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

Neprodejné

Kalibrační postup

KP 2.4.1/03/21

SNÍMAČE A PŘEVODNÍKY TLAKU

Praha

Září 2021

Neprodejné

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.

© ÚNMZ, ČMS

1 Předmět kalibrace

Kalibrační postup na kalibraci snímačů tlaku a měřicích převodníků tlaku vychází z ustanovení ČSN EN 60770-1 a dokumentu EA-10/17. Při kalibraci se používá metoda přímého porovnání výstupu kalibrovaného zařízení s „ideálním“ výstupním signálem odpovídajícím hodnotě tlaku, určenou etalonem tlaku, podle statické charakteristiky kalibrovaného zařízení. Etalon tlaku i kalibrovaný snímač, resp. převodník tlaku jsou zatíženy stejným tlakem.

Poslední čtvrtá verze dokumentu [L7] spojila do jediného postupu kalibraci všech základních druhů měřidel tlaku – deformační tlakoměry, číslicové tlakoměry a snímače (převodníky) tlaku. [L7] předpokládá jednotnou metodiku vlastního měření tlakoměrů, která vychází z očekávané nejistoty kalibrace (je tedy závislá na přesnosti měřidla deklarované výrobcem). Obdobným způsobem se přizpůsobují i kalibrační postupy evropských kalibračních laboratoří, viz např. [L9]. Pro lepší názornost, přehlednost a srozumitelnost kalibračních postupů zachovala ČMS samostatné vzorové postupy jednotlivých typů tlakoměrů.

Tento kalibrační postup platí pro kalibraci snímačů a měřicích převodníků tlaku v oblasti přetlaku a podtlaku, absolutního tlaku a diferenčního tlaku. Měřicí rozsah kalibrovaných zařízení je omezen měřicím rozsahem etalonů tlaku kalibrační laboratoře. Kalibrované snímače a měřicí převodníky tlaku jsou v dalším označeny jako DUT.

2 Související normy a metrologické předpisy

TNI 01 0115	Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)	[L1]
ČSN IEC 60050-351 + A1	Mezinárodní elektrotechnický slovník - Část 351: Technologie řízení	[L2]
ČSN EN 60770-1, ed. 2	Měřicí převodníky pro řídicí systémy průmyslových procesů - Část 1: Metody hodnocení vlastností	[L3]
ČSN EN 60770-3, ed. 2	Měřicí převodníky pro řídicí systémy průmyslových procesů - Část 3: Metody hodnocení vlastností inteligentních převodníků	[L4]
ČSN EN 61298-1, ed. 2	Zařízení pro měření a řízení průmyslových procesů - Obecné metody a postupy pro hodnocení vlastností - Část 1: Obecné úvahy	[L5]
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	[L6]
EA-cg 10/17, version 4 9/2019	EA Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers	[L7]
EA-4/02 M: 2013	Vyjadřování nejistot měření při kalibracích	[L8]
Guideline DKD-R 6-1	Calibration of Pressure Gauges	[L9]
ÚTR č. VII/5/18	Program rozvoje metrologie 2018 „Podklad pro průběžné sjednocování výpočtu CMC v akreditovaných kalibračních laboratořích v oboru tlak“, ČIA	[L10]

Neprodejné

Beamex Calibration White Paper	How to calibrate pressure gauges – 20 things you should consider	[L11]
ČSN EN IEC 62828-1	Referenční podmínky a postupy pro zkoušení vysílačů pro měření průmyslových procesů – Část 1: Obecné postupy pro všechny typy vysílačů	[L12]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kvalifikace pracovníků oprávněných provádět kalibraci snímačů a převodníků tlaku je dána příslušným předpisem organizace. Příslušní pracovníci mají být seznámeni a proškoleni s tímto postupem a souvisejícími předpisy. Doporučuje se certifikace odborné způsobilosti těchto pracovníků.

4 Názvosloví, definice

Názvosloví a definice použité v kalibračním postupu jsou obsaženy v příslušných normách (viz čl. 2), zejména v [L1], [L2], [L7] a v dalších publikacích věnovaných metrologické terminologii.

Snímače tlaku převádějí měřený tlak na analogový elektrický signál, který je úměrný aplikovanému tlaku. Podle konstrukce může být výstupní veličinou elektrické napětí, elektrický proud nebo frekvence. Snímače tlaku musí být napájeny ze stabilizovaného zdroje; přesnost stabilizace musí odpovídat očekávané nejistotě měření tlaku.

Měřicí převodníky tlaku skládají se ze snímače tlaku a modulu pro úpravu a zesílení výstupního signálu. Výstupem jsou elektrické unifikované signály podle [L2] nebo digitální formát (např. RS 232). Napájecí zdroje převodníků nemusí být speciálně stabilizovány.

5 Prostředky potřebné pro kalibraci

5.1 Při kalibraci snímačů a převodníků tlaku se používají:

- *referenční a pracovní etalony tlaku,* tj. pístové tlakoměry, kapalinové tlakoměry, indikační tlakoměry s deformačním členem, tlakoměry s analogovou nebo digitální indikací, snímače a převodníky tlaku, kalibrátory tlaku (všechny etalony tlaku kalibrační laboratoře),
- *přístrojové vybavení na měření, resp. zobrazení výstupního signálu,* tj. číslicové voltmetry, ampérmetry, přesné snímací odpory, čítače, nebo vyhodnocovací a indikační jednotky pro převod a zobrazení hodnoty výstupní veličiny převodníku tlaku na číselnou hodnotu,
- *pomocné měřicí přístroje,* které slouží na měření parametrů okolního prostředí, např. teploměr, vlhkoměr, nebo přístroje na měření dalších ovlivňujících veličin,
- *pomocná měřicí zařízení,* tj. zdroje tlakového média, regulátory, redukční ventily, vývěvy, filtry, zdroje napájecího napětí apod.

Neprodejné

5.2 Přístroje použité při kalibraci musí vyhovovat následujícím podmínkám:

- musí mít zaručenou metrologickou návaznost a platný kalibrační list,
- podle [L7] má být v každém zkoušeném tlakovém bodě přesnost měřicího systému použitého při kalibrace, která je vyjádřena ve formě rozšířené nejistoty s pravděpodobností pokrytí 95 %, lepší než očekávaná nejistota DUT. Poměr nejistot by měl být roven nebo větší než 2. Tento požadavek je akceptovatelný pro nejpřesnější měřidla tlaku, pro kalibrace běžných měřidle je preferován poměr 4 (etalon 4x lepší nejistota než DUT). Měřicí systém použitý při kalibraci je tvořen etalonem tlaku, který generuje, resp. měří vstupní tlak a zařízením na měření výstupního signálu DUT.

6 Obecné podmínky kalibrace

Kalibrace snímačů a převodníků tlaku se provádí za následujících referenčních podmínek:

- evropské normy preferují teplotu prostředí (20 ± 2)°C resp. (23 ± 2)°C, dokument [L7] požaduje, aby teplota byla v intervalu (18 až 28)°C a stabilita během kalibrace ležela v rozmezí ±1°C,
- relativní vlhkost vzduchu 20% až 80%,
- atmosférický tlak musí být v rozmezí 86 kPa až 108 kPa.

Referenční podmínky je nutné před zahájením kalibrace, v jejím průběhu a po skončení kontrolovat.

Hodnota napájecího napětí je stanovena výrobcem. Normální napájecí napětí pro převodníky tlaku leží v rozmezí (10 až 30) VDC, obvyklá hodnota je 24 VDC. Napájení snímačů tlaku bývá v rozmezí (5 až 15) VDC, standard je 10 VDC. Kalibrovaný převodník tlaku s unifikovaným výstupním signálem musí být připojen k odporové zátěži v rozsahu stanoveném výrobcem. Obvykle používanou hodnotou je zátěž 250 Ω.

Kalibrované měřidlo musí být chráněno před přímým slunečním světlem. DUT musí být umístěno co nejblíže etalonu tlaku. Rozdíl referenčních úrovní mezi etalonem a DUT musí být minimální (nulový). Pokud ho nelze eliminovat, musí být hodnota tlaku korigována odpovídajícím hydrostatickým tlakem nebo musí být zahrnut do nejistoty. Před kalibrací musíme zapnout napájení snímače i všech elektrických měřidel, abychom dosáhli tepelné rovnováhy s okolím. Doba zapnutí, montážní poloha nebo utahovací moment připojovacích závitů se řídí specifikací výrobce.

7 Rozsah kalibrace

Při kalibraci snímačů / převodníků tlaku se provádějí:

- vnější prohlídka a příprava ke kalibraci (viz čl. 8.1, 8.2),
- měření metrologických parametrů (viz čl. 9).

Neprodejné

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

8.1 Kontrola měřidel dodaných ke kalibraci – vnější prohlídka

Při přebírání DUT ke kalibraci je třeba, aby odpovědný pracovník kalibrační laboratoře posoudil, zda dodaný předmět kalibrace odpovídá údajům uvedeným v objednávce nebo dodacím listu. Současně se provede vnější prohlídka, při které se kontroluje stav elektrického a tlakového připojení, čistota a označení DUT. V případě, že byly zjištěné závažné nesrovnalosti nebo technické nedostatky, DUT se dále nezkouší, dokud se závady ve spolupráci se zákazníkem neodstraní.

8.2 Příprava měřidel ke kalibraci

8.2.1 DUT se umístí do prostředí s teplotou a vlhkostí vzduchu dle čl. 6 na dobu potřebnou pro vyrovnání teplot, přičemž se zohlední především počáteční rozdíl teplot a hmotnost DUT. Doporučená doba je minimálně čtyři hodiny před vlastní kalibrací.

8.2.2 DUT se připraví na kalibraci, v souladu s jeho technickou dokumentací se provede elektrické a tlakové zapojení. Při instalaci DUT je nutné dodržet tyto zásady:

- instalovat DUT co možná nejblíže etalonu tlaku do polohy specifikované výrobcem,
- minimalizovat výškovou odlehlost referenčních úrovní DUT a etalonu,
- použít tlakové propojení vhodné k aplikovanému tlaku, co nejkratší a s dostatečným vnitřním průměrem na zabezpečení přenosu tlakového média,
- zajistit čistotu a těsnost tlakového rozvodu,
- při práci s plynným médiem používat čistý a suchý plyn (např. dusík) o teplotě blízké teplotě okolí, očistit použité tlakové spojení od případné kapaliny uvnitř,
- při práci s kapalným médiem použít kapalinu doporučenou výrobcem, použít čisté tlakové spojení, odvzdušnit tlakový rozvod.

8.2.3 Po zapnutí napájení se musí DUT ustalovat po dobu náběhu. Není-li doba náběhu stanovena v dokumentaci, dobu pro dosažení ustálených teplotních podmínek určí pracovník provádějící kalibraci podle hmotnosti DUT a vyzařované ztrátové energie. Tato doba by neměla být kratší než 30 minut.

8.2.4 Jestliže má měřidlo tlaku více druhů výstupů, musí být se zákazníkem dohodnuto, které výstupy budou kalibrovány.

8.2.5 Před vlastní kalibrací a zaznamenáváním údajů se musí DUT podrobit několika tlakovým cyklům, při kterých se zvyšováním a snižováním tlaku dosáhne obou mezních hodnot rozsahu. Při dosažení horní i dolní meze rozsahu setrváme na hodnotě po dobu nejméně jedné minuty. Podle [L7] provádíme nejméně dva zatěžovací cykly, běžně se DUT zatěžuje 3x dle uvedeného postupu. Po předběžném zatěžování se provede nastavení nulového výstupu DUT, pokud je to umožněno.

Neprojde

9 Postup kalibrace

9.1 Popis kalibrační metodiky

Pravidla Kalibrační postup umožňuje vyhodnocení linearity, hystereze a opakovatelnosti DUT, nebo vyhodnocení základní chyby a chyby hystereze.

Pokud je provedeno nastavení DUT, provádí se kalibrace ve třech následujících krocích:

- kontrola v omezeném počtu tlakových bodů v jednom měřicím cyklu (minimálně tři body, doporučené umístění tlakových bodů je 0 – 50% – 100% vstupního rozpětí) pro stanovení výchozích parametrů DUT,
- nastavení DUT podle specifikace výrobce, s cílem minimalizovat chyby,
- kalibrace v celém měřicím rozsahu podle čl. 9.2, 9.3 nebo 9.4 podle předpokládané přesnosti DUT.

Při kontrole vstupního stavu DUT (počet kontrolovaných bodů) a při nastavení DUT je vhodné zohlednit požadavky uživatele. V případě, že bylo provedeno nastavení DUT, musí se tato skutečnost uvést v kalibračním listě.

Z důvodu vyloučení jakýchkoli účinků v důsledku nestability DUT, se musí každá série měření provádět bez přerušení a v co nejkratším čase potřebném pro dané měření. 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 [L7] odchylku referenčních hodnot ve výši max. 1% kalibrovaného rozsahu měřidla.

Identifikujeme-li při kontrole významnou odchylku od specifikace měřidla nebo od požadavku uživatele (např. rozdíl od lineární závislosti analogového výstupu), provedeme po dohodě s uživatelem nastavení. Může se jednat o mechanické nastavení (např. potenciometry ZERO a SPAN) nebo o SW nastavení včetně uložení kalibračních bodů. Postup nastavení musí být dostupný z technické dokumentace měřidla. Jestliže zákazník pracuje se závislostí vstupní a výstupní veličiny měřidla, je vhodné stanovení této závislosti a její uvedení na kalibrační list (např. lineární závislost standardních snímačů tlaku nebo odmocninová charakteristika u snímačů tlaku používaných k měření průtoku).

Pokud má převodník tlaku funkci nulování, před začátkem každé série se tato funkce použije k nastavení nové nulové hodnoty. Při užití funkce nulování se postupuje dle návodu výrobce. Při nulování v průběhu kalibrace (mezi 1. a 2. sérií nebo 2. a 3. sérií) se do záznamu o měření zaznamenává hodnota tlaku před nulováním – tedy v příslušné sérii měření v posledním tlakovém bodě (při odlehčování) je uvedena hodnota tlaku před nulováním, v prvním bodě následující série je potom uvedená hodnota tlaku po nulování.

Neprodejné

Poznámka: Je nutné důsledně rozlišovat nulování a justáž (nastavení). Justáž mění kalibrační křivku měřidla, nulování (stiskem tlačítka „0“, zadáním příkazu „Zero“ přes komunikátor apod.) kalibrační křivku beze změny jejího tvaru (sklonu…) posune do „nulového“ bodu.

Snímače tlakové diference mají často libovolnou pracovní polohu pouze ve směru osy snímací membrány čidla. Jejich nulování se provádí při zatížení kladné i záporné větve snímače stejnou hodnotou tlaku (obvykle barometrický tlak) a musí být prováděno po každé montáži snímače.

První měření se provádí na první významné hodnotě měřicího rozsahu následující po 0% rozpětí vstupu (např. 20% rozpětí vstupu). Na začátku se generuje vstupní signál rovnající se dolní hodnotě rozsahu a potom se vstupní signál pomalu zvyšuje tak, aby bez jeho překročení dosáhl prvního zkušebního bodu; po přiměřené době pro ustálení se zaznamená hodnota odpovídající vstupnímu a výstupnímu signálu. Potom se vstupní signál pomalu zvyšuje tak, aby dosáhl následujícího zkušebního bodu bez jeho překročení a po přiměřené době pro ustálení se zaznamená odpovídající hodnota výstupního signálu. Tento postup se opakuje pro všechny předem určené hodnoty až do dosažení hodnoty 100% vstupního rozpětí. Po dokončení měření v tomto bodě se vstupní signál pomalu snižuje až do dosažení zkušební hodnoty ležící bezprostředně pod 100% vstupního rozpětí. Potom se pokračuje postupně přes všechny další hodnoty směrem k hodnotě 0% vstupního rozpětí, kterou se daný měřicí cyklus uzavírá. Hodnoty tlaku při kalibraci se nastavují buď na jmenovitou hodnotu etalonu, nebo na jmenovitou hodnotu kalibrovaného měřidla. Hodnoty tlaku se musí nastavovat zespodu, resp. shora podle smyslu zatěžování; dojde-li k přejetí kalibrované hodnoty, musíme se vrátit na bod předešlý a nastavení opakovat.

9.2 Druhy kalibračních metodik snímačů / převodníků tlaku

Všechny předpisy platné pro kalibrace tlaku se nějakým způsobem zabývají způsobem zjišťování metrologických charakteristik měřidel tlaku. Nejčastějším způsobem je stanovení počtu kalibračních bodů, kalibračních cyklů a opakovatelnosti podle deklarované přesnosti měřidla tlaku (normativní přístup) nebo podle očekávané, resp. požadované, nejistoty měření (přístup dle L7).

9.2.1 Základní kalibrační postup

Při kalibraci DUT s předpokládanou přesností $\delta > 1\%$ z rozpětí výstupního signálu nebo při požadované nejistotě měření 0,2% měřicího rozpětí a horší se kalibrace provádí minimálně v 6 tlakových bodech při stoupajícím tlaku a ve stejných tlakových bodech při klesajícím tlaku. Zkoušené tlakové body musí být rozloženy v celém tlakovém rozsahu, musí zahrnovat dolní a horní hodnotu rozsahu nebo hodnoty jim blízké (v rozmezí 10% rozpětí). Tlakové body volíme obvykle v řadě 0 – 20% – 40% – 60% – 80% – 100% vstupního rozpětí. Těchto bodů se dosahuje postupným zvyšováním tlaku a poté snižováním tlaku. Zaznamenávají se hodnoty indikované kalibrovaným tlakoměrem a etalonem pro každý tlakový bod pro jeden průchod celým rozsahem v každém směru.

Opakovatelnost měření se u těchto měřidel vyhodnotí tím způsobem, že jednu základní sérii měření o min. šesti bodech rozšíříme o dvě zkrácené série. V těchto doplňkových sériích měříme jen ve 2 bodech při zatěžování a to při 0% a cca 50% (40% až 60%) měřicího rozpětí tlakoměru. Opakovatelnost se vyhodnocuje ve formě nejistoty typu A pro výše uvedené tlakové body. Ma-

Reprodukce

ximální hodnota této nejistoty se pak použije jako hodnota charakteristická pro celý rozsah. Rozšířená nejistota měření uvedená v kalibračním listu (pro $k = 2$) při základním kalibračním postupu nesmí být menší než 0,2% měřicího rozpětí kalibrovaného měřidla.

9.2.2 Standardní kalibrační postup

Používá se při kalibraci DUT s předpokládanou přesností ($0,1 < \delta \leq 1$)% z rozpětí výstupního signálu nebo při požadované nejistotě měření vyšší než 0,05% měřicího rozpětí a menší než 0,2% měřicího rozpětí. Kalibrace se provádí minimálně v jedenácti tlakových bodech, rovnoměrně rozložených v celém rozsahu, zahrnujících dolní a horní hodnotu rozsahu nebo hodnoty jim blízké (v rozmezí 10% rozpětí). Těchto bodů se dosahuje postupným zvyšováním tlaku a poté snižováním tlaku. Zaznamenávají se hodnoty indikované kalibrovaným tlakoměrem a etalonem pro každý tlakový bod pro jeden průchod celým rozsahem v každém směru.

Opakovatelnost měření se u těchto měřidel vyhodnotí tím způsobem, že jednu základní sérii měření rozšíříme o dvě zkrácené série. V těchto doplňkových sériích měříme jen ve 4 bodech při zatěžování a to při 0%, cca 20%, cca 50% a cca 80% měřicího rozpětí tlakoměru. 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 $k = 2$) při standardním kalibračním postupu nesmí být menší než 0,05% měřicího rozpětí kalibrovaného měřidla.

9.2.3 Rozšířený kalibrační postup

Používá se při kalibraci DUT s předpokládanou přesností $\delta \leq 0,1$% z rozpětí výstupního signálu nebo při požadované nejistotě měření menší než 0,05%. Kalibrace se provádí minimálně v jedenácti tlakových bodech, rovnoměrně rozložených v celém rozsahu, zahrnujících dolní a horní hodnotu rozsahu nebo hodnoty jim blízké (v rozmezí 10% rozpětí). Těchto bodů se dosahuje postupným zvyšováním tlaku a poté snižováním tlaku. Zaznamenávají se hodnoty indikované kalibrovaným tlakoměrem a etalonem pro každý tlakový bod pro tři průchody celým rozsahem v každém směru (tři kompletní série měření). Opakovatelnost se vyhodnocuje ve formě nejistoty typu A pro každý tlakový bod.

9.2.4 Postupy dle evropských norem

Poněkud jiný přístup ke zkoušení elektronických měřidle mají [L3 až L6 + L12]. Počet kalibračních bodů a měřicích cyklů je odvozen od typu zkoušky, ke které je kalibrace použita. Zkoušky jsou rozděleny následovně:

Zjišťování přesnosti (výkonnosti) převodníků – kalibrace je prováděna v 6 bodech (po 20% měřicího rozpětí), počet měřicích cyklů je 3 nebo 5 [L6] resp. 3 až 5 [L12].

Typová zkouška převodníků – komplexní test měřidla před uvedením do oběhu; kalibrace je prováděna v 11 bodech (po 10% měřicího rozpětí), počet měřicích cyklů je 3 nebo 5 [L6].

Nerodáme

Kontrolní nebo přejímací test – kalibrace je prováděna v 5 bodech (po 25% měřicího rozpětí) v jediném měřicím cyklu.

Tyto postupy vyžadují i grafické znázornění průběhu zjištěných chyb snímače v obou smyslech zatěžování [L3]. Volba metodiky závisí na konkrétní laboratoři a měla by respektovat potřeby zákazníků při současné ekonomické dostupnosti. U akreditovaných laboratoří se očekává přístup především podle [L7].

9.3 Zpracování naměřených údajů

Výsledky kalibrace mají být uváděny ve formě, která umožňuje uživateli DUT jednoduché posouzení provozuschopnosti objektu kalibrace.

Nezávisle od přijatého modelu, tj. přijaté polynomické funkce, kterou lze popsat závislost výstupního signálu DUT na vstupním tlaku, se výsledky kalibrace uvádí ve tvaru podle následující tabulky.

referenční tlak 1)	průměrná hodnota výstup. signálu DUT 2)	směrodatná odchylka výstup. signálu DUT 3)	výstup. signál podle přijatého modelu 4)	chyba snímače, resp. převodníku tlaku 5)	nejistota měření 6)

1) referenční tlak, reprezentovaný údajem etalonového tlakoměru;

2) průměrná hodnota výstupního signálu kalibrovaného snímače, resp. převodníku tlaku ze tří opakovaných měření, v případě, že nebyla provedena opakovaná měření, uvádí se naměřená hodnota výstupního signálu. U každého měřicího bodu se musí z odečtených údajů získaných v jednotlivých po sobě jdoucích měřicích cyklech stanovit střední hodnoty pro vzestupný i sestupný směr a z těchto hodnot je potom možné stanovit střední hodnotu v daném tlakovém bodu;

3) směrodatná odchylka výstupního signálu, vypočítaná ze tří opakovaných měření, v případě kalibrace podle bodu 9.2.1 a 9.2.2 se uvádí maximální hodnota směrodatné odchylky zjištěná ve vybraných tlakových bodech. Uvedená směrodatná odchylka se uvádí pouze v případě, kdy opakovatelnost měření je významná, nebo na přání zákazníka;

4) výstupní signál vypočítaný podle přijatého modelu – podle zvolené statické charakteristiky; tuto charakteristiku je možné stanovit regresní analýzou výsledků kalibrace metodou nejmenších čtverců ve tvaru polynomické funkce

$$A(p) = c_0 + c_1 \cdot p + c_2 \cdot p^2 + c_3 \cdot p^3 + \ldots \qquad (1)$$

Neprodejné

Kde: $A(p)$ výstupní signál kalibrovaného snímače/převodníku tlaku,
p vstupní tlak,
c_i koeficienty.

Ve většině případů polynom 3. řádu postačuje pro popis závislosti střední hodnoty výstupního signálu A na vstupním tlaku p.

V běžné praxi se vychází z charakteristiky uváděné výrobcem. Nejčastěji jsou používány převodníky s lineární převodovou funkcí. Pro tyto měřicí převodníky platí:

$$\frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \tag{2}$$

Kde: p hodnota měřeného tlaku,
I hodnota výstupního signálu odpovídající hodnotě tlaku p,
$I_{\min}$ minimální hodnota rozsahu výstupního signálu, např. 4 mA,
$I_{\max}$ maximální hodnota rozsahu výstupního signálu, např. 20 mA,
$p_{\min}$ hodnota měřeného tlaku odpovídající hodnotě signálu $I_{\min}$,
$p_{\max}$ hodnota měřeného tlaku odpovídající hodnotě signálu $I_{\max}$.

Podle vztahu (2) lze vyjádřit měřený tlak p nebo výstupní signál I

$$p = p_{\min} + (p_{\max} - p_{\min}) \cdot \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \tag{3}$$

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \tag{4}$$

[5] chyba snímače/převodníku tlaku, tj. rozdíl mezi pozorovanou hodnotou výstupního signálu a hodnotou výstupního signálu vypočítanou podle statické charakteristiky v daném tlakovém bodě, vyjádřená obvykle v procentech ideálního rozpětí výstupního signálu;

[6] rozšířená nejistota měření vyjádřená obvykle v procentech ideálního rozpětí výstupního signálu.

9.4 Stanovení nejistoty měření

9.4.1 Všeobecně

Při rozboru nejistot je potřeba uvažovat následující zdroje nejistot a odpovídající nejistoty:

- standardní nejistota hodnoty tlaku měřeného, resp. generovaného etalonovým tlakoměrem u_{et},
- standardní nejistota stanovení výstupního signálu DUT u_v,
- standardní nejistota způsobená nestabilitou nulového výstupu a jeho nulováním u_n,
- standardní nejistota způsobená konečným rozlišením měřidla výstupního signálu u_d,
- standardní nejistota údaje DUT u_t způsobená odchylkou teploty okolí od referenční teploty,

Neprodejné

- standardní nejistota u_{nap} způsobená napájením (významné především při kalibraci snímačů tlaku),
- standardní nejistota u_{hyst} způsobená hysterezí DUT (započítává se tehdy, je-li výsledkem kalibrace průměrná hodnota z údajů při zvyšování a snižovaní tlaku, vyhodnocujeme-li každý smysl zátěže samostatně, uvádí se hystereze nejčastěji jako měřená hodnota na kalibrační list),
- standardní nejistota u_h charakterizující nekorigovanou odlehlost referenčních úrovní etalonového tlakoměru a DUT,
- standardní nejistota u_{od} charakterizující chybu způsobenou zapojením oddělovače tlakového média, filtru apod.

Model kalibrace (chyba DUT v j-tém tlakovém bodě)

$$Ex = I_{klj} - I_{etj} - \delta_{etj} - \delta_{vj} + \delta_{nj} + \delta_{dj} + \delta_{tj} + \delta_{napj} + \delta_{hystj} + \delta_{hj} + \delta_{odj} \quad (5)$$

Kde: I_{klj} hodnota výstupního signálu DUT,
I_{etj} hodnota „ideálního“ výstupního signálu odpovídajícího hodnotě tlaku stanovené etalonem tlaku,
δ_{etj} zdroj nejistoty od etalonu tlaku,
δ_{vj} zdroj nejistoty od měřidla výstupního signálu DUT (voltmetr, ampérmetr, rezistor apod.),
δ_{nj} zdroj nejistoty od vlivu nulování,
δ_{dj} zdroj nejistoty od rozlišení indikátoru zobrazujícího výstupní hodnotu DUT,
δ_{tj} zdroj nejistoty od teplotní závislostí DUT,
δ_{napj} zdroj nejistoty od napájením DUT,
δ_{hystj} zdroj nejistoty způsobený hysterezí DUT,
δ_{hj} zdroj nejistoty způsobený odlehlostí referenčních úrovní etalonu tlaku a DUT,
δ_{odj} zdroj nejistoty způsobený necitlivostí oddělovače tlakového média, filtru apod.

9.4.2 Nejistota typu A
Standardní nejistota stanovená metodou typu A (opakovatelnost) dle [L8] je dána vztahem

$$u_{Aj} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^{n} \left(I_{ij} - I_j\right)^2} \quad (6)$$

Kde: I_{ij} je i-tý údaj výstupního signálu DUT v j-tém tlakovém bodě,
I_j aritmetický průměr výstupního signálu DUT v j-tém tlakovém bodě,
n počet měření.

Pokud byla provedena kalibrace ve třech měřicích cyklech standardní nejistotu u_A vypočítáme podle vztahu (6) v každém kalibrovaném bodě. V případě, že opakované měření bylo provedeno pouze v omezeném počtu tlakových bodů, největší hodnota u_A je považována za typickou pro všechny kalibrované body.

Neprodejné

Přístup ke stanovení opakovatelnosti podle [L7]: Jestliže neprovádíme mezi jednotlivými sériemi měření demontáž a zpětnou montáž kalibrovaného tlakoměru, určuje se opakovatelnost b' z rozdílu mezi odchylkami naměřenými v odpovídajících sériích měření (označeny číselně), korigovanými hodnotou nulového výstupu (nulový index); index ***j*** udává pořadovou hodnotu měřeného tlaku v sérii – viz vzorec 7.

Pro počet opakovaných měření menší než 10 je potřeba posoudit spolehlivost nejistoty u_A při stanovení koeficientu rozšíření.

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

$$b'_{dn,j} = \max\{|(p_{ind,4,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ind,2,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,4,j} - p_{ref,3,0}) + (p_{ref,2,j} - p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,6,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,2,j} - p_{ind,1,0}) - (p_{ref,6,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,2,j} - p_{ref,1,0})|, |(p_{ind,6,j} - p_{ind,5,0}) - (p_{ind,4,j} - p_{ind,3,0}) - (p_{ref,6,j} - p_{ref,5,0}) + (p_{ref,4,j} - p_{ref,3,0})|\} \quad (7)$$

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

9.4.3 Nejistota stanovená metodou typu B

9.4.3.1 Etalonový tlakoměr u_{et}

Standardní nejistotu hodnoty tlaku měřeného/generovaného etalonovým tlakoměrem určíme na základě kalibračního certifikátu etalonového tlakoměru vydělením příslušné rozšířené nejistoty koeficientem rozšíření a stanovením vlivu jeho dlouhodobé stability (driftu) na nejistotu, nebo vydělením největší dovolené chyby √3.

9.4.3.2 Výstupní signál DUT u_v

Nejistotu hodnoty výstupního signálu stanovíme podle typu výstupního signálu a použité měřicí metody (přímé měření, nepřímé měření výstupního signálu, odečet číslicové hodnoty). V případě analogového signálu (napětí, proud, …) vycházíme z mezních chyb použitých měřidel. Standardní nejistotu vypočítáme vydělením největší dovolené chyby √3.

Poznámka: při stanovování nejistoty etalonu, multimetru, etalonového odporu apod. včetně jejich dlouhodobé stability můžeme vycházet z výsledků opakovaných kalibrací daného měřidla, resp. nejistot kalibrací, specifikace měřidla a driftu měřidla několika způsoby:

a) Pokud z opakovaných kalibrací vyplývá, že měřidlo je vždy v cca 30% specifikace a není justováno, pak lze do nejistot uvažovat jeho skutečný drift (nebo podíl specifikace) + nejistoty kalibrace.
b) Pokud měřidlo při kalibracích osciluje mezi cca 30% a 80% specifikace, pak do výpočtu nejistot uvažujeme celou specifikaci a nejistotu kalibrace.
c) Pokud má měřidlo při kalibraci chybu nad 80% specifikace a je justováno, pak je nutné zkrátit rekalibrační interval měřidla.

9.4.3.3 Vliv nulování u_n

Bylo-li měřidlo mezi jednotlivými sériemi měření nulováno, použije se pro stanovení nejistoty maximální hodnota rozdílů indikace před a po nulování (resp. na konci a začátku série měření) podle vztahu:

Neprodejné

$$f_0 = \max \begin{pmatrix} |p_{o1,0} - p_{z1,0} - (p_{e\,o,1} - p_{e\,z,1})| \\ |p_{o2,0} - p_{z2,0} - (p_{e\,o,2} - p_{e\,z,2})| \\ |p_{o3,0} - p_{z3,0} - (p_{e\,o,3} - p_{e\,z,3})| \end{pmatrix}, \text{ kde} \qquad (8)$$

$p_{oi,0}$ je indikace měřidla v prvním tlakovém bodě v *i*. sérii při zatěžování, ihned po vynulování);
$p_{zi,0}$ je indikace měřidla v posledním tlakovém bodě v *i*. sérii při odlehčování, před vynulováním
$p_{e\,z,i}$, $p_{e\,o,i}$ jsou hodnoty tlaku etalonu v prvním tlakovém bodě v *i*. sérii při zatěžování, resp. v posledním tlakovém bodě v *i*. sérii při odlehčování.

9.4.3.4 Vliv rozlišení indikátoru DUT u_d

Odečet výstupního údaje je u převodníků a snímačů tlaku prováděn na multimetrech v příslušném měřicím rozsahu výstupní veličiny. Rozlišení odpovídá kroku *r*, se kterým se mění indikace výstupního signálu (většinou odpovídá poslední platné číslici výstupního signálu). Jako odpovídající složka nejistoty je uvažována poloviční hodnota *r/2* s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti (dělení √3).

9.4.3.5 Teplotní chyba DUT u_t

Nejistotu u_t určíme vydělením příslušné teplotní chyby √3. Ve většině případů je tato chyba v teplotních podmínkách podle čl. 6 (referenční rozmezí) zanedbatelná.

9.4.3.6 Podmínky napájení u_{nap}

Standardní nejistotu u_{nap} způsobenou odchylkou napájecího napětí od referenčních hodnot předepsaných výrobcem určíme vydělením příslušné chyby √3. Při kalibraci snímačů a převodníků tlaku se používají stabilizované napájecí zdroje. Zvýšenou pozornost je třeba věnovat jejímu odhadu při kalibraci snímačů tlaku.

9.4.3.7 Vliv hystereze DUT u_{hyst}

Pokud jsou výsledky kalibrace uváděné ve formě údajů při zvyšování a snižování tlaku, nejistota vyplývající z chyby hystereze u_{hyst} se do výsledné nejistoty nezapočítává. Když jsou výsledky prezentované ve formě průměrné hodnoty chyby DUT určené z obou způsobů zatěžování, do vztahu pro výpočet standardní kombinované nejistoty se přidá složka u_{hyst}. Standardní nejistota vyplývající z chyby hystereze se vypočítá podle vztahu

$$u_{hyst} = \frac{\square}{(2 \cdot \sqrt{3})} \qquad \text{kde } h \text{ je chyba hystereze DUT.} \qquad (9)$$

Podle [L7] se hystereze h_j určuje jako rozdíl mezi odpovídajícími odchylkami výstupních hodnot naměřených při stoupajícím a klesajícím tlaku, korigovaných hodnotou nulového výstupu:

$$h_j = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{n} \left| \left(p_{\text{ind},2m,j} - p_{\text{ind},2m-1,0}\right) - \left(p_{\text{ind},2m-1,j} - p_{\text{ind},2m-1,0}\right) - \left(p_{\text{ref},2m,j} - p_{\text{ref},2m-1,0}\right) + \left(p_{\text{ref},2m-1,j} - p_{\text{ref},2m-1,0}\right) \right| \qquad (10)$$

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

Neprodejné

9.4.3.8 Odlehlost referenčních úrovní u_h
Standardní nejistota u_h, charakterizující nejistotu vyplývající z nekorigované odlehlosti referenčních úrovní etalonového tlakoměru a DUT je

$$u_h = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{\sqrt{3}} \qquad (11)$$

kde ρ je hustota tlakového média;
g hodnota místního tíhového zrychlení;
h nekorigovaná odlehlost referenčních úrovní; když byla provedena korekce odlehlosti jedná se o chybu stanovení odlehlosti referenčních úrovní.

Poznámka: Při kalibraci plynným médiem (kromě tlakoměrů absolutního a malého tlaku) je u_h ve většině případů zanedbatelná.

9.4.3.9 Vliv oddělovače média, filtru apod. u_{od}
Standardní nejistota u_{od}, charakterizující nejistotu vyplývající z necitlivosti oddělovače tlakového média je

$$u_{od} = \frac{\delta_{od}}{\sqrt{3}} \qquad (12)$$

kde δ_{odd} je chyba způsobená zapojeným oddělovačem médií.

9.4.4 Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovanou standardní nejistotu měření v j-tém tlakovém bodě získáme sloučením výše uvedených standardních nejistot, přičemž předpokládáme, že odhady vstupních veličin nejsou korelované (Gaussův zákon šíření nejistot).

Standardní nejistoty vstupních veličin uvedených v čl. 9.4.3 je nutno přepočítat na standardní nejistoty výstupní veličiny (všechny složky nejistoty musí být přepočteny na stejnou veličinu – tlak, výstupní elektrický signál nebo relativní vyjádření). Příspěvky k nejistotě od jednotlivých vlivů jsou potom dány součinem parciální derivace funkce modelu kalibrace podle příslušné vstupní veličiny x_a a standardní nejistoty u_a. Uvedená parciální derivace je označována jako citlivostní koeficient.

$$u(\delta_j) = \sqrt{\sum_a \left(\frac{\partial \delta_j}{\partial x_{aj}} \cdot u_{aj} \right)^2} \qquad (13)$$

Bližší vysvětlení uvádí příklad, viz čl. 14. Index *j* značí, že se jedná o nejistotu v j-tém tlakovém bodě.

9.4.5 Rozšířená nejistota

Rozšířená nejistota $U(\delta_j)$ v j-tém tlakovém bodě je daná vztahem

Neprodejné

$$U(\delta_j) = k \cdot u(\delta_j) \qquad (14)$$

kde k je koeficient rozšíření odpovídající pravděpodobnosti pokrytí asi 95%. Pro počet měření $n \geq 10$ při stanovení nejistoty metodou typu A předpokládáme normální rozdělení rozšířené nejistoty a koeficient rozšíření $k = 2$. Pro počet měření $n < 10$ předpokládáme t-rozdělení. Koeficient rozšíření stanovíme podle tabulky č. 1.

Tabulka č. 1: Stanovení koeficientu rozšíření podle EA 4/02 M pro $n < 10$

ν_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,32	2,28

ν_{eff}	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
k	2,25	2,23	2,21	2,20	2,18	2,17	2,16	2,15	2,14	2,13

ν_{eff}	25	30	35	40	45	50	∞
k	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,00

Odhad efektivních stupňů volnosti ν_{eff} provedeme podle Welch-Satterthwaitova vztahu

$$\nu_{eff} = \frac{u^4(\delta_j)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4(\delta_j)}{\nu_i}} \qquad (15a)$$

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

Při kalibraci snímačů/převodníků tlaku ($n = 3$) je možné vztah (15a) vyjádřit ve tvaru

$$\nu_{eff} = \frac{2 \cdot u^4(\delta_j)}{u_A^4(\delta_j)} \qquad (15b)$$

Poznámka: V průběhu výpočtu nejistot jsou všechny složky nejistot vyjádřené v jednotkách výstupního signálu (napětí, proud, …). V závěru výpočtu se výsledné nejistoty vyjádří v procentech rozpětí výstupního signálu DUT, nebo v souladu s konkrétní specifikací výrobce.

Neproda

10 Vyhodnocení kalibrace

10.1 Postup vyhodnocení

Na základě vyhodnocené základní chyby DUT, resp. stanovené linearity, hystereze opakovatelnosti a příslušné rozšířené nejistoty pracovník provádějící kalibraci může rozhodnout o výsledku kalibrace. Vyhodnocení shody se specifikací se neprovádí, pokud není uvedena přesnost DUT 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.

10.2 Postup v případě neshody

Jestliže je základní chyba nebo chyba hystereze větší než dovolená chyba, způsob označení měřidla se dohodne se zákazníkem.

11 Kalibrační list, označení měřidla

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,

Neprodejné

h) určení specifikace uplatněné při kalibraci nebo označení kalibračního postupu (v tomto případě KP 2.4.1/03/21) 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 kalibrovaný DUT opatří kalibrační značkou – štítkem, na němž je uvedeno datum provedené kalibrace a identifikace kalibrační laboratoře.

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

Neprodejné

12 Péče o kalibrační postup

Originál kalibračního postupu je uložen u jeho zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku.

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

Neprodejné

14 Stanovení nejistoty měření (příklad výpočtu)

Kalibrovaný měřicí převodník tlaku:

Měřicí rozsah	(0 až 7000) kPa
Výstupní signál	4 mA až 20 mA, lineární převodová charakteristika
Referenční teplota	20°C
Přesnost (linearita, hystereze, opakovatelnost)	0,075 %

Podmínky při měření:

Teplota prostředí	20°C ±2°C

Rozdíl referenčních úrovní etalonového tlakoměru a DUT je zanedbatelný. Etalonový tlakoměr a kalibrovaný převodník tlaku jsou zapojeny přímo – bez oddělovacích membrán a filtrů. Použité tlakové médium – dusík.

Použitý etalon tlaku a zařízení na měření výstupního signálu:
Vstupní tlak je generovaný pístovým tlakoměrem s měřicím rozsahem do 20 MPa s největší dovolenou chybou generovaného tlaku $\delta_{et} \leq \pm 0{,}01\%$ z měřené hodnoty v základním rozsahu, tj. od 10 % do 100 % měřicího rozsahu a $\delta_{et} \leq \pm 0{,}2$ kPa v doplňkovém rozsahu, tj. do 10% měřicího rozsahu pístového tlakoměru.

Výstupní proud se měří pomocí číslicového stejnosměrného voltmetru a přesného odporu. Při stanovení nejistoty měření výstupního signálu vycházíme ze specifikace výrobce použitých měřidel potvrzených jejich kalibrací. Použitý číslicový multimetr má toleranci v daných podmínkách měření:

$\delta_U \leq \pm$ (0,0040% rdg + 0,0007% fs) v rozsahu do 1 V
$\delta_U \leq \pm$ (0,0035% rdg + 0,0005% fs) v rozsahu do 10 V

kde rdg je měřená hodnota a fs horní mez měřicího rozsahu.

Odchylka skutečné hodnoty snímacího odporu δ_R od jmenovité hodnoty 100 Ω v daných podmínkách měření je menší než 0,01%.

Neprodejné

Tabulka č. 2 - Naměřené údaje a chyba zkoušeného převodníku tlaku

Vstupní tlak	Výstup. signál - ideální	Výstupní signál – skutečný						Střední chyba	Střední chyba	Střední chyba
		1. série		2. série		3. série				
		nahoru	dolů	nahoru	dolů	nahoru	dolů	nahoru	dolů	
kPa	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	%	%	%
0,000	4,0000	4,0033	4,0033	4,0033	4,0034	4,0033	4,0034	0,021	0,021	0,021
2000,397	8,5723	8,5701	8,5720	8,5701	8,5721	8,5704	8,5722	- 0,013	- 0,001	- 0,007
4000,794	13,1447	13,1404	13,1439	13,1421	13,1439	13,1420	13,1441	- 0,020	- 0,004	- 0,012
5000,993	15,4308	15,4270	15,4291	15,4274	15,4294	15,4275	15,4293	- 0,022	- 0,010	- 0,016
6001,191	17,7170	17,7126	17,7146	17,7131	17,7148	17,7144	17,7149	- 0,023	- 0,014	- 0,018
7001,390	20,0032	20,0001	20,0001	20,0001	20,0001	20,0002	20,0002	- 0,019	- 0,019	- 0,019

Charakteristika přenosu zkoušeného převodníku tlaku daná výrobcem je lineární závislost popsaná vztahem

$$I_{idj} = 4 + \frac{16}{7000} \cdot p_j \qquad (16)$$

kde I_{idj} je hodnota výstupního proudu převodníku tlaku podle charakteristiky přenosu v j-tém tlakovém bodě,
p_j hodnota tlaku reprezentovaná údajem použitého etalonu tlaku v j-tém tlakovém bodě.

Hodnoty proudu jsou v mA, hodnoty tlaku se zadávají v kPa. Hodnota 16 mA uvedená v čitateli zlomku představuje rozpětí výstupního signálu, hodnota 7000 kPa uvedená ve jmenovateli zlomku představuje rozpětí vstupního tlaku.

Výstupní proud je měřený nepřímo jako úbytek napětí na snímacím odporu 100 Ω. Hodnota výstupního proudu I_j v j-tém tlakovém bodě je stanovená podle Ohmova zákona

$$I_j = \frac{U_j}{R} \qquad (17)$$

kde U_j je hodnota napětí na snímacím odporu v j-tém tlakovém bodě;
R hodnota snímacího odporu.

Model kalibrace (chyba převodníku tlaku v j-tém tlakovém bodě):

$$\delta_j = I_{klj} - I_{etj} \qquad (18a)$$

Oproti vztahu (5) byla zanedbaná chyba způsobená odečtem výstupního údaje DUT, chyba nulováním (nebylo prováděno), odchylka teploty okolí a napájecího napětí od referenčních hodnot, chyba odlehlosti referenčních úrovní a chyba způsobená oddělovačem médií. Výsledky budou

Neprodejné

prezentovány pro zvyšování a snižování tlaku, proto se do nejistoty nezahrnula ani chyba hystereze.

$$\delta_j = \frac{U_j}{R} - (4 + \frac{16}{7000} \cdot p_j) \quad (18b)$$

Stanovení standardních nejistot vstupních veličin

Standardní nejistota stanovená metodou typu A vyplývá z opakovaných měření napětí na snímacím odporu, vypočítá se podle vztahu (6).

Standardní nejistota hodnoty napětí u_U je

$$u_U = \frac{\delta_U}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

Standardní nejistota hodnoty odporu u_R je

$$u_R = \frac{\delta_R}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

Standardní nejistota hodnoty tlaku u_{et} je

$$u_{et} = \frac{\delta_{et}}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

Nejistoty jsou stanoveny ze specifikací měřidel, které zahrnují nejistotu kalibrace i drift.

Stanovení citlivostních koeficientů:

Vliv nejistot u_{et}, u_U *a* u_R na nejistotu stanovení chyby převodníku tlaku vyjadřují citlivostní koeficienty c_{et}, c_U *a* c_R. Tyto jsou dané parciální derivací rovnice (16b):

$$c_{et} = \frac{\partial \delta}{\partial p} = -\frac{16}{7000} \quad (22)$$

$$c_U = \frac{\partial \delta}{\partial U} = \frac{1}{R} \quad (23)$$

$$c_R = \frac{\partial \delta}{\partial R} = -\frac{U}{R^2} \quad (24)$$

Standardní nejistota hodnoty chyby převodníku tlaku vyplývající z nejistoty etalonu tlaku je

$$u_{et}(\delta) = c_{et} \cdot u_{et} \quad (25)$$

z nejistoty číslicového voltmetru je

$$u_U(\delta) = c_U \cdot u_U \quad (26)$$

z nejistoty hodnoty snímacího odporu je

$$u_R(\delta) = c_R \cdot u_R \quad (27)$$

Neprodejné

Standardní nejistoty $u_{et}(\delta)$, $u_U(\delta)$, $u_R(\delta)$ mají rozměr v jednotkách výstupního signálu, v našem případě mA. Standardní nejistota u_A je vyjádřená ve voltech. Vynásobením citlivostním koeficientem c_U jí převedeme na hodnotu $u_A(\delta)$ v mA. Do dalšího výpočtu použijeme maximální hodnotu u_A v daném tlakovém bodě z hodnot u_A při zvyšování a snižování tlaku. Znaménko mínus v citlivostních koeficientech se dále neuvádí vzhledem na charakter nejistoty (nejistota – interval).

Tabulka č. 3 - Výpočet nejistot, 1. část

u_A	u_A	$u_A(\delta)$	u_{et}	$u_{et}(\delta)$	napětí	u_U	$u_U(\delta)$
nahoru	dolů				průměr		
V	V	mA	Pa	mA	V	V	mA
0,000 000	0,000 003	0,000 03	115	0,000 26	0,400 337	0,000 013	0,000 13
0,000 010	0,000 006	0,000 10	115	0,000 26	0,857 020	0,000 024	0,000 24
0,000 055	0,000 007	0,000 55	231	0,000 53	1,314 150	0,000 055	0,000 55
0,000 015	0,000 009	0,000 15	289	0,000 66	1,542 730	0,000 060	0,000 60
0,000 054	0,000 009	0,000 54	346	0,000 79	1,771 337	0,000 065	0,000 65
0,000 003	0,000 003	0,000 03	404	0,000 92	2,000 013	0,000 069	0,000 69

Tabulka č. 4 - Výpočet nejistot, 2. část

u_R	$u_R(\delta)$	$u(\delta)$	ν_{eff}	k	k	$U(\delta)$	$U(\delta)$
					max		
Ω	mA	mA				mA	%
0,005 77	0,000 00	0,000 30	12668	2,00	2,16	0,000 65	0,004
0,005 77	0,000 00	0,000 37	373	2,05	2,16	0,000 80	0,005
0,005 77	0,000 01	0,000 94	17	2,16	2,16	0,002 03	0,013
0,005 77	0,000 01	0,000 91	2467	2,00	2,16	0,001 97	0,012
0,005 77	0,000 01	0,001 15	43	2,06	2,16	0,002 48	0,016
0,005 77	0,000 01	0,001 16	2886921	2,00	2,16	0,002 51	0,016

Výsledky kalibrace prezentované v kalibračním listu jsou uvedeny v tabulce 5. V tabulce jsou uvedené hodnoty chyby kalibrovaného převodníku tlaku při zvyšovaní a snižovaní tlaku. Proto do uvedené rozšířené nejistoty není zahrnuta složka nejistoty vyplývající z chyby hystereze.

Tabulka č. 5 – Výsledky kalibrace

údaj	výstupní signál	výstupní signál skutečný		chyba		nejistota
etalonu	ideální	nahoru	dolů	nahoru	dolů	
kPa	mA	mA	mA	%	%	%
0,000	4,000	4,003	4,003	0,021	0,021	0,004
2000,397	8,572	8,570	8,572	- 0,013	- 0,001	0,005
4000,794	13,145	13,142	13,144	- 0,020	- 0,004	0,013
5000,993	15,431	15,427	15,429	- 0,022	- 0,010	0,013
6001,191	17,717	17,713	17,715	- 0,023	- 0,014	0,016
7001,390	20,003	20,000	20,000	- 0,019	- 0,019	0,016

Neprodejné

Největší naměřená chyba je 0,023%, hystereze je 0,015%, největší absolutní hodnota chyby zvětšená o příslušnou rozšířenou nejistotu je 0,039%. Při použití nejistoty měření jako ochranného pásma pro stanovení shody se specifikací převodník **vyhovuje** specifikaci výrobce.

Rozšířená nejistota měření je vyjádřena jako standardní nejistota měření vynásobená koeficientem rozšíření k = 2,16; která při t-rozdělení a efektivních stupních volnosti ν_{eff} = 17 odpovídá konfidenční pravděpodobnosti pokrytí asi 95%. Standardní nejistota měření byla stanovena v souladu s dokumentem EA-4/02 M.

Tabulka č. 6 - Bilance nejistot pro zkušební bod 7000 kPa

veličina X_i	odhad x_i	standardní nejistota $u(x_i)$	rozdělení pravděpod.	citlivostní koeficient c_i	příspěvek nejistoty $u_i(\delta)$
U	2,000 013 V	3,3E-06 V	normální	1,00E-02 Ω^{-1}	3,3E-05 mA
U	2,000 013 V	6,9E-05 V	rovnoměrné	1,00E-02 Ω^{-1}	6,9E-04 mA
R	100 Ω	5,8E-03 Ω	rovnoměrné	-2,00E-04 V·Ω^{-2}	-1,2E-05 mA
p	7001,390 kPa	4,0E-01 kPa	rovnoměrné	-2,29E-03 mA·kPa^{-1}	-9,2E-04 mA
δ	-0,0030 mA				1,2E-03 mA

Naměřená chyba v tlakovém bodě 7000 kPa včetně nejistoty měření:

δ = – 0,0030 mA ± 0,0025 mA,

což je možné vyjádřit v procentech z rozpětí výstupního signálu jako

δ = – 0,019% ± 0,016%.

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.

Neprodejné

Změny proti předchozímu vydání z roku 2008

Kalibrační postup byl upraven podle aktualizovaného dokumentu [L7] a aktualizovaných norem dle kap. 2. Příklad výpočtu odpovídá platnému dokumentu EA 4/02 M, aktualizována byla tabulka koeficientů rozšíření v závislosti na efektivních stupních volnosti a v souladu s ní byla přepočtena rozšířená nejistota měření. Prohlášení o shodě s metrologickou specifikací bylo aktualizováno podle dokumentu ILAC-g8:9/2019.

Neprodejné