



Česká metrologická společnost, z.s.

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

tel/fax: 221 082 254

e-mail: cms-zk@csvts.cz

KALIBRAČNÍ POSTUP

KP 2.4.1/05/24

Číslicový tlakoměr

Praha

září 2024

Vzorový metodický postup byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2024

Číslo úkolu: VII/2/24

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

Řešitel: Česká metrologická společnost, z.s.

© ÚNMZ, ČMS

Neprodejné: Metodika je volně k dispozici na stránkách ÚNMZ a ČMS. Nesmí však být dále komerčně šířena.

1 Předmět kalibrace

Kalibrační postup se vztahuje na číslicové tlakoměry, používané k měření tlaku jako pracovní měřidla. Číslicový tlakoměr může být ve formě kompaktního měřidla (převod měřeného tlaku na elektrický signál a digitální výstup je zabudován do jediného měřicího celku) nebo je převod měřeného tlaku na elektrický výstupní signál zpracován externě (samostatný snímač tlaku) a číslicový výstup odečítáme na panelovém měřidle, ovládacím panelu nebo na PC. V tomto případě tvoří snímač tlaku a panelové měřidlo měřicí řetězec tlaku. Tento postup se ale nezabývá měřicími řetězci, které jsou kalibrovány mimo stálé laboratorní prostory (viz KP 2.4.1/04/21 „Měřicí řetězec tlaku“). V tomto postupu se zabýváme kalibrací stolních nebo přenosných číslicových měřidel tlaku, používaných např. v laboratořích, zkušebnách, kontrolních stanovištích apod. Základním členem číslicového tlakoměru je vždy převodník měřeného tlaku (snímač tlaku) na elektrickou výstupní veličinu (snímače kapacitní, indukční, frekvenční, piezoelektrické apod.). Tento postup lze použít s minimálními úpravami také pro kalibraci analogových elektronických tlakoměrů (odečet tlaku na elektronickém analogovém měřidle).

1.1 Princip kalibrace

Kalibrace je prováděna metodou přímého porovnání údajů kalibrovaného měřidla s údaji etalonu. Číslicový tlakoměr se obvykle kalibruje jako celek, ve výjimečných případech lze provádět samostatnou kalibraci snímače tlaku a indikační jednotky (týká se spíše měřicích řetězců tlaku). Při kalibraci se tlak postupně zvyšuje až na maximální hodnotu a poté postupně snižuje při dodržení určeného počtu kalibračních bodů v jednom cyklu a určeného počtu cyklů.

2 Související normy, předpisy a literatura

Dokument EA 4/02 M:2022	Vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci. Vyd. ČIA 04/2022. https://www.cai.cz/wp-content/uploads/2022/04/01_08-P001-EA-04_02-M_2022_20220425opr.pdf	[L1]
Dokument EURAMET Calibration Guide No. 17, Version 4.1	Kalibrace elektromechanických a mechanických tlakoměrů. Vyd. 09/2022. https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines	[L2]
Dokument ILAC-G8:09/2019	Pokyny pro použití rozhodovacích pravidel a uvádění výroků o shodě. Vyd. ČIA 03/2020. https://www.cai.cz/wp-content/uploads/2020/04/ILAC-G8-2019-1.pdf	[L3]
Dokument ILAC-P14:09/2020	Politika ILAC pro nejistotu měření při kalibraci. Vyd. ČIA 03/2021. https://www.cai.cz/wp-content/uploads/2021/04/ILAC-P14.pdf	[L4]
Vyhláška č. 264/2000 Sb.	o základních měřicích jednotkách a ostatních jednotkách a o jejich označování	[L5]
(01 1300) ČSN EN ISO 80000-1	Veličiny a jednotky. Část 1: Obecně. Vyd. 10/2023	[L6]
(01 5253) ČSN EN	Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a	[L7]

ISO/IEC 17025	kalibračních laboratoří. Vyd. 04/2018	
(18 0001) ČSN EN 61298-2 ED.2	Zařízení pro měření a řízení průmyslových procesů – Obecné metody a postupy pro hodnocení vlastností. Část 2: Zkoušky při referenčních podmínkách. Vyd. 08/2009	[L8]
(18 1078) ČSN EN 60770-1 ED.2	Měřicí převodníky pro řídicí systémy průmyslových procesů – Část 1: Metody hodnocení vlastností. Vyd. 09/2011 (v roce 2023 zrušena bez náhrady).	[L9]
ČSN EN 60770-3 ED.2	Měřicí převodníky pro řídicí systémy průmyslových procesů – Část 3: Metody hodnocení vlastností inteligentních převodníků. Vyd. 03/2015 (v roce 2023 zrušena bez náhrady).	[L10]
(25 7010) ČSN EN 472:	Měřidla tlaku. Terminologie. Vyd. 07/1996	[L11]
(25 7012) ČSN EN 837-1	Měřidla tlaku – Část 1: Tlakoměry s pružnou trubicí – Rozměry, metrologie, požadavky a zkoušení. Vyd. 03/1998	[L12]
TNI 01 0115	Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). Vyd. 02/2009	[L13]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kvalifikace pracovníků, kteří kalibrují měřidla, je stanovena předpisem organizace, který se týká způsobilosti personálu v oblasti metrologie. Příslušní pracovníci musí být seznámeni s tímto kalibračním postupem, samostatná kalibrace měřidel vyžaduje odpovídající laboratorní praxi, doporučuje se certifikace odborné způsobilosti těchto pracovníků.

4 Názvosloví, definice

Názvosloví a definice jsou obsaženy v normách, zejména v TNI 01 0115 a v ČSN EN 472.

Ostatní pojmy:

Tlakové snímače: tlakové snímače převádějí měřený tlak na analogový elektrický signál, který je proporcionální k zatěžujícímu vstupnímu tlaku. Ve vztahu k druhu snímače může být výstupním signálem napětí, proud nebo frekvence. K zajištění funkce potřebuje snímač stabilizovaný zdroj napájení s úrovní stabilizace ve vztahu k očekávané nejistotě měření tlaku.

Tlakové převodníky: tlakový převodník je obecně jednotkou, která obsahuje tlakový snímač a dále modul pro úpravu, resp. zesílení signálu snímače. Podle druhu převodníku může být výstupní informací tlakového převodníku napětí (5 V; 10 V; ...), proud (4 mA - 20 mA; ...), frekvence nebo digitální formát (RS 232; ...). Pro svoji činnost vyžadují tlakové převodníky průběžné elektrické napájení bez specifikovaných požadavků stabilizace napájení.

Číslicové tlakoměry: tlakoměry s digitální (číslicovou) indikací. Tento druh tlakoměru je kompletní měřicí přístroj, který indikuje zvolenou jednotku tlaku.

Podle typu se může skládat z následujících komponentů:

- tlakový snímač,
- modul úpravy analogového signálu,
- analogově-digitální převodník,
- modul zpracování digitálních údajů,
- digitální indikace (možnost volby jednotek tlaku),

- elektrické napájení (obecně je napájení nedílnou částí přístroje).

Tyto komponenty mohou být umístěny v jedné přístrojové skřínce (přístroj s interním snímačem), nebo mohou být umístěny v separátních zařízeních, když v jednom z nich je snímač (přístroj s externím snímačem). Tlakoměry mohou být rovněž vybaveny analogovými nebo digitálními výstupními porty.

Poznámka: Kompletní kalibrace těchto přístrojů vyžaduje vykonat kalibraci každého takového výstupu.

5 Prostředky potřebné pro kalibraci

5.1 Metoda kalibrace

Kalibrace číslicových tlakoměrů je prováděna metodou přímého porovnání údajů kalibrovaného měřidla s údaji etalonu. Kalibrace se provádí podobně jako u ostatních měřidel tlaku ve směru vzestupném i sestupném (jeden nebo několik úplných kalibračních cyklů). Jako pracovní měřidla obvykle používáme číslicové tlakoměry ve třídě TP 0,1 a horší, oblast vyšších přesností (lepší než TP 0,1) spadá většinou do etalonových měřidel.

5.2 Etalonová zařízení

Etalony použité při kalibraci se řídí metodou kalibrace, použitým médiem a rozsahem tlaků, ve kterém se mají tlakoměry kalibrovat. Podmínku návaznosti uvádí kap. 6.1. Nejčastěji se používají:

- pístové tlakoměry všech druhů s kapalným i plyným médiem,
- digitální tlakoměr se samostatným regulovatelným zdrojem tlaku,
- digitální kalibrátor s automatickou regulací a stabilizací tlaku z externího zdroje (tlaková láhev plynu),
- procesní kalibrátor spojený s etalonovými převodníky tlaku s digitálním výstupem,
- inteligentní převodníky tlaku s HART komunikátorem.

5.3 Ostatní zařízení

Do pomocných prostředků patří:

- zařízení na vytvoření a regulaci tlaku (ruční tlakové kleště s objemovým regulátorem, které mohou pracovat s plyným nebo kapalným médiem, tlakový lis, přenosný kompresor s redukční stanicí, malá tlaková láhev plynu, tlakový kalibrátor),
- redukční ventily, filtry, oddělovací komory,
- měřidlo teploty a vlhkosti okolí, měřidlo barometrického tlaku,
- spojovací materiál (hadice nebo trubičky, redukce, těsnění, šroubení, rychlospojky – vše v metrické i palcové soustavě),
- napájecí zdroje (obvykle 24 VDC pro převodníky tlaku nebo stabilizovaných 10 VDC pro snímače tlaku),
- souprava náradí,
- ruční multimetr (pomocné měřidlo),
- lupa, posuvné měřítko, metr,
- čisticí prostředky,
- stojánek pro uchycení snímačů,
- náhradní náplň k doplnění kapalného média.

6 Obecné podmínky kalibrace – referenční podmínky

Teplota okolního vzduchu musí ležet v rozmezí $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$, což je obvyklý referenční a plně teplotně kompenzovaný rozsah měření digitálních měřidel. Tlakoměr bez teplotní kompenzace by měl být kalibrován v rozmezí teplot $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ nebo $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Změny teploty okolního vzduchu nesmí překročit po dobu jedné série měření $\pm 1 ^\circ\text{C}$.

Relativní vlhkost vzduchu by měla být v rozmezí (20 až 80) % RH nebo dle specifikace měřidla (nekondenzující prostředí).

Atmosférický tlak musí být v rozmezí 86 kPa až 108 kPa, pokud patří mezi ovlivňující veličiny.

Jestliže mají podmínky okolního prostředí vliv na indikaci kalibrovaného tlakoměru, jejich hodnoty se při kalibraci zaznamenávají a následně se uvedou do kalibračního listu.

V souladu s požadavky zákazníka má postup kalibrace dovolit vyhodnocení hystereze, linearity a opakovatelnosti kalibrovaného přístroje. Použitý postup měření závisí na očekávané (deklarované) nejistotě měření kalibrovaného přístroje ve vztahu k požadavkům zákazníka nebo ke specifikaci výrobce. Podle [L2] provádíme kalibrace obvykle třemi způsoby:

Základní kalibrační postup

Základní kalibrační postup by měl být použit v případě, že pro požadovanou nejistotu měření při koeficientu rozšíření $k = 2$ platí ... $U > 0,2 \%$ měřicího rozsahu (dále zkratka FS – full scale). Postup lze obvykle použít pro tlakoměry s deklarovanou přesností 1 % FS a horší. Kalibrace se vykoná jedním cyklem v 6 tlakových bodech zahrnujících dolní a horní mez měřicího rozpětí při stoupajícím a klesajícím tlaku. Opakovatelnost měření se v tomto případě vyhodnotí následovně: jednu základní sérii měření o min. šesti bodech rozšíříme o dvě zkrácené série. Podle [L2] měříme v těchto zkrácených sériích jen ve 2 bodech při zatěžování a to při 0 % FS a cca 50 % FS (40 % až 60 %). Možné je měření zkrácených sérií při zatěžování i odlehčování. Opakovatelnost se vyhodnocuje ve formě nejistoty typu A pro výše uvedené tlakové body. Maximální hodnota této nejistoty se pak použije jako hodnota charakteristická pro celý rozsah měření. Rozšířená nejistota měření uvedená v kalibračním listu (pro $k = 2$) nesmí být při tomto měření menší než 0,2 % FS kalibrovaného měřidla.

Standardní kalibrační postup

Standardní kalibrační postup by měl být použit v případě, že pro požadovanou nejistotu měření platí ... $0,05 \% \text{ FS} \leq U \leq 0,2 \% \text{ FS}$ ($k = 2$). Postup lze obvykle použít pro tlakoměry s deklarovanou přesností v rozmezí (0,1 až 1,0) % FS. Kalibrace se vykoná jedním cyklem v 11 tlakových bodech zahrnujících dolní a horní mez měřicího rozpětí při stoupajícím a klesajícím tlaku. Opakovatelnost měření se v tomto případě vyhodnotí následovně: jednu základní sérii měření o min. jedenácti bodech rozšíříme o dvě zkrácené série. Podle [L2] měříme v těchto zkrácených sériích ve 4 bodech při zatěžování a to při 0 % FS, cca 20 % FS, cca 50 % FS a cca 80 % FS. Možné je měření zkrácených sérií při zatěžování i odlehčování. Opakovatelnost se vyhodnocuje ve formě nejistoty typu A pro výše uvedené tlakové body, pro ostatní body se opakovatelnost stanoví jako maximální hodnota opakovatelnosti za dvou sousedních bodů (resp. nejbližších bodů – pro body nad cca 80 % měřicího rozpětí). Rozšířená nejistota měření uvedená v kalibračním listu (pro $k = 2$) nesmí být při tomto měření menší než 0,05 % FS kalibrovaného měřidla.

Rozšířený kalibrační postup

Rozšířený kalibrační postup by měl být použit v případě, že pro požadovanou nejistotu měření platí ... $U < 0,05 \% \text{ FS}$ ($k = 2$). Postup lze obvykle použít pro tlakoměry s deklarovanou přesností 0,1 % FS a lepší. Kalibrace se vykoná třemi cykly min. v 11 tlakových bodech za-

hrnujících dolní a horní mez měřicího rozpětí při stoupajícím a klesajícím tlaku. Opakovatelnost se vyhodnocuje ve formě nejistoty typu A pro každý tlakový bod.

6.1 Obecné požadavky

1. Rozšířená nejistota etalonu ($k = 2$), použitého pro měření musí být menší nebo nejvýše rovna 1/4 největší dovolené chyby zkoušeného tlakoměru. Při zkoušení tlakoměrů přesnosti 0,01 % až 0,06 % z měřené hodnoty nebo z rozsahu může být poměr uvedené nejistoty a dovolené chyby zkoušeného tlakoměru větší, maximálně však roven 1/2.
2. Vibrace, rázy, vnější elektrická a magnetická pole je nutno vyloučit nebo omezit tak, aby nezpůsobily chybu větší než 5 % z největší dovolené chyby tlakoměru.
3. Napájecí podmínky během zkoušky – podle údajů výrobce, resp. podmínek vyplývajících z dokumentace zařízení.
4. Tlak musí být vyvozen tlakovým médiem, určeným pro zkoušený tlakoměr. V případě, kdy je možnost volby, použije se média podle požadavku zákazníka. Druh tlakového média se vždy uvede do kalibračního listu.
5. Propojení etalonového a zkoušeného tlakoměru má být takové, aby výškový rozdíl referenčních úrovní obou tlakoměrů způsobil chybu maximálně 5 % z největší dovolené chyby tlakoměru. V případě, že rozdíl ve výškách referenčních úrovní etalonového a zkoušeného tlakoměru je větší, musí být měřen a musí být zavedena korekce na výšku sloupce použitého média. Tento hydrostatický tlak se vypočte dle vztahu:

$$P_h = h \cdot \rho \cdot g \quad (\text{Pa})$$

kde je:

h (m) výškový rozdíl mezi měřicí úrovní etalonového tlakoměru a kalibrovaného tlakoměru. h je záporné, pokud měřicí úroveň (připojovací šroubení) kalibrovaného tlakoměru je výše než měřicí úroveň etalonu (P_h se odečítá) a kladné v opačném případě (P_h se připočítává),

ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) měrná hustota použitého média při kalibraci,

g ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) místní tíhové zrychlení.

6. Těsnost systému (etalonový tlakoměr – zkoušený tlakoměr) musí být taková, aby umožňovala ustálení tlaku na horní mezi kalibračního rozsahu a snadný odečet hodnoty tlaku.
7. Po zapnutí napájení je třeba stabilizovat teplotu tlakoměru po dobu specifikovanou výrobcem. Není-li tento údaj dostupný, uvažujeme dobu zahřátí min. 15 minut.

Kalibrace měřidel tlaku, určených k měření tlaku kyslíku je umožněna např. použitím oddělovacího členu olej – inertní kapalina (etylalkohol, voda apod.).

7 Rozsah kalibrace – přehled zkoušených parametrů

Rozsah zkoušek stanovíme vždy po dohodě se zákazníkem podle toho, zda se jedná o první kalibraci, kalibraci po opravě nebo výměně částí tlakoměru nebo o periodickou kalibraci.

Všeobecný postup při kalibraci obvykle zahrnuje předběžnou mechanickou kontrolu tlakoměru; kontrolu údajů na měřidle (především při kalibraci zařízení nových nebo po opravě); funkční kontrolu; měření metrologických parametrů; vyhodnocení a vypracování kalibračního listu

8 Kontrola tlakoměru

Během kalibrace se kontrolují následující požadavky (pokud některý z nich měřidlo nespĺňuje, uvede se tato skutečnost do kalibračního listu):

Požadavek přesnosti měřidla – přesnost je obvykle číslo, které se rovná absolutní hodnotě největší základní dovolené chyby. Její hodnota vyplývá z vlastností převodníku tlaku, zpracování signálu převodníku, zobrazovací jednotky, měřicí karty PC atd. U číslicových tlakoměrů se setkáváme s různým způsobem vyjádření dovolené chyby – absolutní hodnota (obvykle u digitálních barometrů), relativní hodnota ve vazbě na rozsah měřidla (procenta nebo ppm z rozsahu), relativní hodnota ve vazbě na měřenou hodnotu (dále jen MH) (procenta nebo ppm z MH) nebo kombinace všech uvedených způsobů {např. $\pm (0,05 \% \text{ MH} + 5 \text{ Pa})$ nebo $\pm (0,05 \% \text{ MH} + 0,01 \% \text{ FS})$ }.

Hystereze – nesmí překročit absolutní hodnotu největší základní dovolené chyby pro danou přesnost tlakoměru.

Na tlakoměru musí být uvedeny:

- název nebo označení výrobce,
- typ,
- měřicí rozsah.

Jako identifikační znak slouží výrobní číslo měřidla, metrologické nebo evidenční číslo apod.

8.1 Předběžná kontrola a příprava měření

Zkoušený tlakoměr se musí stabilizovat v ustálených okolních podmínkách (teplota a vlhkost podle kapitoly 6) minimálně 6 hodin před započítáním zkoušek, případně jinou dobu, stanovenou v technické dokumentaci měřidla.

Při vnější prohlídce se zjišťuje:

- čistota měřidla,
- poškození převodníku tlaku (je-li dostupný) a zejména poškození přívodu vstupního tlaku,
- poškození elektrického připojení, stav baterií u akumulárního napájení,
- zda označení a nápisy odpovídají požadavkům; kontroluje se označení vodičů a svorek kabelů, zapojení stínění a neporušenost dalších částí tlakoměru (převodníků, vazebních členů, korekčních členů apod.) U výstupního zařízení se kontroluje, zda jsou v pořádku nápisy, stav ukazatele, stupnice, displej atd.

Pokud některý z údajů není vyznačen na měřidle, uvede se tato okolnost do kalibračního listu.

Pokud zjištěná závada znemožní další zkoušky, dále se nepokračuje.

Tlakoměr nebo snímač zkoušeného tlakoměru se upevní v pracovní poloze podle údajů výrobce nebo podmínek použití. Podle požadavků uvedených výše se zvolí vhodný etalon a další pomůcky a provede se propojení. Identifikujeme referenční úroveň etalonu a kalibrovaného tlakoměru (v místě připojení nebo dle údajů výrobce). Druh tlakového média volíme dle požadavku zákazníka, rozsahu měření a skutečného použití.

9 Postup kalibrace

Určení metrologických charakteristik (statických)

Metoda zjištění základní chyby tlakoměru a jeho hystereze spočívá v přímém porovnání veličiny indikované tlakoměrem s konvenční hodnotou tlaku, realizovanou etalonem v okamžiku, kdy jsou oba přístroje vystaveny stejnému dostatečně ustálenému tlaku. Konkrétní postup při zkoušce se může lišit podle přesnosti zkoušeného řetězce a podle požadavků zákazníka. Jmenovitou hodnotu tlaku lze nastavit jak na kalibrovaném měřidle, tak na etalonu, pokud to umožňuje (hodnota tlaku pístového tlakoměru je definována hmotností závaží a efektivní plochou pístu). U přístrojů s více výstupy vykonáme kalibraci pro výstup (výstupy) specifikované uživatelem. Bez ohledu na kalibrovaný přístroj a použitý postup (viz kap. 6) se vždy musí postupovat v souladu s následujícími třemi body:

- kontrola přístroje v omezeném počtu tlakových bodů z měřicího rozsahu pro určení počátečních metrologických parametrů přístroje,
 - nastavení přístroje v souladu se specifikací výrobce,
 - vlastní kalibrace přístroje v celém jeho rozsahu měření nebo v definovaném rozpětí.
- Každá z těchto operací (speciálně nastavení přístroje) musí být vykonána pouze se souhlasem zákazníka a výsledky před a po nastavení musí být uvedeny v kalibračním listu.

9.1 Úvodní kontrola

Pro určení dlouhodobého driftu přístroje je nutno uživateli poskytnout příslušné informace o stavu přístroje před jakýmkoli možným nastavením. Jestliže zákazník nepožaduje kompletní kalibraci před nastavením přístroje, je vhodné vykonat následující operace:

- zatížit kalibrovaný přístroj nejméně 2x až na úroveň horní meze měření a tlak zde ponechat nejméně po dobu 1 minuty, odlehčit tlakoměr a opět ponechat bez zátěže mezi sériemi po dobu min. 1 minuty,
- po dobu první stoupající série kontrolovat indikaci přístroje ve vztahu k jeho specifikaci,
- odečíst indikaci přístroje v hodnotách 0 %, 50 % a 100 % jeho měřicího rozpětí.

9.2 Nastavení

Jestliže výstupní údaj měřidla neodpovídá konvenční hodnotě, tj. mezi odečítaným a aplikovaným tlakem je významná odchylka (např. 80 % dovolené chyby měřidla nebo více), provede se nastavení přístroje v souladu s požadavky zákazníka nebo specifikací výrobce. V závislosti na možnostech kalibrační laboratoře se nastavení vykoná pomocí:

- analogových prostředků běžně přístupných uživateli (potenciometry pro nastavení dolní a horní meze měření; po nastavení je účelné jejich zabezpečení proti manipulaci),
- interních justovacích prostředků kalibrovaného přístroje (kalibrační křivka uložená v paměti měřidla, tlačítkové funkce, SW nastavení atd.) v souladu s informacemi v technickém manuálu přístroje.

Tyto operace obvykle předpokládají detailní znalosti nastavovacích postupů (neobejdeme se bez uživatelského nebo servisního manuálu). Pokud má přístroj definovány nastavovací body (např. v intervalu 20 % měřicího rozpětí), provede se nastavení přednostně v těchto bodech.

9.3 Vlastní kalibrace

Použitý kalibrační postup (viz kap. 6) se zvolí na základě očekávané nejistoty měření kalibrovaného přístroje. V každém kalibračním bodu musí být zaznamenána nejméně následující data:

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

V záznamu o kalibraci musí být rovněž zaznamenána následující data:

- hodnoty ovlivňujících veličin (teplota, vlhkost, barometrický tlak),
- identifikační parametry kalibrovaného přístroje,
- identifikace etalonových přístrojů včetně měřicích systémů příp. přístrojů použitých pro měření výstupního signálu,
- ostatní údaje (datum kalibrace, jméno technika, rozlišení měřidla atd.)

Kalibrační body volíme rovnoměrně rozložené v celém rozsahu měření, přičemž zahrneme i dolní a horní hodnotu rozsahu tlakoměru nebo hodnoty jim blízké (v rozmezí 10 % rozpětí). Těchto bodů se dosahuje postupným zvyšováním a poté snižováním tlaku, přitom rychlost změny tlaku by neměla přesáhnout 5 % měřicího rozpětí za sekundu. V každém tlakovém bodě se vstupní tlak udržuje na měřené hodnotě, dokud ho nelze považovat za dostatečně ustálený. Doporučuje se provádět odečet nejdříve po 30 s. Při měření je nezbytné dodržet smysl tlakové tendence (nárůst nebo pokles). Hodnoty tlaku při kalibraci se nastavují buď na jmenovitou hodnotu etalonu, nebo na jmenovitou hodnotu kalibrovaného tlakoměru. Po do-

sažení horní meze měřicího rozsahu a odečtení hodnoty při nárůstu tlaku lze zvýšit hodnotu tlaku o max. 10 % horní meze měření a po jedné až několika minutách tlak opět snížit na horní mez měření. Tím získáme dva odečty horní meze tlakoměru pro opačný smysl zátěže. Jestliže tlakoměr přetížení neumožňuje, provádíme odečet horní meze měření při stoupajícím tlaku, ponecháme nejméně 2 minuty na max. tlaku, eliminujeme případný únik a po ustálení odečteme druhou hodnotu horní meze. Po odečtu pokračujeme ve snižování tlaku.

10 Vyhodnocení zkoušek

Vyhodnocení spočívá v porovnání zjištěných a dovolených chyb, stanovení rozšířené nejistoty měření a posouzení shody s metrologickou specifikací, pokud je zákazníkem požadováno. Na základě měření jednotlivých tlakových úrovní je provedeno celkové vyhodnocení kalibrovaného tlakoměru a je uvedeno do kalibračního listu.

- a) Vyhodnocení shody se specifikací se neprovádí, pokud není uvedena přesnost tlakoměru nebo pokud ji zákazník nepožaduje.
- b) Pokud tlakoměr na všech úrovních vyhovuje, vyhovuje i celkově.
- c) Pokud minimálně na jedné úrovni nevyhovuje, nevyhovuje i jako celek.

Pokud na jednotlivých úrovních vyhovuje a minimálně na jedné nevyhovuje z důvodu velké hystereze, potom jako celek nevyhovuje z důvodu velké hystereze.

Při vyhodnocení shody s metrologickou specifikací musí být se zákazníkem dohodnut způsob vyhodnocení dle [L3] a velikost ochranného pásma (obvykle nejistota měření). Vyhodnocení je možné provádět binárně bez respektování ochranného pásma, binárně s respektováním ochranného pásma nebo nebinárně s respektováním ochranného pásma. Dokument [L3] je v době vytvoření postupu volně k dispozici na webové stránce ČIA (odkaz viz kap. 2).

11 Kalibrační list, označení měřidla po kalibraci

Kalibrační list by měl obsahovat hlavně tyto údaje:

- a) název a adresa kalibrační laboratoře,
- b) pořadové číslo kalibračního listu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- c) jméno a adresu zákazníka, popř. uživatele,
- d) název, typ, výrobce a identifikační označení kalibrovaného tlakoměru,
- e) datum kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- f) určení metody a specifikace uplatněné při kalibraci nebo označení kalibračního postupu, v tomto případě KP 2.4.1/05/24,
- g) podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňujících veličin apod.),
- h) vyjádření o návaznosti použitých měřidel, resp. výsledků měření,
- i) výsledky měření a s nimi spjatou nejistotu měření, příp. prohlášení o shodě s určenou metrologickou specifikací,
- j) identifikaci schvalujícího pracovníka, příp. jméno pracovníka, který provedl kalibraci a razítko kalibrační laboratoře.

Akreditovaná kalibrační laboratoř navíc uvede název/logo akreditačního orgánu, odkaz na akreditaci v souladu s ČSN EN ISO/IEC 17025, místo kalibrace, prohlášení, že kalibrační list nesmí být bez písemného schválení kalibrační laboratoře rozmnožován jinak než celý.

Pokud provádí kalibrační laboratoř kalibraci pro vlastní organizaci, může být kalibrační list zjednodušen, popř. vůbec nevystavován (výsledky kalibrace mohou být uvedeny např. v kalibrační kartě snímače nebo na vhodném nosiči, např. v elektronické paměti). I v tomto případě však musí kalibrační laboratoř archivovat záznam o měření s uvedenými měřenými

hodnotami a základními údaji o měření, které by umožnily opakování měření za identických podmínek.

11.1 Protokolování

Originál kalibračního listu se předá zadavateli kalibrace. Kopii kalibračního listu si ponechá kalibrační laboratoř a archivuje ji po dobu minimálně 5 roků zároveň se záznamem o měření. Doporučuje se archivovat záznamy o měření a kalibrační listy chronologicky.

11.2 Umístění kalibrační značky

Po provedené kalibraci může kalibrační laboratoř označit kalibrovaný snímač teploty kalibrační značkou, např. kalibračním štítkem. Pokud to není výslovně uvedeno v některém podnikovém metrologickém předpisu nebo neexistuje dokumentovaný požadavek zákazníka, nesmí akreditovaná kalibrační laboratoř uvádět na kalibrační štítek datum příští kalibrace.

12. Převzetí měřidla ke kalibraci a předání po kalibraci

Převzetí a předávání měřidla jsou řešeny v pracovním postupu nebo v příručce kvality. Předávací protokoly se obvykle vyplňují na místě kalibrace, aby byly popsány aktuální a reálné podmínky (počet měřidel, rozsah kalibrace, identifikace zákazníka, kontaktní osoba, zapůjčení podkladů atd). Po skončení kalibrace měřidla stvrzuje zákazník svým podpisem na příslušném formuláři nebo v knize zakázek jeho převzetí. V obou případech se k podpisům připojují příslušná data.

12.1 Reklamace

V případě, že objednatel kalibrace podá stížnost na provedenou kalibraci, tuto přebírá vedoucí kalibrační laboratoře, v době nepřítomnosti jeho zástupce. Stížnost se může týkat rozsahu nebo správnosti kalibrace, úplnosti nebo správnosti kalibračního listu, úplnosti a funkčnosti měřidla, popřípadě fakturace za provedenou kalibraci. Povinností vedoucího kalibrační laboratoře je analyzovat stížnost, na jejím základě učinit příslušná opatření a seznámit s nimi bez prodlení objednatele kalibrace. Když se při analýze nenajdou závady, bude o tom objednatel kalibrace informován. Pokud je stížnost oprávněná a jedná se o rozsah nebo správnost kalibrace, provede laboratoř novou, bezplatnou kalibraci a vystaví nový kalibrační list. V ostatních případech oprávněné stížnosti se provedou příslušná opatření podle příručky kvality.

13 Péče o kalibrační postup

Originál kalibračního postupu je uložen u zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku na titulní straně písemně nebo elektronickým přístupem. Kalibrační postup podléhá řízení podle normy ČSN EN ISO řady 9000 nebo ČSN EN ISO/IEC 17025 v platném znění. Změny, popřípadě revize kalibračního postupu provádí jeho zpracovatel. Schvaluje je vedoucí zpracovatele (vedoucí kalibrační laboratoře nebo metrolog organizace).

14 Rozdělovník, úprava a schválení, revize

14.1 Rozdělovník

Kalibrační postup		převzal		
výtisk číslo	obdrží útvar	jméno	podpis	datum

14.2 Úprava a schválení

Kalibrační postup	jméno	podpis	datum
upravil			
schválil			

14.3 Revize

strana	popis změny	zpracoval	schválil	datum

15 Stanovení nejistoty měření při kalibraci (příklad)

Než stanovíme nejistotu měření, definujeme si některé pojmy resp. zdroje nejistoty, které se používají při měření tlakoměrů. Kalibrační postup vychází především z [L2]. Tento dokument doporučuje vyhodnocení nejistoty typu A formou empirických směrodatných odchylek. V případě přístrojů ovlivněných hysterezí, kde musí být měření při stoupajícím a klesajícím tlaku vyhodnocována samostatně, obdržíme v každém kalibračním bodě pouze max. tři hodnoty v obou smyslech zátěže. Často je problematické předpokládat, že tyto hodnoty mají normální rozdělení pravděpodobnosti. Následně jsou proto uvedeny jednoduché vztahy, které nejsou založeny na statistických pravidlech, které však na základě zkušeností uspokojivě nahradí směrodatné odchylky. Aplikace těchto vztahů je samozřejmě volitelná, vyhodnocení opakovatelnosti lze provádět v souladu s dokumentem [L1].

Chyba nuly f_0 – může být určována před každým měřicím cyklem, tj. sériemi měření při stoupajícím a klesajícím tlaku. Musí být určena před a po měřicím cyklu. Čtení musí být provedeno po úplném odstranění zatížení. Chyba nuly je vypočtena následovně:

$$f_0 = \text{MAX} \{ |x_{2,0} - x_{1,0}|, |x_{4,0} - x_{3,0}|, |x_{6,0} - x_{5,0}| \} \quad (1)$$

Indikovaná čísla měřených hodnot \underline{x} uvádějí čtení v nulových hodnotách pro měřicí série od M1 do M6.

Opakovatelnost a' – opakovatelnost při nezměněné montáži kalibrační sestavy se určuje z odchylek hodnot měřených veličin odpovídajících sérií měření, korigovaných na nulový signál (index j označuje nominální hodnoty tlaku; $j = 0$: nulový bod):

Stoupající tlak:

$$a'_{up,j} = \text{MAX}\{|(x_{3,j} - x_{3,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})|, |(x_{5,j} - x_{5,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})|, |(x_{5,j} - x_{5,0}) - (x_{3,j} - x_{3,0})|\} \quad (2)$$

Klesající tlak:

$$a'_{dn,j} = \text{MAX}\{|(x_{4,j} - x_{4,0}) - (x_{2,j} - x_{2,0})|, |(x_{6,j} - x_{6,0}) - (x_{2,j} - x_{2,0})|, |(x_{6,j} - x_{6,0}) - (x_{4,j} - x_{4,0})|\} \quad (3)$$

Střední hodnota:

$$a'_{stř,j} = \text{MAX}\{b'_{up,j}, b'_{dn,j}\} \quad (4)$$

Podtržené výrazy se vynechají, pokud se třetí cyklus (série měření) vykoná po reinstalaci pro kontrolu reprodukovatelnosti. V tomto případě se stanoví tzv. **reprodukovatelnost a** :

$$a_{up,j} = \text{MAX}\{|(x_{5,j} - x_{5,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})|\} \quad (5)$$

$$a_{dn,j} = \text{MAX}\{|(x_{6,j} - x_{6,0}) - (x_{2,j} - x_{2,0})|\} \quad (6)$$

$$a_{stř,j} = \text{MAX}\{b_{up,j}, b_{dn,j}\} \quad (7)$$

Hystereze h (reverzibilita) – určí se z odchylek mezi korespondujícími odečty / výstupními hodnotami měření při stoupajícím a klesajícím tlaku:

$$h_j = 1/3 \{ |x_{2,j} - x_{1,j}| + |x_{4,j} - x_{3,j}| + |x_{6,j} - x_{5,j}| \} \quad (8)$$

S hodnotou hystereze pracujeme dvojím způsobem. Jestliže jsou na kalibračním listu uvedeny samostatně měřené hodnoty při stoupajícím a klesajícím tlaku, hystereze měřidla se vyjádří na kalibrační list podobně jako max. chyba tlakoměru a není zahrnuta do nejistoty měření. [L2] také umožňuje uvedení pouze průměrných hodnot tlaku, vypočtených z údaje při stoupajícím a klesajícím tlaku. V tomto případě se hystereze nevyjadřuje a musí být zahrnuta do nejistoty měření.

Protože jsou uvedené veličiny určeny ze stoupajících a klesajících hodnot měřeného tlaku, uvažujeme jako zdroj příslušné nejistoty poloviční hodnotu s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti.

Příklad: Určíme nejistotu měření při kalibraci stolního digitálního tlakoměru s údaji dle specifikace:

Měřicí rozsah (FSM)	(0 až 40) MPa
Třída přesnosti	0,6 (vztaženo k FSM)
Rozlišení údaje	0,01 MPa
Teplotní součinitel k_{tM}	0,02 % FSM / °C, referenční teplota 23 °C
Teplota při kalibraci t	21,0 °C

Jako etalon pro kalibraci byl použit kalibrátor tlaku s digitálním výstupem, pro který platí:

Rozsah etalonu (FSE)	0 až 60 MPa
Přesnost etalonu	0,05 % FSE
Roční stabilita etalonu	0,05 % FSE
Rozlišení etalonu	0,001 MPa
Nejistota kalibrace etalonu pro 20 MPa	0,006 MPa
Teplotní součinitel etalonu k_{tE}	0,01 % FSE / °C, referenční teplota 20 °C

Stanovení nejistoty je provedeno v kalibračním bodě 20 MPa při stoupajícím tlaku.

Chyba údaje měřeného tlaku kalibrovaného měřidla E_X je definována:

$$E_X = p_M - p_E - \delta_{ET} - \delta_{TE} + \delta_{TM} + \delta_{RM} - \delta_{SE} + \delta_0 + \delta_A + \delta_H$$

p_M ... údaj tlaku kalibrovaného měřidla

p_E ... údaj tlaku etalonu

δ_{ET} ... korekce na nejistotu kalibrace etalonu

δ_{TE} ...	korekce na teplotní závislost etalonu
δ_{TM}	korekce na teplotní závislost měřidla
δ_{RM} ...	korekce na rozlišitelnost odečtu měřidla
δ_{SE} ...	korekce na přesnost (drift) etalonu
δ_0	korekce chyby nuly
δ_A ...	korekce na opakovatelnost
δ_H ...	korekce na hysterezi

P1.1 Určení etalonové hodnoty tlaku a odchylky tlakoměru

Etalonová hodnota tlaku byla nastavena $p_{et} = 20,000$ MPa. Měřená hodnota na kalibrovaném tlakoměru činí 20,10 MPa. Odchylka etalonové a měřené hodnoty je tedy

$$\Delta_m = 0,100 \text{ MPa.}$$

P1.2 Chyba nuly, opakovatelnost a hystereze (u_0 , u_B , u_H)

Naměřené hodnoty při údají etalonu 20,000 MPa jsou:

$p_{up} = 20,10 / 20,08 / 20,12 \dots$ MPa; průměr $p_{up} = 20,10$ MPa ... stoupající tlak

$p_{dn} = 20,12 / 20,11 / 20,13 \dots$ MPa; průměr $p_{dn} = 20,12$ MPa ... klesající tlak

Při odlehčení tlakoměru byla indikace tlakoměru vždy 0,00 MPa, chyba nuly je tedy nulová.

Vliv opakovatelnosti dle vzorce (4) je $\delta_A = 0,04$ MPa,

hystereze dle vzorce (8) je $\delta_H = 0,03$ MPa.

Obě složky se uplatňují s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti (jde o max. hodnoty), příslušné nejistoty jsou tedy

$$u_A = \frac{\delta_A}{2\sqrt{3}} = \mathbf{0,012 \text{ MPa}} \qquad u_H = \frac{\delta_H}{2\sqrt{3}} = \mathbf{0,009 \text{ MPa}}$$

Kdybychom opakovatelnost počítali jako nejistotu typu A podle [L1], vyšla by pro vyhodnocovaný smysl zatěžování hodnota $u_{A1} = 0,0115$ MPa, čili prakticky shodná s u_A .

P1.3 Další zdroje nejistoty typu B

Při kalibraci lze uvažovat tyto zdroje nejistot:

- nejistota kalibrace etalonu tlaku
- dlouhodobá stabilita (drift) nebo přesnost etalonu
- nejistota vyplývající z rozdílné referenční a kalibrační teploty měřidla
- nejistota vyplývající z rozdílné referenční a kalibrační teploty etalonu
- nejistota charakterizující rozlišení měřené hodnoty

P1.3.1 Nejistota kalibrace etalonu tlaku (u_{ET})

Na kalibračním listu etalonu je uveden koeficient rozšíření $k_{ET} = 2,07$. Standardní nejistota kalibrace je tedy

$$\delta_{ET} = \frac{0,006}{2,07} = \mathbf{0,0029 \text{ MPa}}$$

P1.3.2 Vliv dlouhodobé stability (driftu) nebo přesnosti etalonu tlaku (u_{SE})

Vliv etalonu na nejistotu měření můžeme zahrnout dvojím způsobem. Standardně lze uvažovat nejistotu kalibrace dle předchozího odstavce a přesnost etalonu dle specifikace výrobce. Jestliže etalon v několika posledních kalibracích nevykazuje odchylky větší než cca 30 % své dovolené chyby, která vyplývá ze specifikace výrobce, je možné uvažovat do nejistoty pouze poměrnou část dovolené chyby tak, aby byly respektovány skutečné dlouhodobé vlastnosti etalonu s určitou rezervou. V našem případě nepřekročili odchylky etalonu při

posledních třech kalibrací 25 % dovolené chyby. Místo specifikace výrobce (0,05 % FSE) uvažujeme tedy s určitou rezervou polovinu specifikace výrobce:

$$\delta_{SE} = \frac{0,025}{100} \cdot 60 = 0,015 \text{ MPa}$$

Příspěvek nejistoty od vlivu driftu je při rovnoměrném rozdělení pravděpodobnosti:

$$u_{SE} = \frac{\delta_{SE}}{\sqrt{3}} = \mathbf{0,009 \text{ MPa}}$$

P1.3.3 Teplotní vliv na kalibrované měřidlo (u_{TM})

Teplotní závislost kalibrovaného tlakoměru je známa (0,02 % FSM na 1 °C), odchylka od referenční teploty je $t_r - t = 2$ °C:

$$\delta_{TM} = \frac{0,02}{100} \cdot 40 \cdot (t_r - t) = 0,016 \text{ MPa}$$

Pro rovnoměrné rozdělení je tedy příspěvek nejistoty:

$$u_{TM} = \frac{\delta_{TM}}{\sqrt{3}} = \mathbf{0,009 \text{ MPa}}$$

P1.3.4 Teplotní vliv na etalon (u_{TE})

Teplotní závislost etalonu je 0,01 % FSE na 1 °C. Referenční teplota je překročeno o $t_r - t = -1$ °C:

$$\delta_{TE} = \frac{0,01}{100} \cdot 60 \cdot (t_r - t) = -0,006 \text{ MPa}$$

Pro rovnoměrné rozdělení je tedy příspěvek nejistoty:

$$u_{TE} = \frac{\delta_{TE}}{\sqrt{3}} = \mathbf{-0,004 \text{ MPa}}$$

P1.3.5 Rozlišení displeje měřidla (u_{RM})

Příspěvek nejistoty od rozlišitelnosti 0,01 MPa je při rovnoměrném rozdělení:

$$u_{RM} = \frac{0,01}{2 \cdot \sqrt{3}} = \mathbf{0,003 \text{ MPa}}$$

Rozlišení etalonu zanedbáváme, je desetkrát menší než rozlišení měřidla. Kalibrace byla provedena tak, aby byly dodrženy referenční úrovně, není tedy respektován vliv hydrostatického tlaku média dle kapitoly 6.1 postupu, bod 5.

P1.4 Určení rozšířené nejistoty

Celková standardní kombinovaná nejistota činí:

$$u = \sqrt{u_B^2 + u_H^2 + u_{ET}^2 + u_{TM}^2 + u_{TE}^2 + u_{RM}^2 + u_{SE}^2} = \mathbf{0,021 \text{ MPa}}$$

Protože opakovatelnost byla stanovena ze 3 měření (počet měření < 10), je vhodné zvážit spolehlivost stanovení standardní nejistoty dle přílohy E dokumentu EA 4/02. Pro standardní nejistotu typu A je počet stupňů volnosti definován $\nu_A = n - 1 = 2$ ($n \dots$ počet měření). Nejistoty typu B byly stanoveny z limitních chyb a jejich stupně volnosti se blíží dle přílohy E dokumentu [L1] nekonečnu (podíl čtvrté mocniny příspěvku nejistoty u_i^4 a složky ν_i je tedy

blízký nule). Welch – Satterthwaitův vztah pro určení efektivních stupňů volnosti má tedy v našem případě tvar:

$$v_{eff} = \frac{u^4}{\frac{u_A^4}{v_A}} = 18,8$$

Dle tabulky E1 dokumentu [L1] je počet ef. stupňů volnosti < 50 , zaokrouhlíme ho na nejbližší nižší celé číslo tj. 18 a koeficient rozšíření volíme dle tabulky $k = 2,15$.

Rozšířená kombinovaná nejistota je tedy:

$$U = k \cdot u = 2,15 \cdot 0,021 = \mathbf{0,045 \text{ MPa}}$$

Odchylka tlakoměru je tedy **(0,100 ± 0,045) MPa**.

Jestliže bychom pro kalibraci použili standardní kalibrační postup dle kap. 6 postupu, museli bychom respektovat podmínku, že nejistota kalibrace nesmí být lepší než 0,05 % FSM, tj. 0,02 MPa. Tato podmínka je v tomto případě dodržena.

PŘEHLED NEJISTOT:

Veličina X_i	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Pravděpodob- nostní rozdě- lení	Citlivostní koeficient c_i	Příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
$p_M (\delta_A)$	20,10 MPa	0,012 MPa	Rovnoměrné	1	0,012 MPa
$p_{ET} (\delta_{ET})$	20,000 MPa	0,0029 MPa	Normální	-1	-0,0029 MPa
δ_H	0,0 MPa	0,009 MPa	Rovnoměrné	1	0,009 MPa
δ_{TM}	0,0 MPa	0,009 MPa	Rovnoměrné	1	0,009 MPa
δ_{TE}	0,0 MPa	-0,004 MPa	Rovnoměrné	-1	0,004 MPa
δ_{RM}	0,0 MPa	0,003 MPa	Rovnoměrné	1	0,003 MPa
δ_{SE}	0,0 MPa	0,009 MPa	Rovnoměrné	-1	-0,009 MPa
δ_m	0,100 MPa	Kombinovaná standardní nejistota			0,021 MPa

Při kalibraci je obvykle požadován závěr, zda tlakoměr vyhovuje nebo nevyhovuje specifikované přesnosti. Při rozhodování o shodě s metrologickou specifikací se řídíme např. dokumentem [L3], ve kterém je definováno tzv. ochranné pásmo. Ochranné pásmo může být nulové (měřidlo vyhovuje, jestliže naměřená odchylka je rovna dovolené chybě) nebo může být definováno zákazníkem. Nejčastěji bývá velikost ochranného pásma rovna nejistotě měření, přičemž rozhodování může být binární (vyhovuje x nevyhovuje) nebo nebinární. V našem případě by tlakoměr na měřené hodnotě vyhověl ve všech případech možného hodnocení. Bližší údaje o vyhodnocování dle [L3] viz webový odkaz v seznamu literatury (stažitelné v češtině).

16 Validace

Metody použité v tomto kalibračním postupu byly validovány. Doklad o validaci je uložen u 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/2/24. Šíření a využívání tohoto kalibračního postupu nebo jeho částí jakýmkoli komerčním způsobem je nepřípustné.

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.