



# Česká metrologická společnost

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

tel/fax: 221 082 254

e-mail: cms-zk@csvts.cz

www.csvts.cz/cms

## Kalibrační postup

**KP 7.2.1/04/13**

### DIGITÁLNÍ ANEMOMETRY

kalibrace anemometrů ve větrných tunelech

**Praha**  
Říjen 2013

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

**Číslo úkolu:** VII/1/13

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

**Řešitel:** Česká metrologická společnost

© ÚNMZ, ČMS

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

## 1 Předmět kalibrace

Tento kalibrační postup se vztahuje na měřidla rychlosti větru (anemometry) různých typů – např. miskové, vrtulkové, termické a ultrazvukové anemometry a Prandtlovy trubice. Nevztahuje se na optické metody měření rychlosti větru – např. laserové dopplerovské anemometry, pro něž existují přesnější metody kalibrace např. pomocí kotoučových kalibrátorů.

Popsaná metoda předpokládá využití větrného tunelu s etalonem rychlosti proudění vzduchu. Pro kalibrace anemometrů existují i jiné metody, které nejsou zahrnuty v tomto postupu, např. metody založené na tažení zkoušeného měřidla klidným vzduchem definovanou rychlostí, které se využívají zejména v oblasti nízkých rychlostí řádu setin až desetin m/s.

Rozsah rychlostí proudění vzduchu je dán parametry konkrétního anemometru a parametry větrného tunelu. Tento postup je určen pro skupinu anemometrů, jejichž rozsah se pohybuje cca v řádu od desetin po desítky m/s. Tento postup není určen pro anemometry používané např. v leteckých aplikacích, kde se měřené rychlosti proudění mohou pohybovat v řádu stovek m/s, případně mohou dosáhnout nadzvukových hodnot.

## 2 Související normy a metrologické předpisy

ČSN EN 61400-12-1	Větrné elektrárny – Část 12-1: Měření výkonu větrných elektráren (2007), Příloha F: Postup kalibrace miskového anemometru	[1]
ISO 16622	Meteorology – Sonic anemometers/thermometers – Acceptance test methods for mean wind measurements (2002)	[2]
ISO 17713-1	Meteorology – Wind measurements – Part 1: Wind tunnel test methods for rotating anemometer performance (2007)	[3]
ČSN ISO 3966	Měření průtoku tekutin v uzavřených profilech – Metoda měření rychlostního pole pomocí Prandtlových trubic (1996)	[4]
ČSN ISO 10780	Stacionární zdroje emisí – Měření rychlosti a průtoku plynů v potrubí (1998)	[5]
EA 4/02	Vyjadřování nejistot měření při kalibracích (ČIA, 2001)	[6]
ČSN EN ISO/IEC 17 025	Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří	[7]
TNI 01 0115	Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)	[8]
ČSN EN ISO 10012	Systémy managementu měření - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení	[9]

Jednotlivé dokumenty popisují doporučené kalibrační postupy pro určité typy anemometrů pro specifickou aplikaci. V obecném postupu, který zahrnuje kalibrace širšího okruhu anemometrů, na které se nemusejí vztahovat uvedené normy, uvádíme obecně přijatelný postup, který ne vždy přesně kopíruje postupy uvedené v normách pro specifické aplikace. Pro aplikace, na které se vztahují uvedené normy, je třeba vycházet z těchto norem a

postup popsany v tomto textu brát jako doplněk.

### 3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci anemometrů je dána příslušným předpisem organizace. Tito pracovníci se seznámí s kalibračním postupem a souvisejícími předpisy. Doporučuje se potvrzení odborné způsobilosti těchto pracovníků prokázat vhodným způsobem, například osvědčením o odborné způsobilosti, osobním certifikátem apod.

### 4 Názvosloví, definice

LDA ... laserový dopplerovský anemometr

Další pojmy jsou, pokud je třeba, definovány přímo v textu.

### 5 Prostředky potřebné pro kalibraci

- Větrný tunel

Tunel může být přímý s nasáváním okolního vzduchu (typ Eiffel) nebo smyčkový s cirkulací vzduchu (typ Göttinger). Měřicí prostor může být v případě smyčkového tunelu otevřený nebo uzavřený a v případě přímého tunelu je vždy uzavřený.

Průmět plochy zkoušeného měřidla včetně upínacího zařízení, které zasahuje do proudu vzduchu, do roviny kolmé na proud vzduchu by neměl překročit 5 % plochy průřezu měřicího prostoru v případě tunelů s uzavřeným měřicím prostorem a 10 % plochy výstupní trysky v případě tunelů s otevřeným měřicím prostorem, aby se předešlo odchylkám vlivem ucpání měřicího prostoru kalibrovaným měřidlem.

Měl by být znám průběh rychlostního pole proudění vzduchu v měřicím prostoru bez instalovaného kalibrovaného měřidla. Tento průběh lze zjistit ideálně měřením pomocí laserového dopplerovského anemometru (LDA) nebo pomocí jiného přesného anemometru, jehož rozměry jsou natolik malé, že významně neovlivňují proudění v tunelu (např. tenká Prandtlůva trubice, termický anemometr). Rychlosti proudění v různých místech v oblasti instalace kalibrovaného měřidla by se neměly lišit o více než 0,2 % dle EN 61400 - 12 - 1. Norma ISO 17713 je méně přísná a uvádí maximální odchylku rychlosti  $\pm 1$  % v prostoru kalibrovaného měřidla. Měl by být znám rozdíl rychlosti proudění vzduchu v místě, kam se instaluje kalibrované měřidlo a v místě, kde je při kalibraci umístěn etalon rychlosti proudění. Z této hodnoty se při vyhodnocení vypočtou příslušné korekce.

Dle norem EN 61400 - 12 - 1 a ISO 17713 by neměla axiální intenzita turbulence v místě kalibrovaného měřidla překročit hodnotu 2 %. Norma ISO 16622 uvádí maximální hodnotu intenzity turbulence v měřicím prostoru 1 %. Intenzitu turbulence je možno měřit pomocí LDA nebo pomocí termického anemometru.

- Etalon rychlosti proudění vzduchu

Jako etalon rychlosti proudění vzduchu lze použít přesný anemometr, který je instalován

v měřicím prostoru tak, že zásadním způsobem neovlivňuje proudění v tunelu. V současnosti nejpřesnější technologie používaná k tomuto účelu je LDA, jehož výhoda spočívá v bezkontaktnosti, širokém rozsahu rychlostí a nízké nejistotě měření (rozšířená nejistota rychlosti typicky 0,2 % MH až 0,3 % MH). Jako etalon lze použít také např. Prandtlovu trubici, vrtulkový nebo termický anemometr či měření diferenčního tlaku na výstupní kontrakční dýze tunelu.

- Měřidla teploty, barometrického tlaku a vlhkosti uvnitř a vně tunelu

Tato měřidla slouží jednak pro sledování podmínek uvnitř a vně tunelu a jednak pro výpočet hustoty vzduchu uvnitř tunelu při eventuálním měření Prandtlovou trubicí. Nejistoty měření v řádu desetin °C pro teplotu, desítek Pa pro tlak a jednotek % pro relativní vlhkost jsou obvykle dostačující.

Při měřeních Prandtlovou trubicí (ať už jako etalonem nebo zkoušeným měřidlem) se nejistoty měření teploty, tlaku a vlhkosti promítnou do nejistoty určení rychlosti Prandtlovou trubicí. Vztah rychlosti proudění měřené Prandtlovou trubicí a hustoty vzduchu je dán např. v normě ČSN ISO 3966. Výpočet hustoty vzduchu z teploty, tlaku a relativní vlhkosti je dán např. v [1].

- Zařízení pro uchycení kalibrovaných měřidel

Toto zařízení musí umožnit uchycení kalibrovaného měřidla způsobem, který zbytečně nepřidává další objemné překážky do proudu vzduchu a který dovoluje instalovat zkoušené měřidlo ve směru proudění vzduchu s požadovanou úhlovou přesností.

- Zařízení pro odečítání údajů z kalibrovaných měřidel

Zkoušená měřidla mohou mít různé druhy výstupů. Základním druhem výstupu je přímo měřená rychlost proudění, která se zobrazuje na displeji. Jiné druhy výstupů však mohou vyžadovat dodatečná zařízení. Prandtlovy trubice např. vyžadují diferenční tlakoměr, měřidla s proudovým, napěťovým či pulsním výstupem vyžadují vhodný multimetr, měřidla s komunikací RS 232, RS 485 apod. vyžadují odpovídající převodník. Parametry zařízení pro odečítání údajů by měly být voleny tak, aby tato zařízení výrazně nenavýšovala nejistotu měření.

*Pozn.:* Všechna použitá měřidla a měřicí prostředky musí být navázány na vhodný etalon a mít platnou kalibraci.

## 6 Obecné podmínky kalibrace

*Teplota vzduchu v tunelu* by neměla překročit meze stanovené výrobcem zkoušeného měřidla a výrobcí použitých etalonů. Je-li požadavek na teplotu vzduchu při kalibraci pro danou specifickou aplikaci stanoven normou, měla by teplota v tunelu vyhovovat této normě.

*Rozdíl teplot vzduchu v tunelu a okolí* se může projevit zejména u tunelů s otevřeným měřicím prostorem při nízkých rychlostech proudění, jelikož vzduch z tunelu, který se od okolního vzduchu liší teplotou a tedy i hustotou, bude získávat vlivem vztlakové síly

vertikální složku rychlosti. Požadavek na maximální rozdíl teplot se odvíjí od konstrukce tunelu a od rychlosti proudění.

*Maximální přípustná změna teploty vzduchu* během kalibrace se odvíjí od citlivosti konkrétního typu kalibrovaného anemometru na teplotní změny. Vlivem teploty může docházet například ke změně tření v ložiscích rotačních anemometrů nebo ke změně hustoty vzduchu, která je zásadní pro Prandtlovy trubice. K nárůstu teploty vzduchu dochází zejména v tunelech s uzavřenou cirkulací při vyšších rychlostech proudění. Tomuto nárůstu lze buďto předejít, pokud je tunel vybaven regulací teploty vzduchu, nebo je třeba aktuální hodnoty teploty během měření zaznamenávat a deklarovat je ve výstupním dokumentu. Hustotu vzduchu pro měření Prandtlovou trubicí je vždy nutno počítat z aktuálních hodnot teploty, relativní vlhkosti a barometrického tlaku vzduchu v tunelu pro dané měření.

*Relativní vlhkost vzduchu* by neměla překročit meze stanovené výrobcem zkoušeného měřidla a výrobcí použitých etalonů. Je-li požadavek na vlhkost vzduchu při kalibraci pro danou specifickou aplikaci stanoven normou, měla by vlhkost vzduchu v tunelu vyhovovat této normě. Kalibrace by měla probíhat v nekorozním prostředí.

*Proudění okolního vzduchu* může ovlivnit zejména měření v tunelech s otevřeným měřicím prostorem při nižších rychlostech větru. Tomuto proudění musí být zabráněno např. odstraněním všech potenciálních zdrojů (otevřená okna, dveře, zapnutá klimatizace) nebo odstíněním měřicího prostoru ochrannými stěnami, apod.

## 7 Rozsah kalibrace

- Vytemperování měřidla na teplotu v laboratoři,
- seznámení se s fungováním měřidla,
- instalace měřidla do kalibrační pozice a kontrola sklonu měřidla vzhledem k proudění,
- spuštění a stabilizace proudění na dané rychlosti,
- stanovení způsobu odečtu dat z měřidla a doby vzorkování,
- opakovaná měření pro danou rychlost a záznam dat relevantních pro kalibraci,
- vyhodnocení měření – stanovení chyby měřidla a její nejistoty,
- vystavení kalibračního listu.

## 8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

### 8.1 Kontrola dodávky.

Podmínkou pro přijetí měřidla k provedení metrologického výkonu je dodání přístroje s potřebným příslušenstvím a s technickou dokumentací.

U každého měřidla předloženého ke kalibraci se kontroluje:

- kompletnost podle technické dokumentace,
- mechanická a elektrická neporušenost (bezpečnost),
- správná mechanická funkce všech ovládacích prvků,
- provozuschopnost podle technické dokumentace.

Pokud se při technické prohlídce zjistí hrubé závady, je zadavatel kalibrace – vlastník měřidla požádán o jejich odstranění. Do odstranění závad se v kalibraci nepokračuje.

## 8.2 Příprava měřidla

Pracovník provádějící kalibraci měřidla se seznámí s fungováním a ovládáním měřidla na základě manuálu k měřidlu a/nebo konzultací se zákazníkem.

Měřidlo se nechá alespoň hodinu před měřením vytemperovat na teplotu v laboratoři.

Před zkouškou je třeba připravit uchycení měřidla v měřicím prostoru tunelu.

## 9 Postup kalibrace

### 9.1 Poloha kalibrovaného měřidla a poloha etalonu při kalibraci

Při kalibraci musí být kalibrované měřidlo a etalon instalovány tak, aby se minimalizovalo jejich vzájemné ovlivňování. V případě etalonů, které interagují s proudem vzduchu, je třeba zvážit, zda narušení proudění způsobené etalonem nezasahuje v podstatné míře i kalibrované měřidlo. Naopak narušení proudění kalibrovaným měřidlem nesmí v podstatné míře ovlivnit údaj etalonu. Konkrétní umístění měřidla a etalonu splňující výše uvedené podmínky závisí na velikosti a typu měřicího prostoru, na velikosti kalibrovaného měřidla a etalonu a na rychlosti proudění a je třeba se jím zabývat případ od případu.

V případě bezkontaktních etalonů, jako je např. LDA, odpadá problém s ovlivňováním proudění etalonem. Při použití LDA se kalibrované měřidlo typicky umísťuje za měřicí bod LDA po proudu vzduchu mimo osu proudění procházející měřicím bodem LDA. Pro většinu měřidel s velikostí měřicí části v řádu jednotek cm je dostatečná vzdálenost LDA od měřidla cca (20 až 25) cm.

### 9.2 Instalace kalibrovaného měřidla a nastavení jeho směru

Při instalaci kalibrovaného měřidla v měřicím prostoru tunelu je třeba minimalizovat úhlové odchylky měřidla vůči směru proudění vzduchu. Toho lze docílit např. pomocí vodováhy nebo pomocí referenčních laserových paprsků vztažených ke směru proudění vzduchu buďto přímým porovnáním se směrem těchto paprsků nebo sledováním polohy stopy paprsku odraženého od vhodné plochy na kalibrovaném měřidle.

Umožňuje-li zařízení laboratoře odhadnout nejistotu úhlové odchylky instalace měřidla a je-li známa závislost indikace měřidla na úhlové odchylce, je možno zahrnout tuto nejistotu do celkové nejistoty měření.

Závislost indikace některých typů Prandtlových trubic typu L na úhlové odchylce je popsána např. v normě ČSN ISO 3966. Příklad závislosti indikace miskového anemometru na úhlové odchylce je uveden např. v normě ČSN EN 61400 - 12 - 1. Tato norma, ve které je popsán postup kalibrace miskového anemometru pro měření ve větrné energetice, rovněž uvádí maximální přípustnou úhlovou odchylku kalibrovaného měřidla od hlavního proudu vzduchu 1°.

### 9.3 Volba rychlostí pro kalibraci

Pro dané kalibrované měřidlo rozhodne odpovědný pracovník, pro jaké rychlosti proudění se bude kalibrace anemometru provádět. Volba rychlostí se odvíjí od požadavků zákazníka, rozsahu a typu měřidla či od interních předpisů kalibrační laboratoře.

### 9.4 Stabilizace rychlosti proudění

Rychlost proudění v tunelu je třeba nastavit způsobem vedoucím k co možná nejnížší

nestabilitě (časové proměnlivosti) rychlosti proudění. Stabilitu rychlosti proudění je třeba monitorovat přesným anemometrem s dostatečným rozlišením a rychlou odezvou (LDA, termický anemometr, Prandtlova trubice, malý vrtulkový anemometr).

### 9.5 Doba vzorkování během jednoho měření

Většinou se při kalibracích anemometrů neodečítají okamžité hodnoty, ale hodnota z měřidla i etalonu je dána průměrem z hodnot detekovaných měřidly během určité doby vzorkování. Doba vzorkování by měla být stanovena tak, aby nejistota měření typu A pro rychlost měřenou etalonem výrazně nenašovala celkovou nejistotu měření, tj. aby směrodatná odchylka průměru z hodnot zaznamenaných etalonem během vzorkování byla výrazně menší než požadovaná výsledná standardní nejistota měření. Pro různé etalony může vyhodnocení tohoto požadavku vypadat různě. Zde uvádíme příklad pro LDA.

Při měření pomocí LDA se zaznamenávají průlety částic kouře měřicím objemem LDA. Každý průlet částice je vyhodnocen a je určena rychlost průletu částice. Ovládací software pro LDA ukazuje tři hodnoty: průměrnou rychlost  $v$ , tj. rychlost vypočtenou jako aritmetický průměr pro všechny zaznamenané částice, počet zaznamenaných částic  $N$  a intenzitu turbulence  $Tu$ , která je dána jako  $Tu = \sigma/v \cdot 100$  (%), kde  $\sigma$  je směrodatná odchylka rychlostí zaznamenaných částic. Počet zaznamenaných částic  $N$ , kterým je dána i doba vzorkování, by měl splňovat:

$$\frac{Tu}{\sqrt{N}} \leq k \frac{\sigma_v}{v} \cdot 100$$

kde  $\sigma_v$  je požadovaná celková standardní nejistota měření a  $k$  je faktor, který vyjadřuje, kolikrát menší má být směrodatná odchylka průměru vzorkování. Můžeme zvolit např.  $k = 0,1$ .

### 9.6 Průběh série měření

Měření pro danou rychlost se opakuje, aby bylo možno vyhodnotit nejistotu typu A pro kalibrované měřidlo a etalon. Počet opakování se typicky pohybuje mezi třemi a deseti. Opakování lze provést v řadě za sebou pro danou rychlost a pak přejít k rychlosti další, přičemž je možno mezi každým opakováním snížit rychlost proudění v tunelu, aby se tak kalibrované měřidlo dostalo z rovnováhy a zjištěný údaj o opakovatelnosti měl větší praktickou vypovídací hodnotu.

Druhá možnost je po každém měření přejít k následující rychlosti a několikrát opakovat celou sérii měření. Zde je však třeba vzít v úvahu fakt, že zejména v uzavřených větrných tunelech při vyšších rychlostech může výrazně růst teplota vzduchu v tunelu a tím i rozdíl teplot mezi vzduchem v měřicím prostoru a okolím. Při přechodu z vysokých rychlostí na nízké se tedy mohou projevit proudy vzduchu vzniklé tímto rozdílem teplot, protože vzduch v měřicím prostoru bude mít tendenci stoupat.

Pokud je doba vzorkování (jednoho měření) dostatečně dlouhá a během vzorkování jsou zaznamenána všechna průběžně načítaná data nebo alespoň jejich základní statistické parametry jako průměr, směrodatná odchylka a množství zaznamenaných dat. Je možné měření opakovat pouze jednou a nejistotu typu A vyhodnotit z těchto statistických parametrů.



### 9.7 Data zaznamenávaná během měření

Pro každé jednotlivé opakování měření je třeba zaznamenat minimálně následující údaje:

- 1) Údaj rychlosti proudění z etalonu, popřípadě jeho průměrnou hodnotu během doby vzorkování,
- 2) výstupní údaj ze zkoušeného měřidla, popřípadě jeho průměrnou hodnotu během doby vzorkování. Výstupní údaj může být rychlost proudění, diferenční tlak pro Prandtlovy trubice, elektrický proud, napětí či frekvence pulsů pro měřidla s tímto druhem výstupu,
- 3) teplota a vlhkost vzduchu v měřicím prostoru a barometrický tlak,
- 4) údaj o nestabilitě proudění a intenzitě turbulence, pokud jsou tyto údaje relevantní a jsou monitorovány.

Pro celkové měření je třeba zaznamenat alespoň teplotu a vlhkost vzduchu v okolí tunelu.

## 10 Vyhodnocení kalibrace

Pro každou hodnotu rychlosti proudění, pro kterou se provádí kalibrace, se spočte aritmetický průměr z opakovaných měření rychlosti etalonem  $v_{En}$  a kalibrovaným měřidlem  $v_M$ . Hodnota  $v_{En}$  se koriguje o příslušné korekce. Jedná se zejména o korekci na rozdíl rychlostí proudění mezi polohou etalonu a kalibrovaného měřidla  $\Delta v_{pos}$  a v případě měřidel větších rozměrů je možné aplikovat korekci na nehomogenitu proudění v oblasti umístění kalibrovaného měřidla  $\Delta v_{dim}$ . Hodnoty těchto korekcí mohou být zjištěny proměřením rychlostního pole proudění v měřicím prostoru např. pomocí LDA. Korigovaná etalonová rychlost proudění se pak spočte jako

$$v_E = v_{En} + \Delta v_{pos} + \Delta v_{dim}. \quad (1)$$

Chyba měření se následně spočte jako

$$E = v_M - v_E, \quad (2)$$

případně lze chybu vyjádřit relativně jako

$$E_{rel} = \frac{v_M - v_E}{v_E} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Nejistota chyby se spočte dle článku 13 tohoto postupu.

Kritéria pro hodnocení výsledku kalibrace (např. maximální dovolená chyba dle určité normy nebo dle třídy přesnosti, je-li specifikována výrobcem) stanoví zadavatel.

## 11 Kalibrační list

### 11.1 Náležitosti kalibračního listu

Kalibrační list by měl obsahovat minimálně následující údaje:

- a) název a adresu kalibrační laboratoře,

- b) pořadové číslo kalibračního listu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- c) jméno a adresu zadavatele, resp. zákazníka,
- d) název a identifikační číslo kalibrovaného měřidla, popřípadě jméno výrobce,
- e) datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- f) označení kalibračního postupu (v tomto případě KP 7.2.1/04/13),
- g) podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňujících veličin apod.),
- h) měřidla použita při kalibraci,
- i) obecné vyjádření o návaznosti výsledků měření (etalony použité při kalibraci),
- j) výsledky měření a s nimi spjatou nejistotu měření a/nebo prohlášení o shodě s určitou metrologickou specifikací,
- k) jméno pracovníka, který měřidlo kalibroval, jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, razítko kalibrační laboratoře.

Akreditovaná kalibrační laboratoř navíc uvede přidělenou kalibrační značku a odkaz na 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, 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. I v tomto případě však musí kalibrační laboratoř zpracovat záznam o měření (s uvedenými měřenými hodnotami) a archivovat jej.

### 11.2 Protokolování

Originál kalibračního listu se předá zadavateli kalibrace. Kopii kalibračního listu si ponechá kalibrační laboratoř a archivuje ji po dobu nejméně pět roků nebo po dobu stanovenou zadavatelem zároveň se záznamem o kalibraci. Doporučuje se archivovat záznamy a kalibrační listy chronologicky. Výsledky kalibrace se mohou v souladu s případnými podnikovými metrologickými dokumenty zanášet do kalibrační karty měřidla nebo ukládat do vhodné elektronické paměti.

### 11.3 Umístění kalibrační značky

Po provedení kalibrace může kalibrační laboratoř označit kalibrované měřidlo kalibrační značkou, popř. kalibračním štítkem. Pokud to není výslovně uvedeno v některém podnikovém metrologickém předpisu, nesmí kalibrační laboratoř uvádět na kalibrační štítek datum příští kalibrace.

## 12 Péče o kalibrační postup

Originál kalibračního postupu je uložen u jeho zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku (viz čl. 12.1 tohoto postupu). Změny, popř. revize kalibračního postupu provádí jeho zpracovatel. Změny schvaluje vedoucí zpracovatele (vedoucí kalibrační laboratoře nebo metrolog organizace).

## 13 Rozdělovník, úprava a schválení, revize

### 13.1 Rozdělovník

Kalibrační postup		Převzal		
Výtisk číslo	Obdrží útvar	Jméno	Podpis	Datum

### 13.2 Úprava a schválení

Kalibrační postup	Jméno	Podpis	Datum
Upravil			
Úpravu schválil			

### 13.3 Revize

Strana	Popis změny	Zpracoval	Schválil	Datum

## 14 Stanovení nejistoty měření (příklad výpočtu)

### Stanovení standardní nejistoty typu A

Uvažujme sérii měření, kde pro danou rychlost bylo provedeno  $n$  opakování měření za stejných podmínek. Hodnoty zjištěné při těchto měřeních označme  $x_i$ , kde index  $i$  nabývá hodnot 1 až  $n$ . Aritmetický průměr z těchto hodnot je dán jako:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

Je-li počet měření dostatečně velký ( $n \geq 10$ ), standardní nejistota typu A aritmetického průměru veličiny  $x$  se dle EA 4/02 určí podle vztahu:

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (5)$$

Pro menší počet měření lze použít postup vyhodnocení popsany v TPM 0051 - 93, který spočívá ve vynásobení nejistoty  $u_A$  spočtené dle výše uvedeného vzorce koeficientem dle tabulky níže:

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_{u_A}$	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

Pro  $n < 10$  tedy máme

$$u_A(x) = k_{u_A} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (6)$$

Pro malý počet měření ( $n < 10$ ) lze ekvivalentně použít přístup popsany v příloze E dokumentu EA 4/02, který je založen na výpočtu koeficientu rozšíření pro danou hodnotu efektivních stupňů volnosti (jedná se zde tedy rovnou o rozšířenou nejistotu).

Celková nejistota měření typu A je dána příspěvkem od etalonu a od zkoušeného měřidla

$$u_A = \sqrt{u_A(v_{En})^2 + u_A(v_M)^2}. \quad (7)$$

### Stanovení standardní nejistoty typu B:

Možné zdroje nejistoty typu B jsou:

- 1) Nejistota kalibrace etalonu,
- 2) nejistota určení korekčního členu  $\Delta v_{pos}$ ,
- 3) nejistota určení korekčního členu  $\Delta v_{dim}$ ,
- 4) nejistota způsobená ucpáním měřicího prostoru kalibrovaným měřidlem,
- 5) nejistota orientace etalonu vůči proudu vzduchu,
- 6) nejistota orientace kalibrovaného měřidla vůči proudu vzduchu,
- 7) nejistota způsobená nestabilitou rychlosti proudění během kalibrace,
- 8) dílek etalonu,
- 9) dílek kalibrovaného měřidla,
- 10) nejistota kalibrace měřidel snímajících výstup kalibrovaného měřidla (diferenční tlakoměr, multimetr, ...).

Podívejme se nyní detailněji na jednotlivé zdroje nejistoty.

*Nejistota kalibrace etalonu* je dána kalibračním listem etalonu, případně dlouhodobou stabilitou etalonu, pokud je tato známa.

*Nejistota určení korekčních členů  $\Delta v_{pos}$  a  $\Delta v_{dim}$*  závisí na konkrétním postupu měření, kterým byly tyto členy změřeny. Závisí na metrologických parametrech anemometru, kterým byly změřeny a na postupu měření a jeho opakovatelnosti.

*Nejistota způsobená ucpáním měřicího prostoru kalibrovaným měřidlem* se projevuje více u tunelů s uzavřeným měřicím prostorem v případě kalibrace rozměrnějších měřidel.

Pokud není počítána korekce na ucpání, norma ČSN EN 61400 - 12 - 1 uvádí požadavek na příspěvek k relativní nejistotě o velikosti 1/4 poměrného ucpání pro uzavřené měřicí prostory a 1/16 poměrného ucpání pro otevřené měřicí prostory. Poměrným ucpáním se zde myslí poměr části čelní plochy měřidla včetně úchyty vstupující do měřicího prostoru k ploše průřezu měřicího prostoru. Tyto hodnoty nejistot jsou hrubým odhadem. Skutečný vliv ucpání lze zjistit často jen experimentálně pro konkrétní anemometr v konkrétním tunelu.

V případě uzavřeného měřicího prostoru lze nejistotu snížit aplikací korekce na ucpání vypočítané podle Maskellova teorému [2].

*Nejistotu orientace etalonu vůči proudu vzduchu a nejistotu orientace kalibrovaného měřidla vůči proudu vzduchu* lze určit, pokud je tunel vybaven měřením úhlu otočení. Výsledný příspěvek k nejistotě chyby kalibrovaného měřidla lze určit, pokud je známa závislost chyby měřidla či etalonu na úhlu otočení. Závislost indikace některých typů Prandtlových trubíc typu L na úhlové odchylce je popsána např. v normě ČSN ISO 3966. Příklad závislosti indikace miskového anemometru na úhlové odchylce je uveden např. v normě ČSN EN 61400 - 12 - 1. Pro některé typy anemometrů (např. LDA) lze jejich úhlovou závislost poměrně jednoduše vypočítat z jejich fyzikálního principu. Pro LDA je tato závislost dána jako

$$\frac{\Delta v_{ang}}{v_{LDA}} = (1 - \cos \varphi) \approx \frac{\varphi^2}{2}, \quad (8)$$

kde  $\varphi$  je úhlová odchylka,  $\Delta v_{ang}$  je odchylka indikované rychlosti způsobená úhlovou odchylkou a  $v_{LDA}$  je rychlost indikovaná LDA. Úhlovou závislost lze v obecném případě také změřit.

*Nejistota způsobená nestabilitou rychlosti proudění během kalibrace.* Velikost tohoto příspěvku závisí na vlastnostech konkrétního zkoušeného měřidla a etalonu, zejména na jejich reakční době při změně rychlosti a také na změně jejich chyby měření při změně rychlosti.

Pokud například etalon i kalibrované měřidlo sledují kolísání rychlosti v tunelu bez výrazného prodlení a jejich chyba měření je konstantní v intervalu kolísání rychlosti, pak nestabilita proudění nevnáší nejistotu do určení chyby kalibrovaného měřidla. Pokud však například kalibrované měřidlo má velkou setrvačnost a při kolísání rychlosti v tunelu se jeho indikace příliš nemění a zůstává vychýlena na jednu nebo druhou stranu od průměrné rychlosti v tunelu – v tomto případě se nestabilita proudění na nejistotě chyby měřidla projeví.

Odhadem maximální hodnoty rozšířené nejistoty pak může být rozdíl průměrné rychlosti proudění během měření a její maximální či minimální hodnoty, podle toho, která hodnota dá větší rozdíl. Ve většině případů bude tato nejistota výrazně menší, obzvláště je-li kalibrovanému měřidlu ponechána dostatečná doba na ustálení. Odpovídající standardní nejistota je pak polovinou této hodnoty.

*Dílek etalonu a dílek kalibrovaného měřidla.* Uvažujme, že dílek kalibrovaného měřidla či etalonu má hodnotu  $d$ . Je-li indikována hodnota  $x$ , skutečná měřená hodnota leží v intervalu  $x \pm d/2$  s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti. Odpovídající standardní nejistota měření je pak dána vztahem:

$$u_d = \frac{d}{2\sqrt{3}}. \quad (9)$$

Nejistota kalibrace měřidel snímajících výstup kalibrovaného měřidla je dána chybou a nejistotou těchto měřidel uvedenou v jejich kalibračních listech. Citlivostní koeficient je dán vztahem mezi indikační veličinou a rychlostí proudění.

Označíme-li  $u_{Bi}$  standardní nejistoty typu B od jednotlivých vlivů a  $c_i$  příslušné citlivostní koeficienty, pak celková nejistota typu B je dána jako (korelace považujeme za zanedbatelné)

$$u_B = \sqrt{\sum_i (c_i u_{Bi})^2}. \quad (10)$$

### Stanovení kombinované standardní nejistoty:

Kombinovaná standardní nejistota je dána jako:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (11)$$

### Stanovení rozšířené nejistoty:

Rozšířená nejistota měření je dána jako:

$$U = k \cdot u, \quad (12)$$

kde hodnota koeficientu rozšíření je  $k = 2$ , což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

### Příklad výpočtu nejistoty měření

Zde uvádíme příklad výpočtu nejistoty pro kalibraci vrtulkového anemometru s průměrem vrtulky 10 cm v tunelu s otevřeným měřicím prostorem a s průměrem výstupní trysky 45 cm pro rychlost proudění 5 m/s. Jako etalon rychlosti proudění je v našem příkladu použito LDA. Měřicí bod LDA je umístěn 215 mm před kalibrovaným měřidlem a 125 mm na straně od osy měřicího prostoru. Kalibrované měřidlo je umístěno na ose uprostřed měřicího prostoru.

Uvažujeme, že kalibrované měřidlo zobrazuje měřenou rychlost na displeji a je možné nastavit zobrazení průměrné hodnoty vzorkování rychlosti během určité doby. Typická intenzita turbulence při rychlosti 5 m/s je cca 0,3 % a doba jednoho měření (vzorkování) bude 30 s. Uvažujeme 10 opakování měření. Předpokládáme, že zadavatel nepožaduje kalibraci podle určité specifické normy. Dílek LDA je 0,001 m/s a dílek kalibrovaného měřidla je 0,01 m/s. Naměřené hodnoty rychlosti v jednotkách m/s jsou

$v_{LDA}$	5,0076	5,0065	5,0083	5,0089	5,0053	5,0090	5,0078	5,0076	5,0085	5,0097
$v_M$	5,068	5,074	5,070	5,068	5,070	5,064	5,070	5,070	5,066	5,070

Jedná se o průměrné hodnoty za 30 s měření. Tyto hodnoty mají tedy o jedno desetinné

místo navíc oproti rozlišení měřidla.

### Standardní nejistota typu A

Hodnota  $v_{En}$  je dána jako průměr hodnot měřených LDA. Máme tedy  $v_{En} = 5,0079$  m/s a podle vzorce (5) dostaneme hodnotu  $u_A(v_{En}) = 0,0004$  m/s. Hodnota  $v_M$  je dána jako průměr hodnot měřených kalibrovaným měřidlem. Máme tedy  $v_M = 5,0690$  m/s a podle vzorce (5) dostaneme hodnotu  $u_A(v_M) = 0,0009$  m/s. Celkovou nejistotu typu A vypočteme podle vzorce (7) a získáme hodnotu  $u_A = 0,0010$  m/s.

### Standardní nejistota typu B

*Nejistota kalibrace etalonu.* Rychlost měřená LDA se vyjádří jako  $v = dx \cdot f$ , kde  $dx$  je vzdálenost interferenčních rovin v měřicím objemu LDA a  $f$  je měřená frekvence kolísání intenzity rozptýleného světla. Hodnota  $dx$  je stanovena kalibrační laboratoří, která je k tomuto úkonu akreditovaná. Hodnota stanovena kalibrační laboratoří je zanesena v kalibračním certifikátu včetně rozšířené nejistoty, která činí 0,2 %. Nejistota stanovení frekvence  $f$  je odhadnuta na základě výzkumu provedeného výrobcem. Rozšířená nejistota stanovení frekvence FFT algoritmem za použití oknové funkce typu Blackwell je maximálně 0,06 %. Celková rozšířená nejistota měření rychlosti pomocí LDA je pak stanovena jako

$$U_{cal}(v_{LDA}) = \sqrt{0,2^2 + 0,06^2} = 0,21 \%$$

Hodnota standardní nejistoty  $u_{cal}(v_{LDA})$  je pak dána jako polovina hodnoty rozšířené nejistoty, tj.  $u_{cal}(v_{LDA}) = 0,1\%$ , což v absolutních jednotkách pro rychlost 5 m/s je

$$u_{cal}(v_{LDA}) = 0,005 \text{ m/s.}$$

*Nejistotu korekčních členů  $\Delta v_{pos}$  a  $\Delta v_{dim}$  značíme  $u(\Delta v_{pos})$  a  $u(\Delta v_{dim})$ .* Hodnoty  $u(\Delta v_{pos})$  a  $u(\Delta v_{dim})$  jsou odhadnuty na základě měření rychlostních profilů v měřicím prostoru tunelu. Pro tyto veličiny byly měřeními získány hodnoty  $\Delta v_{pos} = 0,011$  m/s,  $u(\Delta v_{pos}) = 0,001$  m/s,  $\Delta v_{dim} = 0,002$  m/s,  $u(\Delta v_{dim}) = 0,002$  m/s.

*Nejistotu způsobenou ucpáním měřicího prostoru zkoušeným měřidlem odhadneme podle doporučení normy ČSN EN 61400 - 12 - 1 pro otevřený měřicí prostor jako 1/16 poměrného ucpání. Poměrné ucpání vrtulkovým anemometrem s průměrem vrtulky 10 cm v tunelu s výstupní tryskou o průměru 45 cm činí 5 %. Z toho 1/16 je 0,3 %, což pro rychlost 5 m/s dělá  $u_{ucp} = 0,015$  m/s.*

*Nejistota orientace etalonu vůči proudu vzduchu byla odhadnuta na 1°. Hodnota  $\Delta v_{ang}$  odchylky rychlosti způsobené úhlovou výchylkou je pro LDA je dána vzorcem (8), tj. jako  $\Delta v_{ang} = v_{LDA}(1 - \cos \varphi) \approx v_{LDA}\varphi^2/2$ , kde  $\varphi$  je úhlová odchylka LDA od směru proudění vzduchu. Citlivostní koeficient odpovídající tomuto vlivu je tedy  $\partial \Delta v_{ang} / \partial \varphi = v_{LDA}\varphi$ , což pro předpokládanou hodnotu  $\varphi = 0$  vede na nulovou hodnotu. I pokud vyjádříme odchylku  $\Delta v_{ang}$  přímo, tedy nikoli pouze lineární aproximací, dostaneme hodnotu  $\Delta v_{ang} = 0,0008$  m/s, která je oproti ostatním vlivům zanedbatelná.*

Nejistota orientace zkoušeného měřidla vůči proudu vzduchu byla odhadnuta na  $1^\circ$ . Závislost chyby měřidla na náběhovém úhlu není známa a tento vliv považujeme za zanedbatelný.

Nejistota způsobená nestabilitou rychlosti proudění během kalibrace. Nestabilita rychlosti proudění (rozdíl maxima a průměru rychlosti během měření) je cca 0,2 %, což odpovídá maximální standardní nejistotě 0,1 % z měřené rychlosti, tj. 0,005 m/s. Jedná se o horní odhad. Skutečný vliv nestability bude pravděpodobně menší. Vliv turbulence zde neuvažujeme.

Dílek etalonu 0,001 m/s vede podle vzorce (9) na standardní nejistotu  $u_{dE} = 0,0003$  m/s.

Dílek kalibrovaného měřidla 0,01 m/s vede podle vzorce (9) na standardní nejistotu  $u_{dE} = 0,003$  m/s.

Nejistota kalibrace měřidel snímajících výstup kalibrovaného měřidla se zde neuplatňuje, protože měřidlo indikuje přímo hodnotu rychlosti.

### Přehled příspěvků do nejistoty etalonové rychlosti typu B

Veličina	Hodnota	Standardní nejistota	Rozdělení	Citlivostní koeficient	Příspěvek k nejistotě
$v_{LDA}$	5,000 m/s	0,005 m/s	normální	1	0,005 m/s
$\Delta v_{pos}$	0,011 m/s	0,001 m/s	normální	1	0,001 m/s
$\Delta v_{dim}$	0,002 m/s	0,002 m/s	normální	1	0,002 m/s
$\Delta v_{ucpání}$	0 m/s	0,015 m/s	normální	1	0,015 m/s
$\varphi_E$	$0^\circ$	$1^\circ$	normální	$v \cdot \varphi$	0 m/s
$\varphi_M$	$0^\circ$	$1^\circ$	normální	0	0 m/s
$\Delta v_{nestabilita}$	0 m/s	0,005 m/s	normální	1	0,005 m/s
$\Delta v_{dílekE}$	0 m/s	0,0003 m/s	rovnoměrné	1	0,0003 m/s
$\Delta v_{dílekM}$	0 m/s	0,003 m/s	rovnoměrné	1	0,003 m/s
Celková standardní nejistota chyby měření typu B - dle vzorce (10)					0,017 m/s

### Kombinovaná standardní nejistota chyby a rozšířená nejistota chyby

Kombinovaná standardní nejistota chyby je dána vzorcem (11) a její hodnota je

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,001^2 + 0,017^2} = 0,017 \text{ m/s.}$$

Rozšířená nejistota chyby je dána vzorcem (12) a její hodnota je  $U = 0,034$  m/s, což je 0,68 % z měřené rychlosti.

Samotná chyba měření je dána vzorcem (2) a její hodnota je

$$E = v_M - (v_{En} + \Delta v_{pos} + \Delta v_{dim}) = 0,048 \text{ m/s.}$$



## 15 Validace

Kalibrační metody podléhají validaci v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 čl. 5.4. Validační zpráva je uložena v archivu sekretariátu ČMS.

### Upozornění

Kalibrační postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby jej organizace přizpůsobila svým požadavkům s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky. V případě, že střediskem provádějícím kalibraci je akreditovaná kalibrační laboratoř, měl by být kalibrační postup navíc upraven podle příslušných předpisů (zejména MPA a EA).

### Reference

- [1] R. S. Davis, *Equation for the Determination of the Density of Moist Air*, Metrologia **29** (1992), str. 67-70
- [2] E. C. Maskell, *A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel*, Aeronautical Research Council Reports and Memoranda No. **3400** (1963)