



ČESKÝ INSTITUT PRO AKREDITACI, o.p.s.

Opletalova 41, 110 00 Praha 1 – Nové Město

Dokumenty EA

EA - Evropská spolupráce pro akreditaci

Číslo publikace: EA - 10/17

Dokument pro kalibraci elektromechanických tlakoměrů

Tento dokument byl zpracován ke zdokonalení a k harmonizaci v oblasti měření tlaku. Poskytuje návod pro národní akreditační orgány a shrnuje minimální požadavky pro kalibraci elektromechanických manometrů. Kalibračním laboratořím poskytuje informace a rady k vlastnímu procesu kalibrace.

Dokument obsahuje 2 detailní příklady vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci.

Tento dokument nesmí být dále rozšiřován.

červenec 2004

Autoři

Tato publikace byla zpracována expertní skupinou pro tlak EA.

Úřední jazyk

Text může být přeložen do jiného jazyka podle příslušných požadavků. Anglická jazyková verze je definitivní.

Copyright

Autorské právo k tomuto textu náleží EA. Text nesmí být kopírován pro účely dalšího prodeje.

Používání dokumentu

Dokument reprezentuje dohodu členů EA a uvádí praktické návody pro akreditační problematiku v dané oblasti. Postupy nejsou povinné, jsou však určeny pro akreditační orgány EA a jimi akreditované kalibrační laboratoře. V tomto smyslu je dokument určen pro další sblížení postupů akreditovaných kalibračních laboratoří EA, zejména těch, které participují na multilaterální dohodě EA.

Další informace

Další informace o této publikaci poskytne Váš národní akreditační orgán, člen EA.

Aktuální informace získáte na naší webové stránce

<http://www.european-accreditation.org>

Národní člen EA:

Český institut pro akreditaci, o.p.s.

Opletalova 41, 110 00, Praha 1 – Nové Město

Telefon: 221 004 501

Fax: 221 004 408

E-mail: mail@cai.cz

OBSAH:

1	ÚVOD	3
2	REFERENCE, LITERATURA	3
3	DEFINICE	3
4	PRINCIPY ELEKTROMECHANICKÝCH TLAKOMĚRŮ	3
4.1	Tlakové snímače	3
4.2	Tlakové převodníky	4
4.3	Tlakoměry s digitální (číslicovou) nebo analogovou indikací	4
5	KALIBRAČNÍ POSTUPY LABORATOŘÍ	5
5.1	Instalace zařízení	5
5.2	Metody kalibrace	5
5.2.1	Základní kalibrační postup	5
5.2.2	Standardní kalibrační postup	5
5.2.3	Rozšířený kalibrační postup	5
5.3	Používané prostředky	5
5.3.1	Referenční přístroje	5
5.3.2	Mechanická sestava	6
5.3.3	Electrická sestava	8
5.4	Kalibrační souslednosti	10
5.4.1	Přípravné práce	10
5.4.2	Kalibrační postupy	10
5.4.3	Uvádění výsledků	11
6	URČENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ	13
6.1	Obecné aspekty určování nejistoty měření	13
6.2	Popis výpočtu nejistot pro zvolené praktické případy	16
6.2.1	Kalibrace digitálního tlakoměru	16
6.2.2	Kalibrace tlakového snímače s elektrickým výstupním signálem	19
7	PŘÍKLADY	23
7.1	Příklad 1 – Kalibrace indikačního digitálního tlakoměru	24
7.2	Příklad 2 – Kalibrace tlakového snímače	27

1 ÚVOD

Tento dokument se zabývá kalibrací elektromechanických tlakoměrů. Dokument se nezabývá tlakoměry s ručičkovými číselníky, které se jinak standardně pro tlakoměry používají.

Dokument dává uživatelům elektromechanických tlakoměrů základní informace, nutné pro aplikaci kalibračních procesů.

Dokument se vztahuje ke všem elektromechanickým tlakoměrům, které měří absolutní tlak, přetlak, resp. diferenční tlak, mimo vakuových zařízení s měřením pod 1 kPa.

Poznámky:

- A Dokument se částečně zabývá "měřicími" funkcemi tlakových kalibrátorů.
- B Dokument se nevztahuje na piezoelektrické tlakové snímače.

2 REFERENCE, LITERATURA

VIM "International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology"

GUM "Guide to the expression of uncertainty in measurements"

EA Document 4/02 (Rev 0), "Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration"

RM Aero 802 41, "Calibration and use of electromechanical manometers", *in French*

EA Document 4/07 (Rev 1), "Traceability of Measuring and Test Equipment to National Standards"

IEC 770 "Methods of Evaluating the Performance of Transmitters for Use in Industrial-process control Systems"

3 DEFINICE

Za účelem omezení nejednoznačných vysvětlení, následující termíny znamenají:

Statický tlak: Statický tlak, používaný jako referenční pro měření tlakové difference.

Referenční úroveň: Úroveň, ke které je aplikovaný tlak vztahován.

Poznámka: Výrobce přístroje tuto úroveň specifikuje. Pokud to neplatí, tuto úroveň specifikuje kalibrační laboratoř.

4 PRINCIPY ELEKTROMECHANICKÝCH TLAKOMĚRŮ

Dokument se zabývá třemi typy elektromechanických tlakoměrů:

- tlakové snímače,
- tlakové převodníky,
- tlakoměry s digitální nebo analogovou indikací.

4.1 Tlakové snímače

Tlakové snímače převádějí měřený tlak na analogový elektrický signál, který je proporcionální k použitému vstupnímu napětí.

Ve vztahu k druhu snímače, výstupní signál může být:

- napětí,
- proud,
- frekvence.

K zajištění funkce, snímač potřebuje průběžný stabilizovaný zdroj, s úrovní stabilizace ve vztahu k očekávané nejistotě měření tlaku.

4.2 Tlakové převodníky

Tlakový převodník je obecně jednotkou, která obsahuje tlakový snímač a dále modul pro úpravu, resp. zesílení signálu snímače.

Podle druhu převodníku, výstupní informace tlakového převodníku může být:

- napětí (5 V; 10 V; ...),
- proud (4-20 mA; ...),
- frekvence,
- digitální formát (RS 232; ...).

Pro svoji činnost, tlakové převodníky vyžadují průběžné elektrické napájení, bez specifikovaných požadavků stabilizace napájení.

4.3 Tlakoměry s digitální (číslíkovou) nebo analogovou indikací

Tento druh tlakoměru je kompletní měřicí přístroj, který indikuje tlakovou jednotku. Podle typu, může se skládat z následujících komponentů:

(a) Tlakoměr s digitální indikací:

- tlakový snímač,
- modul úpravy analogového signálu,
- analogově-digitální převodník,
- modul zpracování digitálních údajů,
- digitální indikace (jednotkou, použitou, resp. specifikovanou výrobcem),
- elektrické napájení (obecně je napájení nedílnou částí přístroje).

(b) Tlakoměr s analogovou indikací:

- tlakový snímač,
- modul zpracování analogového signálu,
- analogová indikace,
- 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 KALIBRAČNÍ POSTUPY LABORATOŘÍ

5.1 Instalace zařízení

- Zařízení by mělo být zapnuto v kalibrační laboratoři před počátkem kalibrace za účelem teplotní rovnováhy celého systému.
- Je nutno chránit zařízení před přímým slunečním světlem.
- Přístroj je nutno očistit.
- Kalibrovaný přístroj se umístí co nejbližší k referenčnímu etalonu.
- Zajistí se, že tlakové referenční úrovně kalibrovaného přístroje a referenčního etalonu jsou co nejbližší. Případnou diferenci je nutno odečíst za účelem výpočtu korekce, resp. nejistot.
- Je nutno respektovat specifikace výrobce kalibrovaného přístroje, např. ohledně montážní pozice, pracovní teploty, atd.

5.2 Metody kalibrace

Pokud je to předmětné, postup kalibrace má dovolit v souladu s požadavky zákazníka vyhodnotit hysterezi, linearitu a opakovatelnost kalibrovaného přístroje.

Aplikovaný postup závisí na očekávané přesnosti kalibrovaného přístroje, opět ve vztahu k požadavkům zákazníka.

5.2.1 Základní kalibrační postup

Základní kalibrační postup by měl být použit pro přístroje, jejichž očekávaná rozšířená nejistota měření ($k=2$) je $U > 0,2 \%$ měřicího rozsahu (dále zkratka FS – full scale). Kalibrace se vykoná jednou v 6 tlakových bodech při stoupajícím a klesajícím tlaku. Opakovatelnost se vyhodnotí ze tří opakovaných měření v jednom tlakovém bodě (preferenčně 50 % FS).

5.2.2 Standardní kalibrační postup

Standardní kalibrační postup by měl být použit pro přístroje, jejichž očekávaná rozšířená nejistota měření ($k=2$) je $0,05 \% \text{ FS} \leq U \leq 0,2 \% \text{ FS}$. Kalibrace se vykoná jednou v 11 tlakových bodech při stoupajícím a klesajícím tlaku. Opakovatelnost se vyhodnotí ze tří opakovaných měření ve čtyřech tlakových bodech (preferenčně 0, 20, 50, 80 % FS).

5.2.3 Rozšířený kalibrační postup

Rozšířený kalibrační postup by měl být použit pro přístroje, jejichž očekávaná rozšířená nejistota ($k=2$) je $U < 0,05 \% \text{ FS}$. Kalibrace se vykoná v 11 tlakových bodech ve 3 sériích měření.

5.3 Používané prostředky

5.3.1 Referenční přístroje

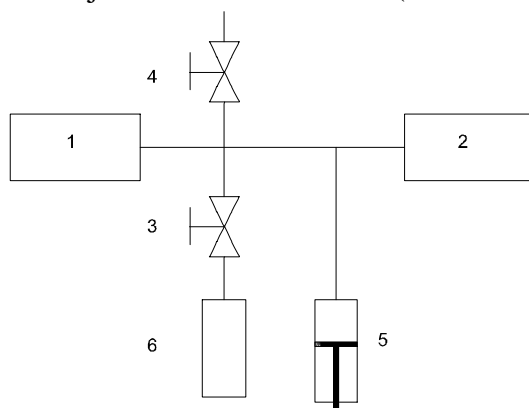
Referenční přístroje by měly vyhovovat následujícím požadavkům:

- Musí být navázány na národní, resp. mezinárodní etalony.
- Jejich nejistota musí být lepší (pokud je to praktické) než nejistota kalibrovaného přístroje. Poměr je obvykle rovný, nebo vyšší číslu 2.

5.3.2 Mechanická sestava

5.3.2.1 Přetlak, médium plyn

Typická sestava je následně znázorněna (viz Obr. 1) :



1. referenční etalon
2. kalibrovaný přístroj namontovaný v pozici standardního používání
3. jemně regulovatelný vstupní ventil
4. jemně regulovatelný výstupní ventil
5. objemový regulátor
6. zdroj tlaku

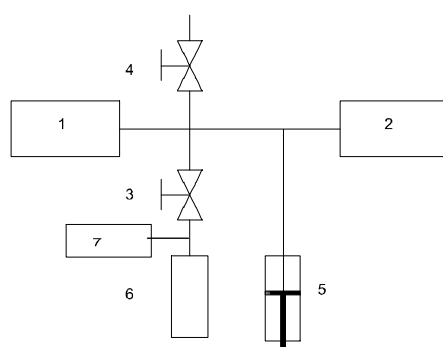
Obrázek 1 – Sestava pro přetlak, médium plyn

Zásadně se doporučuje použít tlakovou nádobu se suchým a čistým plynem, jako tlakový zdroj. Nádobu musí být vybavena redukčním ventilem, nebo propojena s regulačním ventilem, pokud to vyžaduje měřicí rozsah kalibrovaného přístroje.

Požadovaný tlak je hrubě nastavován vstupními a výstupními ventily, v závislosti zda se tlak nastavuje ve směru stoupajícím, nebo klesajícím. Konečné jemné nastavení tlaku se provádí objemovým regulátorem.

5.3.2.2 Absolutní tlak, médium plyn

Typická sestava je následně znázorněna (viz Obr. 2)



1. referenční etalon
2. kalibrovaný přístroj namontovaný v pozici standardního používání
3. jemně regulovatelný vstupní ventil
4. jemně regulovatelný výstupní ventil
5. objemový regulátor
6. zdroj tlaku
7. vakuová vývěva

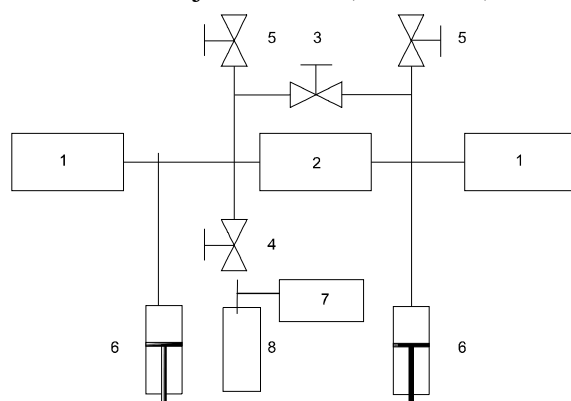
Obrázek 2 – Sestava pro absolutní tlak, médium plyn

Za účelem zajištění kvality zkušebního plynu, vakuová vývěva musí být vybavena souvisejícím příslušenstvím, např. klapkami, oddělovacími ventily, atd.

V případě, že absolutní tlak je významně vyšší než tlak barometrický, je možno použít referenční etalony pro měření přetlaku a barometrického tlaku. Doporučená sestava je stejná jako pro přetlak. Hodnota absolutního tlaku se získá součtem údajů obou referenčních etalonů.

5.3.2.3 Diferenční tlak, médium plyn

Je doporučena následující sestava (viz Obr. 3):



1. dva referenční etalony (nebo etalon diferenčního tlaku)
2. kalibrovaný přístroj
3. bypass (obtokový) ventil
4. jemně regulovatelný vstupní ventil
5. jemně regulovatelný výstupní ventil
6. dva objemové regulátory
7. vakuová vývěva (pro statický tlak nižší než barometrický)
8. zdroj tlaku

Obrázek 3 – Sestava pro diferenční tlak, médium plyn

Požadovaný statický tlak je hrubě nastavován pomocí vstupních a výstupních ventilů, v závislosti zda se nastavuje při stoupajícím, nebo klesajícím tlaku. Finální jemné nastavení se provádí pomocí objemového regulátoru. V průběhu nastavování je obtokový ventil otevřen.

Požadovaný diferenční tlak je nastavován jedním z objemových regulátorů.

Namísto dvou referenčních etalonů je možno použít diferenční tlakový etalon, nebo dvojitý pístový etalonový tlakoměr.

Vakuová vývěva, namontována před vstupním ventilem dovoluje nastavit statický tlak nižší než barometrický.

5.3.2.4 Hydraulický tlak (tlakové médium kapalina)

Sestava pro přetlak, resp. diferenční tlak je principiálně stejná jako pro plynné médium, s uvažováním následujících bodů:

- výpustný ventil musí být nahrazen ventilem pro snížení tlaku, který je spojen se zásobníkem tlakové kapaliny.
- tlakový zdroj musí být nahrazen šroubovým, nebo jiným čerpadlem.

Pro kalibraci absolutního tlaku je nutno vzít do úvahy poslední paragraf části 5.3.2.2.

5.3.3 Elektrická sestava

Tato část se vztahuje pouze ke snímačům a převodníkům s analogovým výstupním signálem.

Jestliže je kalibrovaný snímač vybaven úpravou signálu ohledně elektrického nastavení, je nutno dodržovat instrukce výrobce.

V opačném případě je nutno mít k dispozici relevantní datové údaje, resp. specifikace od výrobce.

Pokud se používají, voltmetr a referenční etalonový odpor musí být kalibrovány a navázány na příslušný národní/mezinárodní etalon.

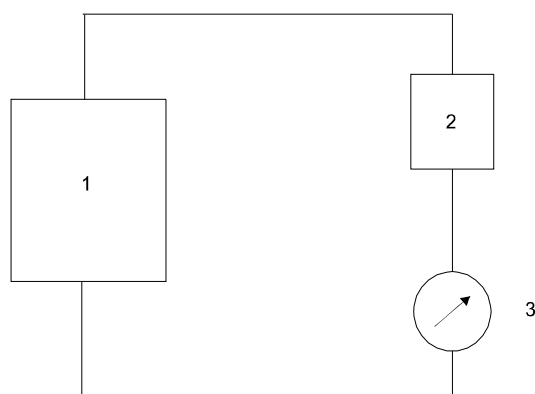
V každém případě je nutno dodržovat požadavky ohledně elektrického stínění, k zabezpečení dostatečné kvality elektrického signálu (speciálně u snímačů s “nízkou úrovní”). Některé přístroje mohou být napájeny zdrojovým systémem, nebo se u nich napájení takovým systémem předpokládá.

V závislosti na typu přístroje, jsou možné různé sestavy. Tento dokument se zabývá pouze třemi nejtypičtěji.

5.3.3.1 Dvojvodičové převodníky

Obecně je to případ přístrojů s DC proudovým signálem (4 - 20) mA. Přesto mohou být použity i jiné výstupní signály (0 až 10 mA, 0 až 20 mA nebo 0 až 50 mA).

Typická sestava může být následující (viz Obr. 4) :



1. převodník
2. napájení
3. měření

Obr. 4 – Elektrická sestava, dvojvodičový převodník

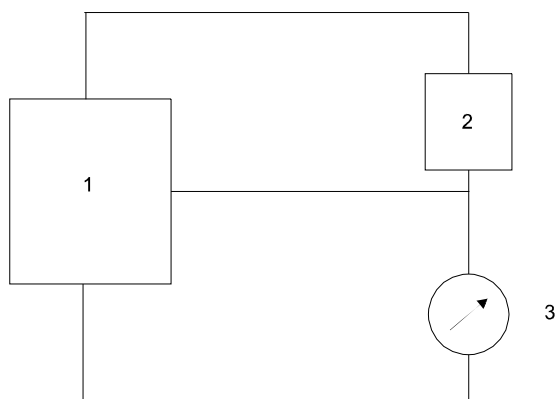
Proud (I) je určen měřením výstupního napětí (U_s) na svorkách kalibrovaného etalonového odporu (R) :

$$I = U_s / R$$

Doporučuje se postupovat dle instrukcí výrobce, pokud se jedná o hodnoty napájecího napětí, resp. etalonového odporu, resp. dle související specifikace zákazníka.

5.3.3.2 Třívodičové snímače nebo převodníky

Obecně se jedná o přístroje s Wheatstonovým můstkem. Typická sestava je následující, (viz Obr. č. 5):



1. snímač nebo převodník
2. napájení
3. měřicí výstup

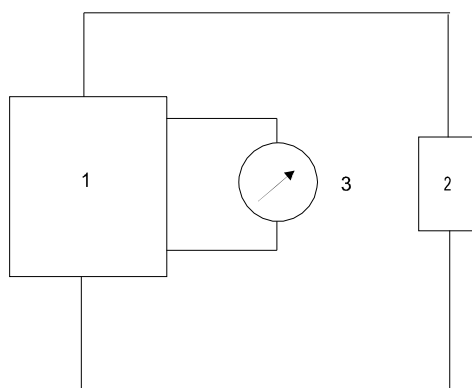
Obrázek 5 – Elektrická sestava, třívodičové zapojení snímačů nebo převodníků

pokud jde o volbu napájení, resp. měřidla výstupního napětí, doporučuje se postupovat dle specifikace výrobce. Odpor tohoto měřidla však má být v každém případě dostatečně vysoký (nejméně 10x) ve srovnání s vnitřním odporem kalibrovaného snímače, resp. převodníku.

5.3.3.3 Čtyřvodičové snímače nebo převodníky

Obecně se jedná o přístroje s Wheatstonovým můstkem.

Typická sestava je následující, (viz Obr. č. 6):



1. snímač nebo převodník
2. napájení
3. měřicí výstup

Obrázek 6 – Elektrická sestava, čtyřvodičové zapojení snímačů nebo převodníků

Výstupní signál má nízkou úroveň. Proto je nutné zajistit kvalitní uzemnění a stínění.

Varianty výstupů:

- výstupní signál je převeden na vyšší úroveň (výstup vysoké úrovně) zesilovačem zabudovaným v převodníku,
- některé přístroje mohou zahrnovat snímač pro teplotní kompenzaci. Výstup z tohoto snímače může být pomocí jednoho, nebo dvou dalších vodičů.

5.4 Kalibrační souslednosti

5.4.1 Přípravné práce

Před vlastní kalibrací je nutno vizuálně zkontrolovat vhodné pracovní podmínky kalibrovaného měřidla. Speciálně se jedná o:

- dobrou kvalitu elektrických kontaktů,
- čistotu přístroje.

Doporučuje se vykonat následující operace:

- identifikovat referenční úroveň:
 - etalonového přístroje,
 - kalibrovaného přístroje (na úrovni propojení nebo na úrovni definované výrobcem),
- minimalizovat diferenci výše uvedených úrovní,
- u zařízení citlivých na krut, dodržovat instrukce výrobce.

5.4.2 Kalibrační postupy

V případě přístrojů s více výstupy, je vhodné vykonat kalibraci pro výstup (výstupy) specifikované výrobcem.

Bez ohledu na kalibrovaný přístroj a použitý postup (viz sekce 5.2), vždy se 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 rozpětí.

Každá z těchto operací, speciálně nastavení přístroje, musí být vykonána pouze se souhlasem zákazníka a musí to být uvedeno v kalibračním listu.

5.4.2.1 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, doporučuje se vykonat následující operace:

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

5.4.2.2 Nastavení

Jestliže odpověď měřidla neodpovídá konvenční hodnotě, tj.:

- u digitálních manometrů s přímým odečítáním je odchylka mezi odečítaným a aplikovaným tlakem,
- u převodníků s elektrickým výstupem je odchylka od konvenčního signálu, (např. 4 až 20 mA),

vykoná se nastavení přístroje v souladu s požadavky zákazníka.

V závislosti na možnostech kalibrační laboratoře, nastavení se vykoná pomocí:

- prostředků normálně přístupných uživateli (potenciometry s nulou, resp. s plným nebo středním rozsahem měření),
- pomocí interních justovacích prostředků kalibrovaného přístroje (potenciometry, v paměti uložená kalibrační křivka, atd.), v souladu s informacemi v technickém popisu přístroje, po odsouhlasení zákazníkem.

Poznámka.: Tyto operace obvykle předpokládají detailní znalosti nastavovacích postupů a vyžadují speciální procedury a prostředky mnohdy náročnější než kalibrovaný přístroj.

Jestliže je přístroj opatřen značkami stupnice užitečnými pro uživatele (např. kalibrační body, náhrada kalibrační křivky), doporučuje se určit tyto elementy a uvést je v kalibračním listu.

5.4.2.3 Hlavní kalibrace

Použitý kalibrační postup (viz část 5.2) 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 a teploty u pístového tlakoměru),
- indikace kalibrovaného tlakoměru.

Rovněž musí být zaznamenána následující data:

- hodnoty ovlivňujících veličin (teplota, barometrický tlak),
- identifikační parametry kalibrovaného přístroje,
- identifikace přístrojů včetně měřicích systémů a/nebo přístrojů použitých pro měření výstupního signálu.

5.4.3 Uvádění výsledků

Obecně se doporučuje uvádět výsledky kalibrace ve formě, kterou je možno bez problémů vyhodnotit uživatelem kalibrovaného měřidla. Podstatné je jasné uvádění výsledků kalibrace a metod náhrady nebo interpolace (pokud se metody použijí).

Aby bylo možné vzít do úvahy specifické metody vyhodnocení nejistoty měření a jejího výpočtu, výsledky se mohou uvádět různě, v závislosti na tom zda kalibrovaný přístroj disponuje:

- výstupním signálem v elektrické jednotce (tlakové snímače a převodníky),
- indikací v jednotce tlaku (digitální tlakoměry).

5.4.3.1 Tlakové snímače a převodníky

Bez ohledu na metodu náhrady, výsledky kalibrace mohou být uváděny formou následující tabulky:

	Výsledky kalibrace				Model, náhrada		
	Aplik. tlak	Aplik. tlak	Průměr výstupního signálu	Standardní odchylka výstupního signálu	Indikovaný tlak pomocí náhrady	Odchylka	Rozšířená nejistota měření
	p_r (1)	p_r (2)	(3)	(3, 4)	p_i (5)	$p_i - p_r$ (5)	(5, 6)
Stoupající tlak							
Klesající tlak							

- 1) Tlak měřený referenčním etalonem na referenční úrovni kalibrovaného měřidla, vyjádřený v jednotkách Pascal, nebo jeho násobcích. Namísto tohoto sloupce může být uveden přepočítávací koeficient jednotky udávanou kalibrovaným přístrojem na jednotku Pascal.
- 2) Tlak měřený referenčním etalonem na referenční úrovni kalibrovaného měřidla, vyjádřený v jednotce výstupního signálu kalibrovaného měřidla.
- 3) Hodnota vyjádřená v jednotce výstupního signálu kalibrovaného měřidla.
- 4) Vypočteno v každém bodu měření, pokud jsou k dispozici nejméně tři naměřené hodnoty.
- 5) Hodnota vyjádřená v tlakové jednotce kalibrovaného přístroje. Popis náhrady v kalibračním listu je volitelný.
- 6) Nejistota určená v souladu s částí 6.

Je vhodné poznamenat, že standardní odchylka vstupního signálu (obecně velmi malá) není uváděna v této tabulce. Odchylka je vzata do úvahy při vyjádření nejistoty měření referenčního etalonu.

5.4.3.2 Digitální tlakoměry

Výsledky kalibrace digitálních tlakoměrů mohou být uvedeny formou následující tabulky:

	Aplik. tlak p_r (1)	Aplik. Tlak p_r (2)	Indikovaný tlak p_i (3)	Standardní odchylka měření (3)	Odchylka $p_i - p_r$ (3)	Rozšířená nejistota měření (3,4)
Stoupající tlak						
Klesající tlak						

- 1) Tlak měřený referenčním etalonem na referenční úrovni kalibrovaného měřidla, vyjádřený v jednotkách Pascal, nebo v jeho násobcích. Namísto tohoto sloupce může být uveden přepočítávací koeficient jednotky udávanou kalibrovaným přístrojem na jednotku Pascal.
- 2) Tlak měřený referenčním etalonem na referenční úrovni kalibrovaného měřidla, vyjádřený v jednotce kalibrovaného přístroje.
- 3) Hodnota vyjádřená v jednotce tlaku kalibrovaného přístroje.
- 4) Vyhodnocení v souladu s částí 6.

6 URČENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ

6.1 Obecné aspekty určování nejistoty měření

Základní položky, které je nutno uvažovat při vyhodnocování nejistoty výsledků kalibrace elektromechanických tlakoměrů jsou následující:

Pro tlakové snímače a převodníky:

- nejistota referenčního etalonu v provozních podmínkách (např. nejistota z kalibračního listu, dlouhodobá stabilita, okolní podmínky, atd.),
- nejistota ve vztahu k opakovatelnosti,
- nejistota ve vztahu k reverzibilitě (hysterezi) kalibrovaného přístroje,
- nejistoty měřicích přístrojů použitých ke kalibraci (pro měření napětí, proudu, frekvence, atd.),
- nejistoty ovlivňujících veličin,
- nejistota ve vztahu k elektrickému napájení pro nízkoúrovňové snímače (v tomto případě je výstupní signál úměrný napájení: nejistota měření a krátkodobé stability napájecího napětí by měla být uvažována),
- nejistota ve vztahu k matematické náhradě (vyhodnocená směrodatná odchylka měřené veličiny),
- nejistota vyhodnocení korekce výškového rozdílu mezi referenčním etalonem a kalibrovaným přístrojem,

pro tlakoměry s digitální nebo analogovou indikací:

- nejistota referenčního etalonu v provozních podmínkách (např. nejistota z kalibračního listu, dlouhodobá stabilita, okolní podmínky, atd.),
- nejistota ve vztahu k opakovatelnosti,
- nejistota ve vztahu k rozlišení kalibrovaného přístroje,
- nejistota ve vztahu k reverzibilitě (hysterezi) kalibrovaného přístroje,
- nejistota vyhodnocení korekce výškového rozdílu mezi referenčním etalonem a kalibrovaným přístrojem.

Postup

Nejistota výsledků kalibrace musí být vyhodnocena na základě principů uvedených v dokumentu EA 4/02.

Při analýze příspěvků nejistot, musí být vzaty do úvahy následující termíny a pravidla výpočtu, za předpokladu, že neexistují korelace mezi jednotlivými vstupními veličinami:

Tabulka 1

Model			$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$
Standardní nejistota měření	$u(x_i)$	Standardní nejistota ve vztahu ke vstupní veličině x_i	
	c_i	Citlivostní koeficient	$c_i = \partial f / \partial x_i$
	$u_i(y)$	Příspěvek ke standardní nejistotě výsledku na základě standardní nejistoty $u(x_i)$ vstupní veličiny x_i	$u_i(y) = c_i \cdot u_i(x_i)$
	$u(y)$	Standardní nejistota výsledku	$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$ $u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$
Rozšířená nejistota měření	$U(y)$	Rozšířená nejistota měření	$U(y) = k \cdot u(y)$
	k	Faktor rozšíření	$k = 2^a$

^a Rozšířená nejistota měření $U(y)$ má zahrnout nejmenší možný interval s pokrytím pravděpodobností 95 %. Faktor rozšíření k je implicitně definován vztahem $U(y) = k \cdot u(y)$. Pokud je rozdělení pravděpodobnosti měřené veličiny normální (Gaussovo), což je v praxi obvyklý případ, potom hodnota $U(y)$ má být rovná $2 \cdot u(y)$, t. j. $k = 2$.

Pokud se používají relativní vyjádření nejistot, jsou proměnné u , U nahrazeny proměnnými w , W .

Dodatečně k výše uvedeným obecným pravidlům výpočtu nejistot, existují dva speciální případy, které vedou k citlivostním koeficientům $c_i = \pm 1$:

Aditivní / diferenční model

$$Y = X + \sum_{i=1}^N \delta X_i \quad (1)$$

Y	výstupní veličina
X	vstupní veličina /veličiny na kterých měřená veličina závisí
δX_i	nekorigovaná(é) chyba(y)
$E[\delta X_i] = 0$	očekávaná (střední) hodnota [není ovlivněna výstupní veličina, pouze nejistota měření]

Tento model je vhodné využít např. pro určení chyb indikačních tlakoměrů:

$$\Delta p = p_{\text{indication}} - p_{\text{standard}} + \sum_{i=1}^N \delta p_i \quad (2)$$

Multiplikační model

$$Y = X \cdot \prod_{i=1}^N K_i \quad (3)$$

Y	výstupní veličina
X	vstupní veličina/veličiny na kterých měřená veličina závisí
$K_i = (1 + \delta X_i)$	korekční faktor(y)
δX_i	nekorigovaná(é) chyba(y)
$E[\delta X_i] = 0 ; E[K_i] = 1$	očekávaná (střední) hodnota [není ovlivněna výstupní veličina, pouze nejistota měření]

Tento model je např. vhodný k vyhodnocení nejistot měření převodního koeficientu tlakového snímače s elektrickým výstupním signálem:

$$S = \frac{X_{\text{output}}}{X_{\text{input}}} = \frac{V_{\text{indication}} / (G \cdot V_{\text{PS}})}{P_{\text{standard}}} \cdot \prod_{i=1}^N K_i \quad (\text{PS} \equiv \text{el. napájení}) \quad (4)$$

Vstupní veličiny

Nejistoty měření vztažené na vstupní veličiny jsou rozdělené do dvou skupin, v závislosti na způsobu jejich určení:

Typ A: Hodnota a příslušná standardní nejistota jsou určeny metodou statistické analýzy z naměřených sérií za příslušných podmínek opakovatelnosti.

Typ B: Hodnota a příslušná standardní nejistota jsou určeny na základě jiných informací, např.:

- předcházející naměřená data (např. v průběhu schvalování typu),
- obecné informace a zkušenosti o vlastnostech měřicího přístroje,
- specifikace výrobce,
- kalibrační nebo jiné certifikáty,
- referenční data z návodů, atd.

V mnoha případech je možné určit pouze horní a dolní limit a_+ , resp. a_- vstupní veličiny a na základě toho lze předpokládat rozdělení, resp. hustotu rozdělení pravděpodobnosti. Tato situace je obvykle popsána rovnoměrným (rektangulárním) rozdělením.

6.2 Popis výpočtu nejistot pro zvolené praktické případy

6.2.1 Kalibrace digitálního tlakoměru

Volba modelu

Je použit aditivní/diferenční model pro určení chyb a nejistot pro měřené hodnoty, separátně při stoupajícím a klesajícím tlaku:

$$\Delta p = p_{\text{indication}} - p_{\text{standard}} + \sum_{i=1}^2 \delta p_i = p_{\text{indication}} - p_{\text{standard}} + \delta p_{\text{zero error}} + \delta p_{\text{repeatability}} \quad (8)$$

Symbole jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Tabulka 2

$Y = \Delta p$	měřená veličina (= chyba indikace)
$X_1 = p_{\text{indication}}$	indikace kalibrovaného tlakoměru
$X_2 = p_{\text{standard}}$	tlak generovaný referenčním etalonem ¹
$X_3 = \delta p_{\text{zero-error}}$	nekorigovaná chyba měření v nulové hodnotě
$X_4 = \delta p_{\text{repeatability}}$	chyba měření ve vztahu k opakovatelnosti

p_{standard} se předpokládá konstantní v průběhu jednotlivých tlakových cyklů. Pokud by změny byly významné ve vztahu k rozlišení $p_{\text{indication}}$, je nutno vykonat korekci vždy ke stejné hodnotě p_{standard} .

Střední hodnota indikace:
$$\bar{p}_{\text{indication}} = \frac{p_{\text{indication,up}} + p_{\text{indication,dn}}}{2} \quad (9)$$

Pro výpočet chyby střední hodnoty indikace $\bar{\Delta p}$, je nutno vzít do úvahy efekt hystereze:

$X_5 = \delta p_{\text{hysteresis}}$	nekorigovaná chyba měření ve vztahu k hysterezi
--------------------------------------	---

$$\bar{\Delta p} = \bar{p}_{\text{indication}} - p_{\text{standard}} + \sum_{i=1}^3 \delta p_i = \bar{p}_{\text{indication}} - p_{\text{standard}} + \delta p_{\text{zero error}} + \delta p_{\text{repeatability}} + \delta p_{\text{hysteresis}} \quad (10)$$

Dále je nutno zahrnout další příspěvek $\delta p_{\text{resolution}}$ pro limit rozlišitelnosti indikace (v tabulce 3 je dán intervalem $2a = r$).

¹ Tlak generovaný referenčním etalonem v referenční úrovni kalibrace. Tento tlak musí být korigován na případný vliv pracovních podmínek. Obecně, analýza nejistot zahrnuje rovněž komponenty nejistot, beroucích do úvahy rozdíl mezi referenčními a pracovními podmínkami.

Výpočet nejistot

Pokud jsou analyzovány série při stoupajícím (up) a klesajícím (down \equiv dn) tlaku separátně, rozšířená nejistota měření ($k=2$) je dána vztahem

$$U_{\text{up/dn}} = k \sqrt{u_{\text{standard}}^2 + u_{\text{resolution}}^2 + u_{\text{zero error}}^2 + u_{\text{repeatability}}^2} \quad (11)$$

Při používání kalibrovaného přístroje je často vhodné zkombinovat očekávanou nejistotu U s chybou Δp . To dovoluje získat informaci o maximální odchylce jednoho výsledku měření od správné hodnoty (tj. od hodnoty, která by byla naměřena etalonovým přístrojem).

Pro tento účel je definována tzv. chyba rozpětí² U' :

$$U'_{\text{up/dn}} = U_{\text{up/dn}} + |\Delta p| \quad (12)$$

Pro výpočet nejistoty středních hodnot při stoupajících a klesajících tlakových sériích, musí být zahrnut efekt hystereze:

$$U_{\text{mean}} = k \sqrt{u_{\text{standard}}^2 + u_{\text{resolution}}^2 + u_{\text{zero-error}}^2 + u_{\text{repeatability}}^2 + u_{\text{hysteresis}}^2} \quad (13)$$

Chyba rozpětí U'_{mean} se získá použitím nejvyšší hodnoty příspěvku opakovatelnosti z každého tlakového bodu:

$$U'_{\text{mean}} = U_{\text{mean}} + |\overline{\Delta p}|. \quad (14)$$

² Chyba rozpětí je maximální očekávaná odchylka mezi naměřenou hodnotou a konvenčně pravou hodnotou měřené veličiny. Chyba rozpětí může být použita v technických specifikacích pro charakteristiku přesnosti kalibrovaného přístroje.

Informace ohledně vstupních veličin

Informace ohledně vstupních veličin jsou shrnuty v tabulce:

Tabulka 3

Č.	Veličina	Odhad	Jdn. ³	Interval	Rozdělení pravděpod.	Dělitel	Standardní nejistota	Citliv. koef.	Příspěvek k nejistotě
	X_i	x_i		$2a$	$P(x_i)$		$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$

1	$p_{\text{indication}}$ nebo $\overline{p}_{\text{indication}}$	$p_{i,\text{indic.}}$ nebo $\overline{p}_{i,\text{indic.}}$	bar	r (rozlišení)	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$u(r) = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{r}{2}\right)^2}$	1	u_r
2	p_{standard}	$p_{i,\text{standard}}$	bar		normální	2	$u(p_{\text{standard}})$	-1	u_{standard}
3	$\delta p_{\text{zero error}}$	0	bar	f_0	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$u(f_0) = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	u_{f_0}
4	$\delta p_{\text{repeat.}}$	0	bar	b'	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$u(b') = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	$u_{b'}$
5	$\delta p_{\text{hysteresis}}$	0	bar	h	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$u(h) = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	u_h
	Y	$\frac{\Delta p}{\Delta p}$ nebo $\frac{\Delta p}{\Delta p}$	bar						$u(y)$

Poznámka: 1) Vztahy doporučené pro určení veličin f_0 , b' a h z limitovaného souboru naměřených dat jsou dány rovnicemi 21, 22 a 23 v části *Určování charakteristických hodnot, významných pro nejistotu*.

2) Pokud je k dispozici dostatečné množství dat, opakovatelnost může být vyjádřena empirickou standardní odchylkou.

Vyhodnocení jedné hodnoty

Dodatečně k chybě rozpětí pro každý kalibrovaný tlakový bod, může být uvedena maximální chyba rozpětí v jednom bodě z celého kalibrovaného rozsahu (v jednotkách tlaku, nebo ve vztahu k měřené hodnotě, nebo k měřicímu rozpětí). Může být potvrzena shoda se specifikovanou nejvyšší dovolenou chybou (stav shody).

³ Doporučuje se použití jednotky veličiny, která přispívá k nejistotě (jednotka fyzikální veličiny, jednotka indikace, vztažná (bezrozměrná) veličina, atd.).

6.2.2 Kalibrace tlakového snímače s elektrickým výstupním signálem

Volba modelu

Obvykle je závislost výstupní veličiny tlakového snímače (jakákoli elektrická veličina) na veličině vstupní (tlak) popsána tzv. charakteristikou $Y = f(p)$, obecně procházející bodem $Y = 0$ nebo nějakým definovaným bodem $Y = Y_0$ a mající sklon najustovaný výrobcem s hodnotou v příslušných limitech. Kalibrace tlakového snímače potom vychází z následujícího modulu:

$$\Delta Y = Y - f(p_{\text{standard}}) + \sum (\delta Y)_i \tag{15}$$

kde funkce $f(p)$ je vyjádřena na základě matematické analýzy, tj. polynomem s koeficienty a jejich nejistotami, a výstupní veličina Y má hodnoty y_i naměřené v kalibračních bodech tlaku p_i získaných etalonovým přístrojem.

Rovnice (15) koresponduje s rovnicí (8) a může se použít aditivní/diferenční model pro určení chyby ΔY a její nejistoty separátně pro hodnoty měřené při stoupajícím a klesajícím tlaku, nebo pro průměrné hodnoty. Přesto musí být brán do úvahy příspěvek $(\delta Y)_{\text{indication}}$, který se týká nejistoty přístroje použitého pro měření výstupního signálu snímače.

Formálně jiný přístup je určení převodního koeficientu S - opět zvlášť pro hodnoty měřené při stoupajícím a klesajícím tlaku a pro průměrné hodnoty, - s použitím multiplikačního modelu:

$$S = \frac{X_{\text{output}}}{X_{\text{input}}} = \frac{V_{\text{indication}} / (GV_{\text{PS}})}{P_{\text{standard}}} \prod_{i=1}^2 K_i = \frac{V_{\text{indication}} / (GV_{\text{PS}})}{P_{\text{standard}}} K_{\text{zero error}} K_{\text{repeatability}} \tag{16}$$

Tabulka 4

$Y = S$	měřená veličina, převodní koeficient
$X_1 = V_{\text{indication}}$	Indikace výstupního zařízení (voltmetru)
$X_2 = G$	převodní koeficient zesilovače
$X_3 = V_{\text{PS}}$	napájecí napětí (dodatečné zařízení)
$X_4 = p_{\text{standard}}$	tlak generovaný referenčním etalonem
$X_5 = K_{\text{zero error}}$	korekční faktor pro chybu v nulové hodnotě
$X_6 = K_{\text{repeatability}}$	korekční faktor pro opakovatelnost
$X_7 = K_{\text{reproducibility}}$	pokud je nutné, korekční faktor pro reprodukovatelnost
$X_8 = K_{\text{hysteresis}}$	korekční faktor pro hysterezi

Výsledek průměrné hodnoty převodního koeficientu se získá zahrnutím korekčního faktoru pro hysterezi:

$$S_{\text{mean}} = \frac{X_{\text{output}}}{X_{\text{input}}} = \frac{V_{\text{indication}} / (GV_{\text{PS}})}{P_{\text{standard}}} \prod_{i=1}^3 K_i = \frac{V_{\text{indication}} / (GV_{\text{PS}})}{P_{\text{standard}}} K_{\text{zero error}} K_{\text{repeatability}} K_{\text{hysteresis}} \tag{17}$$

Výpočet nejistoty

Pokud se analyzují separátně série měření při stoupajícím a při klesajícím tlaku, relativní rozšířená nejistota ($k = 2$) převodního koeficientu se vyjádří následovně:

$$W_{\text{up/dn}} = k \sqrt{w_{\text{standard}}^2 + w_{\text{indication}}^2 + w_{\text{amplifier}}^2 + w_{\text{power-supply}}^2 + w_{\text{zero error}}^2 + w_{\text{repeatability}}^2} \quad (18)$$

Pokud se berou průměrné hodnoty při stoupajících a klesajících tlakových sériích, platí vztah:

$$W_{\text{mean}} = k \sqrt{w_{\text{standard}}^2 + w_{\text{indication}}^2 + w_{\text{amplifier}}^2 + w_{\text{supply}}^2 + w_{\text{zero error}}^2 + w_{\text{repeatability}}^2 + w_{\text{hysteresis}}^2} \quad (19)$$

s použitím nejvyšší hodnoty opakovatelnosti v každém tlakovém bodě při výpočtu nejistoty $w_{\text{up/dn}}$.

Relativní chyba rozpětí je

$$W'_{\text{mean}} = W_{\text{mean}} + \left| \frac{\Delta S}{S} \right| \quad (20)$$

$$\text{když } \Delta S = S - S_0$$

Jednoduchý převodní koeficient (S_0) je obecně směrnice přímky vedoucí přes všechny naměřené body výstupního signálu.

Informace o vstupních veličinách

Informace o vstupních veličinách jsou shrnuty v následující tabulce:

Tabulka 5

Č.	Veličina	Odhad	Interval	Rozdělení pravděpod.	Dělitel	Standardní nejistota	Citl. koef.	Příspěvek k nejistotě
	X_i	x_i	$2a$	$p(x_i)$		$w(x_i)$	c_i	$w_i(y)$
1	$V_{\text{indication}}$ nebo $\bar{V}_{\text{indication}}$	$V_{i,\text{indic.}}$ nebo $\bar{V}_{i,\text{indic.}}$		normální	2	$w(\text{indikačnízařízení})$	1	$w_{\text{indication.}}$
2	G	G		normální	2	$w(\text{zesilovač})$	-1	$w_{\text{amplifier}}$
3	V_{PS}	V_{PS}		normální	2	$w(\text{napájení})$	-1	$w_{\text{power-supply}}$
4	p_{standard}	$p_{i.\text{stand.}}$		normální	2	$w(\text{etalon})$	-1	w_{standard}
5	$K_{\text{zero error}}$	1	f_0	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$w(f_0) = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	w_{f_0}
6	$K_{\text{repeatability}}$	1	b'	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$w(b') = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	$w_{b'}$
7	$K_{\text{reproducib.}}$	1	b	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$w(b) = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{b}{2}\right)^2}$	1	w_b
8	$K_{\text{hysteresis}}$	1	h	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$w(h) = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	w_h
	Y	S nebo S'						$w(y)$

K porozumění tabulky 5 je důležité následující:

1. Charakteristické veličiny f_0 , b' , b a h jsou zde veličiny relativní, t.j. vztahené k měřené hodnotě (k indikaci).
2. Při určování převodního koeficientu, nulový bod není bodem kalibračním. Přesto, případný posuv nuly vstupuje do nejistoty měřených veličin výstupního signálu a tím ovlivňuje i výsledek kalibrace pro výstupní veličinu S.

Určování charakteristických hodnot, významných pro nejistotu

Předběžná poznámka:

Ve vztahu ke straně 18, příspěvky nejistot typu A by měly být vyhodnoceny formou empirických směrodatných odchylek. V případě přístrojů ovlivněných hysterezí, kde musí být měření při stoupajícím a klesajícím tlaku vyhodnocována samostatně, v každém kalibračním bodě se obdrží pouze tři hodnoty. 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.

Rozlišení r

Rozlišení odpovídá digitálnímu kroku při měření, který není větší než digitální krok při nezatíženém přístroji.

Pokud se při nezatíženém přístroji indikace mění více než výše uvedené rozlišení, rozlišení se vyhodnocuje na základě intervalu $2a = r$ s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti.

Chyba nuly f_0

Chyba nuly 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:

$$f_0 = \max\left\{|x_{2,0} - x_{1,0}|, |x_{4,0} - x_{3,0}|, |x_{6,0} - x_{5,0}|\right\} \quad (21)$$

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

Opakovatelnost b'

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):

$$b'_{up,j} = \text{MAX}\{|(x_{3,j} - x_{3,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})|, |(x_{5,j} - x_{5,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})|, |(x_{5,j} - x_{5,0}) - (x_{3,j} - x_{3,0})|\} \quad (22)$$

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

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

Podtržené výrazy se vynechají, pokud se třetí cyklus (série měření) vykoná po reinstalaci, pro kontrolu reprodukovatelnosti. V tomto případě platí:

Reprodukovatelnost b

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

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

$$b_{mean,j} = \text{MAX}\{b_{up,j}, b_{dn,j}\}$$

Hystereze h (Reverzibilita)

Hystereze se určí z odchylek mezi korespondujícími odečty / výstupní hodnoty měření při stoupajícím a klesajícím tlaku:

$$h_j = \frac{1}{3} (|x_{2,j} - x_{1,j}| + |x_{4,j} - x_{3,j}| + |x_{6,j} - x_{5,j}|) \quad (23)$$

7 PŘÍKLADY

Obecné poznámky

Byly vybrány dva příklady:

Příklad 1: Kalibrace indikačního digitálního tlakoměru. Číselné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce E1 a znázorněny v Grafu 7.

Příklad 2: Kalibrace tlakového snímače. Příklad 2 je uveden dvěma způsoby:

Příklad 2a vychází z definované lineární charakteristiky přístroje. Tlakové hodnoty vypočítané z výstupních signálů za použití této charakteristiky jsou porovnány s tlakovými hodnotami etalonového tlakoměru. Aditivní/diferenční model je použit pro výpočet nejistoty měření. Opakovatelnost je stanovena pomocí směrodatných odchylek ze tří homogenních datových bodů. Číselné hodnoty jsou v Tabulce E2a a jsou znázorněny v Grafu 8.

V příkladě 2b je určen převodní koeficient stejného přístroje ve stejných kalibračních bodech. Chyba nuly, opakovatelnost, reprodukovatelnost a hystereze jsou vypočteny pomocí vztahů uvedených na straně 24. Číselné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce E2b a znázorněny v Grafu 9.

Grafem 8 je demonstrováno, že kalibrační metody 2a a 2b jsou ekvivalentní.

Chyba rozpětí $U'(p_{\text{indicated}})$ uvedena v Grafu 8 může být vypočtena z chyby rozpětí $U'(S_{p \text{ ind.}})$ hodnot převodního koeficientu S následovně:

$$U'(p_{\text{indicated}}) = U'(S_{p \text{ ind.}}) * p_{\text{ind}} * 100 = U'_{\text{rel}}(S_{p \text{ ind.}}) \cdot p_{\text{ind.}} \cdot (1/S)_{\text{nominal value}}$$

$$[\text{bar}] = [\text{mV/V} \cdot \text{bar}] * [\text{bar}] * [\text{bar}/(\text{mV/V})]$$

V Grafu 8, jsou hodnoty $U'(p_{\text{indicated}})$ obdržené v příkladu 2a indikovány jako prázdné kroužky, zatímco výsledky příkladu 2b jako prázdné čtverečky. V ideálním případě by měly být tyto značky identické. Rozdíly upozorňují na diferencii v metodách při výpočtu složek $u(y)$ v obou příkladech. Obvykle, celkový výsledek kalibrace zásadně nezávisí na diferencích, které zde byly takto demonstrovány.

7.1 Příklad 1 – Kalibrace indikačního digitálního tlakoměru

Kalibrační objekt:

Indikační digitální tlakoměr

Rozsah: 0 MPa do 25 MPa (přetlak)

Rozlišení: 0,01 kPa

Referenční teplota: 20 °C

Poznámka: Při tlaku menším než malá kritická hodnota se na displeji objeví nulová hodnota. Čtení nuly tak neodpovídá přesné hodnotě $p_e = 0$.

Kalibrační postup

Před kalibrací byl přístroj dvakrát zatížen na nominální tlakovou hodnotu, na této hodnotě byl tlak ponechán vždy po dobu jedné minuty.

Diference Δh mezi tlakovou referenční úrovní kalibrovaného přístroje a etalonového přístroje byla najustována na nulu.

Kalibrační teplota = referenční teplota $\pm 0,5$ K.

Byly vykonány tři kompletní série porovnávacích měření (rozšířený kalibrační postup).

Etalonový přístroj

Jako etalon byl použit pístový tlakoměr s médiem olej, pracujícím při teplotě pístu/pouzdra t_{std} , okolním tlaku p_{amb} a okolní teplotě t_{amb} , tj. při hustotě vzduchu $\rho_{air}(p_{amb}, t_{amb}, 60 \% \text{ rel. humidity})$.

Rozšířená nejistota měření tlaku etalonu při kalibračních podmínkách na referenční úrovni kalibrovaného přístroje byla stanovena:

$$U(p_e) = 0,02 \text{ kPa} + 8,0 \cdot 10^{-5} \cdot p_e$$

Vyhodnocení nejistoty měření

Nejistota pozorované odchylky mezi indikovaným tlakem kalibrovaným přístrojem a správnou hodnotou tlaku udávanou etalonovým přístrojem je vypočítána na základě aditivního/diferenčního modelu, zvláště pro tlakové body při stoupajícím a klesajícím tlaku. Nejistota průměrných hodnot indikovaného tlaku je vypočítána přidáním příspěvku nejistoty ve vztahu k reverzibilitě (hysterezi). Pokud nebyla použita korekce čtení, přesnost měření tlaku kalibrovaným přístrojem je dána chybou rozptětí (nejistota + odchylka).

Tabulka E1: KALIBRACE DIGITÁLNÍHO TLAKOMĚRU / ČÍSELNÉ VÝSLEDKY

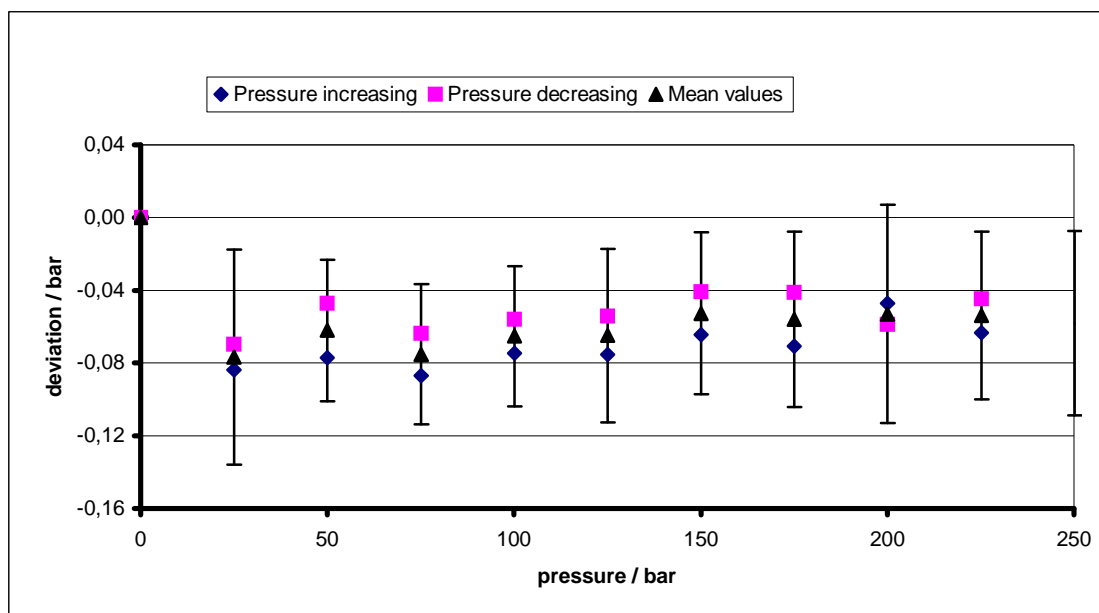
Rozšířená nejistota aplikovaného tlaku kPa	Aplikovaný tlak p_r MPa	Aplikovaný tlak p_r bar	Průměr čtení p_i Bar	Interval opakov. b' up,down Bar		Odchylka $p_i - p_r$ bar	Rozšířená nejistota měření bar	
0,02	0,0000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	
0,22	2,5015	25,015	24,931	0,029		-0,084	0,058	
0,42	5,0029	50,029	49,952	0,017		-0,077	0,035	
0,62	7,5043	75,043	74,956	0,017		-0,087	0,034	
0,82	10,0057	100,057	99,983	0,019		-0,075	0,014	
1,02	12,5072	125,072	124,996	0,023		-0,075	0,046	
1,22	15,0086	150,086	150,021	0,018		-0,064	0,037	
1,42	17,5099	175,099	175,029	0,021		-0,071	0,045	
1,62	20,0113	200,113	200,066	0,029		-0,047	0,059	
1,82	22,5127	225,127	225,064	0,018		-0,063	0,040	
2,02	25,0140	250,140	250,078	0,023		-0,062	0,050	
2,02	25,0140	250,140	250,086	0,018		-0,054	0,042	
1,82	22,5127	225,127	225,082	0,020		-0,045	0,045	
1,62	20,0113	200,113	200,054	0,026		-0,059	0,054	
1,42	17,5099	175,099	175,058	0,006		-0,041	0,019	
1,22	15,0085	150,085	150,044	0,020		-0,041	0,043	
1,02	12,5071	125,071	125,017	0,016		-0,054	0,033	
0,82	10,0057	100,057	100,001	0,035		-0,056	0,022	
0,62	7,5043	75,043	74,979	0,018		-0,064	0,036	
0,42	5,0029	50,029	49,982	0,012		-0,047	0,024	
0,22	2,5015	25,015	24,945	0,014		-0,070	0,028	
0,02	0,0000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	
Rozšířená nejistota aplik. tlaku KPa	Průměr apl. tlaku $p_{r,mean}$ MPa	Průměr apl. tlaku $p_{r,mean}$ bar	Průměr čtení $p_{i,mean}$ bar	Interval opak. b' mean Bar	Hystereze $p_{i,dn} - p_{i,up}$ bar	Odchylka $p_i - p_r$ bar	Rozšířená nejistota měření Bar	Chyba rozp. bar
0,02	0,0000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
0,22	2,5015	25,015	24,938	0,029	0,014	-0,077	0,059	0,136
0,42	5,0029	50,029	49,967	0,017	0,030	-0,062	0,039	0,101
0,62	7,5043	75,043	74,968	0,018	0,023	-0,075	0,038	0,114
0,82	10,0057	100,057	99,992	0,035	0,018	-0,065	0,024	0,089
1,02	12,5071	125,071	125,007	0,023	0,021	-0,065	0,048	0,113
1,22	15,0085	150,085	150,033	0,020	0,023	-0,053	0,045	0,097
1,42	17,5099	175,099	175,043	0,021	0,029	-0,056	0,048	0,104
1,62	20,0113	200,113	200,060	0,029	-0,012	-0,053	0,060	0,113
1,82	22,5127	225,127	225,073	0,020	0,018	-0,054	0,046	0,100
2,02	25,0140	250,140	250,082	0,023	0,008	-0,058	0,051	0,109

SOUHRN NEJISTOT V KALIBRAČNÍM TLAKOVÉM BODĚ 100 bar

Veličina	Odhad	Variační interval $2a$	Rozdělení pravděpodobnosti	Dělitel	Standardní nejistota	Citlivostní Koefficient	Příspěvek	Variance
X_i	x_i				$u(x_i)$	c_i	K nejistotě	
							$u_i(y)$	
p_{standard}	100,057 bar	0,016 bar	normální	2	0,0041 bar	-1	0,0041 Bar	1,68E-05
p_{reading}	99,992 bar	0,001 bar	Rovnoměrné	$3^{0,5}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$ bar	1	$2,89 \cdot 10^{-4}$ Bar	$8,35 \cdot 10^{-8}$
$\delta p_{\text{zero error}}$	0,000 bar	0,000 bar						
$\delta p_{\text{repeatability}}$	0,000 bar	0,070 bar	Rovnoměrné	$3^{0,5}$	0,0202	1	0,0202 Bar	$4,08 \cdot 10^{-4}$
$\delta p_{\text{hysteresis}}$	0,000 bar	0,018 bar	Rovnoměrné	$3^{0,5}$	0,0053	1	0,0053 Bar	$2,80 \cdot 10^{-5}$
Δp	-0,065 bar						$2,13 \cdot 10^{-2}$ Bar	$4,93 \cdot 10^{-4}$

$$\Delta p = -0,065 \text{ bar}$$

$$U = k \cdot u = 0,024 \text{ bar}$$



Meze intervalů: Rozšířená nejistota průměrných hodnot

Obrázek 7 – Kalibrace digitálního tlakoměru

7.2 Příklad 2 – Kalibrace tlakového snímače

1. s použitím lineární charakteristiky pro náhradu výstupního signálu (Příklad 2a)
2. s určením převodního koeficientu (faktoru) (Příklad 2b)

Kalibrační objekt:

Tlakový snímač s *Wheatstonovým* můstkem v aplikaci s kovovou membránou, která je snímacím elementem. Rozsah: 20 MPa. Referenční teplota: 20 °C.

Kalibrační postup

Výstupní signál snímače byl měřen v jednotkách [mV/V] použitím digitálního kompenzátoru, jehož rozšířená nejistota měření byla 0,00005 mV/V.

Před kalibrací byl přístroj dvakrát zatížen na nominální hodnotu tlaku, a zde bylo tlakové zatížení ponecháno po dobu jedné minuty.

Výšková diference Δh mezi referenční úrovní kalibrovaného přístroje a přístroje etalonového byla najustována na nulovou hodnotu.

Kalibrační teplota byla rovná teplotě referenční v rozsahu $\pm 0,5$ K.

Byly vykonány tři kompletní série měření (rozšířený kalibrační postup).

Etalonový přístroj

Jako etalon byl použit pístový tlakoměr s médiem olej, pracujícím při teplotě pístu/pouzdra t_{std} , okolním tlaku p_{amb} a okolní teplotě t_{amb} , tj. při hustotě vzduchu

$$\rho_{air}(p_{amb}, t_{amb}, 60 \% \text{ rel. humidity}).$$

Rozšířená nejistota měření tlaku etalonu při kalibračních podmínkách na referenční úrovni kalibrovaného přístroje byla stanovena: $U(p_e) = 1,0 \cdot 10^{-4} \cdot p_e$ pro $p_e > 1$ MPa.

Vyhodnocení nejistoty měření

Nejistota pozorované odchylky $\Delta(p)$ mezi tlakem určeným z lineární náhrady a správnou hodnotou tlaku udávanou etalonovým přístrojem je vypočítána na základě aditivního/diferenčního modelu, zvláště pro tlakové body při stoupajícím a klesajícím tlaku. Nejistota průměrných hodnot $\Delta(p)$ je vypočítána přidáním příspěvku nejistoty ve vztahu k reverzibilitě (hysterezi). Pokud nebyla použita korekce čtení, přesnost měření tlaku kalibrovaným přístrojem je dána chybou rozpětí (nejistota + odchylka).

Poznámka: Směrnice lineární charakteristiky se získá pomocí přímky, proložené přes kalibrační body. Ta nahrazuje nominální hodnotu 1,000000 E-02 mV/(V·bar) (což odpovídá výstupnímu signálu 2 mV/V FS – z plného rozsahu), která je definována výrobcem - jako nominální hodnota – tato se musí uvažovat jako **definovaná hodnota** bez stanovení nejistoty.

Tabulka E2a: KALIBRACE TLAKOVÉHO SNÍMAČE / ČÍSELNÉ VÝSLEDKY

Rozšířená nejistota apl. tlaku	Aplikovaný tlak p_r	Aplikovaný tlak P_r	Průměr výst. signál I_{mean}	Interval opakov. b' up,down	Interval reproduk. b up,down	Náhrada tlakové Indikace	Odchylna $p_i - p_r$	Nejistota měření
KPa	MPa	Bar	MV/V	mV/V	mV/V	p_i / bar	Bar	bar
0,00	0,0000	0,000	0,000000	0,000000	0,000050	0,000	0,000	0,010
0,20	2,0010	20,010	0,200163	0,000064	0,000050	20,013	0,003	0,014
0,40	4,0022	40,022	0,400303	0,000038	0,000050	40,024	0,003	0,013
0,60	6,0033	60,033	0,600463	0,000046	0,000050	60,037	0,004	0,014
0,80	8,0045	80,045	0,800590	0,000052	0,000050	80,047	0,002	0,016
1,00	10,0056	100,056	1,000700	0,000090	0,000120	100,055	-0,001	0,018
1,20	12,0068	120,068	1,200787	0,000042	0,000050	120,061	-0,007	0,018
1,40	14,0079	140,079	1,400863	0,000055	0,000050	140,065	-0,014	0,020
1,60	16,0091	160,091	1,600880	0,000052	0,000050	160,064	-0,027	0,022
1,80	18,0102	180,102	1,800907	0,000065	0,000050	180,063	-0,038	0,024
2,00	20,0113	200,113	2,000843	0,000047	0,000050	200,054	-0,059	0,023
2,00	20,0113	200,113	2,001003	0,000135	0,000050	200,070	-0,043	0,021
1,80	18,0102	180,102	1,801313	0,000188	0,000050	180,104	0,002	0,031
1,60	16,0091	160,091	1,601437	0,000159	0,000050	160,119	0,029	0,027
1,40	14,0079	140,079	1,401470	0,000128	0,000050	140,126	0,047	0,023
1,20	12,0068	120,068	1,201407	0,000085	0,000050	120,123	0,055	0,019
1,00	10,0056	100,056	1,001330	0,000090	0,000150	100,118	0,062	0,016
0,80	8,0045	80,045	0,801160	0,000053	0,000050	80,104	0,059	0,013
0,60	6,0033	60,033	0,600943	0,000025	0,000050	60,085	0,052	0,011
0,40	4,0022	40,022	0,400647	0,000021	0,000050	40,059	0,037	0,010
0,20	2,0010	20,010	0,200303	0,000038	0,000050	20,027	0,017	0,010
0,00	0,0000	0,000	-0,000010	0,000026	0,000050	-0,001	-0,001	0,000
Matematická náhrada:			$p_i = c * I$	$C =$		99,9849	bar/(mV/V)	
Průměr.apl. tlaku $P_{r,mean}$ Bar	Průměr výst. signálu mV/V	Interval reprod. b mV/V	Hystereze $P_{i,dn} - P_{i,up}$ mV/V	Náhrada indik. tlaku P_i / bar	Odchylna $p_i - p_r$ bar	Nejistota měření bar	Chyba rozpětí bar	Ch. rozp. převodního koef. *) bar
0,000	-0,000005	0,000026	-0,000010	0,000	0,000	0,011	0,012	
20,010	0,200233	0,000064	0,000140	20,020	0,010	0,027	0,037	0,024
40,022	0,400475	0,000038	0,000343	40,041	0,020	0,027	0,046	0,041
60,033	0,600703	0,000046	0,000480	60,061	0,028	0,034	0,062	0,058
80,045	0,800875	0,000053	0,000570	80,075	0,031	0,040	0,070	0,065
100,056	1,001015	0,000150	0,000630	100,086	0,030	0,038	0,068	0,070
120,068	1,201097	0,000085	0,000620	120,092	0,024	0,053	0,077	0,064
140,079	1,401167	0,000128	0,000607	140,096	0,016	0,065	0,081	0,058
160,091	1,601158	0,000159	0,000557	160,092	0,001	0,074	0,075	0,042
180,102	1,801110	0,000188	0,000407	180,084	-0,018	0,082	0,100	0,057
200,113	2,000923	0,000135	0,000160	200,062	-0,051	0,052	0,103	0,075

*)

Viz tabulka E2b pro porovnání jiných hodnot chyby rozpětí

SOUHRN NEJISTOT V KALIBRAČNÍM TLAKOVÉM BODĚ 100 bar

Vekičina X_i	Odhad x_i	Variační interval $2a$	Rozdělení pravděpo- dobnosti	Dělitel	Standardní nejistota $u(x_i)$	Citlivostní koeficient c_i	Příspěvek ke stand. nej. $u_i(y)$	Variance
p_{standard}	100,056 bar	0,020 Bar	normální	2	0,005 bar	-1	0,005 bar	2,50E-05
výst. sign. (elektr.l)	1,001015 mV/V	0,000100 mV/V	normální	2	0,000025 mV/V	99,9849 bar/(mV/V)	0,002 bar	6,25E-06
výst. sign. (reprod.)	1,001015 mV/V	0,000150 mV/V	rovnoměrné	$3^{0,5}$	0,000043 mV/V	99,9849 bar/(mV/V)	0,004 bar	1,87E-05
hystereze	0,000000 mV/V	0,000630 mV/V	rovnoměrné	$3^{0,5}$	0,000182 mV/V	99,9849 bar/(mV/V)	0,018 bar	3,31E-04
dp	0,030 bar						0,020 bar	3,87E-04

$$\Delta p = 0,030 \text{ bar}$$

$$U = k \cdot u = 0,039 \text{ bar}$$

TABULKA E2B KALIBRACE TLAKOVÉHO SNÍMAČE MĚŘENÍM JEHO PŘEVODNÍHO KOEFICIENTU / ČÍSELNÉ VÝSLEDKY

Měřená data

Aplikovaný tlak	Rozšířená relativní nejistota	Výstupní signál $I_{\text{Digitální kompenzátor}}$					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
p_{standard} bar	$W(p_{\text{standard}})$	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	MV/V
0,000		0,00000	-0,00003	0,00000	0,00002	0,00000	-0,00002
20,010	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,20009	0,20026	0,20019	0,20033	0,20021	0,20032
40,022	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,40026	0,40063	0,40032	0,40067	0,40033	0,40064
60,033	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,60041	0,60094	0,60049	0,60097	0,60049	0,60092
80,045	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,80053	0,80118	0,80062	0,80120	0,80062	0,80110
100,056	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,00063	1,00139	1,00072	1,00135	1,00075	1,00125
120,068	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,20074	1,20149	1,20080	1,20141	1,20082	1,20132
140,079	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,40080	1,40158	1,40089	1,40150	1,40090	1,40133
160,091	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,60082	1,60157	1,60091	1,60148	1,60091	1,60126
180,102	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,80084	1,80148	1,80097	1,80135	1,80091	1,80111
200,113	$1,0 \cdot 10^{-4}$	2,00079	2,00100	2,00088	2,00114	2,00086	2,00087

Vyhodnocení

Aplik. tlak	Rozšířená relativní nejistota	Průměr výstupního signálu	Chyba nuly	Opakovatelnost	Reprodukovatelnost	Hystereze
p_{standard}	$W(I_{D.c.})$	I_{mean}	$f_{0\text{rel}}$	b'_{rel}	b_{rel}	h_{rel}
)		$\Sigma M_i/6$	$ \max /I_{\text{mean}}$	$ \max /I_{\text{mean}}$	$ \max /I_{\text{mean}}$	$(I_{\text{mean}}/3)^ \Sigma h_i $
bar		mV/V				
0,000		-0,000005				
20,010	$2,50 \cdot 10^{-4}$	0,200233	1,5E-04	5,0E-04	6,0E-04	7,0E-04
40,022	$1,25 \cdot 10^{-4}$	0,400475	7,5E-05	1,5E-04	1,7E-04	8,6E-04
60,033	$0,8310 \cdot 10^{-4}$	0,600703	5,0E-05	1,3E-04	1,3E-04	8,0E-04
80,045	$0,63 \cdot 10^{-4}$	0,800875	3,7E-05	1,1E-04	1,1E-04	7,1E-04
100,056	$0,50 \cdot 10^{-4}$	1,001015	3,0E-05	9,0E-05	1,5E-04	6,3E-04
120,068	$0,42 \cdot 10^{-4}$	1,201097	2,5E-05	1,1E-04	1,5E-04	5,2E-04
140,079	$0,36 \cdot 10^{-4}$	1,401167	2,1E-05	9,3E-05	1,9E-04	4,3E-04
160,091	$0,32 \cdot 10^{-4}$	1,601158	1,9E-05	8,7E-05	2,0E-04	3,5E-04
180,102	$0,28 \cdot 10^{-4}$	1,801110	1,7E-05	1,0E-04	2,1E-04	2,3E-04
200,113	$0,25 \cdot 10^{-4}$	2,000923	1,5E-05	4,5E-05	7,0E-05	8,0E-05

*) Na tlakové referenční úrovni kalibrovaného přístroje

Výsledky

Aplik. tlak	Převodní Koefficient	Chyba	Rozšířená relat. nejistota měření	Rozšířená nejistota měření	Chyba rozpětí
p_{standard}	S	ΔS	$W(S)$	$U(S)$	$U'(S)$
	$I_{\text{mean}}/p_{\text{standard}}$	$S - 0,01000151$	$2[\Sigma w_i^2(S)]^{0,5}$	$W \cdot S$	$U + \Delta S$
bar	(mV/V)/bar	(mV/V)/bar		(mV/V)/bar	(mV/V)/bar
0,000					
20,010	0,01000666	0,00000515	6,7E-04	0,00000668	0,00001183
40,022	0,01000637	0,00000486	5,4E-04	0,00000539	0,00001025
60,033	0,01000622	0,00000471	4,9E-04	0,00000493	0,00000964
80,045	0,01000531	0,00000380	4,4E-04	0,00000438	0,00000818
100,056	0,01000455	0,00000304	3,9E-04	0,00000394	0,00000698
120,068	0,01000347	0,00000196	3,3E-04	0,00000335	0,00000531
140,079	0,01000269	0,00000118	3,0E-04	0,00000297	0,00000415
160,091	0,01000155	0,00000004	2,6E-04	0,00000259	0,00000263
180,102	0,01000050	-0,00000101	2,1E-04	0,00000215	0,00000316
200,113	0,00999897	-0,00000254	1,2E-04	0,00000123	0,00000377
	Výsledná hodnota:	0,01000151 (mV/V)/bar			

Souhrn nejistot v kalibračním tlakovém bodě $p = 100$ bar

Veličina	Odhad	Interval	Dělitel	Relativní standardní nejistota	Citlivostní koeficient	Příspěvek k nejistotě	Variance
X_i	x_i	$2a$		$w(x_i)$	c_i	$w_i(y)$	w_i^2
P_{Normal}	100,056 bar	20 mbar	2	$5,00 \cdot 10^{-5}$	-1	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-9}$
V_{reading}	1,001015 mV/V	0,00010 mV/V	2	$2,50 \cdot 10^{-5}$	1	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$6,25 \cdot 10^{-10}$
$K_{\text{zero error}}$	1	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$\sqrt{3}$	$8,66 \cdot 10^{-6}$	1	$8,66 \cdot 10^{-6}$	$7,50 \cdot 10^{-11}$
$K_{\text{repeatability}}$	1	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$\sqrt{3}$	$2,60 \cdot 10^{-5}$	1	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$6,76 \cdot 10^{-10}$
$K_{\text{reproducibility}}$	1	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$\sqrt{3}$	$4,33 \cdot 10^{-5}$	1	$4,33 \cdot 10^{-5}$	$1,87 \cdot 10^{-9}$
$K_{\text{hysteresis}}$	1	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$\sqrt{3}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	1	$1,82 \cdot 10^{-4}$	$3,31 \cdot 10^{-8}$
S	1,000455 E-02 mV/(Vbar)	$w =$				$1,97 \cdot 10^{-4}$	$\sum w_i^2 = 3,88 \cdot 10^{-8}$
S^*	1,000455 E-02 mV/(Vbar)	$W = k * w \quad (k = 2)$				$3,9 \cdot 10^{-4}$	

*) Hodnota koeficientu stanovena pro kalibrační tlak $p = 100,056$ bar. Liší se od hodnoty koeficientu vypočítané ze všech kalibračních bodů.

V kalibračním bodě $p_e = 100$ bar je rozšířená nejistota $U(S)$ hodnoty převodního faktoru S vypočítaná jako:

$$U(s)_{/100 \text{ bar}} = W \cdot S = 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot 0,01000455 \text{ mV/V} \cdot \text{bar} = 3,9 \cdot 10^{-6} \cdot (\text{mV/V}) / \text{bar}$$

Status výsledné hodnoty převodního koeficientu

Obecné využití převodního koeficientu tlakového snímače nepředpokládá používání jednotlivých hodnot pro jednotlivá zatížení (= kalibrační tlakové body), ale použití pouze jedné hodnoty pro celý tlakový rozsah kalibrace. V tomto případě se jedná o směrnicí přímky proložené přes všechny měřené body výstupního signálu.

Pokud je využita tato charakteristická veličina tlakového snímače, status její vhodnosti nahrazuje nejistoty přiřazené k jednotlivým individuálním hodnotám převodního koeficientu.

To vyžaduje stanovit pevné hranice dovolených chyb, které mohou být určeny na základě kalibrace výpočtem chyby rozpětí, tj. s uvažováním:

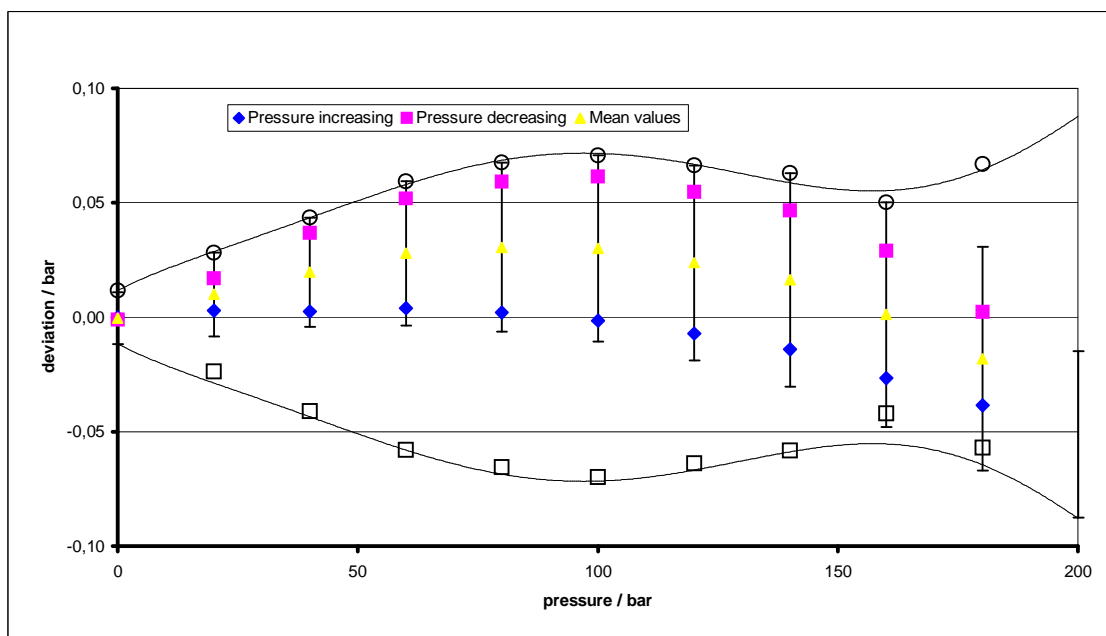
- nejistot spojených s jednotlivými naměřenými hodnotami faktoru a
- odchylek těchto hodnot od výsledné jedné hodnoty převodního faktoru.

Normálně, hodnoty chyby rozpětí se zmenšují se stoupajícím tlakem (viz Graf 9). Je možno využít dvou metod pro stanovení dovolených chyb:

- jedna používá maximální hodnotu chyby rozpětí jako hodnotu limitní, nebo
- limitní hodnoty jsou stanoveny vhodnými křivkami, resp. polynomy.

Poznámka: Použití limitních hodnoty v závislosti na měřeném tlaku není obecná praxe. Přesto, tento případ dovoluje použití menších hodnot nejistot při měření tlaku kalibrovaným přístrojem v horní části jeho tlakového rozsahu.

V případě kalibrovaného přístroje, jehož převodní koeficient je specifikovaný výrobcem, limity dovolených chyb mohou být alternativně určeny na základě tolerance přiřazené ke specifické hodnotě přístroje. V tomto případě je však nutno vždy zkontrolovat, zda hodnoty převodního koeficientu stanovené při kalibraci, včetně jejich nejistot a systematických odchylek od výsledné hodnoty, nepřesahují limity dovolených chyb.

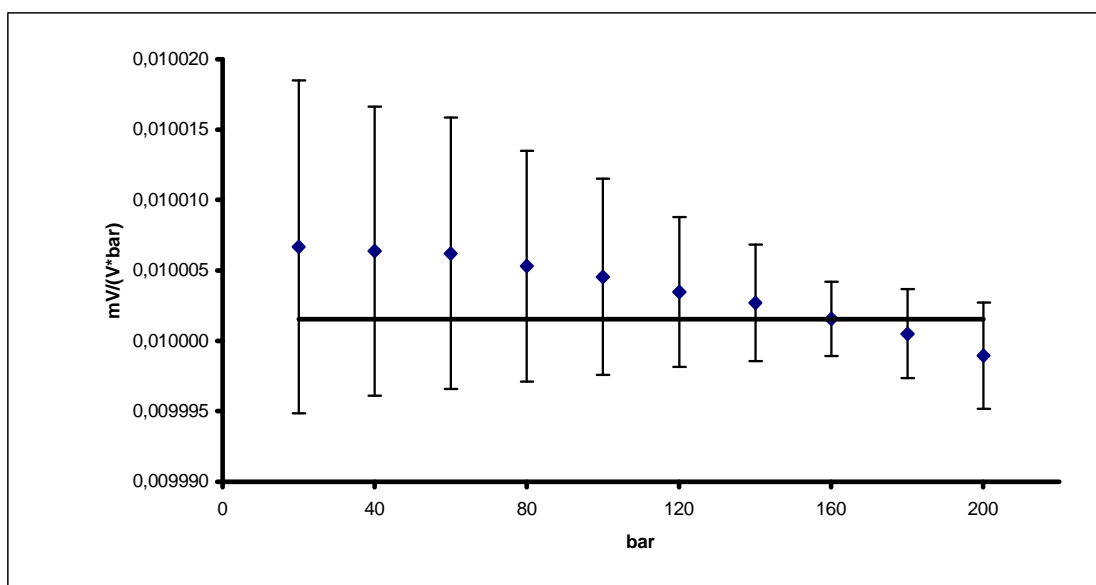


Meze intervalů: Rozšířené nejistoty průměrných hodnot. Spojené body: Chyby rozpětí
Lineární charakteristika: $Měřený\ tlak = 99,9849\ bar/(mV/V) * Indikace$

Prázdné kroužky: rozšířené nejistoty vyhodnocené a popsané v příkladu 2a

Prázdné čtverce: rozšířené nejistoty vyhodnocené a popsané v příkladu 2b

Obrázek 8 - Kalibrace tlakového snímače



Přímka: Výsledná hodnota

Obrázek 9 – Převodní koeficient: Měřené hodnoty a chyby rozpětí