metodou B) a na okolních podmínkách.

Vyhodnocení nejistoty vychází z výpočtu generovaného tlaku použitím hodnot efektivní plochy za nulového tlaku a koeficientu tlakové deformace, které jsou uvedeny v kalibračním listě pístového tlakoměru. Jsou zde uvažovány pouze hlavní komponenty, významné ve většině používaných případech. Je to příklad akceptovatelné a praktické metody.

#### B2 Definice tlaku

Obecná definice tlaku měřená na referenční úrovni kalibrovaného přístroje pomocí pístového tlakoměru s médiem olej v modu přetlaku se obdrží z následujícího výrazu:

$$p_e = \frac{\sum_i m_i g (1 - \rho_a / \rho_{mi}) + \sigma c}{A_p (1 + \lambda p) [1 + (\alpha_p + \alpha_c) (t - t_r)]} + p_f g \Delta h \quad (\text{B.1})$$

kde:

- $p_e$  je měřený přetlak,
- $\sum_i m_i$  je celková hmotnost aplikovaná na píst, včetně všech plovoucích elementů,
- $g$  je místní gravitační zrychlení,
- $\rho_a$  je hustota vzduchu,
- $\rho_{mi}$  je hustota závaží,
- $A_o$  je efektivní plocha tlakové měrky (píst-pouzdro) při referenční teplotě  $t_r$  a při nulovém tlaku,
- $\lambda$  je koeficient tlakové deformace měrky (píst-pouzdro),
- $\alpha_p$  je koeficient lineární teplotní roztažnosti pístu,
- $\alpha_c$  je koeficient lineární teplotní roztažnosti pouzdra,
- $t$  je teplota tlakové měrky (píst-pouzdro),
- $\sigma$  je povrchové napětí oleje,
- $c$  je obvod pístu,
- $\rho_f$  je hustota tlakového média - kapaliny,
- $\Delta h$  je diference mezi výškou  $h_1$  referenční úrovně pístového tlakoměru a výškou  $h_2$  referenční úrovně kalibrovaného přístroje:  $\Delta h = h_1 - h_2$ . V některých případech je referenční úroveň pístového tlakoměru funkcí vztlakové síly oleje na píst: exaktní indikace referenční úrovně je uvedena v kalibračním listě.

Výsledky uváděné v kalibračním listě jsou hodnoty efektivní plochy, koeficientu tlakové deformace měrky (píst-pouzdro) a individuální hodnoty hmotnosti každého závaží. Kalibrační list rovněž uvádí korespondující rozšířené nejistoty každého parametru a odhad opakovatelnosti pístového tlakoměru.

### B.3 Seznam komponentů nejistot

#### B3.1 Vyhodnocení standardní nejistoty typu A

V tomto příkladě není statisticky vyhodnocovaná komponenta. Vyhodnocení typu A by mělo korespondovat s opakovatelností kalibrovaného přístroje.

#### B3.2 Vyhodnocení standardní nejistoty typu B

Pro každou komponentu:

- Odhadnout nejistotu  $U(X_i)$  pro každou komponentu. Pro ovlivňující veličiny se odhad provede dle příslušných rozptylů.
- Určit standardní nejistotu  $u_i(X_i)$  z rozdělení pravděpodobnosti každé komponenty.
- Určit standardní nejistotu  $u_i(p)$  vzhledem k veličině  $X_i$  použitím citlivostního koeficientu, vypočítaného jako parciální derivace funkce (B.1) ve vztahu k veličině  $X_i$ .

Každá komponenta je individuálně analyzována v následujícím textu.

##### B3.2.1 B1 - Opakovatelnost pístového tlakoměru

Tato komponenta  $u_1(p)$ , nazvaná opakovatelnost pístového tlakoměru byla odhadnuta v kalibračním listě. Protože kalibrace byla vykonána v několika tlakových bodech několikrát, opakovatelnost byla odhadnuta z experimentální směrodatné odchylky  $u_1(p_i)$  vypočítané pro každý tlakový bod. V závislosti na případě,  $u_1(p)$  je vyhodnocena jako maximální hodnota z  $u_1(p_i)$ , nebo funkčním výrazem v závislosti na tlaku:

$$u_1(p) = a + b \times p$$

který vyjadřuje příslušné různé hodnoty  $u_1(p_i)$ .

Například:  $u_1(p) = 10 \text{ Pa} + 3,2 \times 10^{-5} \times p$

##### B3.2.2 B2 - Efektivní plocha

Nejistota určení efektivní plochy  $U(A)$  je dána v kalibračním listě pístového tlakoměru. Pokud je výsledek uveden s použitím rozšiřujícího faktoru  $k = 2$ :

$$u_2(p) = \frac{p}{A} \times \frac{U(A)}{2}$$

Například:  $u_2(p) = 3,6 \times 10^{-5} \times p$

### B3.2.3 B3 - Koeficient tlakové deformace

Při určení  $A_p = A_o(1 + \lambda p)$ , kde  $\lambda p \ll 1$ , je možno pro výpočet měřeného tlaku použít přibližnou hodnotu tlaku  $p_e$  (např. nominální hodnotu  $p$ , nebo  $p = \Sigma m_i g / A_o$ ).

V odhadu kombinované nejistoty je významná pouze nejistota koeficientu  $\lambda$ .

Nejistota určení koeficientu tlakové deformace  $U(\lambda)$  je dána v kalibračním listě. Pokud je výsledek uveden s použitím rozšiřujícího faktoru  $k = 2$ :

$$u_3(p) = p^2 \times \frac{U(\lambda)}{2}$$

$$\text{Například: } u_3(p) = 2 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1} \times p^2$$

### B3.2.4 B4 - Hmotnost

Hodnota hmotnosti závaží určená v kalibračním listě se používá k výpočtu celkové hmotnosti aplikované na pístu. Nejistota určení hmotnosti  $U(m)$  je uvedena v kalibračním listě závaží. Pokud je výsledek uveden s použitím rozšiřujícího faktoru  $k = 2$ :

$$u_4(p) = \frac{p}{m} \times \frac{U(m)}{2}$$

$$\text{Například: } u_4(p) = 0,7 \times 10^{-5} \times p$$

### B3.2.5 B5 - Teplota tlakové měrky (píst-pouzdro)

Teplota tlakové měrky (píst-pouzdro) je odvozena z měření okolní teploty. Kalibrace probíhá při kontrolované teplotě v laboratoři  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ . Nejistota tepelného gradientu uvnitř tlakoměru se zvyšuje o  $1 ^\circ\text{C}$ . Potom tedy:

$$U(t) = 2 ^\circ\text{C}.$$

Když je měření prováděno v místnosti s kontrolovanou teplotou v delším čase ve vztahu periodě teplotní regulace, teplota měrky je odhadnuta na základě sinusového rozdělení pravděpodobnosti:

$$u_5(p) = p \times (\alpha_p + \alpha_c) \times \frac{U(t)}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Například: } u_5(p) = 3,2 \times 10^{-5} \times p \text{ (píst i pouzdro vyrobeny z oceli).}$$

### B3.2.6 B6 - Koeficient teplotní roztažnosti tlakové měrky (píst-pouzdro)

Na základě variace teploty zde přistupuje jiná komponenta. Je to vzhledem k nejistotě koeficientu teplotní roztažnosti pístu a pouzdra. Pro naše účely uvažujeme, že se nacházíme při teplotě, která je blízká teplotě kalibrační. Jestliže to není takový případ, nejistota je vyšší.

$$u_6(p) = p \times U(\alpha_p + \alpha_c) \times \frac{\Delta t}{2}$$

kde  $\Delta t$  je maximální diference mezi pozorovanou teplotou při použití pístového tlakoměru a teplotou referenční (v tomto příkladě 2 °C). Hodnoty  $\alpha_p$  a  $\alpha_c$  jsou založeny na měření charakteristik materiálů, a jejich nejistoty jsou vyjádřeny s rozšiřujícím faktorem  $k = 2$ :

Například, když relativní nejistota výrazu  $(\alpha_p + \alpha_c)$  je 10%,

$$u_6(p) = 0,23 \times 10^{-5} \times p$$

### B3.2.7 B7 - Místní gravitace

Místní gravitační konstanta je určena výpočtem z lokální zeměpisné délky, šířky a výšky. Nejistota  $g$  je odhadnuta z nejistoty lokálních parametrů, vyjádřené s rozšiřujícím faktorem  $k=3$ :

$$U(g) = 1 \times 10^{-5} \times g$$

Předpokládá se normální statistické rozdělení:

$$u_7(p) = \frac{p}{g} \times \frac{U(g)}{3}, \text{ takže}$$

$$u_7(p) = 0,3 \times 10^{-5} \times p$$

### B3.2.8 B8 - Vztlak vzduchu

Výpočet korekce vztlaku vzduchu zahrnuje určení hustoty vzduchu. Protože konvenční hodnota hmotnosti obdržená z kalibračního listu, založená na předpokládané konvenční hodnotě hustoty závaží, je použita pro ocelová závaží v modu přetlaku, je možno považovat nejistotu vztaženou k hustotě závaží za zanedbatelnou. V tomto příkladě předpokládáme konvenční hodnotu hustoty vzduchu  $\rho_a = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ , a tato bude použita pro výpočet korekce. Okolní podmínky (atmosférický tlak, relativní vlhkost a okolní teplota) nejsou brány do úvahy: maximální rozptyl hustoty vzduchu v laboratoři lze předpokládat v intervalu  $\pm 5 \%$ :

$$U(\rho_a) = 5 \times 10^{-2} \times \rho_a$$

Jak bylo uvedeno, že průměr pozorovaných hodnot hustoty vzduchu v lokalitě laboratoře je

rovný konvenční hodnotě a statistické rozdělení je normální:

$$u_8(p) = \frac{p}{(\rho_m - \rho_a)} \times \frac{U(\rho_a)}{3}, \text{ tak\textbackslash}z\text{e}$$

$$u_8(p) = 0,25 \times 10^{-5} \times p$$

### B3.2.9 B9 - Korekce výškového rozdílu

Korekce výškového rozdílu je počítána ze tří parametrů  $\rho_f$ ,  $g$  a  $\Delta h$ . Pouze nejistotu parametru  $\Delta h$  lze považovat za významnou při odhadu nejistoty ve vztahu k této korekci. Při odhadu nejistoty měření hodnoty  $h$  na  $\pm 2$  mm, při  $k = 2$  a za předpokladu normálního statistického rozdělení, ekvivalentní nejistota tlaku  $p$  je:

$$u_9(p) = \rho_f \times g \times \frac{U(\Delta h)}{3}, \text{ a když}$$

$$\rho_f = 915 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$u_9(p) = 6 \text{ Pa.}$$

### B3.2.10 B10 - Sklon pístu

Jestliže osa pístu není bezchybně kolmá, síla aplikovaná na píst musí být korigována na základě úhlu náklonu:

$$F' = F \times \cos \Theta$$

Rozložení pravděpodobnosti síly (tlaku) je nesymetrické. Při korektním postupu experimentu je tato složka malá. Následující výraz uvádí maximální standardní nejistotu u tohoto případu.

$$u_{10}(p) = p \times \sin \Theta \times \frac{U(\Theta)}{\sqrt{3}}$$

Odchylka od vertikální polohy se obecně kontroluje vodováhou, buď zabudovanou v základně pístového tlakoměru, nebo uloženou navrchu pístu. V tomto případě je příspěvek o něco menší, než u jiných položek.

V tomto případě, když  $U(\theta) = 5,8 \times 10^{-4}$  rad:

$$u_{10}(p) = 0,2 \times 10^{-6} \times p$$

### B3.2.11 B11 - Prah citlivosti (citlivost hydrostatického porovnání)

Prah citlivosti je tlak odpovídající největší hmotnosti, která nezpůsobí detekovatelnou změnu generovaného tlaku. Může být brán v úvahu když není k dispozici spolehlivý odhad opakovatelnosti pístového tlakoměru. V tomto uváděném příkladě předpokládáme zahrnutí do opakovatelnosti (komponenta B1).

### B3.2.12 B12 - Dlouhodobá stabilita

Hodnota tohoto komponentu se získá z historie přístroje. Vztahuje se jak k hodnotám závaží, tak k hodnotě efektivní plochy tlakové měrky (píst-pouzdro). Analýza je založená na následných kalibracích.

Malou hodnotu tohoto komponentu lze získat z vyšší frekvence kalibrací. Dlouhá historie může umožnit určení zákonu časových variací, což umožní předvídat aktuální hodnotu prostřednictvím extrapolace.

## B.4 Určení kombinované standardní nejistoty

Kombinovaná standardní nejistota  $u_c(p)$  se vypočítá z následující rovnice:

$$u_c^2(p) = \sum_{i=1}^{12} u_i^2(p)$$

Výsledek se vztahuje k prvním 10 komponentám. Dvě poslední nejsou relevantní, protože B11 byla zahrnuta do B1 a pro B12 je nutná případ od případu analýza.

Pro náš případ platí:

$$u_c(p) = \sqrt{[10^2+6^2] \text{ Pa} + 10^{-5} \times p \times \sqrt{[3,2^2+3,6^2+0,7^2+3,2^2+0,23^2+0,3^2+0,25^2+0,02^2]} + 2 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1} \times p^2}$$

Pro lehčí prezentaci výsledků Je obecná praxe, , sčítat separátně termíny konstantní, termíny proporcionální k tlaku  $p$  a termíny proporcionální k  $p^2$ . V každém případě, zvláště při méně striktním výsledku se odvodí:

$$u_c(p) = 12 \text{ Pa} + 5,8 \times 10^{-5} \times p + 2 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1} \times p^2$$

V závislosti na tlakovém rozsahu, třetí člen může být vypočten při maximálním tlaku a převeden do členu druhého.

## B.5 Určení rozšířené nejistoty

Rozšířená nejistota  $U(p)$  je odvozena přímo ze standardní kombinované nejistoty vynásobením rozšiřujícím faktorem  $k = 2$ :

$$U(p) = 24 \text{ Pa} + 9,8 \times 10^{-5} \times p + 4 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1} \times p^2$$

nebo-li, když  $p_{\max} = 10 \text{ MPa}$ :

$$U(p) = 24 \text{ Pa} + 10,2 \times 10^{-5} \times p$$