



Česká metrologická společnost, z.s.

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

tel/fax: 221 082 254

e-mail: cms-zk@csvts.cz

www.spolky-csvts.cz/cms

Kalibrační postup

KP 2.4.1/04/21

MĚŘICÍ ŘETĚZEC PRO MĚŘENÍ TLAKU

Praha

Září 2021

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

Číslo úkolu: PRM VII/2/21

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

Řešitel: Česká metrologická společnost, z.s.

1 Předmět kalibrace

Kalibrační postup se vztahuje na měřicí řetězec, používaný k měření tlaku, v němž je jako snímač fyzikální veličiny použit převodník tlaku na elektrický výstupní signál. Měřicí řetězec tlaku může být samostatný (výstupní signál je snímán panelovým měřidlem), může být součástí zkušebního zařízení (výstup na ovládací panel stroje – např. testovací stolice tlakových hadic) nebo součástí technologického celku s výstupem na ovládací PC (např. lisovací linka plastů).

1.1 Princip kalibrace

Kalibrace je prováděna metodou přímého porovnání údajů kalibrovaného měřidla (digitálního nebo analogového) s údaji etalonu. Měřicí řetězec se kalibruje jako celek nebo po částech (každý jeho funkční celek samostatně). Při kalibraci celého měřicího řetězce se tlak postupně zvyšuje až na maximální hodnotu a poté postupně snižuje při dodržení definovaného počtu kalibračních bodů v jednom cyklu nebo určeném počtu cyklů.

2 Související normy a metrologické předpisy

Vyhláška č. 264/2000 Sb., aktuální znění	Vyhláška č. 264/2000 Sb., o základních měřicích jednotkách a ostatních jednotkách a o jejich označování.	[1]
ČSN ISO 80000-1	Veličiny a jednotky. Část 1: Obecně	[2]
ČSN ISO 1000	Jednotky SI a doporučení pro užívání jejich násobků a pro užívání některých dalších jednotek (zrušená norma)	[3]
ČSN EN ISO/IEC 17025	Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří	[4]
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	[5]
ČSN EN 60770-1 ed. 2	Měřicí převodníky pro řídicí systémy průmyslových procesů - Část 1: Metody hodnocení vlastností	[6]
ČSN EN 60770-3 ed. 2	Měřicí převodníky pro řídicí systémy průmyslových procesů - Část 3: Metody hodnocení vlastností inteligentních převodníků	[7]
ČSN EN 472	Měřidla tlaku - Terminologie	[8]
ČSN EN 837-1 opr. 1	Měřidla tlaku - Část 1: Tlakoměry s pružnou trubicí - Rozměry, metrologie, požadavky a zkoušení	[9]
TNI 01 0115	Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)	[10]
EA 4/02 M	Vyjadřování nejistot měření při kalibracích	[11]
EURAMET/cg-17/v. 4.0	Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers	[12]
EURAMET/cg-11/v. 2.0	Guidelines on the Calibration of Indicators and Simulators by Electrical Simulation and Measurement	[13]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci měřicího řetězce 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 jsou obsaženy v normách, zejména v TNI 01 0115 a v ČSN EN 472.

Další pojmy, které v nich nejsou uvedeny:

- *měřicí řetězec*: účelové uspořádání měření zpravidla fyzikální veličiny (teplota, tlak, průtok atd.) realizované měřidly, která jsou prostorově rozdělena a vhodným způsobem propojena. Měřicí řetězec se skládá ze snímače fyzikální veličiny, obvodů pro úpravu (zesilovač, převodník) a vyhodnocení signálu resp. jeho indikaci (panelové měřidlo, zapisovač, PC apod.). Součástí obvodu jsou i pomocná zařízení (korekční členy, teplotní kompenzace atd.) a propojení (proudová smyčka, napěťová sběrnice, signálová sběrnice). Inteligentní měřicí systémy jsou připojeny přes rozhraní do sběrnicových sítí („Fieldbus“),
- *chyba měřicího řetězce*: rozdíl mezi výstupním údajem a pravou hodnotou veličiny, působící na snímač,
- *největší dovolená chyba měřicího řetězce*: maximální přípustná chyba řetězce určená výpočtem, odhadem nebo technologickou tolerancí zkušebního zařízení pracujícího v konkrétních podmínkách,
- *technologická, zkušební tolerance*: měřicí řetězec tlaku je součástí zkušebního zařízení. V metodice prováděné zkoušky (norma, interní předpis) je uveden dílčí požadavek na přesnost měření tlaku, tj. požadavek vyplývající z použité technologie, druhu zkoušky apod., přesnost měřicího řetězce ve vazbě na použitou technologii si definuje uživatel,
- *kalibrace řetězce vcelku*: jednotlivé části řetězce nerozpojujeme, ze zařízení pouze demontujeme snímač tlaku, který připojíme na zkušební zdroj tlaku, jehož hodnotu určujeme etalonem s požadovanou nejistotou,
- *kalibrace řetězce při odpojení snímače*: snímač tlaku se kalibruje samostatně např. v kalibrační laboratoři a zbytek řetězce se kalibruje s použitím vhodného zdroje referenčního signálu (simulace výstupu převodníku tzv. procesním kalibrátorem; procesní kalibrátory často umí provést i kalibraci samotného převodníku tlaku nebo indikačního přístroje). Postup kalibrace simulací výstupního elektrického signálu bývá v laboratořích zařazován do oboru elektrických veličin. U snímačů tlaku s přímým digitálním výstupem se provádí vždy kalibrace celého měřicího řetězce.

5 Prostředky potřebné pro kalibraci

5.1 Metoda kalibrace

Kalibrace měřicích řetězců tlaku je prováděna metodou přímého porovnání údajů kalibrovaného měřidla (obvykle digitální výstup; princip měřicího řetězce tlaku je obdobný digitálnímu tlakoměru) s údajem etalonu. Provádí se podobně jako u samostatných měřidel tlaku ve směru vzestupném i sestupném (jeden nebo několik úplných kalibračních cyklů). Měřicí řetězce kalibrované mimo stálé laboratorní prostory odpovídají obvykle třídě přesnosti 0,5 a horší.

5.2 Etalonová zařízení

Etalony, použité při kalibraci se řídí metodou kalibrace, použitým médiem a rozsahem tlaků, ve kterém se mají řetězce kalibrovat.

Nejčastěji se používají:

- přenosný digitální tlakoměr se samostatným zdrojem tlaku,
- přenosný digitální tlakoměr s vestavěným zdrojem tlaku (ruční pumpa),
- procesní kalibrátor spojený s etalonovými převodníky tlaku s digitálním výstupem,
- inteligentní převodníky s HART komunikátorem.

5.3 Ostatní zařízení

Do pomocných prostředků patří:

- zařízení na vytvoření a regulaci tlaku (ruční tlakové kleště s objemovým regulátorem a plyným nebo kapalným médiem, tlakový lis, přenosný kompresor s redukční stanicí, malá tlaková láhev plynu, tlakový kalibrátor),
- simulátor elektrických unifikovaných výstupních signálů,
- měřidlo teploty okolí,
- spojovací materiál (hadice nebo trubičky, redukce, těsnění, šroubení, rychlospojky – vše v metrické i palcové soustavě),
- napájecí zdroje (obvykle 24 V DC),
- souprava náradí,
- ruční multimetr (pomocné měřidlo),
- lupa, posuvné měřítko, metr,
- čisticí prostředky,
- stojánek nebo pomocný stend pro uchycení snímače (-ů),
- zařízení pro komunikaci k dorozumění všech osob, které se účastní kalibrace řetězce od snímače až po výstupní zařízení (odečet údaje měřicího řetězce např. na PC může být na místě vzdáleném od místa realizace kalibrace; je nutná spolupráce min. dvou pracovníků).

6 Obecné podmínky kalibrace

Měřicí řetězec můžeme kalibrovat při odstaveném zařízení (přednostně) nebo za provozu (není-li jiná možnost). Ve spolupráci se zákazníkem je nutné stanovit konkrétní podmínky kalibrace (počet měřených bodů, velikost tlaku apod.). Současně musíme respektovat dodržování bezpečnostních předpisů zákazníka.

Pro kalibraci měřicích řetězců se obtížně stanovují referenční i obecné podmínky kalibrace vzhledem k rozmanitosti možných zařízení. Kalibrační list je nezbytné doplnit popisem vnějších podmínek, které nastaly při kalibraci, abychom zajistili opakovatelnost měření. Jedná se o tyto varianty:

- měřicí řetězec se kalibruje na odstaveném technologickém zařízení – v tom případě lze popsat ovlivňující podmínky a často i dodržet referenční hodnoty. Tlak generujeme nezávislým zařízením a můžeme garantovat jeho stabilitu. Při provozu jsou pak jiné podmínky, než byly při kalibraci, kdy nepůsobí vliv provozní teploty, vibrace, prašnosti apod.,
- měřicí řetězec se kalibruje za provozu – převážná část měřidel má podmínky kalibrace shodné s provozními. Jestliže je zdrojem tlaku vlastní technologické zařízení, nelze většinou dodržet stabilitu tlaku a někdy i referenční podmínky etalonu. Ovlivňující podmínky pak musíme zahrnout do nejistoty měření. Pokud kalibrujeme řetězec na vlastním etalonárním zařízení, odstavení technologie a demontáž snímačů musí zařídit uživatel a garantovat přitom dodržení bezpečnosti práce při kalibraci.

Nejvýznamnější ovlivňující veličinou u měřicích řetězců tlaku je teplota. Při kalibraci mimo stále laboratorní prostory je obvyklá referenční teplota $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Při překročení tohoto rozmezí teplot musí být zahrnut do nejistoty měření teplotní vliv na použitá měřidla, který vyplývá z teplotních závislostí. Změny teploty okolního vzduchu nesmí překročit po dobu jedné série měření $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Ve všech uvedených variantách musí být kalibrační zařízení včetně etalonů umístěno v daném prostředí po dobu nezbytnou k jeho temperování před zahájením měření.

6.1 Obecné požadavky

1. Podle [L12] má být v každém zkoušeném tlakovém bodě přesnost měřicího systému použitého při kalibraci, která je vyjádřena ve formě rozšířené nejistoty s pravděpodobností pokrytí 95%, lepší než očekávaná nejistota kalibrovaného řetězce. Poměr nejistot by měl být roven nebo větší než 2. Tento požadavek je akceptovatelný pro nejpřesnější měřidla tlaku nebo pro měření malých tlaků. Vzhledem k očekávané přesnosti měřicích řetězců by rozšířená nejistota etalonu ($k = 2$), použitého pro měření měla být menší nebo nejvýše rovna 1/4 největší dovolené chyby zkoušeného řetězce tlaku.
2. Vibrace a rázy je nutno vyloučit nebo omezit tak, aby nezpůsobily chybu větší než 5% z největší dovolené chyby řetězce.
3. Vnější elektrická a magnetická pole nesmí způsobit chybu větší než 5% z největší dovolené chyby řetězce.
4. Napájecí podmínky během zkoušky – podle údajů výrobce, resp. podmínek vyplývajících z dokumentace zařízení (obvykle je zaručeno indikací výstupního signálu v rámci měřicího řetězce).
5. Tlak musí být vyvozen tlakovým médiem, určeným pro zkoušený řetězec. V případě, kdy je možnost volby, použije se média podle požadavku zákazníka. Druh tlakového média se vždy uvede do kalibračního listu.
6. Propojení etalonového a zkoušeného snímače tlaku má být takové, aby výškový rozdíl referenčních úrovní obou tlakoměrů způsobil chybu maximálně 5% z největší dovolené chyby zkoušeného řetězce. V případě, že rozdíl ve výškách referenčních úrovní etalonového a zkoušeného tlakoměru je větší, musí být měřen a zavedena korekce na výšku sloupce použitého média. Tento hydrostatický tlak se vypočte dle vztahu:

$$P_h = h \cdot \rho \cdot g \quad (\text{Pa}) \quad (1)$$

kde je:

h (m) výškový rozdíl mezi měřicí úrovní etalonového tlakoměru a kalibrovaného tlakoměru

h je záporné pokud měřicí úroveň (připojovací čep) 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.

7. Těsnost systému (etalonový tlakoměr – zkoušený řetězec tlaku) musí být taková, aby pokles tlaku v průběhu odečtu údaje etalonu a zkoušeného řetězce způsobil chybu maximálně 5% z největší dovolené chyby řetězce.
8. Po zapnutí napájení je třeba stabilizovat teplotu jednotlivých členů řetězce po dobu specifikovanou výrobcem. Není-li tento údaj dostupný, uvažujeme dobu zahřátí do 15 minut.

Kalibrace měřicích řetězců tlaku, určených k měření tlaku kyslíku je umožněna např. použitím oddělovacího členu olej – inertní kapalina (etylalkohol, voda apod.). Kalibraci těchto řetězců u zákazníka je nutné důkladně posoudit, protože při použití kyslíku je nezbytné používat samostatnou sadu připojovacích prvků, které zaručí čistotu styčných ploch.

7 Rozsah kalibrace

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

Všeobecný postup při kalibraci:

- předběžná kontrola všech členů řetězce,
- kontrola shody realizace řetězce s projektem (při kalibraci zařízení nových nebo po opravě; kontrola prověří, zda je možné dodržet požadavky zákazníka),
- funkční kontrola,
- měření metrologických parametrů,
- vyhodnocení,
- vypracování kalibračního listu.

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

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

Požadavek přesnosti měřicího řetězce – přesnost je obvykle číslo, které se rovná absolutní hodnotě největší základní dovolené chyby řetězce. Její hodnota vyplývá z vlastností převodníku tlaku, zpracování signálu převodníku, zobrazovací jednotky, měřicí karty PC atd.

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

Na jednotlivých částech měřicího řetězce musí být uvedené:

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

Jako identifikační znak slouží výrobní číslo snímače, v.č. nebo označení panelového měřidla, metrologické nebo evidenční číslo měřicího řetězce apod.

8.1 Předběžná kontrola

Při vnější prohlídce se zjišťuje:

- poškození pouzdra převodníku tlaku a zejména poškození přívodu vstupního tlaku,
- poškození elektrického připojení,
- zda označení a nápisy odpovídají požadavkům; kontroluje se označení vodičů a svorek kabelů, zapojení stínění a neporušenost dalších členů řetězce (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, který je nezbytný pro identifikaci měřidla nebo splnění požadavků zákazníka, není dostupný ze dokumentace nebo není vyznačen na kalibrovaném řetězci, uvede se tato okolnost do kalibračního listu. Pokud zjištěná závada znemožní další zkoušky, dále se nepokračuje.

Snímač zkoušeného řetězce 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 popojení. U měřicích řetězců nemusí měřicí rozpětí snímače tlaku odpovídat kalibrovanému rozpětí tlaku, které je určeno požadavkem zákazníka. Protože přesnost snímačů je nejčastěji vztažena k jejich měřicímu rozpětí, je vhodné uvádět na kalibrační list oba údaje (měřicí i kalibrované rozpětí tlaku). V případě požadavku vyjádření shody se specifikací je měřicí rozpětí snímače povinné. Druh tlakového média volíme dle rozsahu měření a skutečného použití.

9 Postup kalibrace

Určení metrologických charakteristik (statických)

Metoda zjištění základní chyby měřicího řetězce tlaku a jeho hystereze spočívá v přímém porovnání veličiny indikované řetězcem s konvenčně pravou 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. Obvykle používáme tři základní metody měření:

9.1 Optimální nastavení řetězce bez zjištění stávajícího stavu

Používá se obvykle u nových zařízení nebo u zařízení po opravě nebo výměně částí řetězce. Před vlastním měřením se na zkoušeném zařízení provede postupný přechod tlaku přes celý rozsah v každém směru a předběžně se určí chyba měřicího řetězce.

Podle návodu v technické dokumentaci se provede nastavení kalibrovaného řetězce (na snímači tlaku, nastavení offsetu nebo linearitu v ovládacím SW apod.). Po nastavení se zkontroluje odchylka v celém rozsahu min. ve třech bodech, příp. se provede úprava nastavení. Při zkoušení řetězců s přesností 1% a horší (při přesnosti uváděné jako funkce tlaku se uvažuje přesnost v horní mezi měřicího rozsahu vzhledem k měřicímu rozpětí) se kalibrace provádí obvykle v šesti tlakových bodech (minimálně 5 bodů), rovnoměrně rozložených v celém rozsahu, zahrnujících dolní a horní hodnotu rozsahu převodníku (rozsahu měření) nebo hodnoty jim blízké (v rozmezí 10% rozpětí). Těchto bodů se dosahuje postupným zvyšováním tlaku a poté jeho snižováním. Doba zatěžování (odlehčování) měřidla mezi dvěma kalibračními body by měla být stejná a měla by být min. 30 s. Odečet hodnoty tlaku by měl být proveden nejdříve 30 s po dosažení změny tlaku. Horní mez měřicího rozsahu by měla být odečtena dvakrát v intervalu alespoň dvou minut. Nulový tlak na konci měřicího cyklu se odečítá nejméně 30 s po úplném odlehčení tlaku. Hodnoty referenčních tlaků nastavujeme ve všech sériích identické. Pokud to není možné, povoluje [L12] odchylku referenčních hodnot ve výši max. 1% kalibrovaného rozsahu měřidla. Zaznamenávají se hodnoty indikované kalibrovaným řetězcem pro každý zkoušený tlakový bod pro jeden průchod celým rozsahem v každém směru.

Opakovatelnost měření se u těchto měřidel vyhodnotí tím způsobem, že jednu základní sérii měření v šesti bodech rozšíříme o dvě zkrácené série. V těchto doplňkových sériích měříme obvykle ve 3 bodech a to při 0%, cca 20% a cca 80% měřicího rozpětí tlakoměru, minimálně v jednom bodě (50% rozpětí). 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.

Při zkoušení řetězců v intervalu přesnosti od 0,1% do 1% (při přesnosti uváděné jako funkce tlaku se uvažuje přesnost v horní mezi měřicího rozsahu vzhledem k měřicímu rozpětí) se kalibrace provádí obdobně jako v předchozím odstavci, minimálně však v osmi tlakových bodech. Těchto bodů

se dosahuje postupným zvyšováním tlaku a poté jeho snižováním. Zaznamenávají se hodnoty indikované kalibrovaným řetězcem pro každý zkoušený tlakový bod pro tři průchody celým rozsahem v každém směru, postup nastavení tlaků je obdobný jako v předchozím odstavci. Opakovatelnost se vyhodnocuje ve formě nejistoty typu A pro každý tlakový bod.

Metodika kalibrace v [L12] je sice poněkud odlišná, ale ta je navržena především pro kalibrace v laboratoři. Pro externí kalibrace volíme postup, který vychází z [L9] a lze ho aplikovat pro všechna měřidla tlaku.

9.2. Optimální nastavení řetězce se zjištěním stávajícího stavu

Před vlastním měřením se na zkoušeném měřidle provede min. 2x postupný přechod tlaku přes celý rozsah v každém směru.

Provede se měření minimálně v bodech 0%, 50% a 100% měřicího rozpětí, při postupném zvyšování a snižování tlaku. V každém tlakovém bodě se vstupní tlak udržuje na ustálené hodnotě, dokud nelze výstupní signál zkoušeného tlakoměru považovat za dostatečně ustálený. Zaznamenávají se hodnoty indikované kalibrovaným řetězcem pro každý zkoušený tlakový bod pro jeden průchod celým rozsahem v každém směru. Změřené hodnoty jsou uvedeny na kalibrační list jako měření před nastavením.

Podle návodu v technické dokumentaci se provede nastavení kalibrovaného měřicího řetězce. Po nastavení se zkontroluje odchylka v celém rozsahu min. ve třech bodech, příp. se provede úprava nastavení. Dále postupujeme podle článku 9.1.

9.3 Kalibrace řetězce bez nastavení

Před vlastním měřením se na zkoušeném zařízení provede min. 2x postupný přechod tlaku přes celý rozsah v každém směru (tzv. „rozcvičení“ řetězce) a postupuje se bez nastavení podle článku 9.1.

Pomocí simulátoru signálů (procesního kalibrátoru), etalonu tlaku a nezávislého zdroje tlaku lze provádět kalibrace měřicích řetězců tlaku 3 způsoby:

1. Kalibrace měřicího řetězce popsána v člancích 9.1 až 9.3 – etalonový snímač tlaku je připojen na procesní kalibrátor a jeho údaj je porovnáván s výstupní hodnotou měřicího řetězce (digitální ukazatel, ovládací panel stroje, monitor řídicího počítače apod.). Velikost tlaku ovládáme nezávislým zdrojem tlaku s objemovým regulátorem tlaku.
2. Simulace proudového (napětového) signálu do měřicího řetězce – používá se pro kalibraci měřicího řetězce při odpojeném tlakovém snímači (často při hledání závad měřicího řetězce). Simulátor signálu slouží jako zdroj výstupního signálu snímače tlaku (4 mA – 20 mA, 0 – 10 VDC, nízkoúrovňový výstupní signál v mV atd.). Výstupní svorky simulátoru jsou připojeny místo tlakového snímače. Při nastavení hodnoty výstupního proudu (napětí), která odpovídá určité velikosti vstupního tlaku (např. 20 % rozpětí), se zobrazí tato hodnota na konci měřicího řetězce s chybou, která odpovídá nejistotě simulátoru a celkové chybě měřicího řetězce. Simulaci výstupního signálu provádíme obvykle po 25 % rozpětí (5 kalibračních bodů) vzestupně i sestupně podle stejných zásad, jako kalibraci snímačů tlaku. Postup při kalibraci řetězce:
 - místo snímače se připojí kalibrátor, simulující výstupní signál snímače,
 - na kalibrátoru se postupně nastaví pět hodnot v měřicím rozsahu 0%, 25%, 50%, 75%, 100%,

- na výstupním zařízení se kontroluje, zda údaje odpovídají hodnotám simulovaným kalibrátorem s dovolenou chybou,
 - přesáhne-li některý údaj měření dovolenou chybu měřicího řetězce, pak řetězec lze považovat za nevyhovující dle volby ochranného pásma (obvykle nejistota měření); je nutné seřadit všechny členy řetězce při stálém signálu kalibrátoru a potom se zkouška opakuje.
2. Kalibrace samotného snímače tlaku – procesní kalibrátory umožňují napájet snímač a současně snímat jeho výstupní signál. Snímač připojíme ke zdroji tlaku (mechanicky) a k procesnímu kalibrátoru (elektricky) dle manuálu kalibrátoru. Postup při kalibraci je obdobný jako v článcích 9.1 až 9.3, resp. odpovídá postupu pro kalibraci snímačů tlaku.

10 Vyhodnocení kalibrace

Vyhodnocení spočívá v porovnání zjištěných a dovolených chyb, stanovení rozšířené nejistoty měření a posouzení shody s metrologickou specifikací, je-li požadováno. Na základě měření jednotlivých tlakových úrovní je potom provedeno celkové vyhodnocení kalibrovaného řetězce a je uvedeno do kalibračního listu. Vyhodnocení shody se specifikací se neprovádí, pokud není uvedena přesnost kalibrovaného řetězce a hodnocení není zákazníkem požadováno.

Rozhodnutí o shodě se specifikací se provádí v souladu s dokumentem ILAC-G08:09/2019 „Pokyny pro použití rozhodovacích pravidel a uvádění výroku o shodě“ (dostupný na webu Českého institutu pro akreditaci). Pro vyjádření rozhodnutí o shodě se specifikací se používají tzv. rozhodovací pravidla. Pokud je výsledek omezen na dvě možnosti (vyhovuje nebo nevyhovuje), jedná se o binární rozhodovací pravidlo. Nebinární rozhodovací pravidlo představuje situaci, kdy výsledek můžeme vyjádřit více možnostmi (vyhovuje, podmíněně vyhovuje, podmíněně nevyhovuje, nevyhovuje). Použití rozhodovacích pravidel detailně popisuje kap. 4.2 uvedeného dokumentu.

11 Kalibrační list

Uvádění výsledků musí být v souladu s požadavky článku 7.8 normy ČSN EN ISO/IEC 17025. Dále jsou uvedeny pouze základní informace požadované normou.

Výsledky musí být před vydáním přezkoumány a schváleny, musí být uváděny přesně, jasně jednoznačně a objektivně. Musí rovněž obsahovat informace dohodnuté se zákazníkem a všechny informace nezbytné pro interpretaci vyžadované použitou metodou.

11.1 Náležitosti kalibračního listu

Kalibrační list by měl obsahovat tyto údaje:

- a) titul (Kalibrační list, Protokol o zkoušce apod.),
- b) název a adresu kalibrační laboratoře,
- c) místo provádění kalibrační činnosti (u zákazníka, v místě instalace apod.),
- d) pořadové číslo kalibračního listu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran, s jasným udáním konce dokumentu
- e) jméno a adresu zadavatele, popř. zákazníka,
- f) název, typ, výrobce a identifikační číslo kontrolní podložky,

- g) datum přijetí kontrolní podložky ke kalibraci (nepovinné), datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- h) určení specifikace uplatněné při kalibraci nebo označení kalibračního postupu (v tomto případě KP 2.4.1/04/21) a prohlášení, že uvedené výsledky se vztahují pouze ke zkoušeným nebo kalibrovaným položkám,
- i) podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňujících veličin apod.),
- j) měřidla a jednotky použité při kalibraci,
- k) odchylky nebo vyloučení z metody,
- l) obecné vyjádření o návaznosti výsledků měření (etalony použité při kalibraci),
- m) výsledky měření a s nimi spjatou rozšířenou nejistotu měření a/nebo prohlášení o shodě s určitou metrologickou specifikací, či požadavkem zákazníka,
- n) údaje o nejistotách měření ve stejné jednotce jako měřená veličina,
- o) výsledky před a po každé adjustaci nebo opravě, pokud jsou k dispozici,
- p) Tam, kde je to relevantní nebo požadované zákazníkem výrok o shodě s požadavky nebo specifikacemi, případně názory a interpretace výsledků, jeli to nezbytné,
- q) Nesmí být uváděna žádná doporučení týkající kalibračního intervalu, pokud to nabylo dohodnuto se zákazníkem,
- r) jméno pracovníka, který kontrolní podložky kalibroval, jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, razítko kalibrační laboratoře.

Akreditovaná kalibrační laboratoř navíc uvede číslo laboratoře a odkaz na osvědčení o akreditaci. Součástí kalibračního listu je též prohlášení, že uvedené výsledky se týkají pouze kalibrovaného předmětu a kalibrační list nesmí být bez předběžného písemného souhlasu kalibrační laboratoře publikován jinak než celý.

Pokud provádí kalibrační, resp. metrologická laboratoř kalibraci pro vlastní organizaci, nebo po dohodě se zákazníkem, může být kalibrační list zjednodušen, případně vůbec nevystavován (výsledky kalibrace mohou být uvedeny např. v kalibrační kartě měřidla nebo na vhodném nosiči, popř. v elektronické paměti). V tomto případě je vhodné, aby kalibrační laboratoř zpracovala záznam o měření (s uvedenými měřenými hodnotami) a archivovala ho.

11.2 Protokolování

Originál kalibračního listu se předává objednateli kalibrace. Jeho kopii si ponechává kalibrační laboratoř a archivuje ji 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 zanášet do kalibrační karty měřidla nebo ukládat do paměti počítače.

11.3 Umístění kalibrační značky

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

V případě, že je výsledek kalibrace nevyhovující, označí se měřicí řetězec štítkem „Nevyhovuje“. Kalibrační štítek je třeba na přístroj umístit viditelně.

12 Péče o kalibrační postup

Originál kalibračního postupu je uložen 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

	jméno	podpis	datum
Upravil			
Schválil			

13.3 Revize

strana	popis změny	zpracoval	schválil	datum

14 Stanovení nejistoty měření (příklad výpočtu)

PŘÍKLAD 1

Určíme nejistotu měření při kalibraci měřicího řetězce tlaku hydraulického lisu (tlak zobrazován na ovládacím počítači) podle specifikace:

Měřicí rozsah snímače tlaku (FSM)	(0 až 40) MPa
Třída přesnosti řetězce	0,6 (vztaženo k FSM)
Rozlišení údaje na ovládacím PC	0,01 MPa
Teplotní součinitel řetězce k_{TM}	0,02% FSM (dle specifikace převodníku)
Teplotní součinitel etalonu k_{TE}	0,01% FSE [rozsah etalonu FSE (0 až 30) MPa]
Referenční rozmezí teplot	23 °C ± 5 °C
Teplota při kalibraci t	15,0 °C

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

Přesnost etalonu	0,05% FSE
Roční stabilita etalonu	0,05% FSE
Rozlišení etalonu	0,001 MPa

Stanovení nejistoty je provedeno v kalibračním bodě 25 MPa (rozsah zobrazení na PC končí na hodnotě 29,99 MPa, protože pracovní rozsah lisu je do 25 MPa, tedy menší, než rozsah instalovaného převodníku tlaku).

Chyba údaje měřeného tlaku kalibrovaného čidla E_X je definována:

$$E_X = p_M - p_E - \delta_{ET} - \delta_{TE} + \delta_{TM} - \delta_{RE} + \delta_{RM} - \delta_{SE} \quad (2)$$

p_M ...	údaj tlaku kalibrovaného řetězce
p_E ...	údaj tlaku etalonu
δ_{ET} ...	zdroj nejistoty od etalonu tlaku
δ_{TE} ...	zdroj nejistoty od teplotní závislosti etalonu
δ_{TM}	zdroj nejistoty od teplotní závislosti měřidla
δ_{RE} ...	zdroj nejistoty způsobený konečnou rozlišitelností odečtu etalonu
δ_{RM} ...	zdroj nejistoty způsobený konečnou rozlišitelností odečtu měřidla
δ_{SE} ...	zdroj nejistoty způsobený driftem etalonu

P1.1 Určení etalonové hodnoty tlaku a odchylky měřicího řetězce

Etalonová hodnota tlaku byla nastavena $p_{et} = 25,000$ MPa.

Měřená hodnota na kalibrovaném tlakoměru činí 25,10 MPa.

Odchylka etalonové a měřené hodnoty je tedy: $\delta_m = 0,100$ MPa.

P1.2 Opakovatelnost měření (u_A)

Opakovatelnost měření tlaku je určována v bodech 5 MPa a 20 MPa; maximální hodnota byla zjištěna v bodě 5 MPa při klesajícím tlaku, kdy byly ve třech kalibračních cyklech naměřeny hodnoty:

$p_i = 4,89 / 4,92 / 4,93$... MPa; průměr $p = 4,913$ MPa

Opakovatelnost (nejistota typu A) je stanovena v souladu s EA 4/02 M pro $n = 3$ měření

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^3 (p_i - p)^2} \quad (3)$$

$$u_A = 0,012 \text{ MPa}$$

P1.3 Zdroje nejistoty typu B

Při kalibraci lze uvažovat tyto zdroje nejistot:

- nejistota etalonu tlaku,
- nejistota vyplývající z rozdílné referenční a kalibrační teploty řetězce (převodníku),
- nejistota vyplývající z rozdílné referenční a kalibrační teploty etalonu,
- nejistota charakterizující rozlišitelnost měřené hodnoty,
- nejistota charakterizující rozlišitelnost hodnoty etalonu,
- stabilita etalonu.

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

Nejistota etalonu vychází z deklarace jeho přesnosti, která je potvrzená kalibrací (nejistotu kalibrace etalonu, která činí 0,008 % měřené hodnoty, zanedbáváme). Maximální chyba etalonu činí:

$$\delta_{ET} = \frac{0,05}{100} \cdot 30 = 0,015 \text{ MPa} \quad (4)$$

Kombinovaná standardní nejistota etalonu tlaku (rovnoměrné rozdělení) je tedy:

$$u_{ET} = \frac{\delta_{ET}}{\sqrt{3}} = 0,009 \text{ MPa} \quad (5)$$

P1.3.2 Teplotní vliv na kalibrované měřidlo (u_{TM})

Teplotní závislost mimo referenční rozmezí teplot 18 °C až 28 °C je známa pouze u převodníku tlaku (0,02 % FSM na 1 °C). Referenční rozmezí je překročeno o $t_r - t = 3$ °C:

$$\delta_{TM} = \frac{0,02}{100} \cdot 40 \cdot (t_r - t) = 0,024 \text{ MPa} \quad (6)$$

Pro rovnoměrné rozdělení je tedy příspěvek nejistoty:

$$u_{TM} = \frac{\delta_{TM}}{\sqrt{3}} = 0,014 \text{ MPa} \quad (7)$$

P1.3.3 Teplotní vliv na etalon (u_{TE})

Teplotní závislost etalonu mimo referenční rozmezí teplot 18°C až 28°C je 0,01% FSE na 1°C. Referenční rozmezí je překročeno o $t_r - t = 3$ °C:

$$\delta_{TE} = \frac{0,01}{100} \cdot 30 \cdot (t_r - t) = 0,009 \text{ MPa} \quad (8)$$

Pro rovnoměrné rozdělení je tedy příspěvek nejistoty:

$$u_{TE} = \frac{\delta_{TE}}{\sqrt{3}} = 0,005 \text{ MPa} \quad (9)$$

P1.3.4 Rozlišení ukazatele řetězce (u_{RM})

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

$$u_{RM} = \frac{0,01}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,003 \text{ MPa} \quad (10)$$

P1.3.5 Rozlišení etalonu (u_{RE})

Příspěvek nejistoty od rozlišitelnosti 0,001 MPa je při rovnoměrném rozdělení:

$$u_{RE} = \frac{0,001}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,0003 \text{ MPa} \quad (11)$$

P1.3.6 Vliv stability etalonu tlaku (u_{SE})

Pokud je prokázáno jako v našem případě, že stabilita je dlouhodobě lepší než deklarace výrobce, můžeme použít pro stabilitu trojúhelníkové rozdělení pravděpodobnosti (jinak rozdělení rovnoměrné). Maximální dlouhodobá chyba etalonu činí

$$\delta_{SE} = \frac{0,05}{100} \cdot 30 = 0,015 \text{ MPa} \quad (12)$$

Příspěvek nejistoty od vlivu stability je při trojúhelníkovém rozdělení:

$$u_{SE} = \frac{\delta_{SE}}{\sqrt{6}} = 0,006 \text{ MPa} \quad (13)$$

P1.4 Určení rozšířené nejistoty

Celková standardní kombinovaná nejistota činí:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_{ET}^2 + u_{TM}^2 + u_{TE}^2 + u_{RM}^2 + u_{RE}^2 + u_{SE}^2} = 0,022 \text{ MPa} \quad (14)$$

Protože opakovatelnost byla stanovena ze 3 měření (počet měření < 10), je vhodné zvážit spolehlivost stanovení standardní nejistoty dle přílohy E dokumentu EA 4/02 M. 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 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 tvar:

$$\nu_{eff} = \frac{u^4}{\frac{u_A^4}{\nu_A}} = 22,6 \quad (15)$$

Dle tabulky E1 v dokumentu EA 4/02 M je počet efektivních stupňů volnosti < 50 , zaokrouhlíme ho na nejbližší nižší celé číslo tj. 20 a koeficient rozšíření volíme $k = 2,13$.

Rozšířená kombinovaná nejistota je tedy

$$U = k \cdot u = 2,13 \cdot 0,022 = \mathbf{0,047 \text{ MPa}} \dots$$

odchylka tlakoměru je tedy **$0,100 \pm 0,047 \text{ MPa}$** .

Poznámka: Pozor na vliv rozdílu referenčních úrovní, který může být u měřicích řetězců značný. Např. při kalibraci rozsahu 0 kPa – 600 kPa olejem je při rozdílu $h = 5 \text{ cm}$ (0,05 m), při tíhovém zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ a střední hustotě oleje $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$ odpovídající tlak sloupce oleje $p_s = h \cdot g \cdot \rho = 392,4 \text{ Pa}$, což odpovídá 0,065 % FS.

PŘEHLED NEJISTOT:

Veličina X_i	Odhad x_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Pravděpodob- nostní rozděl- ení	Citlivostní koeficient c_i	Příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
p_M	25,10 MPa	0,012 MPa	Normální	1	0,012 MPa
p_{ET}	25,000 MPa	0,009 MPa	Rovnoměrné	-1	-0,009 MPa
δ_{TM}	0,0 MPa	0,014 MPa	Rovnoměrné	1	0,014 MPa
δ_{TE}	0,0 MPa	0,005 MPa	Rovnoměrné	-1	-0,005 MPa
δ_{RM}	0,0 MPa	0,003 MPa	Rovnoměrné	1	0,003 MPa
δ_{RE}	0,0 MPa	0,0003 MPa	Rovnoměrné	-1	-0,0003 MPa
δ_{SE}	0,0 MPa	0,006 MPa	Trojúhelníkové	-1	-0,006 MPa
δ_m	0,100 MPa				0,022 MPa

PŘÍKLAD 2

Stanovení nejistoty kalibrace digitálního tlakoměru simulací tlakového čidla (převodník tlaku 0 bar až 250 bar, 4 mA – 20 mA) – měřicí řetězec tlaku hydraulického lisu s výstupem tlaku na měřicí PC, rozlišení = 0,1 bar, teplotní závislost řetězce 50 ppm FS/°C, referenční teplota ... (23 ± 5) °C. Použitý simulátor má deklarovanou přesnost měření (0,04 % rdg + 5 μA) při 23 °C ± 5 °C a teplotní závislost 25 ppm/ °C, rozlišení 0,001 mA. Teplota okolí 12 °C, simulace bodu 100 bar.

Chyba údaje měřeného tlaku kalibrovaného čidla E_X je definována:

$$E_X = p_M - p_E - \delta_{ET} - \delta_{TE} + \delta_{RM} + \delta_{TM} \quad (16)$$

p_M ... údaj tlaku kalibrovaného čidla,

p_E ... tlak etalonu,

δ_{ET} ... zdroj nejistoty od etalonu,

δ_{TE} ... zdroj nejistoty od teplotní závislosti etalonu,

δ_{TM} ... zdroj nejistoty od teplotní závislosti měřidla,

δ_{RM} ... zdroj nejistoty od rozlišitelnosti odečtu kalibrovaného tlakoměru.

P2.1 Naměřené hodnoty

Při simulaci byla nastavena na simulátoru hodnota $I_E = 10,4$ mA (odpovídá 100 bar) a na PC byla odečtena hodnota $p_M = 101,2$ bar.

P2.2 Nejistota typu A

Při simulaci je nejistota typu A velmi často nulová, protože simulátory nastavují přesnou hodnotu, která generuje stejnou odezvu kalibrovaného měřidla. Platí i v tomto případě.

P2.3 Standardní nejistoty typu B**P2.3.1 Vliv etalonu (u_{ET})**

Přesnost etalonu je dle specifikace

$$U_I = (0,04 \cdot 100\text{bar}/100) + 0,078 \text{ bar} = 0,118 \text{ bar} \text{ při koeficientu rozšíření } k = 2.$$

(0,078 bar odpovídá 0,004 mA, citlivostní koeficient je dán strmostí převodníku 250/16 bar.mA⁻¹).

$$\text{Z toho} \quad u_{ET} = U_I / k = 0,059 \text{ bar} \quad (17)$$

Drift procesního kalibrátoru a nejistota jeho kalibrace je o řád menší, než deklarovaná přesnost. Z tohoto důvodu je zanedbáváme.

P2.3.2 Teplotní závislost etalonu (u_{TE})

Teplotní závislost etalonu může při odchylce $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ od referenčních podmínek generovat chybu, která odpovídá specifikaci tj.

$$\delta_{TE} = 0,000025 \cdot 6 \cdot 250 = 0,0375 \text{ bar.}$$

Při rovnoměrném rozdělení je

$$u_{TE} = \frac{\delta_{TE}}{\sqrt{3}} = 0,022 \text{ bar} \quad (18)$$

P2.3.3 Teplotní závislost měřidla (u_{TM})

Teplotní závislost měřidla může při odchylce $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ od referenčních podmínek generovat chybu, která odpovídá

$$\delta_{TM} = 0,000050 \cdot 6 \cdot 250 = 0,075 \text{ bar.}$$

Při rovnoměrném rozdělení je

$$u_{TM} = \frac{\delta_{TM}}{\sqrt{3}} = 0,043 \text{ bar} \quad (19)$$

P2.3.4 Vliv odečtu měřidla (u_{RM})

Maximální chybu odečtu uvažujeme rozlišitelnost tj. $\delta_{RM} = 0,1 \text{ bar}$, rozdělení pravděpodobnosti rovnoměrné. Z toho

$$u_{RM} = \frac{0,1}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,029 \text{ bar} \quad (20)$$

ROZPIS NEJISTOT

Veličina	Odhad	Nejistota	Rozdělení pravděpodob.	Citlivostní koeficient c_i	Příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
X_i	x_i	$u(x_i)$			
p_X	101,2 bar	–	–	–	–
p_E	100 bar	–	–	–	–
δ_{ET}	0 bar	0,059 bar	normální	-1	- 0,059 bar

δ_{TE}	0 bar	0,022 bar	rovnoměrné	-1	- 0,022 bar
δ_{TM}	0 bar	0,043 bar	rovnoměrné	1	0,043 bar
δ_{RM}	0 bar	0,029 bar	rovnoměrné	1	0,029 bar
E_X	1,2 bar				0,082 bar

P2.5 Rozšířená nejistota

Počet efektivních stupňů volnosti dle W-S kritéria není stanoven, protože opakovatelnost je nulová. Mezi hodnotami se nevyskytuje dominantní příspěvek k nejistotě. Koeficient rozšíření je tedy $k = 2$.

$$U = k \cdot u = 2 \cdot 0,082 = \mathbf{0,16 \text{ bar}} \quad (21)$$

P2.6 Výsledek měření

Měřená hodnota tlaku činí **101,20 bar \pm 0,16 bar.**

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/2/21. 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.