



ČESKÉ KALIBRAČNÍ SDRUŽENÍ

Slovinská 47, 612 00 Brno

PŘÍRUČKA PRO UŽIVATELE VAH S NEAUTOMATICKOU ČINNOSTÍ

**k vyjadřování chyb indikací a nejistot při používání a vyjadřování
výsledků vážení**

PŘÍRUČKA BYLA ZPRACOVÁNA A FINANCOVÁNA V RÁMCI PLÁNU STANDARDIZACE

PROGRAM ROZVOJE METROLOGIE 2010

Číslo úkolu: **VII/3/10**

Název úkolu: **Vyjadřování chyb indikací a nejistot při používání vah a výsledků vážení**

Zadavatel: **Česká republika – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii**

a státní zkušebnictví, organizační složka státu

Řešitel: **České kalibrační sdružení**

Neprodejné - **Metodika** je k dispozici k volnému využití, nesmí však být využita ke **komerčním účelům**. Zveřejnění na stránkách ČKS bylo schváleno odborem metrologie **ÚNMZ**

LISTOPAD 2010

OBSAH

1. Úvod
- 2 Základy měření hmotnosti
- 3 Rušivé vlivy a faktory mající vliv na vážení
- 4 Principy vážení
- 5 Kalibrace vah
- 6 Vlivy působící na váhy v používání (z hlediska nejistot měření)
- 7 Vyjádření nejistoty vah při používání (tři případy)
- 8 Metody pro odvození chyb indikací pro jiné než kalibrované body
- 9 Výsledek vážení a vyjádření hmotnosti
- 10 Chyby vah a jejich použití v praxi
- 11 Vyhodnocení nejistoty a její použití v praxi

1. Úvod

Měření hmotnosti patří k nejrozšířenějším technickým a laboratorním činnostem, kterému se věnuje v praxi většina subjektů. Měření hmotnosti se tak stává velmi důležitým a to jak z hlediska rozsahu (jedná se o měření v oblasti návaznosti měřidel hmotnosti, stanovování hmotnosti v laboratořích a měření hmotnosti v různých oblastech průmyslu), tak z hlediska významu pro další (odvozené) fyzikální veličiny. Z těchto důvodů je třeba věnovat metodám měření hmotnosti a způsobům vyjadřování nejistoty (nedílné součásti výsledku každého měření) značnou pozornost. Jednu z takto významných oblastí měření hmotnosti a kalibrací vůbec tvoří kalibrace vah s neautomatickou činností. Význam těchto kalibrací spočívá mimo jiné v tom, že váhy s neautomatickou činností můžeme nalézt prakticky ve všech oblastech průmyslu, obchodu, zdravotnictví, vědy apod..

Váhy jsou dnes nepostradatelným nástrojem v laboratořích a za posledních 50 let prošly významným vývojem. Nové konstrukce vah jsou díky moderním elektronickým prvkům snadno ovladatelné a jsou schopny splnit náročné požadavky uživatelů. Váhy poslední generace obsahují software a hardware splňující nezbytné předpoklady pro automatizaci laboratorních procesů.

Cílem této příručky je poskytnout především uživatelům vah základní informace o správných aplikacích vah v laboratořích i výrobních procesech a o nakládání s výsledky jejich kalibrací.

2 Základy měření hmotnosti

Vážení je proces, při kterém je měřena fyzikální veličina „*hmotnost*“ jako násobek nebo podíl jednotky 1 *kilogram*. Jako každý proces měření musí vážení splnit tři základní předpoklady: jednotka měření musí být definována, musí být použita vhodná metoda a musí být k dispozici měřicí zařízení.

2.1 Hmotnost a její jednotka

Definice tak jak ji uvádí *Zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii* zní takto:

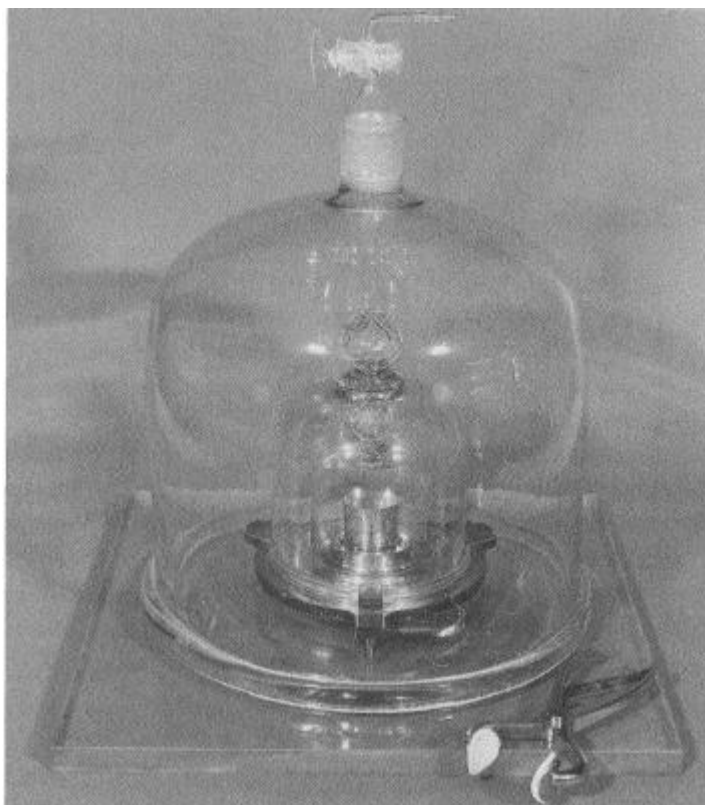
Jednotka hmotnosti - kilogram (kg); kilogram se rovná hmotnosti mezinárodního prototypu kilogramu. Tato definice je v souladu se zněním, které nalezneme v mezinárodní soustavě jednotek (SI).

„The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram.“

Prototyp je vyroben ze slitiny platiny a iridia a je uložen v Mezinárodním úřadu pro váhy a míry BIPM v Sévres u Paříže.

Pozn.: V současnosti probíhá intenzivní výzkum směřující k redefinici jednotky hmotnosti, která by byla definovaná právě na základě některé z fyzikálních konstant.

Tento prototyp kilogramu má podobu rovnostranného válce (výška se rovná průměru) a výšce a průměru 39 mm a je vyroben ze slitiny a Pt₉₀Ir₁₀ (90% platina a 10% iridia). Jeho hustota je přibližně 21.500 kg m⁻³.

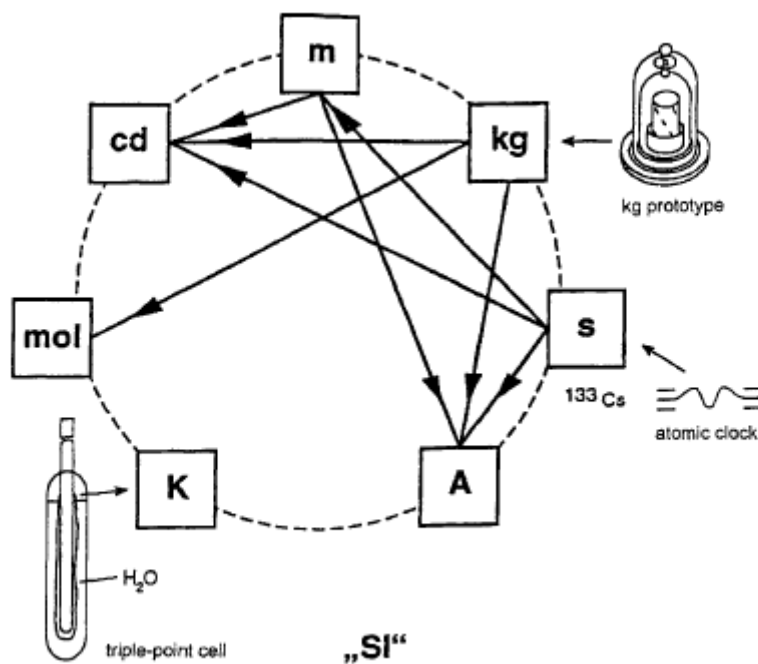


Obr. 1 Mezinárodní prototyp kilogramu uchovávaný pod třemi skleněnými kryty v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy (BIPM) v Sèvres u Paříže.

Tento válec je tedy základní jednotkou a tedy referenční kvantitou pro každou vážicí proceduru, prováděnou kdekoliv na světě.

2.2 Hmotnost a SI

Hmotnost je jednou ze sedmi základních na sobě nezávislých jednotek z pohledu definic. Mezi těmito jednotkami je kilogram poslední jednotkou, která není definována na základě fyzikálních konstant, ale je určena jako specifický objekt. Z tohoto důvodu existuje v oblasti měření hmotnosti mnohastupňové schéma návaznosti. V této hierarchii pak závisí nejistota na určitém stupni na počtu předešlých porovnání.



Obr. 2 schéma Mezinárodního systému jednotek

Při měření hmotnosti se využívá vzájemné přitažlivosti těles nazývané „gravitace“. Využívá se tedy Newtonova gravitačního zákona, který říká, že dvě tělesa o hmotnostech m a M , které jsou ve vzdálenosti r se přitahují silou

$$F = \gamma \cdot (m \cdot M) / r^2$$

kde γ (gravitační konstanta) = $(6,670 \pm 0,007) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

Pokud použijeme sílu F a hmotnost Země a její rádius, můžeme pomocí rovnice výše odvodit známý vztah:

$$F = m \cdot g$$

kde g je gravitační zrychlení ($g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$).

Pomocí tohoto vztahu lze pak definovat měření hmotnosti pomocí síly, které těleso vyvozuje. Toto je základ vážící technologie. Poslední rovnice rovněž znázorňuje vztah mezi hmotností a silou respektive zatížením.

2.3 Hodnota vážení a hmotnost

Při vážení na vahách působí jeden nezanedbatelný efekt a to je vztlaková síla. Pokud se vážený objekt nalézá ve vzduchu, působí na něj síla, která má opačný směr než síla gravitační. Tato vztlaková síla se rovná hmotnosti vytlačeného vzduchu. Tento efekt je popsán Archimédovým zákonem.

Hodnota zatížení tělesa „ W_V “, při porovnání s etalonovým závažím, závisí na hustotě jeho materiálu ρ_S respektive na jeho objemu, což ilustruje vztah níže.

$$m_S = W_V \cdot (1 - \rho_A / \rho_{STD}) / (1 - \rho_A / \rho_S)$$

ρ_S hustota materiálu tělesa
 ρ_{STD} hustota etalonového závaží
 ρ_A hustota vzduchu
 W_V hodnota zatížení tělesa
 m_S hmotnost etalonového závaží

3 Rušivé vlivy a faktory mající vliv na vážení

3.1 Podmínky okolí, které mají vliv na výsledky vážení.

Chybu a nejistotu měření mohou při používání vah a jejich kalibraci významně ovlivňovat tzv. podmínky okolí. Pod tímto pojmem rozumíme všechny vnější vlivy, které na váhu působí. Některé vlivy jsme schopni zahrnout do výpočtu stanovení nejistoty, jiné musíme zohlednit tím, že se je snažíme navodit i v době kalibrace a zahrnout je tím do procesu stanovení nejistoty. Váhy by měly být kalibrovány vždy za podmínek, za kterých jsou používány. Jen tak lze dosáhnout toho, že nejistota stanovená při kalibraci bude odpovídat reálnému používání váhy, a zajistíme tím vyšší bezpečnost našeho procesu. Zásadní chybou uživatelů bývá vytváření ideálních podmínek v době provádění kalibrace. Kalibrační list s relativně malou nejistotou vypadá sice dobře, ale riskují tím, že v praxi bude skutečná nejistota mnohem větší a že budou svůj proces posuzovat na základě nesprávných hodnot.

Jak již bylo zmíněno v kapitole o principech vážení a rozdělení vah, je zřejmé, že vliv okolních podmínek závisí na velikosti dílku váhy (odečitelnosti) a počtu dílků váhy. Čím vyšší má měřidlo rozlišení – tj. čím menší má dílek a větší počet dílků, tím mají podmínky okolí významnější vliv na celkový výsledek vážení. Podívejme se nyní podrobněji na jednotlivé případy:

3.1.2 Umístění váhy

Váhy by měly být umístěny v místnostech a v prostorách tak, aby mohly být co nejméně ovlivňovány. V místnosti, ve které je váha umístěna, by nemělo docházet k vibracím a k proudění vzduchu. Váha by v místnosti neměla být rovněž umístěna v přímých komunikačních cestách, aby nedocházelo k pohybu v okolí váhy, proudění vzduchu, přetěžování váhy přejezdy manipulační techniky, což vše může mít dopad na přesnost vážení. Je-li to možné, je nutné zamezit působení vibrací, takže není vhodné váhy umísťovat ve vysokých podlažích budov (které se chvějí a reagují například na poryvy větru) nebo uprostřed místností, kde podlaha je nejpružnější a reaguje na různé zdroje vibrací vlastním chvěním. Ideálním místem pro váhu je roh místnosti poblíž nosných stěn budovy, kde je konstrukce nejtěžší.

Stolní váhy a přesnější váhy umísťujeme na váhové stoly. Konstrukce váhového stolu ovlivňuje správnost funkce váhy. Stůl by měl být stabilní, měl by mít pevnou konstrukci a měl by reagovat na běžnou manipulaci v okolí váhy. Váhu je vhodné umístit na těžký blok, který slouží jako setrvačnický tlumící vibrace. Tento blok by měl být vyroben z nemagnetického materiálu a měl by být co nejtěžší (50 – 100 kg pro běžnou stolní váhu). Takový blok je dobré umístit na tlumiče vibrací, které si zachovávají dlouhodobě svoji pružnost. Tam, kde to hygienické podmínky dovolují, lze s úspěchem používat korek, ale na trhu lze nalézt i

speciální tlumící hmoty. Guma není příliš vhodným materiálem, protože pod trvalým zatížením časem degeneruje a ztrácí svoji pružnost.

Dalším důležitým pravidlem je, že manipulace kolem váhy nesmí mít vliv na vlastní měření. Z tohoto důvodu je dobré konstrukci s blokem mechanicky oddělit od konstrukce pracovní desky váhového stolu.

Stůl je vhodné upevnit k podlaze nebo ke stěně. Pokud bude upevněn ke stolu i k podlaze zároveň, je nutné si uvědomit, že oba tyto připevňovací prvky mají různé frekvence, které mohou přenášet formou vibrací na stůl.

Pro tlumení vibrací nepoužívejte měkké podložky umístěné pod nožky váhy, protože způsobují takzvané „plavání“ váhy a nestability v konstrukci váhy. Pokud není jiné řešení, je lepší váhu umístit přímo na podlahu místnosti nebo na desku stolu.

Umístění váhy lze snadno ověřit pohybem v okolí váhy, zatěžováním pracovní desky stolu nebo vytvářením různých druhů rušení (dupání, skákání) a současným sledováním reakce displeje váhy. Váha by neměla na tyto vlivy reagovat.

3.1.3 Teplota

Teplota má vliv hned na několik faktorů. Jak vyplývá z fyzikálního principu snímání hmotnosti, toto měření je závislé na teplotě. Rozdílná teplota v místnosti může způsobovat proudění vzduchu, které může ovlivňovat výsledky měření. Z těchto důvodů by váha měla být umístěna v místech s co nejkonstantnější teplotou. Typický teplotní drift váhy činí 1 – 2 ppm/°C. Ve výpočtu nejistoty je tento vliv zohledněn sledováním teploty během kalibrace a teplotním koeficientem váhy, který je brán v úvahu při výpočtu nejistot. Pokud váha není vybavena vnitřním justováním, je potřeba při významných změnách teploty váhu přejustovat (platí to zejména pro váhy vyšší přesnosti). Špičkové laboratoře udržují teplotní stabilitu v místnosti v rozsahu +/- 1 °C za 12 hodin, což není rozhodně nutné pro běžné použití, ale působení teploty nelze zanedbávat.

Doporučení

- Váhu neumísťujte do blízkosti zdrojů tepla nebo přímého slunečního záření, které je rovněž velkým tepelným zdrojem.
- Pokud je váha vybavena funkcí automatického justování, mějte tuto funkci vždy zapnutou.
- Váhu před použitím vždy zapněte cca 30 minut před zahájením prvního měření, aby se teplota elektroniky váhy ustálila na stabilní hodnotě.
- Váhu používejte jen v teplotním rozmezí stanoveném výrobcem, mimo tyto hodnoty váha nemusí vážit přesně. (Obvyklé rozmezí je -5 °C ... 30 °C, ale záleží na typu a provedení váhy.)

Teplotní koeficient a citlivost váhy

Citlivost váhy je definována jako poměr mezi změnou indikované hodnoty a vstupní hodnoty, tj. jako poměr mezi ΔI (změna indikace) a Δm (změna hmotnosti). Citlivost $S = \Delta I / \Delta m$. Pokud vyjádříme tuto závislost graficky, dostáváme tzv. charakteristiku váhy, která by v ideálním případě měla být lineární funkcí.

Citlivost je závislá na teplotě. Tuto závislost vyjadřuje takzvaný teplotní koeficient váhy TC, který udává poměr mezi změnou citlivosti a změnou teploty v okolí váhy. $TC = \Delta S / \Delta T = \Delta I / \Delta m / \Delta T$ a budeme-li považovat hmotnost tělesa za konstantní, pak $TC = \Delta I / m / \Delta T$ a změna indikace vlivem změny teploty bude mít velikost:

$$\Delta I = TC * \Delta T * m$$

Příklad:

TC=0,0001%/°C - uvádí výrobce měřidla

m=200g

$\Delta T = 5^\circ\text{C}$ změna teploty během vážení

$\Delta I = 0,0001 * 5 * 200 = 0,1\text{g}$. Při změně teploty během vážení o 5°C dojde k odchylce indikace o 0,1g což s ohledem na dílek váhy (např.: $d = 0,0001\text{g}$) může být významné zejména u laboratorních vah.

3.1.4 Atmosférická vlhkost

Vlhkost vzduchu má vliv na jeho hustotu a hustota vzduchu má vliv na vážený předmět. Jak vyplývá z Archimedova zákona, vážený předmět zjednodušeně řečeno plave ve vzduchu a je nadnášen vztlakovou silou, která je závislá na hustotě předmětu a hustotě vzduchu. Hustota vzduchu a kompenzace vztlakové síly jsou započteny v matematickém modelu stanovení nejistoty pro váhy s velkým počtem dílků. Vlhkost vzduchu proto musíme sledovat zejména u mikrovah a ultramikrovah, u nichž jsou tyto parametry již velmi důležité. Vlhkost vzduchu navíc ovlivňuje také statickou elektřinu. V místnostech s velmi malou vlhkostí vzduchu nastávají problémy s vybíjením statické elektřiny, což komplikuje ustalování váhy a odečítání stabilní hodnoty měření.

Doporučení

- Pro váhy by měla být zajištěna vlhkost vzduchu v místnosti v rozmezí 45 – 60 %. (Váhy nepoužívejte, pokud vlhkost vzduchu klesne pod 20 % nebo překročí 80 %.)
- U mikrovah a ultramikrovah je nezbytné vlhkost vzduchu monitorovat a snažit se dosáhnout stabilních hodnot.
- Vlhkost vzduchu můžeme regulovat pomocí zvlhčovačů vzduchu nebo speciálních klimatizací.

3.1.5 Proudění vzduchu

Tento faktor je často zanedbáván a přesto může výrazně ovlivňovat výsledky vážení i v běžných aplikacích, jako je například vážení s dílkem 1 g až 3 g. Pokud budou váhy umístěny v průvanu nebo pod klimatizační jednotkou, budou mít problém se ustálit a mohou indikovat chybné hodnoty. Při vážení rozměrných předmětů s malou hmotností nebo předmětů ve volných obalech pak může být problematické zajistit správnou stabilní hodnotu měření.

Doporučení

- Váhy postavte do míst, kde vzduch neproudí – rohy místnosti, mimo okna, mimo topné a klimatizační jednotky.
- Snažte se váhu zakrýt nebo ji alespoň krytem odstínit od proudění vzduchu.
- Pokud je váha vybavena krytem vážící komory, vždy otvírejte jen nezbytně nutný prostor, aby proudění bylo co nejmenší.

- V době kalibrace nevypínejte zdroje rušení (klimatizace, laminární boxy, atd.), aby naměřené hodnoty odpovídaly skutečnosti běžného provozu.

3.2 Fyzikální vlivy

Na výsledky vážení mohou mít významný vliv některé fyzikální děje, se kterými se setkáváme během vážení, abychom minimalizovali jejich dopad, měli bychom jim věnovat pozornost a snažit se jim v praxi předcházet.

3.2.1 Rozdílná teplota

Rozdílná teplota váženého předmětu nebo zkušebního závaží a okolního vzduchu způsobuje výrazné proudění vzduchu kolem vážící misky nebo plošiny. V praxi se tento jev projevuje tím, že displej váhy neukazuje stabilní hodnotu a hodnota stoupá nebo klesá podle směru proudění vzduchu. Díky působení proudění vzduchu v okolí váženého předmětu se studené předměty jeví těžší a teplé předměty se jeví lehčí. Situace se vyřeší, když se teplota váženého předmětu vyrovná s teplotou okolí. Tento jev můžeme pozorovat u vah s dílkem

10^{-4} g ... 10^{-7} g.

Doporučení:

- Čím menší je povrch váženého předmětu tím menší efekt vzniká. Nepoužívejte proto zbytečně velké nádoby pro vážení vzorků.
- Pokud je to možné, nevažte předměty bezprostředně vyjmuté ze sušičky nebo lednice.
- Lidská ruka má teplotu kolem 35 °C, proto se vzorky manipulujte pomocí pinzety a nekládejte ruce do vážícího prostoru.

3.2.2 Vážení těkavých nebo hygroskopických látek

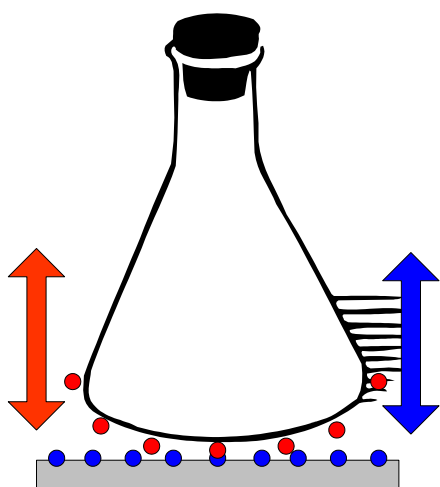
V některých případech vznikají komplikace i při vážení těchto látek. Těkavé látky rychle unikají do okolní atmosféry a rychle ztrácí na váze, hygroskopické vzorky naopak absorbují vzdušnou vlhkost a na vzduchu těžknou. Na displeji váhy se tento jev projevuje tím, že hodnota hmotnosti je nestabilní a utíká jedním nebo druhým směrem.

Doporučení

- Pro vážení těchto látek používejte nádoby s co nejužším hrdlem. Velká plocha povrchu usnadňuje odpařování/absorbování látky.
- Nádobku zakryjte a zabraňte tak úniku látky nebo omezte prostor pro absorbování vlhkosti, nezapomeňte počítat s tím, že víčko musíme započítat, tedy zvážít předem nebo odtárovat.
- Zvyšte nebo snižte vlhkost v laboratoři. (Pozor – při velmi nízké vlhkosti mohou vznikat komplikace se statickou elektřinou.)

Pro stabilní umístění nádoby nepoužívejte vlhké materiály, jako korek, karton...

3.2.3 Elektrostatika



Elektrostatický náboj v reakci s okolím vytváří na povrchu vážených těles elektrostatické síly a mění tak hmotnost vzorku. Tento jev můžeme pozorovat na vahách s dílkem od 0,01 g ... 10^{-7} g. Elektrostatický náboj se projevuje tím, že indikovaná hodnota je nestabilní a při opakovaném vážení dostáváme různé výsledky. Tento jev vzniká, pokud okolí a vzorek jsou nevodivé nebo jen málo vodivé, např. jako sklo, plasty, atd. Elektrostatický náboj se nemá kam vybit a zůstává na povrchu těchto těles. Pokud je v okolí váhy ještě nízká vlhkost (méně než 40 %), která snižuje vodivost okolního vzduchu, tento vliv se projevuje ještě výrazněji. Působení elektrostatického náboje nelze zohlednit v nejistotě váhy jinak, než rozšířením nejistoty o příslušnou bezpečnost.

Doporučení

- Snažte se uzemnit elektrostatický náboj kontaktem s vodivým povrchem, např. s kovovým držákem nádoby, který je dobře uzemněn.
- Pokud umístíme nabitou nádobku do kovového kontejneru, elektrostatický náboj se odstíní.
- Zvyšte vlhkost okolního vzduchu nad 50 %.
- Vyhněte se plastovým a skleněným nádobám, mají špatnou vodivost a el. náboj se na nich snadno zachytává. Kovové, vodivé nádoby jsou mnohem lepší.
- Používejte váhy, u kterých máte jistotu, že jsou řádně uzemněny – miska, snímač, povrch váhy.

Pokud žádná z těchto rad nepomůže, použijte vybíjecí antistatické pistole nebo vybíjecí rámy, které jsou na trhu běžně dostupné.

3.2.4 Magnetismus

Magnetická tělesa šíří kolem sebe magnetické pole, které ovlivňuje mechanismus váhy. Magnetické vzorky se projevují tím, že hodnota indikace silně závisí na poloze vzorku na váze a opakovatelnost váhy je špatná i přesto, že během vážení je hodnota stabilní. Kovová tělesa s obsahem železa velmi často fungují jako feromagnetny a způsobují problémy. Tento jev nelze zohlednit ani při kalibraci. Pokud jsou používána správná závaží, jsou nemagnetická, a vliv faktoru magnetismu můžeme tedy opět zohlednit rozšířením nejistoty o příslušnou bezpečnost.

Doporučení

- Oddalte vážený vzorek co nejvíce od vážící misky pomocí nemagnetické podložky (aluminium, korek, sklo,...)
- Využijte podvěsné vážení, které některé váhy nabízejí, a vzdalte tak magnet od vážící misky.

3.2.5 Vztlak vzduchu

Proč jsou vzorky vážené ve vakuu těžší, než vzorky vážené na vzduchu? Jak již bylo uvedeno výše, v kapitole o vlhkosti, vzduch se jeví jako kapalina, ve které vážený objekt plave. Čím blíže je hustota daného objektu blízká hustotě vzduchu ($1,2 \text{ kg/m}^3$), tím větší je vztlaková síla působící na dané těleso. Významným faktorem je objem tělesa, na kterém velikost vztlaku závisí (viz. Archimedův zákon).

Příklad:

Porovnejme vážení 100g závaží a 100g vody, na vzduchu by se měly hodnoty rovnat.

	Závaží	Voda
Váha na vzduchu	100g	100g
Hustota	8000 kg/m^3	1000 kg/m^3
Objem	$12,5 \text{ cm}^3$	100 cm^3
Vztlak	15mg	120mg
Váha ve vakuu	100,015g	100,120g

Pokud takové předměty převážíme pod vývěvou ve vakuu. Bude vzorek vody lehčí.

Korekce na vztlak vzduchu:

$$\rho_a = \frac{0.348444 p - h(0.00252 t - 0.020582)}{273.15 + t}$$

- ρ hustota [kg/m^3]
- a hustota vzduchu [kg/m^3]
- c hustota závaží [kg/m^3]
- p atmosférický tlak [hPa]
- h relativní vlhkost [%]
- t teplota [$^{\circ}\text{C}$]
- W údaj na displeji [kg]
- m hmotnost [kg]

$$m = \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_c}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}} W$$

Doporučení:

- Pokud to není nutné nevažte zbytečně objemné vzorky.
- Korekci na vztlak vzduchu zohledněte ve výpočtu nejistoty.

3.2.6 Gravitace

Síla, kterou je těleso přitahováno k zemi, známá jako tíha tělesa, je závislá na hmotnosti tělesa a na tíhovém zrychlení $G = m \cdot g$. Gravitační zrychlení g není na celém povrchu Země stejné a mění se i podle vzdálenosti od středu Země. Gravitační síla klesá se čtvercem vzdálenosti od středu Země. Proto je nutné u vah dbát na to, aby byly vždy justovány v místě jejich používání a v příslušné výšce. Pokud přemístíme laboratorní váhu o několik pater výše v budově, např. o 10 m, zjistíme, že stejný předmět váží o něco méně než v nižším podlaží.

Doporučení

- Váhy justujte tam, kde jsou používány.
- Pokud přemístíte váhu, ať již výškově nebo ji přivezete z jiného státu, zkontrolujte ji závažím v místě jejího použití a v případě potřeby zajistěte její přejustování.
- Tento problém řeší váhy vybavené automatickým justováním.

3.2.7 Náklon

Během výroby jsou váhy justovány tak, aby aplikovaná síla při zatížení váhy byla paralelní k síle gravitační a kolmá na vážicí systém. V procesu výroby je poloha váhy justována tak dlouho, dokud váhy neukazují maximální hodnotu vážení při určitém zatížení. Toto najustování se permanentně dociluje indikátorem polohy – libelou. Uživatel váhy tak může vždy nastavit váhy do správné polohy odpovídající její původní justáži.

Kvantifikovat náklon lze následovně. Představme si čtvercovou plochu o straně 1000 mm. Jedna strana je zvednuta o určitou hodnotu. Pokud je tato výška například 5 mm, bude váha na této nakloněné rovině nakloněna na 5: 1000.

Uveďme si jednoduchý příklad. Představme si, že je náklon váhy tedy 5:1000, z důvodu nerovné podložky, na které váha spočívá. V tomto případě bude úhel náklonu $\alpha = \arctan 5/1000 = 0,2865^\circ$. Složka zatížení působící v ose vážení je

$$A = W \cdot \cos \alpha = W \cdot 0,9999875$$

To znamená, že například zkušební závaží o hmotnosti 200g bude vážit na takto nakloněné váze o 2,5 mg méně. To je pro názornost osmi-násobek nejistoty zkušební závaží, které je vhodné pro analytické váhy!

4 Principy vážení

4.1 Základní technický princip digitální elektronické váhy

Váha je vybavena jedním nebo několika snímači síly pracujícími na různých fyzikálních principech: elektromagnetická kompenzace sil, princip kmitající struny nebo tenzometrický snímač (viz níže).

Signál je ze snímače nebo snímačů převáděn pomocí analogově–digitálního převodníku na číselný údaj hmotnosti, který je poté terminálem zobrazován a dále zpracováván. Snímačů může být více a signál z nich je slučován pomocí slučovací skříňky tak, aby váha indikovala celkovou hmotnost váženého tělesa. Existují snímače digitální, které pracují na stejných principech jako analogové snímače, ale jejich součástí je A/D převodník, který zajistí převedení analogového signálu na digitální a usnadní tak přenos hodnot na delší vzdálenost. Terminál pak pracuje již s číselnými údaji.

Váhy rovněž využívají své mechanické prvky k násobení síly působící na snímač nebo její redukci; takové váhy se nazývají hybridní nebo také elektromechanické a využívají principu rovnováhy na páce. Nevýhodou je náročnější údržba převodového mechanismu a riziko jeho poškození. Výhodou je využití jednoho snímače namísto čtyř a unifikace řad váživostí snímačů.

4.1.1 Elektromagnetická kompenzace sil

Jde o princip, který využívá ke stanovení hmotnosti principu kompenzace tíhové síly F_G , kterou působí objekt na misku váhy pomocí elektrodynamického kompenzátoru. Váhový mechanismus je vybaven optickým snímačem polohy, který monitoruje pohyb misky a pomocí řídicího systému generuje pomocí cívky takovou sílu F_c , aby vážený objekt a vážící mechanismus byly v rovnováze. Taková síla F_c je potom shodná s tíhovou silou F_G , která je přímo úměrná hmotnosti tělesa ($F_G = m \cdot g$). Síla generovaná magneto-dynamickým systémem je přímo úměrná proudu potřebnému k jejímu vygenerování. Tento princip umožňuje vyrábět snímače s vysokým počtem dílků až 10 milionů dílků. Využívá se u laboratorních vah, ale i u přesných průmyslových vah.

4.1.2 Tenzometr

Tenzometrické snímače využívají elastických vlastností materiálu. Pomocí tenzometrického snímače je měřena elastická deformace nosiče zatížení, který je deformován působením tíhové síly F_G měřeného tělesa. Deformace je měřena tenzometry, které využívají závislost elektrického odporu na průřezu a délce vodiče. Deformací tělesa nosiče zatížení dochází k deformaci tenzometru, který mění svou délku a zmenšuje průřez a tím zvyšuje elektrický odpor. Pro přesné měření se obvykle tenzometry zapojují do Wheatstonova můstku, který umožňuje rozeznat malé změny odporu na tenzometrech. Deformace je přímo úměrná velikosti působící síly F_G . Elektrický odpor je rovněž přímo úměrný velikosti deformace a na tomto principu lze následně stanovit příslušnou hmotnost tělesa.

4.1.3 Princip kmitající struny

Snímače na principu kmitající struny se dnes příliš nepoužívají, protože byly poměrně drahé a poruchové. Přesto se s nimi můžeme v praxi setkat. Šlo o snímače pro přesné váhy s počtem dílků vyšším než 10000. Snímače pracují na principu změny frekvence kmitů zatížené a nezatížené struny. Ve snímači je umístěna struna, která pokud není zatížena, kmitá danou frekvencí. Po zatížení struny tíhovou silou měřeného tělesa dochází ke změně frekvence kmitající struny. Tato změna frekvence je úměrná působící síle a od ní se odvozuje hmotnost váženého objektu.

4.2 Rozdělení vah s neautomatickou činností, jako pracovních měřidel

Rozdělení vah používaných jako pracovní měřidla není v praxi přesně definováno. Někteří uživatelé řadí měřidla do tříd přesnosti podle ČSN EN 45 501, aniž by si uvědomovali, že tato norma se vztahuje na stanovená měřidla. Dalším problémem v takovém případě je, že norma a související dokumenty pracují s pojmem „ověřovací dílek“, který u pracovních měřidel není uveden, pokud váhy nejsou vyráběny jako ověřitelné. Proto se vžilo rozdělení, které vychází z hodnoty skutečného dílku „d“ a počtu skutečných dílků váhy „n“. Dále budeme hovořit o digitálních elektronických vahách s neautomatickou činností, které představují největší skupinu vah vyskytujících se v praxi. Tyto váhy můžeme rozdělit následujícím způsobem:

4.2.1 Ultra mikro váhy $d < \mu\text{g}$; $n > 10^6$

Tyto váhy se používají při porovnání přesných závaží nebo v laboratořích při přípravě vzorků z drahých materiálů pro analytické účely. Váhová technologie je založena na principu elektromagnetické kompenzace sil. V stávající době se vyrábí modely s dílkem až 10-7g. Tyto váhy pro dobrý vážící výkon potřebují laboratorní podmínky a jsou nejnáročnější na podmínky okolí.

4.2.2 Mikrováhy $d=\mu\text{g}$; $n\sim 10^6$

Tyto váhy se používají při porovnávání přesných závaží, při přípravě vzorků z drahých materiálů pro účely analýz nebo pro speciální aplikace, např. vážení filtrů. Váhová technologie je založena na principu elektromagnetické kompenzace sil. Tento typ vah potřebuje pro svůj dobrý váhový výkon laboratorní podmínky a je náročný na podmínky okolí.

4.2.3 Analytické váhy $d=0,1\text{mg}$; $n\sim 10^4-5$

Analytické váhy jsou typickým laboratorním měřidlem a slouží k vážení vzorků při provádění analýz a k dalším laboratorním aplikacím, jako je například stanovení hustoty apod. Jejich technologie je založena na principu elektromagnetické kompenzace sil. Tyto váhy pro svůj dobrý výkon vyžadují zajistit laboratorní podmínky a ani u nich nelze zanedbat podmínky okolí.

4.2.4 Přesné váhy $d=1\text{mg}$; $n>10^4$

Váhy označované jako přesné jsou váhy s počtem dílků n větším než 10000. Vzhledem k tomu, že zahrnují širokou nabídku modelů od laboratorních předvážek, které se používají při běžné laboratorní praxi, až po průmyslové váhy, využívané například ke kontrole hotově baleného zboží nebo pro míchání, navažování receptur a další aplikace, je obtížné tyto váhy jednodušeji popsat. Princip elektromagnetické kompenzace tyto váhy využívají jen výjimečně, mnohem častěji pracují na tenzometrickém principu nebo v případě starších modelů na technologii kmitající struny. Tyto váhy kladou již o něco menší nároky na okolní podmínky než váhy uvedené výše, ale s ohledem na jejich vysoké rozlišení a vysokou přesnost nelze působení okolního prostředí zanedbat a váhy je nutné umísťovat v odpovídajících prostorách.

4.2.5 Váhy běžné přesnosti $d\sim 0,1\text{g}$; n od 10^3 do 10^4

Jedná se o nejrozšířenější skupinu vah, které můžeme potkat ve všech oborech: obchodní váhy, průmyslové váhy k různým účelům v provedení kompaktním, stolním, můstkovém až mostovém. Váhy jsou používány jak uvnitř budov, tak venku. Téměř všechny modely těchto vah dnes pracují na tenzometrickém principu s tím, že některé snímače se vyrábí jako digitální, což znamená, že A/D převodník je integrován přímo do modulu snímače a do terminálu je posílána již převedená číselná hodnota. Při hodnocení závislosti na podmínkách okolí lze říci, že tyto váhy obecně nejsou příliš náročné, ale přesto je potřeba pečlivě posoudit místo a způsob instalace a zajistit odpovídající prostředí dle požadavků výrobce a to zejména u vah, které jsou provozovány venku nebo instalovány přímo do podlah místností.

4.2.6 Orientační měřidla $n<10^3$

Tyto váhy slouží uživateli jen k hrubé orientaci při vážení, např. váhy indikují položení nějakého předmětu na kontrolovaný povrch nebo se používají ke zjištění, zda kontejner obsahuje nebo neobsahuje nějaký materiál bez bližšího určení množství. Tyto váhy také pracují na tenzometrickém principu, ale používají tenzometry s malým počtem dílků. Okolní podmínky měření tohoto druhu příliš neovlivňují, ale rovněž nelze podle dané aplikace zanedbat pokyny výrobce.

5 Kalibrace vah

Protože dále budeme pracovat s pojmy „kalibrace“ a „nejistota měření“, „etalony a „národní metrologický systém, zkusme si je nejdříve vysvětlit a stručně definovat.

5.1 Kalibrace

Základním prostředkem při zajišťování návaznosti měření je kalibrace měřidel. Tato kalibrace zahrnuje určení metrologických charakteristik přístroje. To se provádí pomocí přímého srovnání s etalony. Vystavuje se kalibrační list a (ve většině případů) připevňuje se štítek na kalibrované měřidlo. Na základě těchto informací může uživatel určit, zda je přístroj vhodný pro danou aplikaci.

Existují tři důvody, proč je třeba přístroje/váhy kalibrovat:

1. Zajistit, aby údaje uváděné přístrojem byly konzistentní s jiným měřením.
2. Stanovit správnost údajů uváděných přístrojem.
3. Zjistit spolehlivost přístroje, tj. zda je možno se na něj spolehnout.

Kalibrací přístroje lze dosáhnout následujících skutečností:

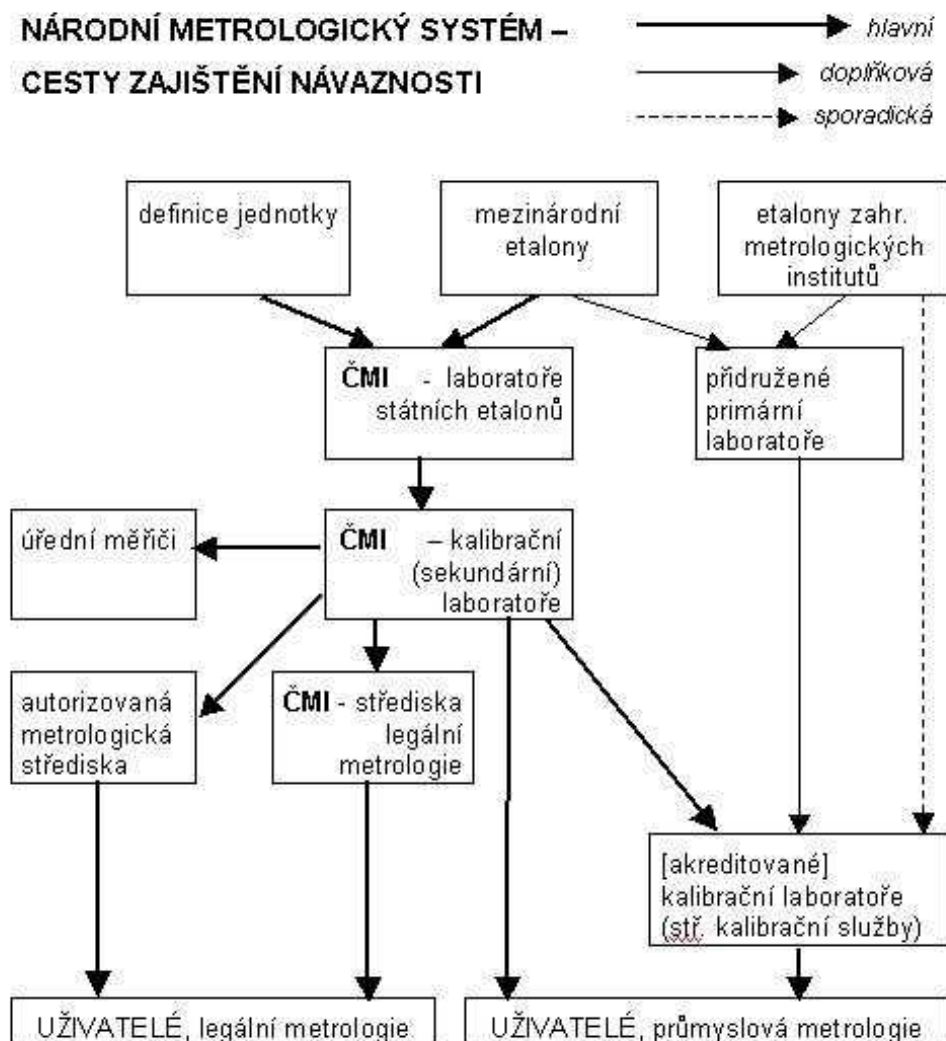
- Výsledek kalibrace umožní buď přiřazení hodnot měřených veličin k indikovaným hodnotám, nebo stanovení korekcí vůči indikovaným hodnotám.
- Kalibrace může rovněž určit další metrologické vlastnosti, jako je účinek ovlivňujících veličin.
- Výsledek kalibrace lze zaznamenat v dokumentu, který se někdy nazývá kalibrační list.

5.1.1 Etalony

Etalon je ztělesněná míra, měřicí přístroj, měřidlo, referenční materiál či měřicí systém určený k definování, realizaci, uchování či reprodukci jednotky nebo jedné či více hodnot určité veličiny mající sloužit jako reference.

5.1.2 Národní metrologický systém (schéma)

NÁRODNÍ METROLOGICKÝ SYSTÉM – CESTY ZAJIŠTĚNÍ NÁVAZNOSTI



5.1.3 Nejistota měření

Nejistota je kvantitativní mírou kvality výsledku měření, umožňující porovnat výsledky měření s jinými výsledky, referencemi, specifikacemi nebo etalony.

Všechna měření jsou zatížena chybami; proto se výsledek měření liší od pravé hodnoty měřené veličiny. Většina zdrojů chyb měření může být zjištěna, vynaložíme-li čas a prostředky, a chyby měření mohou být kvantifikovány a opraveny, například prostřednictvím kalibrace. Ovšem, zřídka jsou k dispozici čas a prostředky, aby se chyby stanovily a opravily kompletně. Nejistota měření může být stanovena různými způsoby. Široce využívanou a uznávanou metodou, uznávanou například akreditačními orgány, je doporučený postup „GUM“, popsáný v „Pokynu pro vyjádření nejistoty měření“ (GUM „Guide to the expression of uncertainty in measurement“).

Výsledek měření se uvádí ve tvaru:

$$Y = y \pm U$$

kde nejistota U je uvedena s nejvýše dvěma platnými číslicemi a y je odpovídajícím způsobem zaokrouhlena na stejný počet číslic.

Nejistota uvedená s výsledkem měření je obvykle *rozšířená nejistota*, která je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %.

5.1.3.1 Základní filosofie GUM pro vyjadřování nejistot

- 1) **Měřená veličina X** , jejíž hodnota není přesně známa, je považována za náhodnou proměnnou s pravděpodobnostní funkcí.
- 2) **Výsledek měření x** je odhadem očekávané hodnoty $E(X)$.
- 3) **Standardní nejistota $u(x)$** se rovná druhé odmocnině odhadu variance $V(X)$.
- 4) **Stanovení nejistoty měření způsobem A** – výsledek a variance se stanoví statistickým vyhodnocením série pozorování, opakovaných měření.
- 5) **Stanovení nejistoty měření způsobem B** – předpokládaná hodnota a rozptyl se určí jinými postupy. Nejběžněji používanou metodou je odhad rozdělení pravděpodobnosti, např. rovnoměrného rozdělení, založený na zkušenosti nebo jiných informacích.

Postup stanovení nejistot podle GUM

1) Stanovení všech důležitých složek nejistoty

K nejistotě měření může přispět mnoho zdrojů. Pro identifikaci zdrojů je vhodné použít model měřicího procesu. Uvést měřené veličiny do matematického modelu.

2) Výpočet standardní nejistoty každé složky nejistoty měření

Každá složka nejistoty měření je vyjádřena standardní nejistotou určenou stanovením typu A nebo typu B.

3) Výpočet kombinované nejistoty

Princip:

Kombinovaná nejistota kombinuje jednotlivé složky nejistoty podle zákona šíření nejistoty.

V praxi to znamená:

- Pro součet nebo rozdíl složek se kombinovaná nejistota vypočte jako druhá odmocnina součtu druhých mocnin standardních nejistot jednotlivých složek.
- Pro součin nebo podíl složek se kombinovaná nejistota vypočte jako druhá odmocnina součtu druhých mocnin relativních standardních nejistot jednotlivých složek (použije se stejný postup jako pro součet/rozdíl, jen se berou v úvahu relativní nejistoty).

4) Výpočet rozšířené nejistoty

Vynásobení kombinované nejistoty koeficientem rozšíření k .

5) Vyjádření výsledku měření ve tvaru

$$Y = y \pm U$$

5.1.3.2 Nejistota měření „jinými slovy“

Co je to nejistota měření?

Nejistota měření vypovídá o kvalitě tohoto měření.

Nejistota měření je pochybnost, která existuje o výsledku jakéhokoliv měření. Můžete si myslet, že velmi dobře vyrobená pravítka, hodiny či teploměry by měly být dostatečně spolehlivé, aby poskytovaly správné odpovědi. Avšak u každého měření a to i u měření velmi pečlivě provedených, existuje vždy určitá pochybnost. V běžném jazyce lze tuto skutečnost vyjádřit slovy „plus/mínus“, tj. provázek může být dlouhý dva metry „plus/mínus“ jeden centimetr.

Vyjádření nejistoty měření

Vzhledem k tomu, že o každém měření existuje vždy určitá mez pochybností, musíme se ptát „Jak velká je tato mez?“ a „Jak velká je tato pochybnost?“ Pro vyjádření velikosti nejistoty jsou tedy nezbytná dvě čísla. Jedno představuje šířku této meze nebo-li tzv. **interval**. Druhá vyjadřuje **úroveň spolehlivosti**, která udává, s jakou jistotou leží „pravá hodnota“ v těchto mezích.

Příklad:

Můžeme říci, že délka nějaké tyčinky je 20 centimetrů plus nebo minus 1 centimetr při úrovni spolehlivosti 95 procent. Tento výsledek lze přepsat takto:

$$20 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm, při úrovni spolehlivosti 95 \%}$$

Tento výrok říká, že jsme si na 95 % jistí, že délka tyčinky je mezi 19 a 21 centimetry.

Chyba versus nejistota

Je velmi důležité, abychom si nepletli pojmy „chyba“ a „nejistota“.

Chyba je rozdíl mezi naměřenou hodnotou veličiny a „referenční hodnotou veličiny“ .

Nejistota je nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace .

Kdykoliv je to možné, snažíme se provést korekci všech známých chyb; například použitím **korekcí** převzatých z kalibračních listů. Avšak každá chyba, jejíž hodnotu neznáme, je zdrojem nejistoty.

Proč je nejistota měření tak důležitá

Můžete se zajímat pouze o nejistotu měření, protože chcete provést kvalitní měření a pochopit výsledky. Pro zvažování nejistoty měření však existují také další speciální důvody.

Měření můžete provádět jako součást:

- Kalibrace – **příslušná nejistota měření musí být uvedena v kalibračním listě.**

- Zkoušky – **nejistota měření je nutná pro to, aby bylo možné rozhodnout, zda zařízení vyhovělo nebo nevyhovělo.**

Nebo abyste splnili

- Tolerance – **jestliže potřebujete znát nejistotu dříve, než se budete rozhodovat o tom, zda jsou příslušné tolerance splněny.**

... nebo potřebujete prostudovat a porozumět kalibračními listy nebo psaným specifikacím stanoveným pro zkoušku nebo měření.

Stručně o statistických výpočtech

Základní statistické výpočty

Množství informací získaných z měření můžete ještě umocnit tím, že provedete řadu odečtů, a z nich pak provedete některé základní statistické výpočty. Mezi dva nejdůležitější statistické výpočty patří nalezení průměru nebo-li **aritmetického průměru** a **směrodatné odchylky** souboru dat.

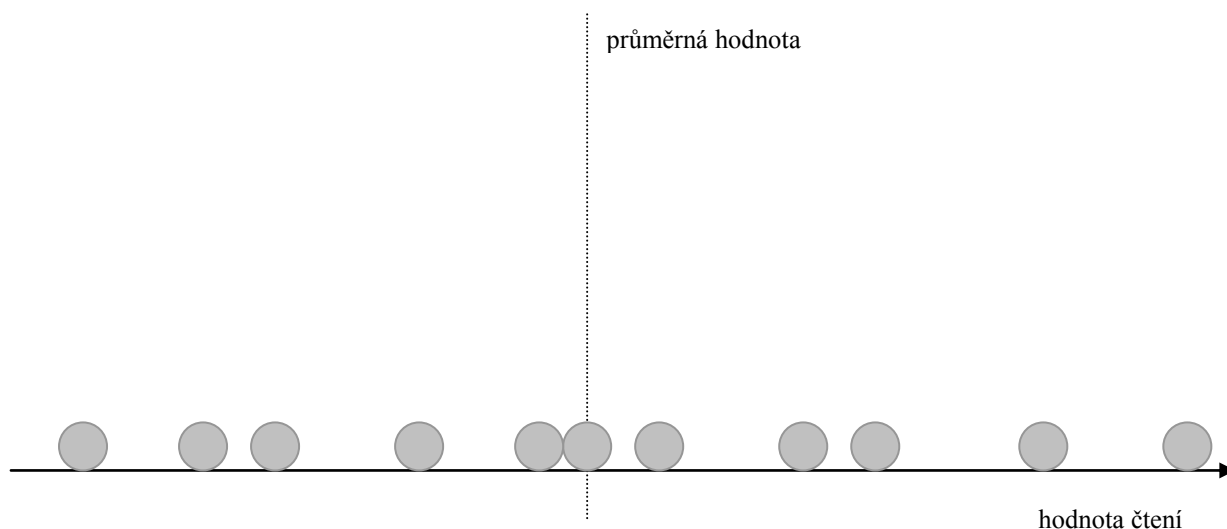
Jak získat nejlepší odhad – vypočítat průměr řady čtení

Pokud opakovaná měření poskytují různé odpovědi, nemusíte dělat nic špatně. Tato skutečnost může být způsobena přirozeným kolísáním příslušné veličiny. (Jestliže např. měříte rychlost větru, pak velmi zřídka získáte stálou hodnotu.) Nebo to může být způsobeno také tím, že se příslušný měřicí přístroj nechová zcela stabilně. (Např. měřické pásmo se může natáhnout a dávat různé výsledky.)

Jestliže se čtení při opakovaném měření mění, pak je lepší provést více odečtů a vzít jejich průměr. Průměr vám poskytne odhad „pravé“ hodnoty. **Průměr** nebo **aritmetický průměr** se označuje příslušným symbolem, který má nahoře vodorovnou čárou.

$$\bar{x}$$

Obrázek 5-1 znázorňuje soubor dat a jejich průměrnou hodnotu. Příklad 1 pak udává, jak se vypočítá aritmetický průměr.



Obrázek 5-1: Příklad souboru dat a jejich průměru.

Příklad 1: Výpočet aritmetického průměru ze souboru dat

Předpokládejme, že máme 10 čtení. Abychom našli průměr, sečteme všechny odečtené hodnoty a vydělíme je jejich počtem (v tomto případě deseti).

Čtení mají následující hodnoty:

16	19	18	16	17	19	20	15	17	13
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Jejich součet je: 170

Průměr z deseti čtení je:

$$\frac{170}{10} = 17$$

Kolik čtení budete potřebovat, abyste získali průměr

Obecně řečeno, čím více měření použijete, tím lepší odhad dostanete. V ideálním případě by se měl průměr získávat z nekonečného souboru hodnot. Čím více hodnot tedy použijeme, tím blíže se dostaneme k ideálnímu odhadu průměru. Získat více čtení však vyžaduje další úsilí a poskytuje poměrně „malou návratnost“. Co tedy představuje ten správný počet? Poměrně častou volbou je číslo 10, protože umožňuje jednoduchý výpočet aritmetického průměru. Počet 20 dává jen velmi nepatrně lepší odhad než počet 10. Počet 50 zase poskytne jen málo lepší odhad než 20. Počet čtení mezi 4 a 10 tedy většinou představuje dostatečný počet.

Rozptyl a směrodatná odchylka

Jestliže opakovaná měření dávají různé výsledky, pak chceme přirozeně vědět, jak jsou příslušná čísla rozptýlena. Rozptyl hodnot nám vypovídá o nejistotě měření. Jestliže tedy

víme, jak velký je tento rozptyl, můžeme začít posuzovat kvalitu měření nebo souboru měření.

Někdy postačuje znát rozsah mezi největší a nejmenší hodnotou. Pro malý soubor hodnot však tento postup nemusí poskytovat užitečnou informaci o rozptylu čtení mezi největší a nejmenší hodnotou. Velký rozptyl může být např. způsobený tím, že jedno čtení se podstatně liší od těch ostatních.

Vhodným způsobem pro vyjádření velikosti rozptylu je směrodatná odchylka. Směrodatná odchylka souboru hodnot vypovídá o tom, jak se jednotlivá čtení typicky liší od průměru daného souboru.

Zhruba jedna třetina čtení bude ležet v intervalu plus/minus (\pm) jedna směrodatná odchylka od průměru. Přibližně 95 % všech čtení bude ležet v intervalu dvou směrodatných odchylek. Toto pravidlo je poměrně rozšířené, i když v žádném případě není zcela univerzální.

„Pravou“ hodnotu pro směrodatnou odchylku lze najít pouze z velkého (nekonečného) souboru čtení. Z běžného počtu hodnot lze zjistit pouze **odhad směrodatné odchylky**. Pro **odhad směrodatné odchylky** se většinou používá symbol s .

Výpočet odhadu směrodatné odchylky

Příklad 2 udává, jakým způsobem lze vypočítat odhad směrodatné odchylky.

Příklad 2: Výpočet odhadu směrodatné odchylky souboru hodnot

Většinou není zrovna moc pohodlné počítat směrodatnou odchylku ručně, jen pomocí pera a papíru. Lze to však udělat, a to následujícím způsobem:

Předpokládejme, že máme soubor 10 čtení (použijeme stejný soubor, který jsme již uvedli v příkladu 1). Začneme tím, že vypočteme jejich průměrnou hodnotu:

Pro soubor čtení, který již byl uvedený, tedy pro hodnoty:

16	19	18	16	17	19	20	15	17	13
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

je průměrná hodnota rovna **17**.

V dalším kroku najdeme rozdíly mezi každým čtením a tímto průměrem:

-1	+2	+1	-1	0	+2	+3	-2	0	-4
----	----	----	----	---	----	----	----	---	----

Dále vypočteme druhou mocninu těchto odchylek:

1	4	1	1	0	4	9	4	0	16
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

V dalším kroku najdeme celkový součet těchto druhých mocnin a vydělíme ($n - 1$). V tomto případě je **n rovno 10**, tedy **$n - 1$ je rovno 9**:

$$\frac{1 + 4 + 1 + 1 + 0 + 4 + 9 + 4 + 0 + 16}{9} = \frac{40}{9} = 4,44$$

Odhad směrodatné odchylky se vypočítá tak, že se výše uvedená hodnota odmocní (přitom zaokrouhlíme na jedno desetinné místo):

$$s = \sqrt{4,44} = 2,1$$

Celý postup výpočtu odhadu směrodatné odchylky pro soubor n měření lze matematicky vyjádřit následujícím vztahem:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

kde

x_i je výsledek i -tého měření,

\bar{x} je aritmetický průměr n uvažovaných výsledků měření.

Rada: Daleko jednodušší je pro výpočte odhadu směrodatné odchylky použít funkční tlačítko kalkulátoru. Zadejte jednotlivá čtení do paměti kalkulátoru podle příslušných instrukcí, které najdete v návodu k tomuto kalkulátoru, a pak použijte tlačítko „směrodatná odchylka“ (většinou označené jako s nebo σ_{n-1}).

Kolik čtení potřebujete, abyste našli odhad směrodatné odchylky

Čím více čtení použijete, tím lepší odhad směrodatné odchylky dostanete. V našem případě to bude odhad nejistoty, který se bude zlepšovat s narůstajícím počtem čtení (nikoliv tedy odhad průměrné hodnoty nebo konečný výsledek). Za běžných okolností však 1é čtení bude postačovat. Pro přesnější odhad je vhodné výsledky sestavit tak, aby byl zahrnut také počte čtení .

Odkud chyby a nejistoty pocházejí

Narušit měření může mnoho různých vlivů. Nedostatky měření mohou být viditelné nebo neviditelné. Protože reálná měření neprobíhají nikdy za ideálních podmínek, lze nalézt příčinu chyb a nejistot nejčastěji v:

- Měřicím přístroji – měřicí přístroje mají chyby včetně systematické odchylky, změn způsobených stárnutím, opotřebením nebo odchylky jiného druhu, nedokonalou odčitelnost, šumy (u elektrických přístrojů) a mnoho dalších problémů.
- Měřeném předmětu – který nemusí být stabilní (představte si např., že měříte délku hrany ledové kostky v místnosti s pokojovou teplotou).
- Postupu měření – samotné měření může být velmi obtížně proveditelné. Například měření hmotnosti malých živých zvířat představuje zvláštní problém, který souvisí s tím, jak tato zvířata přimět, aby při měření spolupracovala.
- Importovaných nejistotách – kalibrace vašeho přístroje má nejistotu, která se pak přenáší do měření, která provádíte. (Je třeba si však uvědomit, že nejistota v důsledku toho, že by příslušná kalibrace nebyla provedena, by byla mnohem větší.)

- Zkušenostech obsluhy – některá měření závisí na zkušenostech a úsudku obsluhy, Jedna osoba může být lepší než jiná, např. při sestavování měření nebo při odečtech jemných detailů pouhým okem. Použití nějakého přístroje, např. stopek, závisí na reakční době příslušné obsluhy. (Hrubé chyby však představují jiný problém a nejsou zahrnovány do nejistot.)
- Výsledcích vzorkování – měření, která provádíte, musí být pro daný postup, který se snažíte vyhodnotit, dostatečně reprezentativní. Pokud potřebujete znát teplotu na pracovním stole, pak tuto teplotu neměřte teploměrem na zdi, který je navíc umístěný v blízkosti klimatizace. Pokud pro měření vybíráte vzorky z výrobní linky, pak nikdy neberte prvních deset kusů vyrobených v pondělí ráno.
- Prostřední – teplota, tlak vzduchu, vlhkost a mnoho dalších podmínek mohou ovlivnit měřicí přístroj nebo měřený předmět.

Jestliže znáte velikost a vliv chyby (např. z kalibračního listu), pak lze na výsledek měření použít korekci. Obecně však nejistoty z každého takového zdroje a z dalších zdrojů budou představovat jednotlivé položky, které přispívají k celkové nejistotě měření.

Obecné typy nejistoty v libovolném měření

Náhodné nebo systematické

Vlivy, které jsou příčinou nejistoty měření, mohou být buď:

- Náhodné – jestliže opakováním měření získáte náhodně odlišné výsledky. Pokud tomu tak je, pak platí, že čím více měření provedeme a pak z nich vypočteme průměrnou hodnotu, tím lepší odhad můžeme obecně očekávat.
- Systematické – jestliže je výsledek každého opakovaného měření ovlivněný stejnou ovlivňující veličinou (vy ale nemusíte být schopni to stanovit). V tomto případě se opakováním měření nedozvíte už nic jiného. Pro odhad nejistoty způsobené systematickými vlivy je nutné použít další metody, např. více měření nebo výpočtů.

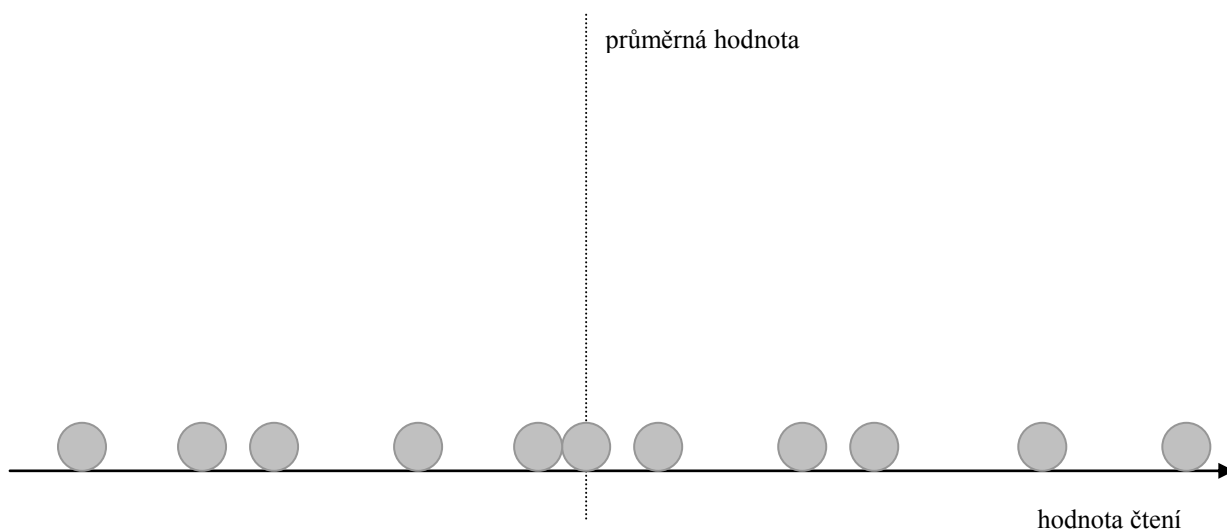
Rozdělení – „tvar“ chyby

Rozptyl souboru dat může mít různý tvar nebo tzv. **rozdělení pravděpodobnosti**.

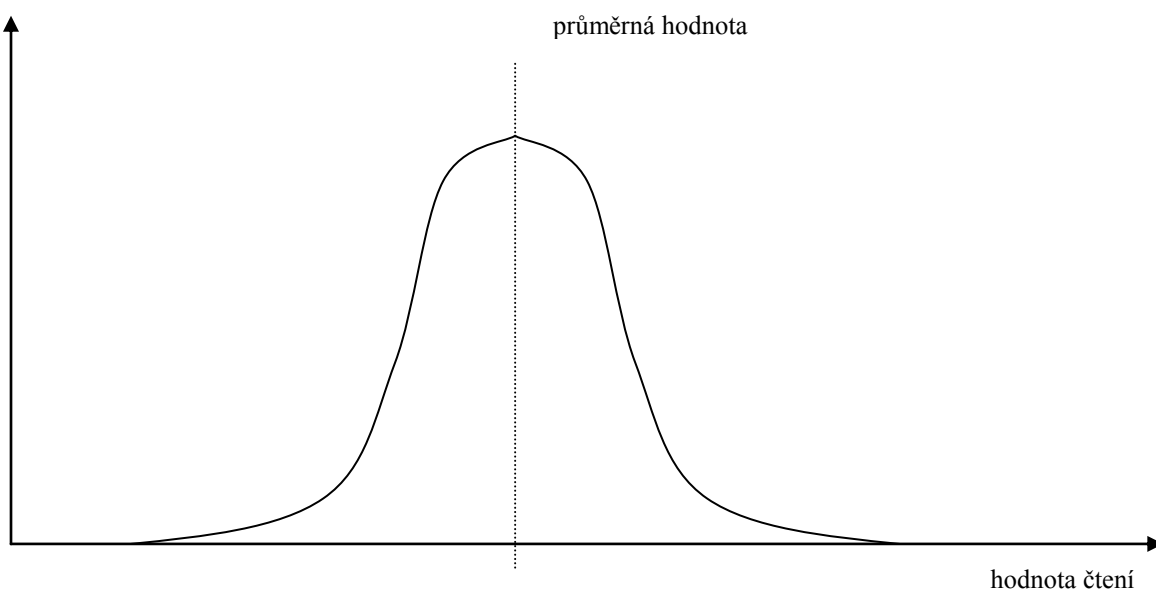
Normální rozdělení

V souboru odečtů spadají hodnoty s větší pravděpodobností do blízkosti průměru častěji než někam jinam. Toto je typické pro normální nebo-li Gaussovo rozdělení. Příklad tohoto rozdělení můžete najít, když měříte výšku jednotlivců ve velké skupině mužů. Většina mužů má výšku blízkou průměrné výšce; jen několik málo je jich extrémně vysokých (nad 200 cm) nebo extrémně malých (pod 150 cm).

Obrázek 5-2 znázorňuje soubor 10 náhodných čísel s přibližně normálním rozdělením. Na obrázku 5-3 je pak uvedeno grafické znázornění normálního rozdělení.



Obrázek 5-2: Znázornění souboru hodnot s normálním rozdělením

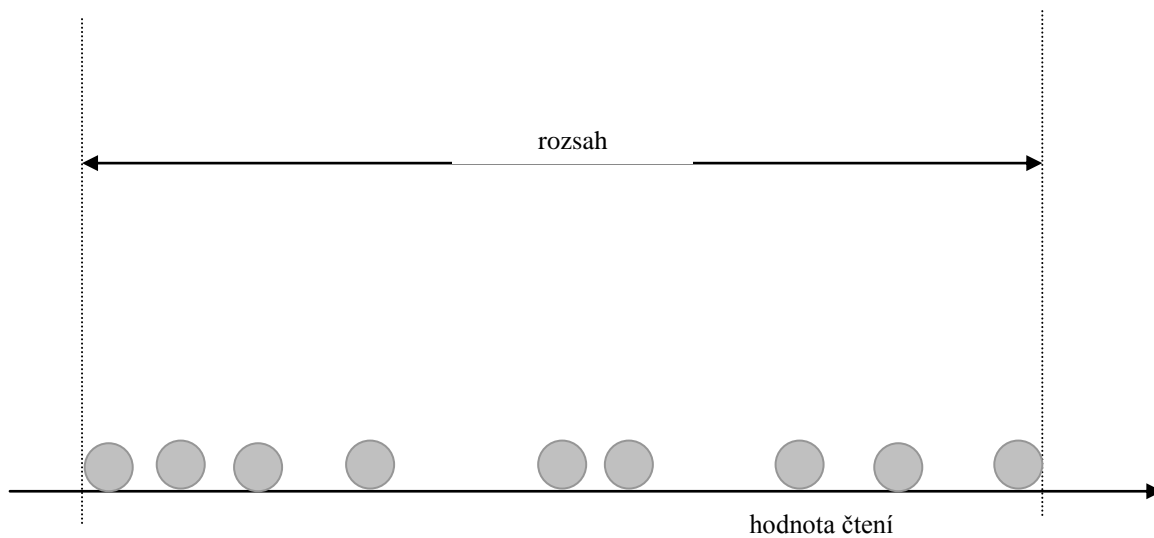


Obrázek 5-3: Grafické znázornění souboru hodnot s normálním rozdělením

Rovnoměrné rozdělení

Jestliže jsou měření rozprostřena poměrně rovnoměrně mezi největší a nejmenší hodnotou, získáme tak rovnoměrné rozdělení. Tento typ rozdělení bychom mohli dostat, kdybychom např. zkoušeli, jak padá déšť na tenký přímý telefonní kabel. Déšť bude padat se stejnou pravděpodobností na jednu i druhou část.

Obrázek 5-4 znázorňuje 10 náhodných hodnot s přibližně rovnoměrným rozdělením. Grafické znázornění tohoto rozdělení je pak uvedeno na obrázku 5.



Obrázek 5-4: Znázornění souboru hodnot s rovnoměrným rozdělením



Obrázek 5-5: Grafické znázornění souboru hodnot s rovnoměrným rozdělením

Další druhy rozdělení

V jiných případech, které se však již vyskytují méně často, mohou mít rozdělení také jiný tvar, např. trojúhelníkové, ve tvaru písmene M (bimodální nebo-li se dvěma vrcholy) nebo mohou být po stranách zkosené.

Co není nejistota měření

Chyby způsobené obsluhou nespádají do nejistoty měření. A v žádném případě se s nimi nesmí počítat jako s příspěvky k celkové nejistotě. Vzniku těchto chyb je třeba zabránit a to tak, že obsluha bude při měření postupovat pečlivě a bude po sobě měření kontrolovat.

Rovněž tolerance nepatří mezi nejistoty. Pro nějaký postup nebo výrobek jsou stanoveny meze přijetí.

Rovněž specifikace nejsou nejistoty. Specifikace hovoří o tom, co můžete očekávat od daného výrobku. Tyto specifikace mohou mít poměrně široký rozsah zahrnující vlastnosti daného předmětu netechnického charakteru, jako je např. vzhled .

Přesnost (nebo raději nepřesnost) není to stejné jako nejistota. Použití těchto slov se však naneštěstí často zaměňuje. Správně řečeno, "přesnost" je pojem týkající se jakosti (např. můžete říci, že měření bylo „přesné“ nebo „nepřesné“). Nejistota je kvantitativní. Pokud je uvedeno číslo se znaménkem „plus/minus“, pak to můžeme nazývat nejistotou a nikoliv nepřesností.

Chyby také nejsou to samé jako nejistoty (i když v minulosti se tato slova často používal běžně v různých spojeních jako např. „analýza chyb“).

Statistická analýza není to samé jako rozbor nejistot. Statistiku lze používat pro vyjádření všech typů závěrů, které nám samy o sobě neříkají nic o nejistotách. Rozbor nejistot představuje pouze jedno z možných použití statistiky.

5.1.3.3 Jak vypočítat nejistotu měření

Aby bylo možné vypočítat nejistotu měření, je nutné nejprve identifikovat zdroje nejistoty měření. V další kroku je třeba odhadnout velikost nejistoty pocházející od každého identifikovaného zdroje. Nakonec se jednotlivé nejistoty zkombinují a jejich kombinací získáme výsledné číslo.

Pro vyhodnocení příspěvku nejistoty z jednotlivých zdrojů a pro jejich sloučení existují jasně definovaná pravidla.

Dvě možnosti pro odhad nejistoty

Bez ohledu na tom, o jaké zdroje nejistot se jedná, existují v podstatě dva přístupy pro jejich odhadování: **vyhodnocení nejistoty typu A** a **vyhodnocení nejistoty typu B**. U většiny měření je nezbytné použít oba typy vyhodnocení.

Vyhodnocení nejistoty typu A – odhad nejistot pomocí statistické analýzy (většinou z opakovaných měření)

Vyhodnocení nejistoty typu B – odhad nejistoty vycházející z jiných informací. Může se jednat o informace, jejichž původ je v již získaných zkušenostech z měření, z kalibračních certifikátů, specifikací výrobce, z výpočtů, z publikovaných informací a z dalších pramenů.

Při určitém zjednodušení můžeme říci, že **typ A** lze považovat za „náhodný“ a **typ B** za „systematický“, ale toto zjednodušení samozřejmě nemusí obecně platit.

Osm základních kroků, které nás dovedou k výpočtu nejistoty

Tyto základní kroky jsou následující:

1. Rozhodněte, co potřebujete zjistit ze svých měření a posuďte, která měření a výpočty jsou pro dosažení požadovaného výsledku nezbytné.
2. Proveďte potřebná měření.
3. Odhadněte nejistotu každé vstupní veličiny, která přispívá ke konečnému výsledku. Nezapomeňte vyjádřit nejistotu ve stejných jednotkách
4. Posuďte, zda jsou chyby vstupních veličin navzájem nezávislé. Pokud se domníváte, že tomu tak není, pak bude třeba provést některé další výpočty nebo získat další informace
5. Z provedených měření vypočtete výsledek (včetně jakékoliv známé korekce vztahující se ke kalibraci).
6. Ze všech jednotlivých příspěvků vypočtete kombinovanou nejistotu.
7. Tuto nejistotu vyjádřete pomocí koeficientu pokrytí společně s velikostí intervalu nejistoty a stanovte pravděpodobnost pokrytí.
8. Zapište výsledek měření a příslušnou nejistotu a uveďte, jak jste je získali.

Tento postup je velmi obecný a udává jednotlivé kroky jen v hrubých rysech.

Další informace nezbytné před zahájením výpočtu nejistot

Standardní nejistota

Všechny příspěvky nejistoty musí být vyjádřeny se stejnou pravděpodobností pokrytí tak, že se převedou na **standardní nejistoty**. Standardní nejistota je mez, jejíž velikost lze považovat za „plus/minus jednu směrodatnou odchylku“. Standardní nejistota hovoří o nejistotě průměru (nejen o rozptylu hodnot). Standardní nejistota se většinou označuje symbolem **u** nebo **u(y)** standardní nejistota hodnoty y).

Výpočet standardní nejistoty pro vyhodnocení typu A

Jestliže jsme získali soubor několika opakovaných měření (pro odhad nejistoty typu A), pak lze z daného souboru dat vypočítat aritmetický průměr \bar{x} a směrodatnou odchylku **s**. Z těchto hodnot se pak vypočítá standardní nejistota **u** průměru, a to podle následujícího vztahu:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Kde **n** je počet měření v daném souboru. (Standardní nejistota průměru se dříve nazývala také směrodatná odchylka průměru nebo směrodatná chyba průměru.)

Výpočet standardní nejistoty pro vyhodnocení typu B

Tam, kde není k dispozici dostatek informací (což je u odhadů typu B poměrně časté), můžeme být schopni odhadnout pouze horní a dolní mez nejistoty. V tomto případě pak musíme předpokládat, že se hodnoty mohou nacházet kdekoli v těchto mezích, tj. musíme

předpokládat rovnoměrné rozdělení. Standardní nejistotu pro rovnoměrné rozdělení zjistíme ze vztahu:

$$\frac{a}{\sqrt{3}}$$

Kde a je polovina rozsahu mezi horní a dolní mezí.

Rovnoměrné rozdělení se vyskytuje poměrně běžně, ale pokud máme dobré důvody předpokládat některé jiné rozdělení, pak bychom své výpočty měli založit raději na tomto rozdělení. Můžeme například běžně předpokládat, že nejistoty převzaté z kalibračního listu vystaveného pro určitý měřicí přístroj mají normální rozdělení.

Převod nejistoty z jedné jednotky měření na jinou

Příspěvky nejistoty musí mít před jejich sloučením do výsledné nejistoty stejné jednotky. Stejně jako o tom hovoří známé přísloví, nemůžeme srovnávat „jablka s hruškami“.

Pokud například provádíme měření délky, pak nejistota měření bude rovněž stanovena v jednotkách délky. Jedním zdrojem nejistoty by mohla být např. změna teploty místnosti. Ačkoliv je tedy zdrojem nejistoty teplota, její vliv se projeví ve změně délky a musí být tedy vyjádřený v jednotkách délky. Můžeme však vědět, že materiál, který se má měřit, se při nárůstu teploty o jeden stupeň prodlouží do délky o jedno procento. V takovém případě by nejistota teploty o velikosti $\pm 2^\circ\text{C}$ byla zdrojem nejistoty délky kusu příslušného materiálu o délce 100 cm o hodnotě ± 2 cm.

Jestliže jsou tedy standardní nejistoty vyjádřeny ve stejných jednotkách, pak lze kombinovanou nejistotu nalézt pomocí jedné z následujících metod.

Kombinovaná standardní nejistota

Jednotlivé standardní nejistoty vypočtené pomocí odhadu nejistoty typu A a typu B lze sloučit pomocí odmocniny ze součtu čtverců (druhých mocnin). Výsledek tohoto výpočtu se nazývá **kombinovaná standardní nejistota** a označuje se jako u_c nebo $u_c(\mathbf{y})$.

Součet čtverců je nejjednodušší, když se výsledku měření dosáhne pomocí sčítání nebo odčítání. Složitější případy, které jsou v dalším textu také uvedeny, platí pro násobení a dělení a také pro další funkce.

Součet čtverců pro sčítání a odčítání

Nejjednodušší případ nastane, když je výsledek měření součtem řady naměřených hodnot (navzájem sčítaných nebo odčítaných). Můžeme například chtít najít celkovou délku plotu vyrobeného z panelů různé šířky. Pokud je standardní nejistota délky každého panelu (v metrech) dána jako a , b , c , atd., pak kombinovaná standardní nejistota celého plotu (v metrech) by se vypočítala jako odmocnina ze součtu druhých mocnin jednotlivých nejistot, tedy

$$\text{Kombinovaná standardní nejistota} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + \dots}$$

Součet čtverců pro násobení a dělení

U složitějších případů může být pro zjednodušení výpočtu užitečné pracovat s relativními nebo zlomkovými nejistotami.

Můžeme například chtít zjistit plochu A pravoúhlého koberce, a to vynásobením jeho délky L šířkou W (tj. $A = L \times W$). Relativní nebo-li zlomkovou nejistotu plochy koberce lze zjistit ze zlomkových nejistot délky a šířky. Pro délku L s nejistotou $U(L)$ je relativní nejistota rovna $u(L)/L$. Pro šířku W s relativní nejistotou $u(W)$ je to $u(W)/W$. Relativní nejistotu plochy A pak určíme ze vztahu:

$$\frac{u(A)}{A} = \sqrt{\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(W)}{W}\right)^2}$$

Pro případ, kdy je výsledek dán součinem tří faktorů, by pak výše uvedená rovnice měla tři takové členy atd. Výše uvedenou rovnici lze rovněž použít (přesně ve stejném tvaru) pro případ, kdy je výsledek dán jako podíl dvou hodnot (tj. jedno číslo dělené druhým číslem, např. délka dělená šířkou). Jinými slovy tento tvar zahrnuje všechny případy, kdy se jedná o násobení nebo dělení.

Součet čtverců pro složitější funkce

Pokud se výpočtu konečného výsledku měření vyskytuje nějaká hodnota umocněná na druhou (např. Z^2), pak relativní nejistota má v důsledku této umocněné složky tvar:

$$\frac{2u(Z)}{Z}$$

Pokud výpočet konečného výsledku obsahuje druhou odmocninu (např. \sqrt{Z}), pak má relativní nejistota v důsledku této složky tvar:

$$\frac{u(Z)}{2Z}$$

Některá měření se však zpracovávají podle vztahu, který využívá kombinace sčítání, odčítání, násobení a dělení. Můžeme například chtít měřit elektrický odpor R a napětí V , a pak chceme vypočítat výsledný výkon P pomocí vztahu:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

V tomto případě by relativní nejistota $u(P)/P$ hodnoty výkonu byla dána vztahem:

$$\frac{u(P)}{P} = \sqrt{\left(\frac{2u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(R)}{R}\right)^2}$$

Obecně řečeno, u vícekrokových výpočtů lze postup sloučení standardních nejistot do kvadratického součtu provést rovněž v několika krocích v každém kroku s využitím příslušného vztahu pro sčítání, násobení, atd.

Korelace

Rovnice uvedené v části, které slouží pro výpočet kombinované standardní nejistoty, jsou správné pouze tehdy, jestliže vstupní standardní nejistoty nejsou vzájemně závislé nebo-li **korelované**. To znamená, že se musíme vždy ptát, zda jsou všechny příspěvky nejistoty navzájem nezávislé. Tedy zda by velká chyba jedné vstupní veličiny mohla způsobit velkou chybu jiné veličiny. Mohla by tedy mít nějaká vnější ovlivňující veličina, např. teplota, mít podobný vliv na několik složek nejistoty najednou – viditelně či neviditelně? Jednotlivé chyby jsou poměrně často nezávislé. Ale pokud tomu tak není, je třeba provést další výpočty.

Faktor pokrytí k

Jestliže máme všechny složky nejistoty ve stejných jednotkách, abychom mohli najít kombinovanou standardní nejistotu, můžeme ale nakonec chtít provést převod výsledku na jinou jednotku. Kombinovaná standardní nejistotu lze považovat za ekvivalentní „jedné směrodatné odchylce“, ale my můžeme chtít získat celkovou nejistotu stanovenou pro jinou pravděpodobnost pokrytí, např. pro 95 procent. Tento převod lze provést pomocí **koeficientu pokrytí k** . Vynásobením **kombinované standardní nejistoty u_c** **koeficientem pokrytí k** dostaneme výsledek, který se nazývá **rozšíření nejistota**, běžně označovaná symbolem U , tj.:

$$U = ku_c$$

Určitá hodnota koeficientu pokrytí dává pro rozšířenou nejistotu určitou úroveň pravděpodobnosti pokrytí.

Obecně řečeno, zvětšíme celkovou nejistotu pomocí koeficientu pokrytí $k = 2$, abychom dostali úroveň pravděpodobnosti přibližně 95 procent. ($k = 2$ je správné tehdy, jestliže má kombinovaná standardní nejistota normální rozdělení. Některé další koeficienty pokrytí (pro normální rozdělení) jsou:

$K = 1$	pro pravděpodobnost pokrytí přibližně 68 procent,
$K = 2,58$	pro pravděpodobnost pokrytí přibližně 99 procent,
$K = 3$	pro pravděpodobnost pokrytí přibližně 99,7 procenta.

Jiné méně časté průběhy rozdělení mají jiné koeficienty pokrytí.

Jinak řečeno, kdekoliv je rozšířená nejistota uvedena s daným koeficientem pokrytí, můžeme zjistit standardní nejistotu pomocí obráceného postupu, tj. vydělením příslušným koeficientem pokrytí. To znamená, že rozšířené nejistoty uvedené v kalibračních listech, pokud jsou správně vyjádřeny, lze dekodovat na standardní nejistoty.

Jak vyjádřit výsledek

Je důležité, abychom výsledek vyjádřili tak, aby čtenář mohl danou informaci použít. Základní informace, které je třeba uvést, jsou následující:

- Výsledek měření společně s hodnotou nejistoty, např. „délka tyče byla $20 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$.“

- Stanovení koeficientu pokrytí a úrovně pravděpodobnosti pokrytí. Doporučené znění je toto: „Uvedená nejistota je založená na standardní nejistotě vynásobené koeficientem pokrytí $k = 2$ při pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %.
- Jakým způsobem byla nejistota odhadnuta

5.2 Obecné aspekty kalibrace vah

Prvky kalibrace

1. aplikování zkušebních zatížení na váhy za specifikovaných podmínek,
2. určování chyb nebo změn indikací a
3. odhadem nejistoty měření, která má být připsána výsledkům.

Rozsah kalibrace

Pokud není zákazníkem požadováno jinak, zahrnuje kalibrace celý vážicí rozsah od nuly po maximální váživost. Zákazník může specifikovat určitou část vážicího rozsahu, omezeného minimálním zatížením a největším zatížením, které má být váženo nebo jednotlivými jmenovitými zatíženími, pro které požaduje kalibraci. U vah s vícenásobným rozsahem, by měl zákazník identifikovat rozsah(y), které jsou předmětem kalibrace. Prvky uvedené výše se pak se aplikují na každý rozsah odděleně.

Místo kalibrace

Kalibrace je normálně prováděna na místě použití vah. Jestliže jsou po kalibraci váhy přemístěny, možné vlivy pocházející z

1. rozdílu gravitačního zrychlení,
2. změn okolních podmínek,
3. mechanických a teplotních podmínek během přepravy

pravděpodobně mění charakteristiky činnosti vah a mohou zrušit platnost kalibrace. Pokud není odolnost vůči těmto vlivům na určité váhy nebo typ vah jasně demonstrována, měli bychom se přemístění vah po kalibraci vyhnout. Tam, kde toto není demonstrováno, neměl by kalibrační certifikát být přijat jako důkaz o návaznosti.

Předběžné podmínky, příprava na zkoušení

Kalibrace by neměla být prováděna pokud

1. nemohou být váhy snadno identifikovatelné,
2. všechny funkce nejsou zbaveny vlivu znečištění nebo poškození a funkce podstatné pro kalibraci nepracují, jak mají,
3. hodnoty závaží nejsou jednoznačně uvedeny a dané indikace nejsou snadno čitelné,
4. normální podmínky použití (proudění vzduchu, vibrace, stabilita místa vážení atd.) nejsou vhodné pro váhy, které mají být kalibrovány,

5. nejsou váhy před kalibrací dostatečně dlouhou dobu připojeny ke zdroji energie, např. po dobu ohřevu specifikovanou pro váhy nebo dobu specifikovanou uživatelem,
6. váhy, tam, kde je to nutné, nejsou ustaveny do vodorovné polohy,
7. váhy nebyly alespoň jednou podrobeny zatížení přibližně rovnému zkušební zátěži, doporučuje se opakované zatížení.

Váhy, které se před použitím pravidelně justují, by měly být před kalibrací najustovány, pokud není se zákazníkem dohodnuto jinak. Justáž by měla být provedena stejnými prostředky, které jsou normálně používány zákazníkem a které splňují, tam kde je to možné, instrukce výrobce.

Pokud je to významné vůči výsledkům kalibrace, měl by být stav nastavení softwaru, který může být zákazníkem měněn, zaznamenán.

Váhy, vybavené zařízením pro automatické nastavení nebo sledování nuly, by měly být kalibrovány s těmito zařízeními v činnosti nebo ne, podle toho jak stanoví zákazník. Při kalibraci na místě by měl být uživatel váhy požádán k zajištění, aby podmínky při kalibraci odpovídaly normálním podmínkám použití. Vlivy jako jsou proudění vzduchu, vibrace nebo naklonění vážicí plošiny (misky), jsou pak tímto způsobem, pokud možno zahrnuty do naměřených hodnot a tudíž jsou zahrnuty v nejistotě měření.

5.2.1 Základní vztahy a rozbor vlivů

Zkušební zatížení a indikace

Základní vztah mezi zatížením a indikací

Všeobecně řečeno, indikace vah (I) je úměrná síle vyvozené objektem o hmotnosti m na nosič zatížení:

$$I \sim m \times g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} \right)$$

kde g je místní gravitační zrychlení
 ρ_a hustota okolního vzduchu
 ρ hustota objektu

Výrazy v závorce odpovídají redukci síly v důsledku vztlaku vzduchu objektu.

Účinek vztlaku vzduchu

Je současnou praxí používat pro justáž a/nebo kalibraci vah etalonová závaží kalibrovaná v hodnotách konvenční hmotnosti m_c . Tato justáž je prováděna tak, aby účinky g a aktuálního vztlaku etalonového závaží m_{cs} byly zahrnuty v justážním faktoru. Tudíž právě při justáži indikace I_s se rovná:

$$I_s = m_{cs}$$

Tato justáž je samozřejmě provedena za podmínek charakterizovaných aktuálními hodnotami g_s , $\rho_s \neq \rho_c$ a $\rho_{as} \neq \rho_0$, identifikovanými indexem “ s ” a je platná pouze za těchto podmínek. Pro jiné těleso mající $\rho \neq \rho_s$, váženém na stejných vahách, ale za odlišných podmínek: $g \neq g_s$ a $\rho_a \neq \rho_{as}$, je indikace obecně rovna (při zanedbání výrazů druhého a vyššího řádu):

$$I = m_c * g/g_s \{ 1 - (\rho_a - \rho_0) (1/\rho - 1/\rho_s) - (\rho_a - \rho_{as})/\rho_s \}$$

Jestliže nejsou váhy přemístěny, není zde změna g , takže $g/g_s = 1$. To je předpokládáno dále.

Vzorec výše je dále zjednodušen v případech, kde některé hodnoty hustot jsou stejné:

a) vážení tělesa při referenční hustotě vzduchu: $\rho_a = \rho_0$, pak

$$I = m_c * \{ 1 - (\rho_0 - \rho_{as})/\rho_s \}$$

b) vážení tělesa se stejnou hustotou jako má justovací závaží:
 $\rho = \rho_s$, pak opět (jako v případě výše))

$$I = m_c * \{ 1 - (\rho_a - \rho_{as})/\rho_s \}$$

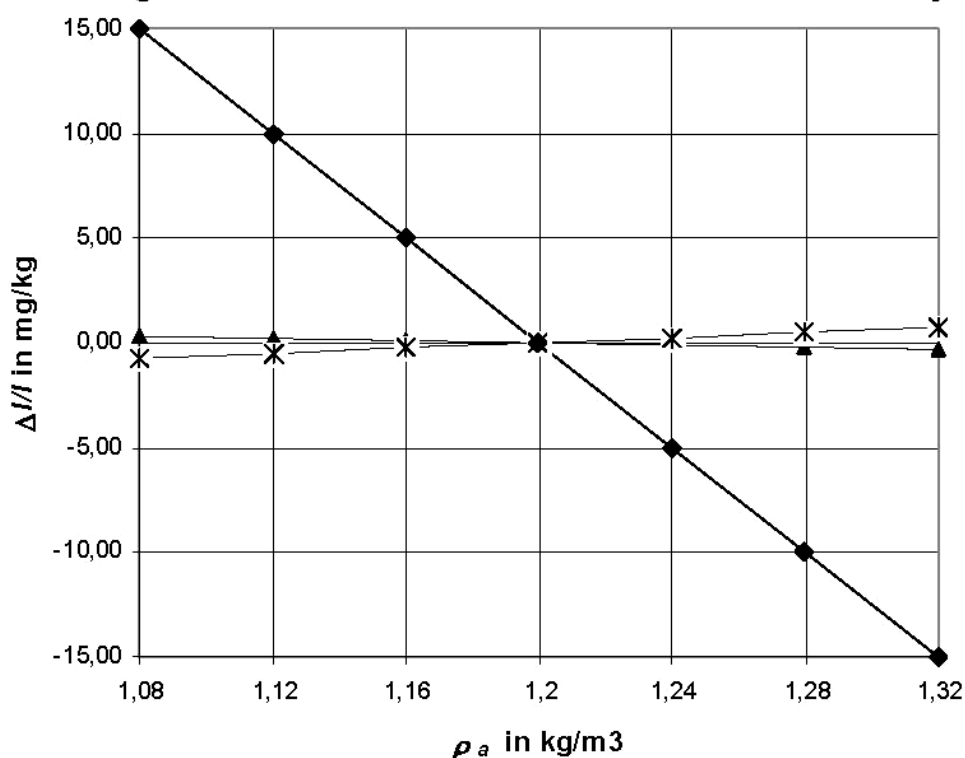
c) vážení ve stejné hustotě vzduchu jako v době justování:
 $\rho_a = \rho_{as}$, pak

$$I = m_c * \{ 1 - (\rho_a - \rho_0) (1/\rho - 1/\rho_s) \}$$

Obrázek níže ukazuje příklady velikosti relativních změn $\Delta I / I_s = (I - I_s) / I_s$ u vah justovaných etalonovým závažím s $\rho_s = \rho_c$, při kalibraci etalonovým závažím o rozdílné ale typické hustotě.

Na obrázku níže je znázorněna změna indikace v důsledku vztlaku vzduchu

Figure 4.2-1 Variation of indication due to air buoyancy



- Δ platí pro těleso s $\rho = 7\,810 \text{ kg/m}^3$, vážené v $\rho_a = \rho_{as}$
- × platí pro těleso s $\rho = 8\,400 \text{ kg/m}^3$, vážené v $\rho_a = \rho_{as}$
- ◆ platí pro těleso s $\rho = \rho_s = \rho_c$ po najustování v $\rho_{as} = \rho_0$

Je zřejmé, že za těchto podmínek má změna hustoty vzduchu daleko větší účinek než změna hustoty tělesa.

5.2.2 Referenční hodnota hmotnosti

K určení chyb indikací vah se používají etalonová závaží o známé hodnotě konvenční hmotnosti m_{cCal} . Jejich hustota ρ_{Cal} se normálně liší od referenční hodnoty ρ_c a hustota vzduchu ρ_{aCal} v době kalibrace se normálně liší od ρ_0 .

Chyba E indikace je

$$E = I - m_{ref}$$

kde m_{ref} je konvenční hodnota hmotnosti, dále nazývaná referenční hodnota hmotnosti. V důsledku účinku vztaku vzduchu, konvekce, driftu a dalších, které mohou vést k menším korekcím δm_x , se m_{ref} přesně nerovná m_{cCal} :

$$m_{ref} = m_{cCal} + \delta m_B + \delta m_{conv} + \delta m_D + \delta m_{...}$$

Korekce na vztlak vzduchu δm_B je ovlivněna hodnotami ρ_s a ρ_{as} , které platí pro justáž, ale normálně nejsou známy. Předpokládá se, že je použito závaží o referenční hustotě $\rho_s = \rho_c$. Vztah níže pak udává obecné vyjádření pro tuto korekci

$$\delta m_B = -m_{cCal} [(\rho_{aCal} - \rho_0)(1/\rho_{cCal} - 1/\rho_c) + (\rho_{aCal} - \rho_{as})/\rho_c]$$

Pro hustotu vzduchu ρ_{as} uvažujeme dvě situace označené A a B:

- A Váhy byly najustovány bezprostředně před kalibrací, takže $\rho_{as} = \rho_{aCal}$. To zjednodušuje výše uvedený vztah na:

$$\delta m_B = -m_{cCal} (\rho_{aCal} - \rho_0)(1/\rho_{cCal} - 1/\rho_c)$$

- B Váhy byly najustovány nezávisle na kalibraci, ve vzduchu o neznámé hustotě ρ_{as} , která by se měla odhadnout na základě racionálního předpokladu.

- B1 U kalibrace na místě, lze očekávat, že ρ_{as} je obdobná jako ρ_{aCal} , s možným rozdílem $\delta\rho_{as} = \rho_{aCal} - \rho_{as}$. Dostáváme pak modifikaci:

$$\delta m_B = -m_{cCal} [(\rho_{aCal} - \rho_0)(1/\rho_{cCal} - 1/\rho_c) + \delta\rho_{as}/\rho_c]$$

- B2 Jednoduchý přímý předpoklad by mohl být $\rho_{as} = \rho_0$, pak

$$\delta m_B = -m_{cCal} (\rho_{aCal} - \rho_0)/\rho_{cCal}$$

5.3 Definice nejistoty kalibrace

5.3.1 Nejistota kalibrace

Nejistota výsledku měření provedeného při kalibraci váhy, vztahující se k podmínkám a zkouškám provedeným v době kalibrace

5.3.2 Nejistota vah při používání

Nejistota odhadnutá pro definované podmínky, za kterých uživatel váhy normálně používá. **Tato nejistota má vždy vyšší hodnotu než nejistota kalibrace!**

5.3.2.1 Podmínky při kalibraci a používání vah (rozdíly)

Uživatel váhy by si měl být vědom skutečnosti, že při normálním použití váhy, která byla kalibrována se liší situace od té při kalibraci v některých pokud ne ve všech následujících aspektech:

1. indikace získané pro vážená tělesa nejsou stejná jako ta při kalibraci,
2. vážicí proces se může lišit od postupu při kalibraci:
 - a. pro každé zatížení je odečtena pouze 1 hodnota, ne několik hodnot pro získání průměrné hodnoty,
 - b. odečet pomocí dílku d váhy, ne s vyšším rozlišením,

- c. zatěžování nahoru a dolů, ne pouze vzhůru - nebo opačně,
 - d. zatížení na nosiči po delší dobu, ne odlehčení po každém zatěžovacím kroku – nebo opačně,
 - e. použití excentrického zatížení,
 - f. použití tárovacího zařízení, atd.
3. prostředí (teplota, barometrický tlak atd.) se může lišit,
4. u vah, které nejsou pravidelně justovány např. pomocí vestavěného zařízení se může, v důsledku stárnutí nebo opotřebení, najustování změnit.

Na rozdíl od bodů 1 až 3, závisí obvykle tento vliv na uplynulém čase od kalibrace a měl by být tudíž uvažován v souvislosti s určitou časovou periodou, např. za jeden rok nebo normální interval mezi kalibracemi.

Pro jasné odlišení výsledků vážení zatížení L na kalibrované váze od indikací I získaných během kalibrace, se zavádí tyto symboly:

R = údaj, jakákoliv indikace získaná po kalibraci;
 W = výsledek vážení, údaj korigovaný chybou E .

R se rozumí jednotlivý údaj při normálním rozlišení (násobek d), s korekcemi, které se mají aplikovat tam kde je to možné.

6 Vlivy působící na váhy v používání (z hlediska nejistot měření)

Je třeba definovat minimálně podmínky v následujících oblastech:

- Použití justážního zařízení váhy
- Provádění korekcí výsledku vážení
- Teplotní podmínky při používání
- excentricita těžiště váženého předmětu (materiálu)

Pro účely této části je indikace označována jak je uvedeno výše R (odečet váhy získaný při jejich použití).

7 Vyjádření nejistoty vah při používání (tři případy)

Při analýze nejistoty v používání lze uvažovat tři případy vůči nejistotě získané při kalibraci, které by měl uživatel zvážit.

7.1 Podmínky jsou stejné jako při kalibraci (měření se provádí v bodech stejných jako při kalibraci)

$$u(v_u)^2 = u_{\text{opak}}^2 + u_{\text{d0}}^2 + u_{\text{dI}}^2 + u_{\text{EI}}^2$$

Toto je nejjednodušší případ. Uživatel musí však mít na paměti, že i při stejných podmínkách jako panovaly při kalibraci bude nejistota při používání vyšší a to minimálně o hodnoty nejistot plynoucí z opakovatelnosti a rozlišení váhy.

7.2 Podmínky se od podmínek při kalibraci liší (měření se provádí v bodech stejných jako při kalibraci)

$$u(v_u)^2 = u_{\text{opak}}^2 + u_{d0}^2 + u_{dI}^2 + u_{EI}^2 + [(u_{\text{adj}})_{\text{rel}}^2 + (u_{\text{T}})_{\text{rel}}^2 + (u_{\text{exc}})_{\text{rel}}^2 + (u_{\text{vz}})_{\text{rel}}^2] \cdot R^2$$

O něco složitější případ, kdy uživatel musí navíc vzít v potaz další faktory vyplývající z odlišných podmínek. Mimo hodnoty nejistot plynoucí z opakovatelnosti a rozlišení váhy se jedná o hodnoty nejistot plynoucí z justáže vah, změny teploty, excentricity a změny hodnoty vztlaku vzduchu.

7.3 Měření se provádí v jiných než kalibrovaných bodech

Při zkouškách prováděných při kalibraci jsou určeny chyby indikací v omezeném počtu definovaných bodů vážícího rozsahu váhy. Hodnoty chyb v ostatních bodech v závislosti na zatížení pak lze získat použitím metod interpolace nebo aproximace. Lze předpokládat, že při správném používání váhy je její nelinearita velmi malá a lze tedy tento případ zjednodušit na použití lineární interpolaci nebo aproximaci pomocí přímky.

8 Metody pro odvození chyb indikací pro jiné než kalibrované body

8.1 Aproximace pomocí přímky procházející středem

Pro jednoduchost, a při aplikování praktických zkušeností lze ve většině případů použít aproximaci pomocí přímky procházející středem (váhy se před aplikací zatížení nulují), tedy předpokládáme, že při správné funkci, při vzrůstajícím zatížení, indikují nezatížené váhy nulu.

Pak:

$$\text{rovnice přímky:} \quad E(R) = f(R) = a_1 R$$

$$\text{kde:} \quad a_1 = \Sigma p I E / \Sigma p I^2$$

$$u^2(a_1) = 1 / \Sigma p I^2$$

p je váhový faktor $p = 1/u^2(E_I)$

Nejistota chyby v aproximovaném bodě:

$$u^2(E_{\text{aprox}}) = a_1^2 u^2(R) + R^2 u^2(a_1)$$

kde R je indikace váhy v daném bodě rozsahu

$$\text{a} \quad u^2(R) = d_0^2/12 + d_I^2/12 + s^2(I)$$

$$u(v_u)^2 = u_{\text{opak}}^2 + u_{d0}^2 + u_{dI}^2 + u^2(E_{\text{aprox}}) + [(u_{\text{adj}})_{\text{rel}}^2 + (u_{\text{T}})_{\text{rel}}^2 + (u_{\text{exc}})_{\text{rel}}^2 + (u_{\text{vz}})_{\text{rel}}^2] \cdot R^2$$

nebo

$$u(v_u)^2 = \alpha^2 + \beta^2 R^2$$

kde α^2 představuje sumu čtverců absolutních standardních nejistot a β^2 relativních standardních nejistot uvedených ve vztahu výše.

8.1.1 Doporučení

Pro aproximaci lze velmi dobře využít Excel, kde lze na měřené hodnoty aplikovat polynomy různých stupňů a vygenerovat závislost pro určení hodnot chyb v jiných než kalibrovaných bodech.

9 Výsledek vážení a vyjádření hmotnosti

9.1 Hodnota hmotnosti nebo konvenční hodnota hmotnosti

Veličinu W pokládáme za odhad konvenční hodnoty hmotnosti váženého objektu. Pro určité aplikace je ale nezbytné odvodit z této hodnoty hodnotu hmotnosti nebo přesnější hodnotu konvenční hmotnosti.

Hustota ρ nebo objem V váženého tělesa, společně s odhadem jejich nejistot však musí být známa z jiných zdrojů.

9.1.1 Hodnota hmotnosti

Hmotnost váženého tělesa je

$$m = W[1 + (1/\rho - 1/\rho_c)]$$

Při zanedbání položek na druhém a vyšším řádu lze odvodit relativní standardní nejistotu $w(m)$ jako

$$w^2(m) = \frac{u^2(W)}{W^2} + u^2(\rho_a) \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right)^2 + \rho_a^2 \frac{u^2(\rho)}{\rho^4}$$

Jestliže V a $u(V)$ jsou známy $u(\rho)$, ρ lze aproximovat pomocí W/V a $u(\rho)$ lze nahradit $u(V)$.

9.1.2 Konvenční hodnota hmotnosti

Konvenční hodnota hmotnosti váženého tělesa je:

$$m_c = W[1 + (\rho_a - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_c)]$$

Opět při zanedbání položek na druhém a vyšším řádu lze odvodit relativní standardní nejistotu $w(m_c)$ jako

$$w^2(m_c) = \frac{u^2(W)}{W^2} + u^2(\rho_a) \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 \frac{u^2(\rho)}{\rho^4}$$

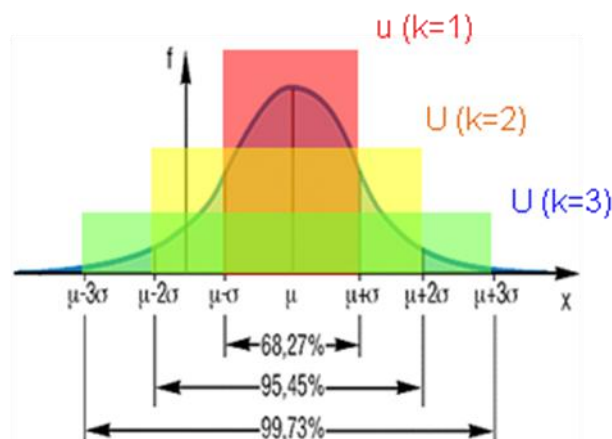
10 Chyby vah a jejich použití v praxi

Tato kapitola se zabývá prací s chybou váhy v souvislosti s její kalibrací. V praxi se často setkáváme s požadavkem uživatele na co nejpřesnější vážení. Tento požadavek je však velmi relativní. Jiná přesnost bude požadována pro navažování ingrediencí při výrobě potravin, kdy chybou měření může dojít ke zkreslení chuti finálního výrobku, a zcela jiná přesnost bude požadována při navažování komponent pro léky, kdy při chybném vážení může dojít k ohrožení života.

Podrobný postup stanovení požadavků na váhu je uveden dále v kapitole „Výběr vhodné váhy“. Nyní se zaměříme na to, jak určit, zda je měřidlo dostatečně přesné, a jaká je tedy vlastní chyba váhy.

Jediným správným způsobem, jak stanovit chybu vážení, je stanovení nejistoty váhy v daném bodě. Právě nejistota nám určuje interval hodnot, ve kterém má ležet výsledek vážení. Nebudeme se zde do detailů zabývat problematikou nejistot, která je popsána v jednotlivých kalibračních postupech, ale pokud dostaneme do ruky kalibrační list, musíme věnovat pozornost následujícím faktorům:

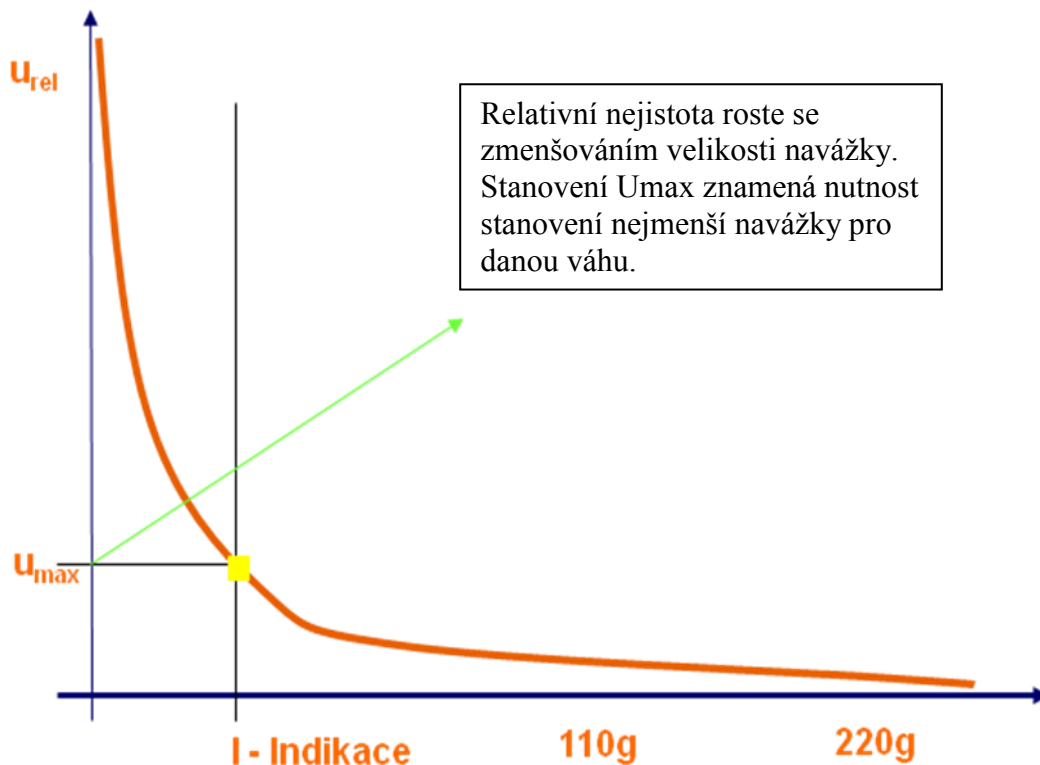
- Je nejistota určena v bodech, ve kterých obvykle měříme? Pokud ne, musíme nejistotu přepočítat pomocí metod interpolace tak, aby odpovídala bodu, ve kterém chceme stanovit chybu.
- Je na kalibračním listu uvedena tzv. rozšířená nejistota měření U ? Jaký byl použit koeficient rozšíření k Gaussova normálního rozdělení (1, 2 nebo 3)? Pokud v kalibračním listu není rozšířená nejistota uvedena, musíme uvedenou nejistotu u vynásobit ještě koeficientem k . Obvykle se volí hodnota $k = 2$, což odpovídá intervalu spolehlivosti 95 % ($k = 1 \dots 68 \%$; $k = 3 \dots 99,7 \%$).



10.1 Nejmenší velikost navážky

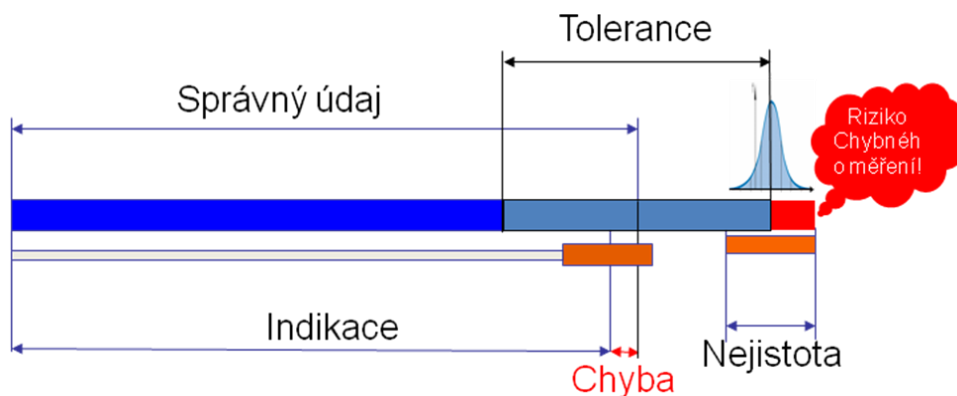
V poslední době se čím dál častěji začíná řešit problematika nejmenší velikosti navážky, protože uživatelé se snaží využívat své váhy v celém jejich rozsahu vážení a v laboratorních podmínkách vzniká potřeba přípravy velmi malých vzorků (v mg) pro provádění analýz. V tomto okamžiku si musíme uvědomit, že budeme-li považovat rozšířenou nejistotu měření U za vyjádření chyby váhy a tuto nejistotu vztáhneme k velikosti dané navážky, dostaneme tzv. relativní nejistotu měření

$U_{rel} = U / I$, kde U je rozšířená celková nejistota váhy v daném bodě a I je odpovídající indikace váhy. Pokud si představíme tuto závislost, dojdeme k hyperbolické funkci. Čím menší bude navážka a tedy indikace I , tím větší bude U_{rel} . Pokud bude navážka rovna 0, U_{rel} bude nekonečná. Pokud bude navážka velmi velká, U_{rel} se bude asymptoticky blížit k 0. Z tohoto důvodu je nutné při vážení malých navážek dávat velký pozor, aby chyba měření nebyla větší než požadované tolerance.



10.2 Vyjádření výsledku měření stanovení chyby

Jak můžeme z nejistoty měření stanovit chybu měřidla? Nejprve je potřeba si uvědomit, že nejistota byla stanovena zkušeným pracovníkem kalibrační laboratoře za pomoci odpovídajícího závaží. I když se kalibrace má provádět za podmínek co nejbližších běžnému používání váhy, nelze při kalibraci zohlednit všechny vlivy, které mají dopad na výsledky vážení. Důvodem může být například skutečnost, že vážený materiál může mít některé vlastnosti, která závaží nemá - např. hygroskopičnost, magnetismus, elektrostatický náboj, teplotu atd., obsluha váhy může do vážení vnášet určitou chybu nesprávnou manipulací – tzv. lidský faktor ... atd. Chceme-li tedy z nejistoty váhy vypočítat chybu měřidla, měli bychom tuto nejistotu rozšířit ještě faktorem bezpečnosti b . Tento faktor volíme v závislosti na rizikovosti a kritičnosti procesu s ohledem na výše uvedené podmínky v rozmezí 2 ... 10. Chybu měřidla E pak stanovíme jako součin $E = U * b$ a výsledek měření uvádíme ve tvaru:
 $I \pm E$



Příklad

Navážujeme navážku 110 g na váze s dílkem $d = 0,001$ g.
 Rozšířená celková nejistota stanovená kalibrací pro 110 g je $U = \pm 0,0012$ g ($k = 2$).
 S ohledem na proces vážení a vlivy na měření volíme bezpečnost $b = 3$.

Stanovíme chybu měření $E = U * b \dots E = 0,0012 * 3 = 0,0036$ g

Výsledek měření by měl být uveden ve tvaru:

$$I \pm E = 110,000 \pm 0,0036 \text{ g}$$

Tento výsledek může být pro uživatele interpretován takto:

„Výsledek měření leží se spolehlivostí 95 % a bezpečností 3 v uzavřeném intervalu hodnot <109,9964 g; 110,0036>.“

Uživatel nebo osoba odpovědná za výsledky měření by si měl být ve všech případech jistý, že měření probíhá v přípustných tolerancích. Uživatelé se obvykle ptají, jak tolerance stanovit? Zde je potřeba se zamyslet nikoliv nad váhou samotnou, ale nad očekávaným výsledkem navážky. Ve výše uvedeném příkladu vidíme, že hodnota navážky není 110 g, ale může být 109,9964 g až 110,0036 g. Pokud tato situace uživateli nevádí a nemá vliv na použití navážky v dalším procesu, znamená to, že váha váží v přípustné toleranci.

Toleranci by pro jednotlivé navážky měl stanovit ten, kdo pracuje s výsledkem měření a odpovídá za to, co se s navážkou dále dělá, a tím pádem i ví, jakou nepřesnost si může dovolit, aniž by byl ohrožen další proces.

11 Vyhodnocení nejistoty a její použití v praxi

11.1 Posouzení procesu

Základem k výběru nové váhy nebo výběru stávající váhy pro nový účel použití by mělo být posouzení celého procesu vážení, při kterém je nutné zvážit, jak kritické je konkrétní vážení pro daný proces. Nezbytné je zohlednit, do jaké míry chybný výsledek vážení ovlivňuje celkový výsledek výrobního procesu, laboratorní analýzy apod. Pro posuzování míry rizika existuje řada metodik a jednotlivé systémy řízení kvality se na ně odvolávají. Obecně bychom měli zvážit tři základní hlediska:

1. Dojde v případě chybného navážení ke škodám na zdraví lidí, zvířat nebo poškození životního prostředí?
2. Jak velké budou ekonomické dopady na naše oddělení nebo celou firmu v případě chybného vážení?
3. Bude snadné chybu vážení po navážení hned odhalit a rychle korigovat, než dojde k dalším škodám?

Pokud není žádné z těchto hledisek relevantní nebo kritické, není nutné se procesem příliš zabývat a lze předpokládat, že případná chyba bude snadno napravena bez větších problémů. Bude-li však některé z těchto hledisek zásadní, měli bychom danému procesu věnovat patřičnou pozornost a pečlivě vážit jednotlivé kroky od volby měřidla, přes jeho užívání, kontrolu a údržbu.

Jaká váha je vhodná pro zamýšlenou aplikaci? V praxi se často setkáváme s tím, že uživatelé rovnou na základě například rozsahu a dílku zvolí měřidlo, aniž by se zamýšleli nad jeho skutečnými vlastnostmi a dalšími funkcemi, které jim mohou zajistit větší spolehlivost, vyšší uživatelský komfort nebo lepší výsledky vážení. Správný postup výběru by měl vycházet z posouzení požadavků na základě účelu, ke kterému bude váha sloužit. Doporučujeme postupovat v následujících krocích:

Jaká bude největší navážka na váze? – Tato navážka musí být vždy větší, než největší plánovaná navážka, včetně hmotnosti obalu (tzv. táry).

Jaká bude nejmenší navážka na váze? – Váha musí být schopna s dostatečnou přesností a bezpečností zvládnout i tu nejmenší navážku.

Jakou požadujete přesnost vážení? – To je často nejobtížnější otázka, nejlepší je vztáhnout jednotlivé navážky k požadovanému výsledku celého procesu a konzultovat toto s technologií výroby. Je nutné zjistit, jak velká může být tolerance navážky.

Jak velká může být odchylka nejmenší netto navážky, aby nebyl ovlivněn výsledek měření? Na základě těchto informací pak můžeme stanovit požadovanou přesnost vyjádřenou přípustnou odchylkou (tolerancí) v procentech.

11.2 Výběr vhodné váhy

Pokud známe odpovědi na výše uvedené otázky, můžeme jednotlivé parametry porovnat s údaji výrobců jednotlivých vah a vybrat modely odpovídající daným specifikacím. Největším problémem bývá stanovení přesnosti váhy. Pokud vybíráme z měřidel, která již vlastnime, je tento problém snazší. Zde můžeme vyhodnotit kalibrační listy a ověřit, zda je běžně dosahovaná nejistota vyjádřená v kalibračních listech menší než požadovaná přesnost. Pokud však kupujeme váhu novou, musíme se spolehnout na údaje od výrobce. Kvalitní výrobci poskytují dnes při prodeji vah informace o opakovatelnosti, nejmenší velikosti navážky, ... V takovém případě je vhodné celý problém konzultovat s prodejcem a ten by měl být schopen doporučit správný model.

Pokud není dodavatel nebo výrobce schopen tyto údaje poskytnout, nezbyvá, než se spolehnout na to, že váha bude pracovat s chybou nejméně +/- 1 dílek. Tuto chybu je však nutné ještě vynásobit bezpečností. Chybu váhy ovlivňuje řada faktorů, ať už je to kvalita elektroniky váhy nebo podmínky okolí, ve kterých bude váha pracovat. Minimální bezpečnost, kterou lze pro takový případ doporučit je 3. Pokud nemáme o váze jiné informace, než maximální váživost a dílek, můžeme pro běžná vážení předpokládat, že v praxi bude chyba měření +/- 3 dílky. Potom bude platit, že uživatelem požadovaná tolerance musí být mnohem větší než +/- 3 dílky váhy. Jedině tak uživatel získá rozumnou jistotu, že neváží mimo požadované tolerance.

11.2.1 Instalace váhy

V minulosti byla instalace často zaměňována s pouhou dodávkou váhy. Technik nebo přepravce váhu doručil a předal zákazníkovi s návodem k obsluze a v opodstatněných případech váhu připojil do výrobní linky. Takový pohled na instalaci je sice ekonomický, ale rozhodně nemá nic společného s řízením kvality, ani se zajištěním kvality daného měření. Technici dodavatele by měli být odborníky a dobře znát podmínky, za kterých je váha schopna pracovat. Dále by měli být připraveni váhu nastavit s ohledem na tyto podmínky tak, aby poskytovala co nejlepší výkon. Správná instalace by měla probíhat v těchto krocích:

Dodávka a kontrola úplnosti dodávky – Technik by měl spolu s uživatelem zkontrolovat, zda byla váha dodána kompletní a nepoškozená v souladu s objednávkou zákazníka, čímž lze předejít problémům s pozdější reklamací kompletnosti dodávky.

Smontování, zapojení váhy a ověření základních funkcí – V tomto okamžiku by mělo dojít k posouzení místa instalace s ohledem na zdroje tepla, vibrace budovy, proudění vzduchu a další faktory ovlivňující funkci váhy. Váha by neměla být nainstalována do podmínek, do kterých není určena. Po zapojení váhy by měl technik ověřit, zda všechny její funkce fungují v souladu se specifikací v objednávce.

Zaškolení obsluhy – Obsluha by měla být zaškolená nejen v základním používání váhy, ale i ve způsobu její kontroly, čištění a údržby. Technik může také pomoci při sestavování postupů, jak váhu správně používat s ohledem na specifické požadavky uživatele.

Prvotní kalibrace váhy a stanovení nejistoty měření – Pokud nejde o stanovené měřidlo (zde jsou tolerance a chyby přesně dány příslušnou harmonizovanou normou), je třeba provést kalibraci váhy. Váha musí být kalibrována na místě používání a za podmínek, za kterých bude používána. Výsledkem kalibrace musí být kalibrační list obsahující nejistotu měření. Nejistota měření by měla být vyjádřena v bodech, ve kterých bude uživatel měření provádět, což usnadní vyhodnocení vhodnosti měřidla. Nejistota by měla být vyhodnocena vzhledem k požadované toleranci. Obecně platí, že rozšířená nejistota vyjádřená v kalibračním listu musí být menší než požadovaná tolerance měření.

$B \dots U \leq T$

b ... je bezpečnost, která se volí v rozsahu 3 – 10

U ... je rozšířená nejistota měření

T ... je požadovaná tolerance

11.3 Faktor bezpečnosti

11.3.1 Jak aplikovat faktor bezpečnosti

Faktor bezpečnosti nám zohledňuje děje, které nelze při vlastní kalibraci nasimulovat. Nejistota zjištěná kalibrací je stanovena odborným technikem, který ke zkoušce používá

závaží (nikoliv reálné vzorky), a při reálném vážení v průběhu používání váhy dochází k dalším dějům, jako jsou například změny teploty, znečišťování váhy a justovacího závaží, vibrace, proudění vzduchu, atd. Váhu obvykle nekalibrujeme každý den ale zpravidla jednou za rok, proto tedy může docházet díky vnějším podmínkám ke zhoršování výsledků vážení. Všechny tyto faktory se snaží postihnout právě bezpečnost. Pro běžné provozy a standardní vážení můžeme použít bezpečnost $b = 3$. Pro kritické procesy, kde hrozí ohrožení zdraví a proces má zásadní vliv na výrobek, můžeme volit bezpečnost $b = 10$. Tento faktor můžeme také snížit nebo zvýšit na základě dlouhodobého vyhodnocování kalibrací.

11.4 Rutinní provoz měřidla

Pokud máme váhu správně nainstalovanou a zkalibrovanou, můžeme ji začít používat. Uvedeme ji tedy do rutinního provozu. Naším cílem je dosáhnout požadovaných výsledků měření s chybou menší, než je požadovaná tolerance, tak, aby nedošlo k ohrožení daného procesu. Jak zajistit spolehlivý provoz váhy? Zohlednit bychom měli tři základní aspekty:

1. Kalibrace měřidla
2. Rutinní zkoušky
3. Technologie měřidla

11.4.1 Kalibrace měřidla

Kalibraci jsme se již hodně věnovali v kapitole o instalaci měřidla. Kalibrace při běžném provozu měřidla je významná, protože nám umožňuje vyhodnotit, jak se výkon měřidla za období mezi kalibracemi změnil. Abychom to mohli zjistit, je nutné kalibraci provádět ještě před provedením údržby ve stavu, ve kterém se váha nachází například po roce provozu. Na základě výsledku a jeho srovnání s předchozím kalibračním listem pak můžeme rozhodnout o velikosti faktoru bezpečnosti, kalibračním intervalu a četnosti rutinních testů. Pokud provádíme kalibrace měřidla pouze po provedení roční pravidelné údržby, této možnosti se zříkáme. Riskujeme tím, že se měřidlo mohlo dlouhým používáním od poslední údržby zhoršit natolik, že výsledek již neodpovídá požadovaným tolerancím.

11.4.2 Rutinní zkoušky

Proč by měly být prováděny další zkoušky během provozu, když je měřidlo řádně nainstalováno, zkalibrováno a udržováno? Odpověď je poměrně snadná – i u řádně udržovaného zařízení se může vyskytnout technická závada, měřidlo obvykle používá více uživatelů různým způsobem a někteří uživatelé si mohou pro svoje potřeby upravit nastavení měřidla. Jistě najdeme řadu vlivů a situací, kdy nemůžeme s jistotou tvrdit, co se s měřidlem dělo od posledního měření. Právě proto systémy řízení kvality vyžadují provádět rutinní zkoušky, aby uživatel snížil riziko chybného měření. Rutinní zkoušky by měly být snadné a rychlé, aby nezatěžovaly uživatele při jeho práci. Mělo by být jednoduché je vyhodnotit, což znamená stanovit limity, které nesmí být při zkoušce překročeny, a jasné instrukce, co dělat, pokud by limity překročeny byly. Další otázkou je potom četnost provádění těchto zkoušek. Zkoušky by měly být prováděny s ohledem na míru rizika a na to, zda jsou váhy vybaveny automatickou kontrolní funkcí. U statických vah můžeme využívat tyto základní rutinní zkoušky: zkoušku citlivosti, zkoušku opakovatelnosti a rohovou zkoušku. U vah, které jsou používány k míchání směsí podle receptur nebo dávkování, je v opodstatněných případech ještě vhodné zařadit zkoušku linearitu.

11.4.3 Vliv Technologie měřidla

Často jsme v předcházejícím textu odkazovali na hodnocení míry rizika. Rizikům lze samozřejmě předcházet organizačními opatřeními, ale také volbou vhodného technického vybavení. Dnešní kvalitní, moderní váhy nabízejí celou řadu technických funkcí, které snižují riziko chybného vážení a umožňují tak uživateli snížit četnost provádění rutinních zkoušek a kalibrací. K těmto funkcím patří:

Automatické justování: Tato funkce je dnes téměř standardem u všech přesných laboratorních vah. Váha s automatickým justováním je vybavena vnitřním justovacím závažím, které používá ke kontrole vážení a přejustování elektroniky snímače. Pokud je váha vybavena dvěma kusy závaží, může taková funkce kontrolovat a justovat váhu ve třech bodech a kontrolovat linearitu váhy. Další výhodou je například automatické přejustování váhy v případě změny teploty, která má významný vliv na výsledky měření. Tato funkce je velmi dobrým pomocníkem a umožňuje snížit četnost testů a případně prodloužit kalibrační interval, ale na druhé straně s sebou nese i určitá úskalí. Dojde-li ke znečištění vnitřních závaží, jejich chybné manipulaci nebo opotřebení, může se stát, že váha bude justována na chybnou hodnotu, a tato funkce se stane příčinou špatného vážení. Dalším rizikem je skutečnost, že vnitřní závaží nelze kalibrovat (navázat na etalony), proto je potřeba zajistit návaznost měřidla vnější kalibrací v pravidelných intervalech.

Uživatelské profily, zajištění váhy heslem: Některé váhy jsou vybaveny funkcí nastavení uživatelských profilů a jejich zajištění heslem. Tato funkce snižuje riziko použití nesprávných parametrů nastavených jiným uživatelem, předchází nechtěným změnám nastavení váhy a bude přínosná, pokud se na váze často střídají uživatelé a mění způsoby navažování.

Velikost minimální navážky: Váhy vybavené touto funkcí upozorňují uživatele na příliš malou navážku, která již není v požadovaných tolerancích. Čím více se hodnota navážky blíží k nule, tím větší je relativní nejistota měření. Proto ten, kdo používá váhu přibližně v prvních 10 % jejího rozsahu váživosti, musí mít tuto skutečnost na paměti a pečlivě si ověřit, jak vypadá nejistota měření ve vztahu k požadované toleranci.

Automatická indikace vodorovné polohy: Moderní váhy mají elektronickou kontrolu vodorovné polohy. Váha nedovolí uživateli vážit, pokud miska váhy není ve vodorovné poloze. Zkuste se projít po laboratoři a po výrobních halách a zjistit, kolik vah je skutečně vyrovnáno do vodorovné polohy. Možná budete výsledkem překvapeni.

Automatická diagnostika: Průmyslové digitální váhy nabízejí funkci diagnostiky přetížení snímače a chyby jednoho nebo více snímačů v sérii. Uživatel je na tyto chyby automaticky upozorňován, záznamy o chybách jsou ukládány v souborech s historií měřidla a následně slouží také servisním pracovníkům při identifikování závad.

Výrobci vah budou bez pochyby i nadále pokračovat ve výzkumu a vývoji nových podpůrných funkcí, které povedou k minimalizaci rizik měření. Přesto je nutné tyto funkce vnímat jen jako pomůcku pro zajištění kvality daného procesu. Jejich samotné využívání bez správného používání váhy, provádění rutinních zkoušek a kalibrací váhy nezajistí spolehlivost a přesnost vážení. Celý systém musí být chápán jako celek a jeho jednotlivé části je potřeba mezi sebou vhodně kombinovat s ohledem na míru rizika.

LITERATURA

- [1] ISO Guide: Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (vydání 1993)
- [2] EA/4-02: Metodika vyjadřování nejistot měření při kalibracích
- [3] Mezinárodní doporučení OIML R 76 - 1: Váhy s neautomatickou činností. Část 1: Metrologické a technické požadavky – zkoušky (vydání 2006)
- [4] Mezinárodní doporučení OIML R 111- 1: Závaží tříd E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ a M₃, část 1 Metrologické a technické požadavky (vydání 2004)
- [5] Mezinárodní dokument OIML D28: Konvenční hodnota výsledku vážení ve vzduchu (vydání 2004)
- [6] ILAC – G8: Směrnice k posuzování a prokazování shody se specifikací (založených na měření a zkouškách v laboratoři) (vydání 1996)
- [7] 0051-93: Stanovení nejistot při měřeních (2 díly) (vydání 1993)
- [8] M. Glaeser: Change of the apparent mass of weights arising from temperature differences, *Metrologia* 36 (1999), p. 183-197
- [9] OIML V1: Mezinárodní slovník termínů v legální metrologii (vydání 2000)
- [10] EURAMET/cg-18/v.02: Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments (vydání 2009)
- [11] Specific requirements relating to the calibration of non-automatic weighing instruments, Cofrac Dokument No. 2089 (vydání říjen 2000)
- [12] Česká norma ČSN EN 45501+AC: Metrologické aspekty vah s neautomatickou činností (vydání srpen 1995)
- [13] MPA 30-02-08: Návaznost měřidel a výsledků měření (vydání 2008)
- [14] ČSN EN ISO/IEC 17025: Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří (2005)
- [15] Mettler - Toledo AG: Weighing the right way (vydání 04/2008)
- [16] Roland Nater, Arthur Reichmuth, Roman Schwartz, Michael Borys, Panagiotis Zervos: Dictionary of Weighing Terms (vydal Springer 2009)