

ANALÝZA NEJISTOTY TLAKU DEFINOVANÉHO PÍSTOVÝMI TLAKOMĚRY PG7102 A PG7601

Autoři :

Pierre Delajoud
CalTechnix S.A.
120, av. Charles de Gaulle
92200 Neuilly-sur-Seine France

Michael Bair
DH Instruments, Inc.
1905 W. Third St.
Tempe, AZ 85281 USA

Překlad :

Anton Piják
D-Ex Limited, s.r.o.
Optátova 37
637 00 Brno

PŘEDMLUVA

Mnoho uživatelů pokládá za nejdůležitější parametr pístového tlakoměru jedinou hodnotu absolutní přesnosti tlaku definovaného pístovým tlakoměrem. V posledních deseti letech se absolutní přesnost neustále zvyšuje a dnes je všeobecně lepší než 0,005% a v některých případech lepší než 0,002%. Při takových přesnostech je výsledný soupis nejistot ovlivněn podmínkami při měření, jež jsou z velké části výrobcem přístroje nekontrolovatelné. Proto jsou údaje o přesnostech bez uvedení předpokladů za jakých byly odvozeny málo užitečné. Nemohou být použity pro srovnání různých přístrojů nebo pro předpověď skutečných výsledných celkových nejistot v dané aplikaci.

Z tohoto důvodu sestavila firma DH Instruments pro řadu PG7000 soubor „standardních“ údajů. Záměrem bylo poskytnout snadno použitelné hodnoty celkové přesnosti definovaného tlaku, které může „typický“ uživatel v „typických“ podmínkách s důvěrou použít. Jsou v nich zahrnuty všechny významné zdroje nejistot a jsou úmyslně zaokrouhleny na nejbližší vyšší celá čísla, konstantní pro každý tlakový rozsah.

Záměrem tohoto dokumentu je poskytnout detailní analýzu „standardních“ údajů o přesnosti pro každý způsob měření přístroji řady PG7000. V analýze jsou popsány dílčí nejistoty, jejich vyhodnocení a zahrnutí do celkové nejistoty definovaného tlaku. Analýza nejistot potvrzuje uživateli platnost hodnot „standardních“ nejistot. Může být rovněž použita k odhadu nejistot pro případ, že jedna nebo více dílčích nejistot bude mít jinou hodnotu než „typickou“. Jiné hodnoty dílčích nejistot mohou poté být použity v popsané analýze k vyhodnocení nové celkové nejistoty definovaného tlaku. Například

nejistota určení efektivní plochy tlakové měrky může být snížena kalibrací přímo v národní laboratoři nebo místní tíhové zrychlení může být zjištěno lépe než na „typických“ ± 5 ppm, výsledkem čehož je nižší celková nejistota definovaného tlaku.

ZÁKLADY ANALÝZY NEJISTOT

Všechny nejistoty jsou počítány metodami popsanými v dokumentu ISO/TAG 4/WG 3 „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“, červen 1992, a technickém dokumentu NIST č. 1297 „Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results“.

Mnoho popsaných nejistot je „typických“ pro pístové tlakoměry PG7102 a PG7601. Složka typu A, což je statistický výsledek založený na sériích měření, nemůže být vypočtena, dokud uživatel systému PG7000 nezíská naměřené hodnoty s daným přístrojem a za daných podmínek. Jelikož statistický údaj může ovlivnit řada nepředvídatelných faktorů (např. proudění vzduchu, vibrace, doplňková technika), můžeme poskytnout pouze typickou hodnotu pro nejistotu typu A, získanou naším měřením na nějakém souboru pístových tlakoměrů za typických vnějších podmínek.

Hodnoty nejistot typu B jsou rovněž uváděny jako typické, neboť jsou založeny na způsobu použití a typických vnějších podmínkách se kterými se uživatel typicky setká. Předpokládané intervaly hodnot veličin prostředí v této analýze jsou následující:

- teplota prostředí: 19 až 23 °C
- relativní vlhkost prostředí: 5 až 95%
- okolní tlak: 70 až 110 kPa

Nejistoty jsou zařazeny do dvou kategorií:

- (i) Nejistoty vyskytující se u všech pístových tlakoměrů řady PG7000, jako jsou nejistoty spojené s okolními podmínkami, hodnotou tlaku referenčního vakua a měření teploty tlakové měřky
- (ii) Nejistoty jejichž hodnoty jsou specifické pro danou tlakovou měřku jako jsou nejistoty spojené s citlivostí a velikostí efektivní plochy.

Pro každou dílčí nejistotu je uveden popis proměnné nebo parametru společně s hodnotou standardní nejistoty a jejího převodového koeficientu na tlak. Po výčtu všech dílčích nejistot jsou vypočteny hodnoty celkových nejistot měřených tlaků pro každý ze tří rozsahů a každý ze tří způsobů měření systému PG7000.

Pokud jsou okolní podmínky jiné než udané v tomto článku nebo nejistoty hodnot některých veličin byly zmenšeny, jako např. nejistota určení efektivní plochy tlakové měřky, pak je možné v tabulkách nahradit „typickou“ nejistotu hodnotou novou. Na závěr se vyčíslí celková nejistota odmocněním součtu druhých mocnin dílčích nejistot a vynásobením příslušným koeficientem pokrytí.

VÝPOČET TLAKU

Následující vztahy jsou použity v systému PG7000 k výpočtu tlaku definovaného v referenční úrovni zkoušeného přístroje. Proměnné jsou společně s uvedením jejich nejistot rozebrány v následujících odstavcích.

• Přetlak =

$$\frac{Mg_i \left(1 - \frac{\rho_{(air)}}{\rho_{(mass)}} \right) + \pi DT}{A_{(20,0)} [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(\theta - 20)] (1 + \lambda P)} - (\rho_{(gas)} - \rho_{(air)})gh$$

• Absolutní tlak s použitím referenčního vakua =

$$\frac{Mg_i + \pi DT}{A_{(20,0)} [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(\theta - 20)] (1 + \lambda P)} - \rho_{(gas)}gh + Vac$$

• Absolutní tlak přičtením hodnoty atmosférického tlaku =

$$\frac{Mg_i \left(1 - \frac{\rho_{(air)}}{\rho_{(mass)}} \right) + \pi DT}{A_{(20,0)} [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(\theta - 20)] (1 + \lambda P)} - \rho_{(gas)}gh + Baro$$

kde:

M	=	celková skutečná hmotnost závaží	[kg]
g_i	=	místní tíhové zrychlení	[m/s ²]
$\rho_{(air)}$	=	hustota okolního vzduchu	[kg/m ³]
$\rho_{(mass)}$	=	průměrná hustota naloženého závaží	[kg/m ³]
πDT	=	efekt způsobený povrchovým napětím (pro plyny považovaný za nulový)	[N]
$\rho_{(gas)}$	=	hustota plynného zkušební média	[kg/m ³]
h	=	odlehlost referenčních úrovní systému PG7000 a zkoušeného přístroje	[m]
Vac	=	zbytkový tlak pod vakuovým zvonem (měření absolutního tlaku s referenčním vakuem)	[Pa]
Baro	=	atmosférický tlak změřený barometrem	[Pa]
$A_{(20,0)}$	=	efektivní plocha tlakové měřky při 20°C a nulovém tlaku	[m ²]
α_p	=	teplotní součinitel délkové roztažnosti pístu	[°C ⁻¹]
α_c	=	teplotní součinitel délkové roztažnosti pouzdra	[°C ⁻¹]
θ	=	teplota tlakové měřky	[°C]
λ	=	součinitel elastické tlakové deformace tlakové měřky	[Pa ⁻¹]
P	=	hodnota tlaku působícího na tlakovou měřku	[Pa]

NEJISTOTY SPOLEČNÉ PRO VŠECHNY ROZSAHY SYSTÉMU PG7000

K systému PG7000 je možné připojit různé zdroje hodnot měřených veličin, definované v souborech nastavení pro uživatelský terminál. V tomto článku se předpokládá, pokud je to možné, že zdroji jsou čidla vestavěná do systému PG7000. K takovým měřeným veličinám patří tlak referenčního vakua, teplota tlakové měřky a vnější podmínky. Nejistoty měření vestavěnými čidly zahrnují základní hodnoty k nimž se přičítají další, pocházející od změny polohy systému nebo navazujících měřicích přístrojů.

B1 - Hmotnost závaží (M)

Skutečné hmotnosti závaží, které jsou uloženy v paměti PG7000, jsou určeny firmou **DH Instruments** substituční metodou založenou na porovnání s etalony hmotnosti kalibrovanými v NIST. Sada závaží se skládá ze sady hlavní, obsahující převážně závaží o hmotnosti 5 kg, ze sady doplňkové tvořené závažími s hmotnostmi zlomků 1 kg a ze sady dovažovacích závaží s nejmenším rozlišením 10 mg. Uvážíme-li, že hmotnosti závaží pro systém PG7000 jsou určeny stejnou metodou, za použití stejných etalonů a stejného zařízení, jsou nejistoty hmotností všech závaží závislé a musí být aritmeticky sečteny namísto odmocnění součtu jejich kvadrátů. Celková nejistota skutečné hmotnosti zátěže pak je (větší z hodnot ± 5 ppm nebo 1 mg) s 95% hladinou spolehlivosti, bez ohledu na to jaká závaží jsou naložena na píst.

Převodový koeficient nejistoty hmotnosti na nejistotu tlaku je roven jedné. Hodnota standardní nejistoty pak bude (větší z hodnot ± 2.5 ppm nebo ± 1 mg). Jelikož hmotnost nejmenší zátěže pístu systému PG7000 je rovna 0,5 kg a hodnota 2,5 ppm z

0,5 kg je větší než 0,5 mg, postačí v analýze uvažovat pouze proporcionální hodnotu ± 2.5 ppm.

B2 - Místní tíhové zrychlení (g)

Místní tíhové zrychlení patří k proměnným, jejichž hodnotu a nejistotu nemůže systém PG7000 poskytnout, neboť závisí na zeměpisné poloze ve které je systém používán. Je ovšem všeobecně známo, že hodnotu tíhového zrychlení pro danou zeměpisnou polohu může instituce US Geodetic Survey zjistit s typickou nejistotou ± 5 ppm s 95% konfidenční pravděpodobností.

Uvážíme-li, že převodový koeficient nejistoty hodnoty této proměnné na nejistotu hodnoty tlaku je roven jedné, můžeme dále v analýze počítat se standardní nejistotou $\pm 2,5$ ppm.

B3 - Měrná hmotnost vzduchu ($\rho_{(air)}$) - pro případ měření přetlaku a absolutního tlaku metodou připočítání hodnoty atmosférického tlaku.

Systém PG7000 provádí výpočet měrné hmotnosti vzduchu kdykoli počítá novou hodnotu tlaku. Její hodnota je společně s průměrnou hodnotou měrné hmotnosti závaží (B4) použita ke korekci aerostatického vztahu podle vztahů pro výpočet hodnoty tlaku. Měrná hmotnost okolního vzduchu je funkcí jeho tlaku, teploty a vlhkosti. Jak již bylo uvedeno v úvodu této sekce, hodnoty veličin prostředí jsou získávány měřením vestavěnými čidly systému PG7000. Proto jsou nejistoty uvedené v tomto odstavci založeny na parametrech vestavěných čidel.

Měrná hmotnost vzduchu je počítána podle následujícího vztahu:

$$\frac{P}{P_n} \times \frac{T_n}{T} \times \frac{Z_n}{Z} \times \text{Normální hustota vzduchu} + \text{Korekce}$$

na vlhkost

kde:

P	= tlak okolního vzduchu	[Pa]
P _n	= normální atmosférický tlak	[101325 Pa]
T _n	= normální teplota	[273.15 K]
T	= teplota okolí (měřena ve °C a připočtena k T _n)	[K]
Z _n	= hodnota normální kompresibility vzduchu	[0.99941]
Z	= kompresibilita vzduchu při tlaku P a teplotě T	[-]
Normální měrná hmotnost vzduchu		[1.2928 kg/m ³]
Korekce na vlhkost		[-]

Následující tabulka uvádí nejistoty hodnoty měrné hmotnosti vzduchu vyplývající z technických údajů o vestavěných čidlech systému PG7000, jež jsou

použity k měření veličin prostředí (není nutné uvádět nejistoty normálních hodnot).

Měřená veličina	Nejistota měření \pm standardní nejistota	Nejistota hodnoty hustoty vzduchu \pm kg/m ³ (standardní nejistota)
T	0.5 °C	0.0022
P	0.1 kPa	0.0012
Z _(P, T)	0.1 %	0.0012
Vlhkost	5.0 % rel. vlhkost	0.0005

Odmocněný součet kvadrátů všech standardních nejistot jednotlivých veličin dává pro standardní nejistotu měrné hmotnosti vzduchu hodnotu $\pm 0,0028$ kg/m³ což činí $\pm 0,23\%$ z hodnoty 1,2 kg/m³.

Za předpokladu, že hodnota průměrné měrné hmotnosti závaží je 8000 kg/m³ a hodnota průměrné měrné hmotnosti vzduchu je 1,2 kg/m³ je hodnota převodového koeficientu 0,000150. Po vynásobení standardní nejistoty ($\pm 0,23\%$) převodovým koeficientem je příspěvek ke standardní nejistotě hodnoty tlaku roven $\pm 0,35$ ppm.

B4 - Průměrná měrná hmotnost zátěže ($\rho_{(mass)}$) - při měření přetlaku a absolutního tlaku metodou připočtení hodnoty atmosférického tlaku.

Průměrná měrná hmotnost zátěže je počítána pro každou zátěž naloženou na píst systému PG7000. Vztah použitý pro její výpočet je následující:

$$\frac{M_{(p)} + M_{(b)} + M_{(s)}}{(M_{(p)}/\rho_{(p)}) + (M_{(b)}/\rho_{(b)}) + (M_{(s)}/\rho_{(s)})}$$

kde:

M _(p)	= skutečná hmotnost pístu	[kg]
$\rho_{(p)}$	= průměrná hustota pístu	[kg/m ³]
M _(b)	= skutečná hmotnost prvku pro ukládání závaží [kg]	[kg]
$\rho_{(b)}$	= průměrná hustota prvku pro ukládání závaží	[kg/m ³]
M _(s)	= skutečná celková hmotnost všech Naložených závaží s hustotou 8000 kg/m ³	[kg]
$\rho_{(s)}$	= hustota hlavních závaží	[8000 kg/m ³]

Měrná hmotnost závaží systému PG7000 je v nejhorším případě určena s nejistotou ± 2 ppm s hladinou spolehlivosti 95%. Nejistota určení průměrné měrné hmotnosti zátěže je největší v případě jejich nejmenších hodnot. Takový případ nastává při

nejmenším tlaku definovatelným tlakovou měrkou nejnižšího rozsahu, kdy je hodnota průměrné měrné hmotnosti zátěže rovna 4 659 kg/m³.

Převodový koeficient má při nejmenší hodnotě tlaku a při normální měrné hmotnosti okolního vzduchu 1,2 kg/m³ hodnotu 0,00026. Standardní nejistota určení měrné hmotnosti závaží, 1 %, násobená převodovým koeficientem dává pro nejistotu hodnoty definovaného tlaku nejistotu $\pm 2,6$ ppm.

B5 - Odlehlost referenčních úrovní (h)

Aby bylo možné vyčíslit příspěvek nejistoty korekce hodnoty tlaku na odlehlost, je potřeba zvolit typickou nejistotu s jakou je možné určit odlehlost referenční úrovně systému PG7000 od referenční úrovně zkoušeného přístroje. Nenákladnými přístroji, jimiž je vybavena většina laboratoří, lze obecně měřit odlehlost s nejistotou ± 5 mm, s úrovní spolehlivosti 95%. Tato hodnota zahrnuje nejistotu čidla pro měření polohy pístu, vestavěného do systému PG7000 a nejistotu určení výškového rozdílu. Převodovým koeficientem s hodnotou 0,000114 vynásobená nejistota určení odlehlosti pro N₂ $\pm 2,5$ mm dává standardní nejistotu $\pm 0,28$ ppm pro definovanou hodnotu tlaku.

B6 - Měrná hmotnost plynného média ($\rho_{(gas)}$)

Z tabulky z odstavce B3, měrná hmotnost vzduchu, plyne, že nejistota určení měrné hmotnosti plynného média bude menší. Není totiž nutné provádět korekci na vlhkost plynného média o kterém se předpokládá, že je suché. Rovněž hodnota tlaku média je známa s nejistotou uvedenou v údajích o systému PG7000 a hodnota stlačitelnosti je známa s tolerancí $\pm 0,01\%$. Standardní nejistota pro N₂ pak bude záviset na jeho teplotě. Předpokládá se, že jakmile je tlak definovaný pístovým tlakoměrem stabilní, je stabilní i teplota média a má hodnotu blízkou hodnotě teploty okolí. Uvažujeme-li nejistotu určení teploty z tabulky B3, standardní nejistota pro plynné médium N₂ bude $\pm 0,0022$ kg/m³, což převedeno na relativní údaj činí $\pm 0,18\%$.

Učiníme-li předpoklad, že typická odlehlost je jeden metr a že měrná hmotnost média roste přímo úměrně s hodnotou tlaku v celém rozsahu systému PG7000, standardní nejistota vynásobená převodovým koeficientem 0,000114 dává standardní nejistotu $\pm 0,21$ ppm hodnoty tlaku systému PG7000.

B7 - Zbytkový tlak referenčního vakua (Vac) - pouze při měření absolutního tlaku vzhledem k referenčnímu vakuu.

Čidlo na měření vakua, vestavěné do systému PG7601, má nejistotu \pm (větší z hodnot 10% odečtu nebo 0,1 Pa) s 95% konfidenční pravděpodobností. Konstrukce systému PG7601 umožňuje dosáhnout vakua o hodnotě 2 Pa v rozumném časovém intervalu jedné až tří minut v závislosti na typu použité vývěvy. Standardní nejistota pro vakuum o hodnotě 2 Pa pak bude $\pm 0,1$ Pa.

Jelikož hodnota této veličiny je již udávána v jednotkách tlaku a je přímo připočtena ke vztahu pro výpočet tlaku, není nutné vyhodnocovat převodní koeficient její nejistoty na nejistotu hodnoty tlaku. Velikost příspěvku k relativní nejistotě měřeného tlaku je závislá na jeho hodnotě.

B8 - Atmosférický tlak (Baro) - pouze při měření absolutního tlaku metodou připočítání hodnoty atmosférického tlaku.

Pokud se systém PG7000 použije pro měření absolutního tlaku metodou připočítání hodnoty atmosférického tlaku, musí se do analýzy zahrnout rovněž nejistota barometru použitého k měření atmosférického tlaku. V této analýze se předpokládá, že jako barometr bude použit přístroj RPM-A0015 firmy DH Instruments, připojený na vyhrazené elektronické rozhraní systému PG7000. Nejistota přístroje RPM-A0015 je ± 10 Pa. Standardní nejistota pak bude ± 5 Pa.

B9 - Rozlišení

Jelikož systém PG7000 udává měřený tlak v číslcové formě, do analýzy nejistot musí být rovněž zahrnuto i jeho rozlišení. Hodnoty všech měřených tlaků ve všech fyzikálních jednotkách (s výjimkou jednoho případu v MPa) jsou vypočteny na 7 dekadických číslic. U chyby dané rozlišením se předpokládá rovnoměrné rozdělení, standardní nejistota tedy bude $\pm 0,6$ ppm (1 ppm/odmocnina ze 3).

B10 - Teplota tlakové měrky (θ)

Nejistota, s jakou se předpoví změna efektivní plochy tlakové měrky s její teplotou, je ovlivněna schopností platinového odporového teploměru, umístěného v bloku pro uchycení měrky, měřit skutečnou teplotu tlakové měrky a nejistotou hodnoty této změřené teploty. Oba tyto vlivy dávají kombinovanou nejistotu $\pm 0,1$ °C s konfidenční pravděpodobností 95%.

Pro tlakové měrky systému PG7000 se udávají dvě hodnoty součinitele teplotní roztažnosti; pro měrky tvořené keramickým pístem ve wolframkarbidovém pouzdře hodnota 10×10^{-6} °C⁻¹ a pro měrky s wolframkarbidovým pístem ve wolframkarbidovém pouzdře hodnota 9×10^{-6} °C⁻¹. Pro tuto složku ne-

jistoty se uvažuje větší z obou hodnot s vědomím, že jejich rozdíl je minimální.

Převodový koeficient nejistoty korekce na teplotu tlakové měrky je roven 0,00001. Po vynásobení standardní nejistoty $\pm 0,05$ °C převodovým koeficientem bude příspěvek standardní nejistoty hodnoty měřeného tlaku roven $\pm 0,5$ ppm.

B11 - Svislost

Nejistota hodnoty tlaku vypočteného systémem PG7000 v sobě rovněž zahrnuje odchylku svislé osy tlakové měrky od směru působení gravitace. Všechny systémy PG7000 jsou vybaveny přesnou libelou, připevněnou k bloku pro uchycení tlakové měrky, s nejistotou ± 2 úhlové minuty s konfidenční pravděpodobností 95%. Dvě úhlové minuty představují nejistotu hodnoty tlaku velikosti $\pm 0,19$ ppm. Standardní nejistota má hodnotu poloviční, tedy $\pm 0,1$ ppm.

NEJISTOTY ZÁVISLÉ NA ROZSAHU (VELIKOSTI) TLAKOVÉ MĚRKY

Se systémem PG7000 mohou být dodány tlakové měrky s následujícími rozsahy:

- 10 kPa/kg (průměr 35 mm)
- 50 kPa/kg (průměr 16 mm)
- 200 kPa/kg (průměr 8 mm)

Následuje popis nejistot typu B, jež jsou závislé na rozsahu (velikosti) tlakové měrky.

B12 - Hodnota efektivní plochy ($A_{(20, 0)}$)

Firma **DH Instruments** je vybavena referenčními tlakovými měrkami s přímou návazností na NIST, tvořícími kalibrační řetězec její laboratoře. Referenční měrky jsou použity k určení efektivních ploch měrek systému PG7000 metodou přímého porovnání. Ačkoliv jsou skutečné hodnoty vypočítaných nejistot vždy menší, uvádí se v následujícím seznamu pro každý rozsah nejhorší možný případ:

Rozsah	Nejistota (95% konfidenční pravděpodobnost) (\pm ppm)	Nejistota standardní nejistota (\pm ppm)
10 kPa/kg	15	7.5
50 kPa/kg	20	10.0
200 kPa/kg	25	12.5

Jak již bylo v předchozím textu zmíněno, celkovou nejistotu je možné zmenšit zmenšením nejistot některých dílčích nejistot, ať už typických nebo

nejhorších možných, zahrnutých do nejistoty celkové.

B13 - Citlivost

Jedním z metrologických parametrů tlakové měrky je její citlivost. Citlivost je definovaná jako nejmenší změna vstupní veličiny pozorovatelná na výstupu. Následující tabulka uvádí nejistotu hodnoty tlaku způsobenou citlivostí pro všechny tlakové rozsahy. Chyba způsobená citlivostí je podobná chybě způsobené rozlišením v tom, že má rovnoměrné rozdělení. Hodnotu standardní nejistoty je pak možné obdržet vydělením odmocninou ze 3.

Rozsah	Nejistota (95% konfidenční pravděpodobnost) (\pm Pa)	Nejistota Standardní nejistota (\pm Pa)
10 kPa/kg	0.1	0.06
50 kPa/kg	0.5	0.29
200 kPa/kg	2.0	1.20

B14 - Linearita

Dalším metrologickým parametrem tlakové měrky je míra souhlasu změny efektivní plochy tlakové měrky v celém rozsahu tlaků s teoriemi mechaniky. U měrek systému PG7000 se předpokládá chování podle lineárního modelu s nejistotou závislou na rozsahu, typu upevnění, materiálech ze kterých jsou vyrobeny a mezeře mezi pístem a pouzdem. Následující tabulka uvádí nejistoty s konfidenční pravděpodobností 95% a standardní nejistoty za předpokladu, že je použit lineární model.

Jelikož pro systém PG7000 existují dvě sady závaží s různou celkovou hmotností, jsou nejistoty spojené s linearitou a pružnou deformací (B15) vyjádřeny pro každou z nich.

Tlaková měrka	(35 kg) (95% konfidenční pravděpodobnost) (\pm ppm)	(35 kg) standardní nejistota (\pm ppm)	(55 kg) (95% konfidenční pravděpodobnost) (\pm ppm)	(55 kg) standardní nejistota (\pm ppm)
10 kPa/kg	2.0	1.0	3.0	1.5
50 kPa/kg	3.0	1.5	5.0	2.5
200 kPa/kg	5.0	2.5	10.0	5.0

B15 - Pružná deformace (λ)

Velikost efektivní plochy je funkcí hodnoty definovaného tlaku a teoretické hodnoty součinitele pružné deformace. Teoretická hodnota součinitele je

vypočtena podle způsobu uchycení tlakové měrky a podle materiálů použitých k její výrobě. Nejistota teoretické hodnoty součinitele, s konfidenční pravděpodobností 95%, je všeobecně považována za rovnu $\pm 10\%$. Následující tabulka uvádí hodnoty součinitelů pružné deformace, jejich standardní nejistoty, horní mez hodnoty tlaku a jeho nejistotu pro všechny rozsahy.

Tlaková měrka	Součinitel tlakové deformace (λ) (Mpa ⁻¹)	Standardní nejistota (Mpa ⁻¹)	35 kg zátěž – max. tlak (Mpa)	35 kg Nejistota hodnoty tlaku Standardní nejistota (\pm ppm)	55 kg zátěž – max. tlak (Mpa)	55 kg Nejistota hodnoty tlaku Standardní nejistota (\pm ppm)
10 kPa/kg	5.38×10^{-6}	2.69×10^{-7}	0.35	0.09	0.55	0.15
50 kPa/kg	-1.67×10^{-6}	8.3×10^{-8}	1.75	0.15	2.75	0.23
200 kPa/kg	-2.35×10^{-6}	1.17×10^{-7}	7.0	0.82	11.0	1.29

Nejistoty uvedené v předchozí tabulce představují nejhorší případ, kdy se pro vyčíslení použije maximální hodnota tlaku v každém rozsahu.

B16 - Součinitel teplotní roztažnosti ($\alpha_p + \alpha_c$)

Velikost efektivní plochy tlakové měrky se mění s teplotou v závislosti na tepelné roztažnosti materiálů ze kterých je vyrobena. Míra změny je dána hodnotou součinitele teplotní roztažnosti. Hodnota součinitele je určena s nejistotou $\pm 5\%$ s 95% konfidenční pravděpodobností. Za předpokladu, že teplota v laboratoři má typicky hodnotu 21 °C, uvádí následující tabulka hodnoty součinitele teplotní roztažnosti tlakové měrky, jeho standardní nejistoty a relativní standardní nejistoty hodnoty tlaku pro korekci o 1 °C.

Rozsah	($\alpha_p + \alpha_c$) (°C ⁻¹)	Standardní nejistota (°C ⁻¹)	Nejistota hodnoty tlaku Standardní nejistota (\pm ppm)
10 kPa/kg	10×10^{-6}	2.5×10^{-7}	0.25
50 kPa/kg	9×10^{-6}	2.2×10^{-7}	0.22
200 kPa/kg	9×10^{-6}	2.2×10^{-7}	0.22

B17 - Stabilita (Reprodukovatelnost)

Stabilita celého systému PG7000 je dána stabilitou velikosti efektivní plochy, hmotnosti závaží a vestavěných čidel.

Vestavěná čidla systému PG7000 jsou vybrána tak, aby vyhovovala udávaným specifikacím po

dobu jednoho roku. Pokud specifikacím vyhovují, žádná další nejistota způsobená jejich driftem se neobjeví.

B17a - Změna hmotnosti závaží dodávaných se systémem PG7000 se může měnit nečistotami a opotřebením. Jelikož jsou systémy PG7000 používány obvykle v laboratořích je změna jejich hmotností v závislosti na čase minimální. Pokud jsou závaží používána správně, změní se jejich hmotnost o méně než ± 2 ppm za rok. Pokud pro tuto změnu uvažujeme konfidenční pravděpodobnost 95%, standardní nejistota způsobená nestálostí hmotnosti závaží bude ± 1 ppm za rok.

B17b - Stabilita efektivní plochy tlakové měrky je závislá na materiálu ze kterého je vyrobena, na velikosti a na způsobu výroby. Firma DH Instruments má dlouholeté zdokumentované poznatky o stabilitě karbidu wolframu a novější poznatky o stabilitě keramického materiálu použitého k výrobě měrky 10 kPa/kg. Z těchto poznatků jasně vyplývá, že stabilita je lepší než ± 4 ppm za rok s konfidenční pravděpodobností 95%. Standardní nejistota pak bude pro každý tlakový rozsah rovna ± 2 ppm za rok.

A1 - Příspěvek nejistoty typu A

Jak již bylo zmíněno na začátku tohoto článku, není možné stanovit experimentální nejistotu typu A, neboť nejsou známy vlivy prostředí, jako jsou např. vibrace nízkých frekvencí nebo proudění okolního vzduchu a vlivy dané instalací v místě použití. Je možné odhadnout velikost nejistoty typu A systému PG7000 založenou na pozorovaných šumech a opakovatelnosti.

Následující tabulka uvádí typické hodnoty nejistoty typu A s 95% konfidenční pravděpodobností a jim odpovídající standardní nejistoty. Nejedná se o skutečné standardní odchylky nýbrž o odhady založené na chybách opakovatelnosti a chybách způsobených šumy v systému podle technických údajů.

Rozsah	Odhad nejistoty typu A (\pm ppm)	Nejistota hodnoty tlaku Standardní nejistota (\pm ppm)
10 kPa/kg	2	1.0
50 kPa/kg	3	1.5
200 kPa/kg	5	2.5

SLOUČENÍ NEJISTOT

Následující tabulky uvádí hodnoty všech nejistot určených v předchozích odstavcích pro všechny rozsahy a každý ze tří způsobů měření systému PG7000. Všechny dílčí nejistoty představují standardní nejistoty. Nejistoty vytištěny tučně jsou uvedeny v jednotkách tlaku. Všechny nejistoty jsou sloučeny do jedné hodnoty odmocněním součtu jejich kvadrátů. Hodnoty uvedené v jednotkách tlaku jsou přičteny přímo k relativní kombinované nejistotě. Na závěr je kombinovaná nejistota vynásobena činitelem pokrytí 2 k dosažení 95% konfidenční pravděpodobnosti.

• **ROZSAH TLAKOVÉ MĚRKY 10 kPa/kg: Standardní hodnoty nejistot, \pm (20 ppm + 0.2 P)**

Proměnná nebo parametr	Typ nejistoty	Měření abs. tlaku pomocí vakua	Měření abs. tlaku přičtením hodnoty atmosférického tlaku		Měření přetlaku	
		35 kg (\pm ppm)	35 kg (\pm ppm)	55 kg (\pm ppm)	35 kg (\pm ppm)	55 kg (\pm ppm)
Plné zatížení						
Hmotnost naložených závaží (M)	B1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Místní tíhové zrychlení (g _i)	B2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Hustota vzduchu ($\rho_{(air)}$)	B3	—	0.35	0.35	0.35	0.35
Průměrná hustota naložených závaží ($\rho_{(mass)}$)	B4	—	2.6	2.6	2.6	2.6
Odlehlost (h)	B5	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Hustota plynného média ($\rho_{(gas)}$)	B6	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
Vac	B7	0.1 Pa	—	—	—	—
Atmosférický tlak (Baro)	B8	—	5 Pa	5 Pa	—	—
Rozlišení	B9	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Teplota měrky (θ)	B10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Svislost	B11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Efektivní plocha ($A_{(20,0)}$)	B12	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Citlivost	B13	0.06 Pa	0.06 Pa	0.06 Pa	0.06 Pa	0.06 Pa
Linearita	B14	1.0	1.0	1.5	1.0	1.5
Pružná deformace (λ)	B15	0.09	0.09	0.15	0.09	0.15
Teplotní roztažnost ($\alpha_p + \alpha_c$)	B16	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Stabilita (závaží)	B17a	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Stabilita (efektivní plochy)	B18b	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Nejistota typu A	A1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Kombinovaná nejistota	—	8,7 ppm + 0,12 Pa	9.1 ppm + 5 Pa	9.2 ppm + 5 Pa	9.1 ppm + 0.06 Pa	9.2 ppm + 0.06 Pa
Rozšířená nejistota při 95% konfidenční pravděpodobnosti	—	17,5 ppm + 0,23 Pa	18.2 ppm + 10 Pa	18.4 ppm + 10 Pa	18.2 ppm + 0.12 Pa	18.4 ppm + 0.12 Pa

• **ROZSAH TLAKOVÉ MĚRKY 50 kPa/kg: Standardní hodnoty nejistot, \pm (25 ppm + 0.5 P)**

Proměnná nebo parametr	Typ nejistoty	Měření abs. tlaku pomocí vakua	Měření abs. tlaku přičtením hodnoty atmosférického tlaku		Měření přetlaku	
			35 kg (\pm ppm)	35 kg (\pm ppm)	55 kg (\pm ppm)	35 kg (\pm ppm)
Plné zatížení		35 kg (\pm ppm)	35 kg (\pm ppm)	55 kg (\pm ppm)	35 kg (\pm ppm)	55 kg (\pm ppm)
Hmotnost naložených závaží (M)	B1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Místní tíhové zrychlení (g)	B2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Hustota vzduchu ($\rho_{(air)}$)	B3	—	0.35	0.35	0.35	0.35
Průměrná hustota naložených závaží ($\rho_{(mass)}$)	B4	—	2.6	2.6	2.6	2.6
Odlehlost (h)	B5	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Hustota plynného média ($\rho_{(gas)}$)	B6	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
Vac	B7	0.1 Pa				
Atmosférický tlak (Baro)	B8	—	5 Pa	5 Pa	—	—
Rozlišení	B9	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Teplota měrky (θ)	B10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Svislost	B11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Efektivní plocha ($A_{(20,0)}$)	B12	10	10	10	10	10
Citlivost	B13	0.29 Pa	0.29 Pa	0.29 Pa	0.29 Pa	0.29 Pa
Linearita	B14	1.5	1.5	2.5	1.5	2.5
Pružná deformace (λ)	B15	0.15	0.15	0.23	0.15	0.23
Teplotní roztažnost ($\alpha_P + \alpha_C$)	B16	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Stabilita (závaží)	B17a	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Stabilita (efektivní plochy)	B18b	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Nejistota typu A	A1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Kombinovaná nejistota	—	11.1 ppm + 0,31 Pa	11.4 ppm + 5 Pa	11.6 ppm + 5 Pa	11.4 ppm + 0.29 Pa	11.6 ppm + 0.29 Pa
Rozšířená nejistota při 95% konfidenční pravděpodobnosti	—	22.2 ppm + 0.62 Pa	22.8 ppm + 10 Pa	23.1 ppm + 10 Pa	22.8 ppm + 0.58 Pa	23.1 ppm + 0.58 Pa

• **ROZSAH TLAKOVÉ MĚRKY 200 kPa/kg: Standardní hodnoty nejistot, \pm (30 ppm + 2 P)**

Proměnná nebo parametr	Typ nejistoty	Měření abs. tlaku pomocí vakua	Měření abs. tlaku přičtením hodnoty atmosférického tlaku		Měření přetlaku	
			35 kg (\pm ppm)	35 kg (\pm ppm)	55 kg (\pm ppm)	35 kg (\pm ppm)
Plné zatížení		35 kg (\pm ppm)	35 kg (\pm ppm)	55 kg (\pm ppm)	35 kg (\pm ppm)	55 kg (\pm ppm)
Hmotnost naložených závaží (M)	B1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Místní tíhové zrychlení (g)	B2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Hustota vzduchu ($\rho_{(air)}$)	B3	—	0.35	0.35	0.35	0.35
Průměrná hustota naložených závaží ($\rho_{(mass)}$)	B4	—	2.6	2.6	2.6	2.6
Odlehlost (h)	B5	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Hustota plynného média ($\rho_{(gas)}$)	B6	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
Vac	B7	0.1 Pa				
Atmosférický tlak (Baro)	B8	—	5 Pa	5 Pa	—	—
Rozlišení	B9	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Teplota měrky (θ)	B10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Svislost	B11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Efektivní plocha ($A_{(20,0)}$)	B12	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
Citlivost	B13	1.20 Pa	1.20 Pa	1.20 Pa	1.20 Pa	1.20 Pa
Linearita	B14	2.5	2.5	5	2.5	5
Pružná deformace (λ)	B15	0.82	0.82	1.29	0.82	1.29
Teplotní roztažnost ($\alpha_P + \alpha_C$)	B16	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Stabilita (závaží)	B17a	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Stabilita (efektivní plochy)	B18b	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Nejistota typu A	A1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Kombinovaná nejistota	—	13.7 ppm + 1.2 Pa	13.9 ppm + 5.1 Pa	14.6 ppm + 5.1 Pa	13.9 ppm + 1.2 Pa	14.6 ppm + 1.2 Pa
Rozšířená nejistota při 95% konfidenční pravděpodobnosti	—	27.4 ppm + 2.4 Pa	27.9 ppm + 10.2 Pa	29.3 ppm + 10.2 Pa	27.9 ppm + 2.4 Pa	29.3 ppm + 2.4 Pa