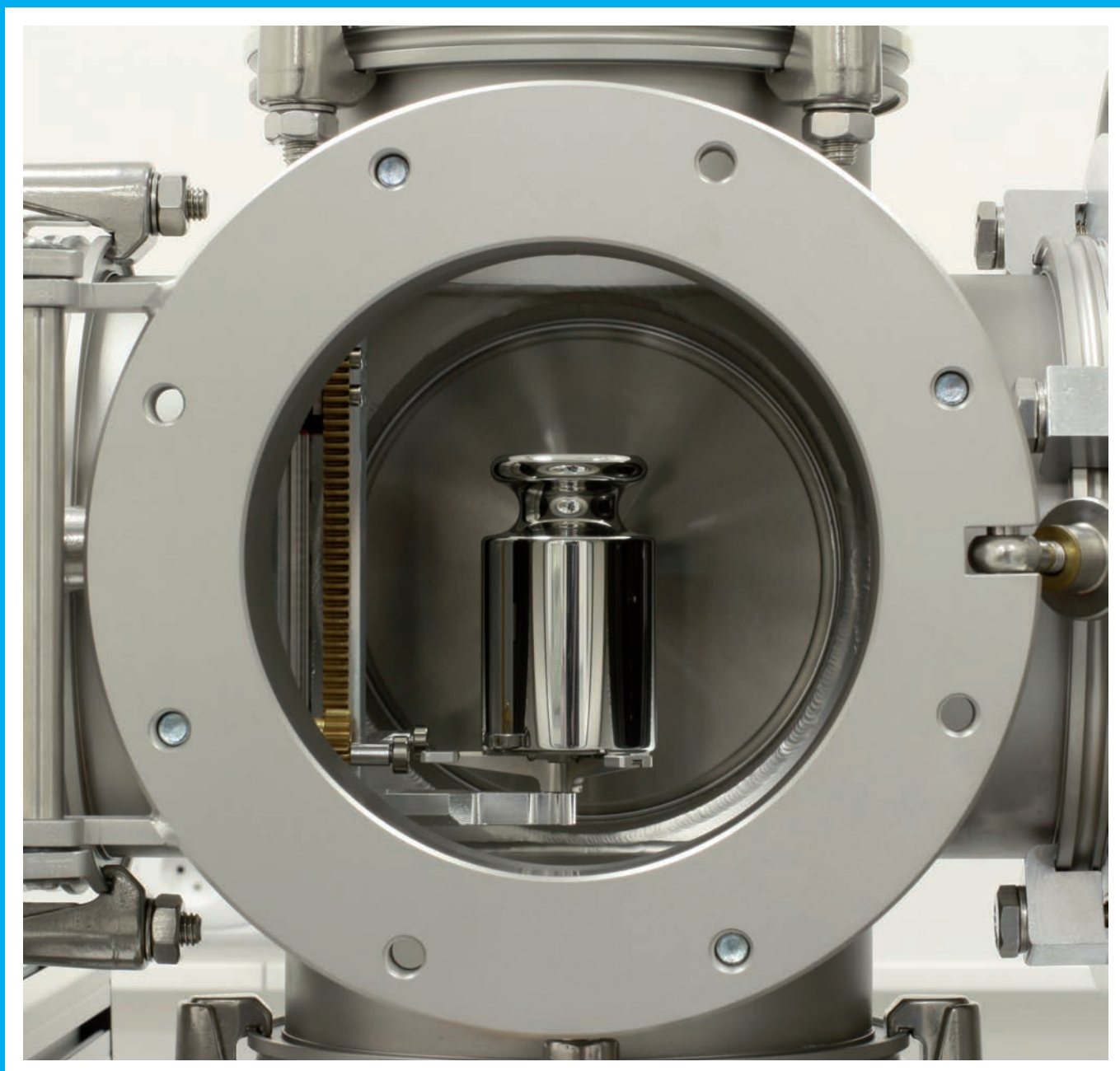


TEMATICKÁ
PŘÍLOHA č. 4/2010

METROLOGIE

VĚDECKÁ
LEGÁLNÍ
PRAKTICKÁ



METROLOGIE HMOTNOSTI

Ing. Ivan Kříž TEMATICKÁ PŘÍLOHA METROLOGIE HMOTNOSTI.....	2
Ing. Ivan Kříž HISTORIE JEDNOTKY HMOTNOSTI.....	3
Ing. Ivan Kříž HISTORIE PRIMÁRNÍ ETALONÁŽE HMOTNOSTI V ČESKÉ REPUBLICE.....	6
Mgr. Jaroslav Zůda NOVÁ DEFINICE HMOTNOSTI.....	7
Mgr. Jaroslav Zůda LABORATOŘ PRIMÁRNÍ METROLOGIE HMOTNOSTI.....	10
Mgr. Jaroslav Zůda KONVENČNÍ A VAKUOVÁ HMOTNOST.....	14
Mgr. Jaroslav Zůda PŘENOS JEDNOTKY HMOTNOSTI.....	17
Mgr. Jaroslav Zůda VYUŽITÍ KOMPARAČNÍCH VAH PRO MĚŘENÍ JINÝCH VELIČIN.....	18
Ing. Ivan Kříž OBLASTI MĚŘENÍ HMOTNOSTI.....	21
Ing. Ivan Kříž VÁŽENÍ V OBLASTI SILNIČNÍ DOPRAVY.....	26
Ing. Ivan Kříž KALIBRACE VAH.....	30
ZÁVĚR.....	36

METROLOGY OF MASS

Ing. Ivan Kříž THEMATIC SUPPLEMENT: METROLOGY OF MASS.....	2
Ing. Ivan Kříž HISTORY OF THE UNIT OF MASS.....	3
Ing. Ivan Kříž HISTORY OF THE PRIMARY ETALONAGE OF MASS IN THE CZECH REPUBLIC.....	6
Mgr. Jaroslav Zůda NEW DEFINITION OF MASS.....	7
Mgr. Jaroslav Zůda LABORATORY OF THE PRIMARY METROLOGY OF MASS.....	10
Mgr. Jaroslav Zůda CONVENTIONAL AND VACUUM MASS.....	14
Mgr. Jaroslav Zůda MASS UNIT TRANSFER.....	17
Mgr. Jaroslav Zůda APPLICATION MASS COMPARATOR BALANCE FOR THE MEASUREMENT OF OTHER VARIABLES.....	18
Ing. Ivan Kříž MASS MEASUREMENT AREAS.....	21
Ing. Ivan Kříž WEIGHING IN THE FIELD OF ROAD TRANSPORT.....	26
Ing. Ivan Kříž CALIBRATION OF BALANCE.....	30
CONCLUSIONS.....	36

TÉMATICKÁ PŘÍLOHA METROLOGIE HMOTNOSTI

1 Úvod

Cílem tématické přílohy je poskytnout čtenáři přehled o zajímavých částech velmi širokého oboru, jakým metrologie hmotnosti skutečně je. O šíři oboru a aplikacích vážicí techniky, která v posledním desetiletí prodělala opravdu nesmírný pokrok z technického hlediska, je pojednáno v příspěvku „Oblasti použití měření hmotnosti“. Samostatný příspěvek je věnován vážicí technice v oblasti silniční dopravy, tedy části oboru hmotnosti, kde se používají různé druhy technologie vážení, která v této oblasti prodělala v posledních letech rovněž velký technický pokrok a která v současné době hraje rovněž významnou roli z hlediska legislativy, týkající se provozu na pozemních komunikacích. V příspěvku věnovaném kalibraci vah jsou popsány současné snahy o určitou harmonizaci v této oblasti, i když se kalibrace vah týká tzv. neregulované sféry. V tomto příspěvku je popsán i důležitý evropský dokument, který se v posledních třech letech stává nástrojem této harmonizace v rámci evropského regionu. Pro čtenáře této přílohy budou jistě zajímavé i příspěvky z historie jednotky hmotnosti a z historie budování oboru hmotnosti respektive primární etalonáže tohoto oboru na území ČR v období před víc než 80 lety až po současnost. Zmíněna bude i historie státních etalonů.

Samozřejmě nelze opomenout příspěvky věnované metodám, které se používají v nejvyšších patrech oboru. Pro čtenáře bude zajímavý příspěvek, podávající přehled o současném stavu prací na redefinici jednotky hmotnosti a popis hlavních experimentů, které zde v současné době ve světě probíhají. Neméně zajímavý je příspěvek popisující využití hmotnostních komparátorů pro jiné účely než je metrologická návaznost na primární a sekundární úrovni nebo standardní kalibrace závaží. Například měření úniku plynů nebo měření magnetických vlastností závaží.

2 Význam roku 2010 pro metrologii hmotnosti v ČR

Rok 2010 je pro metrologii hmotnosti v České republice významný v tom, že je tomu právě 10 let od vyhlášení státního etalonu hmotnosti, kterým se stal v roce 2000 platino-iridiový prototyp. Tento prototyp byl pořízen v roce 1999 v BIPM a nese číslo 67. V roce 2000 se stal oficiálním vrcholem pyramidy metrologické návaznosti v ČR a fakticky jeho vyhlášení umožnilo následně vstup ČR do mezinárodních projektů, například v rámci EURAMET (tehdy pod názvem EUROMET) a stanovení a posléze schválení CMC hodnot v rozsahu 1 mg až 1 t.

V období 2000 až 2009 se primární etalonáž hmotnosti postupně rozvíjela. Bylo například zavedeno měření objemu a hustoty závaží a měření jejich magnetických vlastností. Nelze opomenout ani vybudování etalonáže tzv. velké hmotnosti na pracovišti Oblastního inspektorátu Jihlava. Toto pracoviště je navázáno na brněnskou primární laboratoř a zajišťuje realizaci stupnice hmotnosti od 50 kg do 1 t.

Rok 2010 je důležitým mezníkem i z jiného pohledu. Primární laboratoř byla v tomto roce vybavena novým zařízením, především vakuovým komparátorem. Ten v následujících pěti letech umožní laboratoři přístup i do oblasti vědeckého výzkumu, souvisejícího například s očekávanou redefinicí jednotky hmotnosti. V tomto směru se předpokládá další rozvoj vybavení, například o sférický etalon objemu nebo o speciální artefakty pro studium chování povrchu etalonů hmotnosti v různých prostředích a určování hustoty vzduchu alternativní metodou. Pořízením tohoto vybavení udrží laboratoř primární metrologie hmotnosti ČMI krok s významnými evropskými metrologickými institucemi.

3 Vymezení oboru hmotnosti

Měření hmotnosti patří k velmi přesným a velmi rozšířeným měřením. Rozsah měření se v praxi pohybuje od 10^{-7} g až do 150 t. Měření hmotnosti těles se vykonává ve většině případů na základě posuzování jejich gravitačních účinků. Zařízení, které slouží k tomuto posuzování nazýváme vahami. Váhy respektive měření hmotnosti nalezneme ve vědě, výzkumu, výrobě, obchodu, službách (kde jde především o přepravu nákladů a dopravu zásilek), dále v oblasti ochrany životního prostředí a zemědělství.

Měření hmotnosti (vážení) je základem pro mnoho nepřímých metod měření, například pro chemické analýzy, vědecký výzkum v biologii, zdravotnictví. Značnou část aplikací tvoří průmyslová vážicí technika, která u nás v poměrně krátké době prodělala skutečně radikální změny. Moderní vážicí zařízení je dnes víc než pouhý přístroj, sloužící k vážení. Poskytuje další důležité funkce, jako jsou výpočty, ukládání výsledků do paměti, porovnávání výsledků vážení, třídění produktů a tisk. Tuto radikální modernizaci průmyslového vážení a vážení vůbec umožnil nástup nové generace snímačů zatížení a mikroelektroniky.

3.1 Oblast fundamentální metrologie hmotnosti

Fundamentální metrologie hmotnosti se zabývá definicí jednotky hmotnosti, realizací a porovnáváním jejích etalonů a metodami přenosu hodnoty jednotky na etalony nižších řádů a na pracovní měřidla. Zde je pro tento obor charakteristická mezinárodní vědecká spolupráce, v současné době uskutečňovaná národními metrologickými instituty a Mezinárodním úřadem pro váhy a míry (BIPM).

3.2 Legální metrologie

Měření hmotnosti respektive vážení má odjakživa význam v oblastech, kde si stát vyhrazuje právo na určitou regulaci danou zákonem. Je to třeba ochrana spotřebitele, obchodní vztahy, nebo ochrana zdraví a životního prostředí. Na tuto regulaci se pak lze dívat z pohledu Evropského společenství, kdy hovoříme o harmonizaci určitých oblastí, která je dána směrnici nebo z pohledu národního, kdy jsou zase určité oblasti regulované v různých členských státech odlišně.

V případě harmonizace na bázi směrnic EU lze jako příklady uvést posuzování shody vah s neautomatickou a automatickou činností, kontrolu hotově baleného zboží nebo posuzování shody vah jako zdravotnických prostředků s měřicí funkcí.

Regulace na národní úrovni se zase týká následného ověřování vah s neautomatickou a automatickou činností podle národní legislativy. Určité oblasti, jako je kalibrace vah v průmyslu a nejrůznějších laboratořích, kalibrace závaží nebo vážení v oblasti silniční dopravy pro účely jejího monitorování a statistiky, zase v tomto smyslu regulovány nejsou.



HISTORIE JEDNOTKY HMOTNOSTI

Článek popisuje historii jednotky hmotnosti od období starověku a středověku, přes období Francouzské revoluce až do období zavedení soustavy jednotek SI. Uvádí vývoj definice jednotky hmotnosti, která je dnes prezentována v podobě platino-iridiového prototypu, v časovém období od roku 1793, přes období vzniku Metrické konvence do I. generální konference CGPM v roce 1899 a vyhlášení definice na třetím zasedání CGPM v roce 1903.

1 Úvod – současná definice jednotky hmotnosti

Hmotnost jako fyzikální veličina je poslední, jejíž jednotka není dosud realizována na základě fyzikálních konstant. Již od roku 1878 je dána hmotností určitého artefaktu, mezinárodního prototypu kilogramu. 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 SI, tedy:

„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 Sèvres u Paříže.

V současnosti probíhá intenzivní výzkum směřující k redefinici jednotky hmotnosti, která by byla definovaná právě na základě některé z fyzikálních konstant. V historii měla však jednotka hmotnosti mnoho podob.

2 Historické aspekty

Společně s délkou a časem byla hmotnost pravděpodobně jednou z prvních fyzikálních veličin, které se člověk pokusil změřit. Pro účely klasické mechaniky není termín „hmotnost“ starý ani 300 let; předtím byl užíván termín „váha“ a v podstatě je tak stále hovorově používán. Kromě jednoduchých měřicích nástrojů (obvykle vah) byly pro určování hmotnosti v obchodě a při směně zboží používány vhodné etalony hmotnosti, tvořené reprodukovatelnými ztělesněnými mírami, které nepodléhaly změnám.

Od starověku byly zavedeny nejrozmanitější „etalony hmotnosti“, každý pro určitý účel. Pravděpodobně nejstarší měřicí nástroje a závaží byly vyrobeny v Egyptě a na Středním Východě. Babylóňané měli kontrolovaný metrologický

systém s počátky v Sumeru nebo i ve starších kulturách. Kromě závaží, nesoucích označení panovníka potvrzujícího správnost, byly zavedeny i délkové míry vyřezané do kamene soch. Etalonové míry byly kněžskými uchovávané ve svatyních. V Babylonu, později v Egyptě, byly používány velké a malé hmotnostní jednotky. Velké závaží, královská mina, vážila přibližně 1010 g, což je téměř 1 kg. Menší bylo poloviční a vážilo asi 505 g a bylo závažím, na kterém byl založen obchod.

V Egyptě byly používány jako jednotky hmotnosti *kedet* a *deben* (10 kedetů = 1 deben). Deben odpovídal 90,96 g. Babylonská stříbrná mina byla ekvivalentem 60-ti kedetům.

Z důvodu těsných obchodních vztahů byl středomořský měřicí systém ovlivněn egyptskými a babylonskými váhami a mírami. Takto se stala orientální mina základem pro řecký systém závaží. 100 *drachem za minu* a 6 *obolů za drachmu*.

Za časů Césara měla Římská říše řetězec základů pro etalonové míry pro garantování jednotnosti měř a vah na svém území. Nejpřesnější etalon, Exagia, byl uchovávan v hlavním městě. Základní jednotky římského systému měření byly libra a unce. Obě byly používány jako jednotky tíhy a objemu. Jako duté míry byly libra a unce stanoveny jako neměnné. Hodnoty hmotnosti libry a unce byly určeny pomocí určité substance (obilí, olej nebo víno), kterou byla naplněna míra duté libry nebo unce. Později nebylo bráno v potaz, že Římané používali jako standardní náplň k stanovení jednotky hmotnosti olej a výsledkem bylo, že mnoho měst mělo jednotky, které se od standardu lišily.

3 Nový systém měř a vah

Nový systém měř a vah založený na délce zemského poledníku a decimální stupnici vstoupil ve Francii v platnost v roce 1793.

Od samého počátku zde existovala snaha o odvození jednotky hmotnosti od metru respektive odvodit jednotku pomocí dm^3 vody o teplotě 4°C , kdy při atmosférickém tlaku má největší hustotu. Na tomto základě byl vyroben prototyp kilogramu nazývaný archivní prototyp. Jak je známo, původní záměr fyzikálně vázat soustavu jednotek na jednotku délky – metr narazil na mnohé problémy. Tak už před zahájením mezinárodních jednání o přijetí metrické konvence se vědělo, že hmotnost původního, tohoto archivního prototypu kilogramu neodpovídá hmotnosti jednoho dm^3 vody maxi-

mální hustoty při atmosférickém tlaku, jak to stanovovala definice. Tato definice, podle které byl zhotoven etalon ve tvaru válce, byla přijata v roce 1795. V roce 1799 byl etalon kilogramu společně s etalonem metru uložen v archivu Francouzské republiky. Odtud jejich název „archivní metr“ a „archivní kilogram“. Vědělo se také, že zpřesnění prototypu kilogramu by mělo omezenou platnost až do dalšího zdokonalení měření a proto metrická konvence jako základ nové soustavy vzala prototyp kilogramu (i metru) tzv. mezinárodní prototypy, jejichž hodnoty se odvodily od prototypů archivních.

V roce 1869 požádala francouzská Akademie věd francouzskou vládu, aby svolala mezinárodní konferenci, která se bude zabývat studiem možností zhotovení etalonů pro jednotlivé země a vypracováním metod pro ověřování. Za tímto účelem byla ustavena mezinárodní komise. První etapou bylo studium archivních etalonů. Bylo zjištěno, že metr je „ve velmi uspokojivém stavu udržování“ a že kilogram je „v dokonalém stavu“.

Platina, jak se vyráběla v době založení metrické soustavy, obsahovala, z důvodu tehdejších možností zpracování iridium, takže archivní etalony se musely vytvářet ze slitiny platiny a iridia s příměsí paladia. Kov, který se zdál nejvhodnější ke zhotovení, byla slitina platiny a 10% iridia. Tato slitina se doporučovala pro svou stálost, stejnorodost, tvrdost, a dobrý lesk, kterého se dá docílit.

Při projednávání využití archivního kilogramu vyvstaly v té době určité problémy. Někteří delegáti tvrdili, že rozdíl mezi jeho skutečnou hodnotou a teoretickou definicí je až 300 mg. Nakonec však komise jednomyslně rozhodla, že se mezinárodní kilogram odvodí od archivního kilogramu v jeho současném stavu. Jako materiál opět vybrala platinu s iridiem a jako tvar válec o výšce rovné průměru se zaoblenými hranami, jako tomu bylo u archivního kilogramu.

Velký problém unifikace vah a měr byl tak v zásadě vyřešen, avšak uskutečnění si vyžádalo ještě mnoho dalších studií a poměrně dlouhou dobu.

Příprava slitiny a její odlití bylo nesnadným úkolem. Až do té doby se nezískávala skutečně čistá platina, alespoň ne ve velkém množství a pro iridium bylo teprve třeba vytvořit metody přípravy a čištění, protože to, co se tehdy považovalo za čisté iridium, obsahovalo jen 50% tohoto kovu.

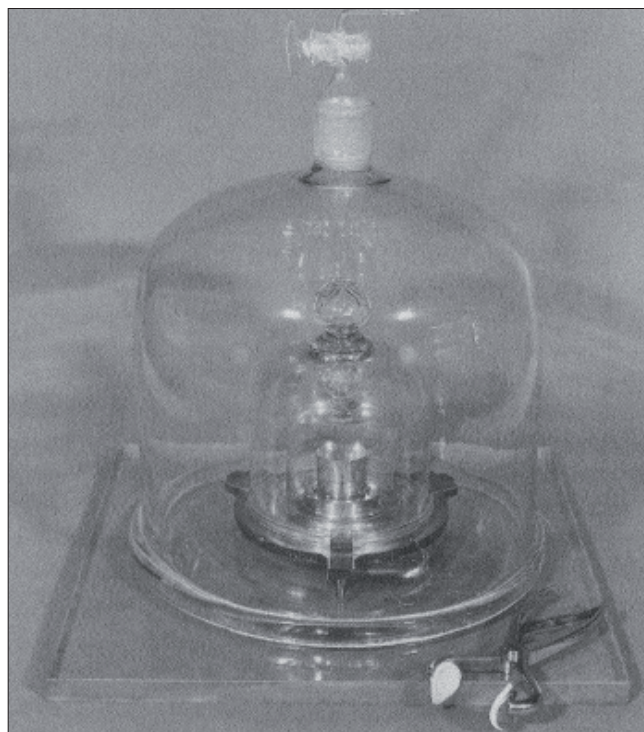
Platinu potřebnou pro první pokusy připravil Henri Sainte-Claire Deville. Avšak pro získání množství potřebného pro velkou tavbu (vyráběly se současně i prototypy metrů) bylo třeba se obrátit na firmu Johnson, Matthey a spol., která také poskytla onu jednu část iridia, které však muselo být čištěno v Paříži. Pokud jde o platinu, byla téměř čistá. Zkušenosti ukázaly, že pro získání látky dostatečně homogenní je třeba přetavit ji vícekrát. Provedlo se přes třicet taveb, než se dosáhlo definitivního roztavení 250 kg. Poslední tavba se uskutečnila 13. května 1874. Slitina byla označena názvem „slitina Vysoké školy průmyslové“ neboli „slitina z r. 1874“. Ingot posloužil k výrobě etalonů.

Do roku 1899 bylo vyrobeno celkem 43 prototypů. V roce 1883 byl mezinárodní prototyp vybrán ze tří, které měly označení KI až KIII. Ze 40 dalších, označených I až 40,

bylo šest vybráno jako pracovní etalony Mezinárodního úřadu pro váhy a míry (BIPM) a zbytek byl postoupen jako národní etalony signatářským zemím metrické konvence. Oficiálně byl mezinárodní prototyp prohlášen za základní jednotku hmotnosti na I. generální konferenci v roce 1899. Později od roku 1928 až 1974 bylo vyrobeno 23 dalších prototypů s označením 41 až 63 jako národní prototypy. Tak například Švýcarsko získalo prototyp č. 38, Německo v roce 1954 prototyp č. 52.

Je třeba říci, že nový metrický systém neměl okamžitý úspěch. Za Napoleona byly staré míry a váhy znovu používány a legalizovány a až za Louise Phillipa se ve Francii nakonec stal metrický systém povinným od 1. ledna 1840. Čtyři další země měly již metrický systém zaveden, Holandsko (1816), Belgie (1816), Lucembursko (1816) a Řecko (1836).

Mezinárodní prototyp kilogramu (IKP) je tzv. rovnostranný válec o výšce 39 mm a průměru 39 mm. Je vyroben ze slitiny sestávající z 90 % platiny a 10 % iridia (Pt-Ir), o hustotě přibližně 21.500 kg m^{-3} .



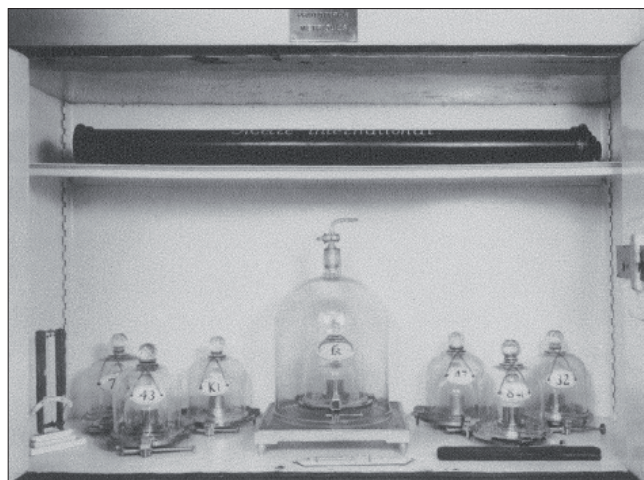
Obř. 1: Mezinárodní prototyp kilogramu uchovávaný pod třemi skleněnými kryty v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy (BIPM) v Sèvres u Paříže

4 Přehled důležitých dat v historii prototypu kilogramu

1793 Nový systém měr a vah založený na délce zemského poledníku a decimálním dělení vstoupilo v platnost ve Francii.

- 1795 „*Kilogramme des Archives*“ je vyroben z platiny a nadjustován Fortinem.
- 1799 „Archivní“ etalony (metru a kilogramu) jsou oficiálně zavedeny.
- 1840 Za Louise Phillipa se stal metrický systém ve Francii závazným.
- 1856-57 Sainte-Claire Deville a Debray vynalezli nový způsob tavby a zušlechťování platiny.
- 1867 Mezinárodní geodetická konference pro měření úhlů v Evropě navrhla založit Evropský úřad pro míry a váhy. Johnson, Matthey & Co. představili 450 kg platiny různých tvarů na Světové výstavě v Paříži
- 1869 Je založena „Commission Internationale du Metre“ (CIM): jsou nominováni francouzští členové a začínají pracovat jako „francouzská sekce CIM“.
- 1869-70 Je pořádáno několik setkání francouzské sekce CIM.
- 1870 Nefrancouzští členové jsou přizváni do CIM; v Paříži je pořádána první konference CIM; CIM navrhuje rozšířit oblast aktivit na všechny metrické míry.
- 1872 Plenární zasedání CIM s delegáty z 29 států. „Comité des Recherches Préparatoires“ (CRP) navrhuje, aby nebyl vyroben pouze jeden prototyp, ale i několik kopií pro členské státy a to ze stejného platinyového ingotu.
- CRP navrhuje založit „Bureau International des Poids et Mesures“ (BIPM) pod kontrolou „Comité Permanent“ (CP).
- 1873-74 Je pořádáno několik zasedání CP a francouzské sekce CIM.
- 1874 Výroba ingotu 250 kg z platiny-iridia v „Conservatoire National des Arts et Metiers“ (CNAM) v Paříži.
- 1875 Diplomatická konference připravuje „Metre Convention“, která je podepsána 17 státy. Jsou založeny „Conférence General des Poids et Mesures“ (CGPM), „Comité International des Poids et Mesures“ (CIPM) a „Bureau International des Poids et Mesures“ (BIPM).
- 1877 Prototyp metru vyrobený CNAM není CIPM akceptován.
- 1878 U firmy Johnson, Matthey & Co. London jsou objednány tři 1 kg válce z platiny-iridia.
- 1879 Firma Johnson, Matthey & Co. dodává tři válce (KI, KII, KIII).
- 1880 „Commission Mixte“, společně s M. Collot provádí několik postupných justáží a vážení těchto tří válců až je KIII prohlášen za vyvážený s hmotností „*Kilogramme des Archives*“.
- 1882 Kilogram KIII je uschován BIPM. Francouzská vláda pověřuje firmu Johnson, Matthey & Co. výrobou 30 prototypů metru a 40 prototypů kilogramu, které se později stávají národními prototypy.
- 1883 KIII je vybrán CIPM jako mezinárodní prototyp kilogramu a je od té doby označován gotickým písmenem K.
- 1884 firma Johnson, Matthey & Co. dodává 40 prototypů kilogramu, některé z nich musí být roztaveny a znovu vyrobeny.

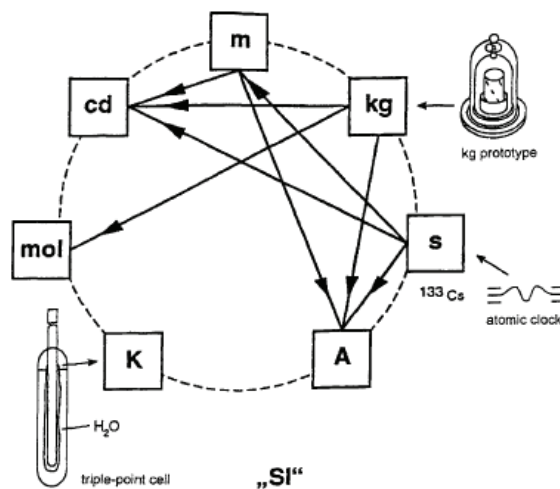
- 1888 Mezinárodní prototyp kilogramu je použit pro porovnání s národními prototypy.
- 1889 První zasedání CGPM v Paříži: schválení mezinárodního prototypu kilogramu.
- 1903 Třetí zasedání CGPM v Paříži: definice jednotky hmotnosti jako hmotnosti mezinárodního prototypu kilogramu.



Obr. 2: Prototyp kilogramu a šest referenčních etalonů – kopií (temoins)

5 Mezinárodní systém jednotek (SI)

V roce 1948 stále existovalo velké množství jednotek. Devátá Generální konference pro míry a váhy pověřila Mezinárodní výbor pro míry a váhy (CIPM) připravit přijetí praktického mezinárodního systému jednotek pro vědu, technologii a školství. V roce 1960 s přijetím Mezinárodního systému jednotek na 11. Generální konferenci byla práce CIPM úspěšně dokončena.



Obr. 3: Schéma Mezinárodního systému jednotek

Literatura

- [1] Kochsiek, M., Glaeser, M.: Comprehensive mass metrology (2000)
- [2] Jones, F. E., Schoonover, R. M.: Handbook of mass measurement (2002)

HISTORIE PRIMÁRNÍ ETALONÁŽE HMOTNOSTI V ČESKÉ REPUBLICE

Článek stručně popisuje historii a vývoj primární etalonáže hmotnosti od roku 1928, tedy od doby získání prvního národního platino-iridiového prototypu kilogramu č. 41, přes období od roku 1968 do konce roku 1992, tedy do období vzniku dvou samostatných států, České a Slovenské republiky. Dále článek popisuje následné období rekonstrukce a vznik nové etalonáže hmotnosti České republiky s mezními daty 1993 (období těsně po vzniku České republiky), 1995 (období dokončení budování nové primární laboratoře hmotnosti) a 2000 (rok vyhlášení státního etalonu hmotnosti České republiky).

1 Česká republika 1928 - 1999

Československá republika získala v roce 1928 prototyp č. 41 a později, v roce 1981 prototyp č. 65. Do roku 1968 byl národní prototyp uchovávan v Praze a po tomto roce převezen na Slovensko do Bratislavy, na pracoviště hmotnosti ČSMÚ (Československý metrologický ústav), kde byly pro Československou republiku zajišťovány úkoly primární etalonáže až do konce roku 1992. Podle tzv. územního principu zůstaly po vzniku dvou samostatných států etalony hmotnosti ve Slovenské republice a v ČR nebyl žádný.

Národní prototypy se kalibrují v BIPM v periodě cca 10 až 15 let. Při těchto kalibracích nejsou však většinou porovnávány přímo s mezinárodním prototypem, ale s pracovními etalony BIPM. Samotný mezinárodní prototyp byl pro takováto porovnání použit pouze v letech 1899, 1939, 1946 a poslední porovnání s ním bylo provedeno v roce 1988.

PtIr etalony mají podobu rovnostranného válce (výška = průměr = 39 mm), jsou vyrobeny ze slitiny 90% Pt a 10% Ir. Etalon č. 65 byl již opracovaný novou technologií, tzn. s vyloučením leštění diamantovými pastami, což představuje použití volného brusiva. Nedochozí tak ke změně hmotnosti z důvodu uvolňování brusiva zabodnutého do povrchu při procesu leštění. Je opracován pouze soustružením diamantovým nožem, přičemž dosahovaná drsnost povrchu je $Ra = 0,01 \mu\text{m}$.

2 Česká republika po roce 1993

Po rozdělení ČSFR na dva samostatné státy musel Český metrologický institut vybudovat a vybavit na území České republiky zcela nové pracoviště primární etalonáže hmotnosti, které by zajišťovalo náročné úkoly spojené s uchováváním národních a referenčních etalonů, které do té doby zajišťovalo pracoviště v Bratislavě. Laboratoř primární hmotnosti byla vybudována a vybavena etalonovým zařízením na konci roku 1994 jako výsledek projektu budování primární etalonáže. V té době Česká republika nevladnala žádný PtIr prototyp kilogramu, jelikož výše zmiňované (č. 41 a 65) zůstaly ve vlastnictví Slovenské republiky. V roce 1995 byla metrologická návaznost etalonů pro ČR prozatímně vyřešena na Švýcarský metrologický institut OFMET (dnešní METAS), který zajistil kalibraci hmotnosti dvou referenčních etalonů 1 kg z austenitické oceli a zajistil i určení jejich objemu a hustoty na úrovni

akceptovatelné i BIPM při jejich pozdějším navázání. Přímá návaznost na Mezinárodní úřad pro váhy a míry BIPM nebyla v té době možná z kapacitních důvodů samotného BIPM. O dva roky později bylo však toto navázání uskutečněno a zmiňované referenční etalony v té době tak plnily funkci národních (státních) etalonů hmotnosti.

Platino – iridiového prototypu kilogramu se Česká republika dočkala na počátku roku 1999, kdy byl na konci dubna dovezen z Mezinárodního úřadu pro váhy a míry prototyp kilogramu označený číslem 67 a oficiálně prohlášen za majetek České republiky. Tento etalon byl vyroben již zmiňovanou novou technologií a má následující metrologické parametry:

Hustota při 0 °C:	21 535,40 kg m⁻³
Objem při 0 °C:	46,4352 cm³
Standardní nejistota:	$u_c = 0,0003 \text{ cm}^3$
koeficient objemové expanze mezi 0 °C a t_{90} °C:	$\alpha = (25,869 + 0,00565 t_{90}) 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Hmotnost tohoto prototypu po dvou operacích čištění byla následující:

17. prosince 1997: **1 kg + 0,164 mg**

se standardní nejistotou u_c ($k=1$) 0,004 mg. Měření bylo provedeno s pracovními etalony BIPM č. 9 a 31, které byly rekalibrovány před touto operací za pomoci prototypu č. 25, který slouží v BIPM pro speciální účely.



Obr. 1: Pt-Ir prototyp č. 67

Následující historie

Od 17. prosince 1997 nebyl prototyp č. 67 čištěn. Byl znovu kontrolován po devíti týdnech a byl přitom zaznamenán nárůst hmotnosti o 0,002 mg.

Před vlastním transferem do České republiky byla opět provedena kalibrace a to v období 20. až 22. února 1999. Při této kalibraci byla zjištěna hmotnost: **1 kg + 0.165 mg**

I když z uvedených skutečností vyplývá, že se nejedná o zcela nově vyrobený prototyp, z hlediska metrologického je to výhodnější, neboť je známa historie a parametry dlouhodobé stálosti tohoto etalonu, jež jsou v tomto případě určující pro samotné oficiální vyhlášení statním etalonem hmotnosti České republiky.

3 Rok 2000

V roce 2000 byl tento prototyp kilogramu vyhlášen státním etalonem hmotnosti ČR a stal se výchozím bodem schématu návaznosti měřidel hmotnosti České republiky, jež zajišťuje jednotnost a správnost měření hmotnosti v primární oblasti, oblasti sekundární a v oblasti pracovních měřidel.

3.1 Základní charakteristiky prototypu kilogramu

Etalon je státním etalonem hmotnosti České Republiky.

Definice:

Etalon je definován jako hmotnost prototypu 1 kg ze slitiny platiny a iridia, jehož hodnota hmotnosti je určena porovnáním s mezinárodním prototypem kilogramu, který je uložen v BIPM – Mezinárodním úřadu pro váhy a míry.

Účel:

Účelem etalonu je přenos jednotky hmotnosti pomocí přenosového zařízení – komparačních vah AT 1006 na pracovní etalony 1 kg z austenitické oceli.

Forma:

Rovnostranný válec 1 kilogram ze slitiny platiny a iridia s následujícími technickými a metrologickými charakteristikami:

3.2 Technická specifikace etalonu:

Číslo etalonu	67
Hmotnost	1 kg + 0.165 mg
Nejistota u_c	$\pm 0,004$ mg (pro $k = 1$)
Složení slitiny	10% Iridium $\pm 0,25\%$ 90% Platinium $\pm 0,25\%$
Příměsi:	Rhodium + Palladium + Ruthenium $< 0,20\%$ Iron $< 0,05\%$

další prvky $< 0,02\%$
rovnostranný válec s oblými hranami
($v = \emptyset = 39$ mm)
Ra = 0,01 μm

Drsnost povrchu

3.2.1 Zařízení pro uchovávání, manipulaci a transport

Zařízení pro uchovávání:

Speciální dvojité skleněný kryt a podložka se třemi středními šrouby pro uchycení vrchního krytu.

Zařízení pro manipulaci:

Speciální kleště se stykovými plochami krytými materiálem zabraňujícím poškození povrchu prototypu při uchopení.

Zařízení pro transport:

Speciální tubus umožňující uchycení prototypu v pěti bodech a zabraňující tak případnému pohybu prototypu při přepravě. Dotykové části jsou kryty speciálním materiálem.

Další charakteristiky:

objem při 0°C:	$46,4352 \text{ cm}^3 \pm 0,0003 \text{ cm}^3$
hustota při 0°C:	$21535,40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
teplotní součinitel objemové roztažnosti mezi 0°C a t_{90} °C:	$\alpha = (25,869 + 0,00565t) 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

4 Rok 2010

V tomto roce byla provedena druhá kalibrace státního etalonu hmotnosti v BIPM a jeho hodnota hmotnosti byla určena takto:

1 kg + 0,188 mg

Nejistota u_c $\pm 0,006$ mg (pro $k = 1$)

Porovnáním s předešlou hodnotou zjišťujeme, že se jeho hmotnost poněkud zvýšila a to v řádu setin miligramu. Rovněž nejistota je vyšší o dvě tisíce miligramu. Zvýšená nejistota je způsobena použitím odlišné metody BIPM. Vyšší hmotnost lze zdůvodnit postupným kontaminováním povrchu s časem – etalon nebyl při kalibracích ani mezi nimi čištěn.

Literatura

- [1] Kříž, I.: Zpráva o státním etalonu hmotnosti (2000)
- [2] Horák, Z., Krupka, F.: Fyzika
- [3] Spurný, R.: Etalonáž hmotnosti v ČSMÚ Bratislava, Metrologie č. 3/1992 str. 93 až 105



NOVÁ DEFINICE HMOTNOSTI

1 Nová definice hmotnosti

Jednotka hmotnosti, kilogram, je stále realizovaná platinou-iridiovým prototypem, který je uložen v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy (BIPM) v Sévres ve Francii. Na něj jsou navázány oficiální kopie, které pak slouží ke kalibraci státních etalonů, jako například i českého v roce 2009. Tento hlavní prototyp je jediné závaží, u kterého je známa hmotnost absolutně přesně, již z definice to je přesně 1 kg.

Ovšem po třetí verifikaci, která probíhala v letech 1988 – 1992, se ukázalo, že prototyp pravděpodobně ztratil přibližně 50 μg na hmotnosti. Při porovnání se ukázalo, že hmotnosti oficiálních kopií vzrostly právě o uvedenou hodnotu, takže vzniká přirozená otázka, zda se změnila hmotnost prototypu nebo hmotnost všech ostatních závaží. Mnohem pravděpodobnější je možnost, že se změnila hmotnost jen jednoho závaží, což přináší velmi závažný důsledek. Vzhledem k tomu,

že neexistuje druhý nezávislý prototyp, není možné s absolutní přesností určit tuto změnu.

Z výše uvedeného zcela jednoznačně vyplynula nutnost zavedení nové definice jednotky hmotnosti, která by nebyla závislá na jednom prototypu a která by ideálně závisela na přírodní konstantě. Takový je současný směr v definicích základních jednotek SI, jako například jednotka délky, která je definována pomocí rychlosti světla ve vakuu, nebo jednotka času s definicí na základě přechodu mezi dvěma hladinami v atomu cesia.

V rámci soustavy jednotek SI jsou další, u kterých pravděpodobně dojde ke změnám, nicméně velmi diskutovaná je právě změna definice hmotnosti. V současnosti jsou již velmi rozvinuté dva projekty, a to projekt Avogadro a projekt výkonových vah (v anglické literatuře označované jako Watt balance), které budou v tomto článku představeny. Oba projekty jsou založeny na přírodních konstantách. Jak již název projektu Avogadro napovídá, zde je zvolenou konstantou Avogadrova konstanta, u projektu výkonových vah je touto konstantou Planckova.

2 Projekt Avogadro

Projekt Avogadro spočívá ve svázání hmotnosti s Avogadrovou konstantou pomocí křemíkové koule. Materiál byl zvolen z důvodu velmi dobře zvládnuté technologie výroby a je možné získat téměř dokonalé krystaly. U takových krystalů jsou stále určité parametry, jako například mřížkový parametr nebo objem jedné buňky.

V rámci tohoto projektu byly vyrobeny dvě velmi přesné koule vyrobené z velmi čistého křemíku ^{28}Si . Maximální odchylka od dokonalé koule je přibližně 50 nm při průměru 93,6 mm, takže se pravděpodobně jedná o nejdokonalejší člověkem vyrobené koule na světě. Vzhledem k náročnosti celého procesu je do projektu zapojeno mnoho institucí, kde například čistý monokrystal křemíku byl vytvořen v Rusku, koule byly vyleštěny v Austrálii a některá měření probíhají v Německu, Koreji a jiných zemích.



Obr. 1: Křemíkové koule používané v projektu Avogadro

Předpokládáme nyní, že máme makroskopický objekt o hmotnosti 1 kg vyrobený z velmi čistého krystalu křemíku. Potom hustota takového objektu bude homogenní. Poté

můžeme snadno spočítat hmotnost jednoho atomu křemíku pomocí vztahu

$$m_{\text{Si}} = \frac{a^3}{n} \rho_{\text{Si}},$$

kde a je délka jedné hrany základní buňky krystalu a n počet atomů v jedné buňce. V případě křemíku je $n = 8$. Délku a lze změřit pomocí rentgenového interferometru, který je přímo navázán na definici metru. Hustotu křemíku zjistíme měřením hmotnosti a objemu makroskopického objektu. Hmotnost je přímo navázána na mezinárodní prototyp kilogramu, zatímco objem můžeme navázat na definici metru, pokud budeme přímo měřit rozměry objektu. V případě koule musíme tedy změřit velmi přesně průměr.

Pokud zavedeme tyto makroskopické parametry do výše uvedeného vztahu, získáme

$$M = \frac{m_{\text{Si}} V n}{a^3},$$

kde velkými písmeny jsou označeny hmotnost a objem celého objektu.

Stále potřebujeme znát hmotnost jednoho atomu. Na tom by mohla být založena nová definice, ale můžeme postoupit ještě dále, až k Avogadrově konstantě. Ta je definována jako počet atomů uhlíku ve 12 g, ve formě matematického zápisu

$$N_a = \frac{0,012}{m(^{12}_6\text{C})}.$$

Hmotnost atomu křemíku můžeme vztáhnout ke hmotnosti atomu uhlíku pomocí relativní hmotnosti, které jsou již známy s dostatečnou přesností, pomocí vztahu

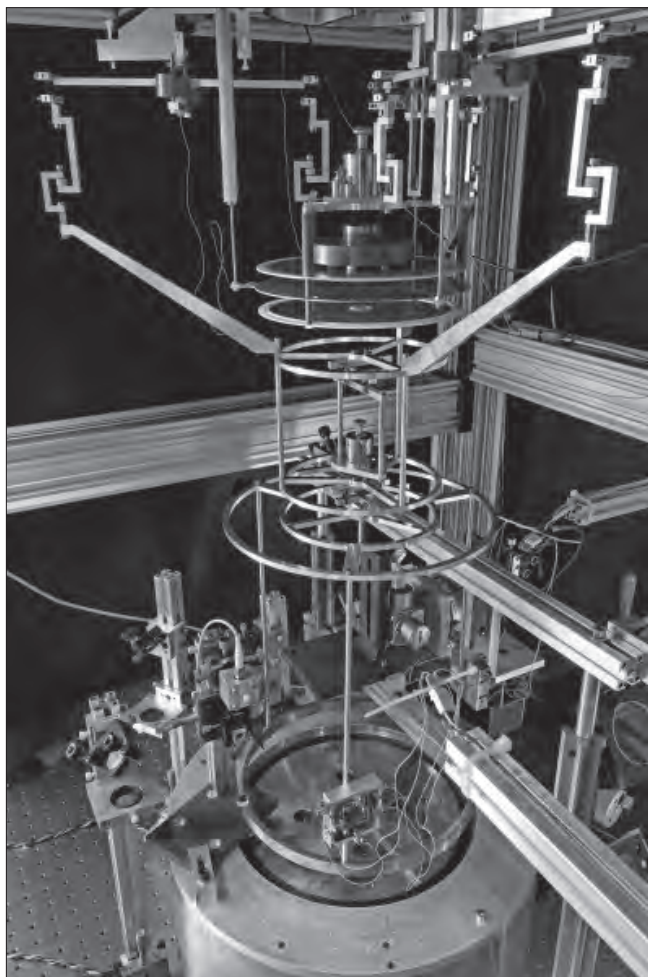
$$A_r(\text{Si}) = 12 \frac{m_{\text{Si}}}{m_c}.$$

Nyní můžeme určit hmotnost křemíkového objektu, pokud známe jeho relativní atomovou hmotnost. V současnosti probíhají experimenty s cílem určit přesně Avogadrovu konstantu. Ta je nyní na první pohled překvapivě objektem měření, i když po ní požadujeme, aby byla hlavní definicí.

3 Výkonové váhy

Druhý projekt, výkonové váhy, využívá jinou konstantu, a to Planckovu. Je možné, že i zde bude použita křemíková koule, a to z důvodu dalšího navazování na pracovní měřidla.

V současnosti probíhá několik experimentů s výkonovými vahami v rámci několika institutů. Prozatím pouze ve dvou z nich, v NPL (Velká Británie) a NIST (USA) se podařilo dosáhnout použitelných výsledků. Projekt v NPL byl již ukončen a zařízení se přestěhovalo do Kanady. Ostatní projekty jsou prozatím ve fázi vývoje, i když se očekává brzká publikace výsledků. Projektováním této speciální váhy se zabývají v Evropě například instituce METAS (Švýcarsko) nebo BIPM. V ČMI prozatím proběhly prvotní úvahy, na jejichž základě lze říct, že projekt tohoto typu a významu by byl hypoteticky možný, ale časově a především finančně velmi náročný, a proto se prozatím od úvah upustilo.



Obr. 2: Výkonové váhy vyvíjené v BIPM

Základním principem těchto speciálních vah je porovnání mechanického a elektrického výkonu. Právě odtud vychází pojmenování těchto vah, i když se výkon v jednotlivých částech experimentu neměří.

Dosavadní přístroje jsou konstruovány tak, že se provádí měření ve dvou režimech, statickém a dynamickém. Ve statickém režimu se porovnává působení tíhové síly závaží a elektromagnetické síly cívky, kterou prochází proud. Vztah, který popisuje takové měření, má tvar

$$mg = ILB,$$

kde I je procházející proud, L délka vodiče v cívce a B magnetická indukce. Tímto postupem závaží fakticky vážíme, a proto se někdy nazývá jako vážící experiment.

Dynamická část umožní vyrušit parametry L a B . Uvažujme, že nyní závaží nebudeme používat a budeme cívku pohybovat konstantní rychlostí. V takovém případě se v cívce bude indukovat napětí popsané vztahem

$$U = BLv,$$

kde v je rychlost pohybu cívky. Kombinací obou vztahů můžeme vyrušit délku cívky a indukci, čímž získáme výsledný vztah

$$UI = mgv.$$

Odtud je tedy zřejmé, proč se používá veličiny výkonu pro označení experimentu, i když z principu činnosti se nikdy výkon přímo neměří. Měří se přímo pouze napětí v pohybové části experimentu a proud ve statické části.

Elektrické veličiny můžeme velmi přesně určit pomocí Josephsonova a kvantového Hallova jevu. Josephsonův jev umožňuje určit velmi přesně napětí, a to pomocí měření frekvence, která patří mezi nejpřesnější měřitelné veličiny vůbec. Vztah popisující takové měření je

$$U = u'f_J \frac{h}{2e},$$

kde h je Planckova konstanta, e elementární náboj a u' bezrozměrná veličina.

Kvantový Hallův jev nám umožňuje velmi přesně určit odpor pomocí vztahu

$$R = r' \frac{h}{e^2}.$$

Odpor se v základním vztahu přímo nevyskytuje, ale je skryt v proudu, který takto nahradíme měřením odporu a napětí. Celkově tedy měříme jeden odpor pomocí kvantového Hallova jevu a dvě napětí pomocí Josephsonova jevu. Po zavedení předchozích vztahů do rovnice výkonové váhy a úpravách dostaneme vztah pro výpočet hmotnosti

$$m = \frac{u'_1 u'_2 f_{J1} f_{J2}}{r'} \frac{1}{gv} \frac{h}{4}.$$

Ve vztahu tedy máme Planckovu konstantu, veličiny pocházející z elektrických měření, tíhové zrychlení a rychlost cívky. Všechny tyto veličiny je nutné určit s alespoň takovou nejistotou, s jakou potřebujeme znát hmotnost. Pokud má být výkonová váha použita jako základ nové definice hmotnosti, celková relativní nejistota musí být řádu 10^{-8} . Odtud například plyne faktická nezbytnost absolutního měření tíhového zrychlení.

V experimentu je nutné vyřešit i další problémy vyplývající z použití obou kvantových elektrických jevů. Zatímco Josephsonův jev potřebuje co nejslabší magnetické pole, kvantový Hallův jev naopak potřebuje silné pole. Limity těchto polí jsou dány mimo jiné hmotností závaží používaného během statické části experimentu, protože pak je potřebné změřit menší proud. Zatímco tedy například v NIST používají jako základ 1kg závaží, v BIPM nebo v METAS používají 100g závaží. Volba jiné základní hmotnosti velmi výrazně ovlivňuje celkovou velikost zařízení, a tak například menší projekt v BIPM zabírá jen asi polovinu jedné laboratoře.

4 Srovnání projektů Avogadro a výkonové váhy

K potenciální nové definici hmotnosti vedou dva projekty založené na jiných principech. Oba by měly dávat stejné výsledky, a proto můžeme snadno zjistit, zda jsou vzájemně konzistentní. Ve zprávě skupiny CODATA lze nalézt, že v současnosti relativní nejistota součinu $N_A h$ je v řádu 10^{-9} , přičemž tento výsledek byl získán jinými způsoby než oba zde popisované experimenty. Relativní nejistota je tedy při-

blíže o řád menší než potřebná pro novou definici hmotnosti. Můžeme tak měřením pomocí výkonových vah určit Planckovu konstantu a následně i Avogadrovu konstantu a naopak, pomocí projektu Avogadro můžeme určit Planckovu konstantu, a to vše bez výrazného navýšení nejistoty.

V ideálním případě by byly všechny tři definice hmotnosti ve vzájemném souladu. Prozatím se ukazuje, že tomu tak není, výsledky získané z projektů Avogadro a výkonové váhy se liší. Pravděpodobně je problém u projektu Avogadro. Příčinou byla nejspíše technika leštění koule, po které se na povrchu vytvořila tenká vrstva, která pak ovlivnila měření některých parametrů. Po započtení těchto efektů jsou již oba experimenty v souladu, i když na definitivní potvrzení je potřeba si ještě počkat.

Již bylo naznačeno, že pro přijetí nové definice hmotnosti musí být dosaženo relativní nejistoty určení hmotnosti v řádu 10^{-8} . Takové nejistoty se podařilo dosáhnout zatím jen v NIST v projektu výkonové váhy. Ostatní projekty mají zatím nejistoty vyšší, ale hodnoty Planckovy konstanty jsou přibližně stejné a odpovídající hodnotě CODATA. Planckova konstanta získaná z projektu Avogadro byla nejdříve velmi odlišná od výkonové váhy a hodnoty uvedené v CODATA, přičemž ani vyšší nejistota nepokryla rozdíl mezi oběma hodnotami. Po započtení zmíněných korekcí je sice nejistota stále vyšší, ale hodnota Planckovy konstanty je již odpovídající hodnotě CODATA.

5 Nová definice hmotnosti

Jaká tedy bude nová definice hmotnosti a kdy bude zavedena? Tato otázka ještě nebyla k plné spokojenosti objasněna především kvůli nesouladu mezi oběma projekty, jejichž výsledky si musí odpovídat. Shoda sice již panuje, ale nejistoty ještě nedosahují potřebné meze. Experimenty totiž vyžadují takové nejistoty, které jdou až na hranu současných možností.

Všeobecně panuje názor, že nová definice bude založena na Planckově konstantě a že bude zavedena v horizontu 10 let. V tomto horizontu dojde navíc ke změně definic dalších tří základních jednotek SI, a to ampéru, kelvinu

a molu. U všech bude využito přírodních konstant, konkrétně u ampéru elementárního náboje, u kelvinu Boltzmannovy konstanty a u molu Avogadrovu konstanty. Právě využití Avogadrovu konstanty u definice molu je jedním z důvodů k preferenci Planckovy konstanty u kilogramu.

Definice jednotky hmotnosti na základě projektu výkonových vah bude mít výhodu v tom, že každý metrologický institut bude mít šanci sestavit si vlastní váhu a mít tak vlastní definici. Vzhledem k časové a finanční náročnosti nelze očekávat, že by takových institutů bylo mnoho, ale na rozdíl od současného stavu bude několik nezávislých realizací jednotky hmotnosti a bude možné mezi nimi porovnávat. Tím bude zamezeno tomu, že všechna závaží a všechny váhy budou vycházet z jednoho základu, u kterého navíc není jisté, že je neměnný, naopak je téměř jisté, že se mění.

6 Shrnutí

V tomto článku byly představeny dva zásadní projekty, které mohou vést k nové definici hmotnosti. Oba jsou založeny na univerzálních konstantách. Projekt Avogadro, který se zabývá určením parametrů křemikové koule, je založen na Avogadrově konstantě, zatímco projekt výkonových vah zabývající se porovnáním mechanických a elektromagnetických sil je založen na Planckově konstantě.

Oba projekty mají vést ke stejnému výsledku, ke hmotnosti, a proto je možné je vzájemně porovnávat. Ukázalo se, že si výsledky obou projektů neodpovídají ani v rámci nejistoty. Po zavedení korekce v Avogadrově projektu si již výsledky odpovídají, ale to stále nestačí k nové definici. Stále je ještě potřeba dosáhnout tak malých nejistot, aby alespoň odpovídaly současným běžně dosahovaným nejistotám závaží.

Byl učiněn odhad, že nová definice bude zavedena v nejbližších 10 letech a že bude založena na projektu výkonových vah. Důvod byl ten, že Avogadrova konstanta bude pravděpodobně použita v jiné definici, jak bylo též okomentováno.

Otázkou může být, zda se může Český metrologický institut zapojit do výzkumu v oblasti nové definice. Vzhledem k náročnosti projektu bylo od úvah dočasně upuštěno.



LABORATOŘ PRIMÁRNÍ METROLOGIE HMOTNOSTI

1 Úvod

Metrologie hmotnosti na úrovni státního etalonu vyžaduje vzhledem k požadovaným kalibračním a měřicím schopnostem mimořádné laboratorní podmínky a soustavný výzkum metod měření a vlastností používaných etalonů.

V tomto článku bude představena laboratoř hmotnosti ČMI včetně přístrojového vybavení a budou uvedeny úkoly vědeckotechnického rozvoje, jejichž řešení je zaměřeno na přesné určování objemu závaží, dále na výzkum chování závaží v různých podmínkách a na problematiku tenkých povrchových vrstev závaží.

Příspěvek vychází ze zkušeností a záměrů na rozvoj laboratoře. Výzkumné práce jsou plánovány a řešeny v kontextu s programy EMRP a s pracemi v ostatních národních metrologických institutech.

Laboratoř je v současnosti personálně, přístrojově i prostorově vybavena tak, jak to odpovídá potřebám hospodářství ČR a vybraným směrům výzkumu.

2 Uspořádání laboratoře

Prostorové uspořádání části laboratoře s komparátory je znázorněno na **obr. 1**. Pro každý komparátor je sestaven sa-



Obr. 1: Nová laboratoř primární metrologie hmotnosti

mostatný žulový stůl a zároveň samostatný základ, oddělený od zbytku budovy. Tím je zajištěna ochrana před vibracemi, které mohou velmi výrazně ovlivňovat měření. Laboratoř je prostorově rozdělena na část výzkumnou a na část kalibrační. Ve výzkumné části jsou umístěny komparátory, které se budou využívat především pro výzkumné práce a v omezené míře i ke kalibračním závaží, výhradně nejvyšších tříd E1 a doposud oficiálně nestanovené E0. V kalibrační části jsou komparátory využitelné především ke kalibraci závaží s cílem přenosu hodnot na nižší řády v řetězci metrologické návaznosti.

Klimatizace laboratoře je provedena v podlaze s odsáváním ve stropě. Proud vzduchu bude po doladění systému konstantní a bude udržovat laboratoř na teplotě 20 °C s maximální odchylkou 0,3 °C.

K laboratoři dále přísluší kancelářská místnost určená k příjmu a výdeji kalibrovaných měřidel a k ukládání dokumentů. K dispozici je dále technická místnost, kde se umísťují přístroje, které nemusí být v prostoru komparátorů nebo takové, které svým provozem zhoršují laboratorní podmínky vibracemi, vývinem tepla nebo elektromagnetickým rušením.

3 Přístrojové vybavení nové laboratoře

3.1 Manuální komparátory

Pro měření hmotnosti závaží o nominálních hmotnostech 1 mg – 5 g je využíván nejmenší komparátor v laboratoři hmotnosti, jehož rozlišení je 0,0001 mg. Typická opakovatelnost měření se závažím 5 g metodou ABA opakovanou desetkrát je 0,0004 mg. Vzhledem k rozsahu se jedná o komparátor, na kterém probíhá nejvíce měření. Zároveň se využívá i pro jiná měření, například pro určení magnetických parametrů závaží nebo pro měření silového působení pro účely nanometrologie.

Další komparátor má maximální kapacitu 100 g. V laboratoři hmotnosti se využívá ke kalibračním závaží o nominálních hmotnostech 10 g – 100 g. Rozlišení tohoto komparátoru je 0,001 mg a typická opakovatelnost 0,004 mg.

3.2 Automatické komparátory

Jedním z nejdůležitějších přístrojů v laboratoři hmotnosti je komparátor typu AT1006 Mettler Toledo. Jedná se již o automatický komparátor, a tak není nutná přítomnost operátora v průběhu měření. Jeho maximální kapacita je 1 kg a používá se pro kalibraci závaží o nominálních hmotnostech 200 g až 1 kg. Rozlišení komparátoru je 0,001 mg a typická opakovatelnost 0,003 mg. Komparátor má celkově 4 pozice, na které lze umístit závaží. Standardní kalibrace jednoho závaží trvá přibližně 1 hodinu.

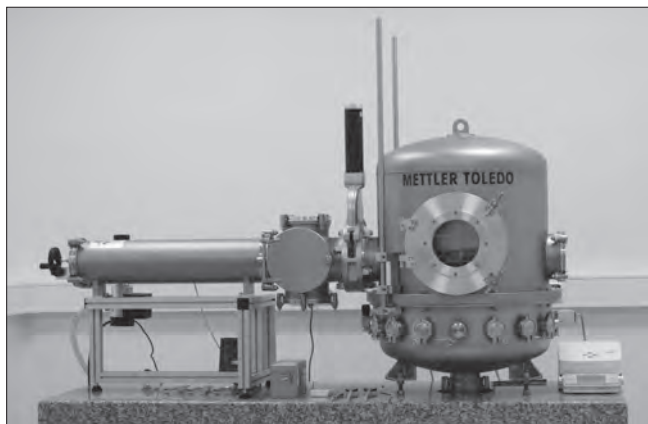
Kromě klasických kalibrací se používá pro přenos jednotky hmotnosti z platinoiridiového státního etalonu na dvě závaží z austenitické oceli a na dělení kilogramu na menší části pomocí systému porovnání různých kombinací závaží.

Ke kalibraci závaží nejvyšších hmotností je určen komparátor typu AT10005. Je také automatický se čtyřmi pozicemi pro závaží. Používá se především pro kalibrace závaží o nominálních hmotnostech 2 kg – 10 kg. Rozlišení stupnice je 0,01 mg s typickou opakovatelností 0,05 mg. Vzhledem k velikosti vnitřního prostoru je možné jeho použití i pro kalibrace závaží a objektů různých tvarů. S úspěchem tak byla například kalibrována speciální disková závaží a také freonová netěsnost, kdy šlo o měření změny hmotnosti. Právě o tomto projektu pojednává jiný článek v příloze.

Posledním z komparátorů je objemový komparátor typu VC1005. Jeho hlavní odlišností od ostatních je, že závaží nejsou měřena ve vzduchu, ale ve speciální fluorokarbonové kapalině FC-40. Nádoba s kapalinou má dvojitou stěnu a v plášti je destilovaná voda pro lepší stabilizaci teploty. Jedná se také o automatický komparátor se čtyřmi pozicemi. Rozlišení stupnice je 0,01 mg, typická opakovatelnost je 0,05 mg. Ačkoliv se komparátor označuje jako objemový, ve skutečnosti pracuje na stejném principu jako předchozí automatické komparátory. Používaná kapalina FC-40 má hustotu přibližně 1850 kg/m³ a koeficient závislosti na teplotě přibližně desetkrát vyšší než voda. Proto musí být teplota kapaliny stálá. To je hlavní důvod, proč je nádoba s kapalinou dvojitá. Prozatím se tento komparátor nevyužívá pro běžné kalibrace. Panuje totiž obava, zda se neztratí návaznost tím, že bude závaží vystaveno působení jiného prostředí než vzduchu. Proto bude jistě ještě probíhat výzkum v této oblasti

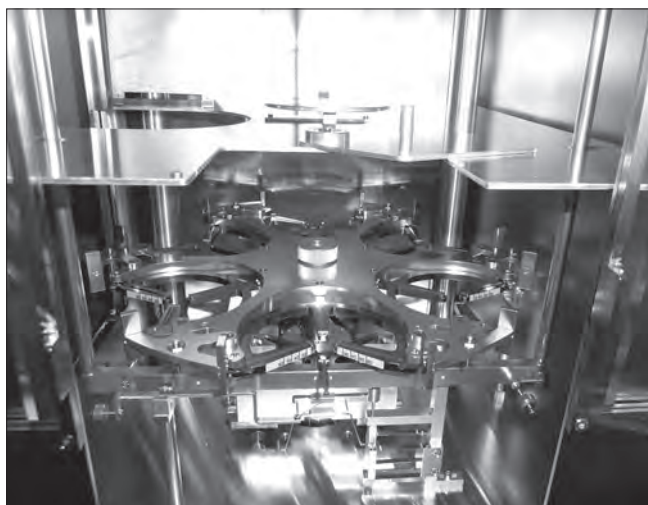
3.3 Vakuový komparátor

Nejnovějším komparátorem v laboratoři hmotnosti je vakuový komparátor, který se skládá ze dvou celků, a to z hlavní komory a systému přesunu závaží do hlavní vakuové komory přístroje (pro jednoduchost nadále jen „load-lock“). Tento mechanismus snižuje ovlivnění podmínek v hlavním prostoru komparátoru. Od komory je oddělen deskovým ventilem a tím je zajištěna možnost nakládání závaží bez porušení vakua uvnitř hlavní komory. Hlavní komora se úplně uzavře, vzorek se položí v podmínkách vnější atmosféry do zařízení „load lock“ a po jeho uzavření začne čerpání do vakua. Po dosažení určitého tlaku se otevře průchod do hlavní komory a závaží se umístí na požadovanou pozici komparátoru. Komparátor ukazuje obr. 2.



Obr. 2: Vakuový komparátor hmotnosti Mettler Toledo M-one

Hlavní komora má tvar válce o průměru 600 mm a výšce 877 mm s rozdělením ve výšce 282 mm od spodní podstavce. Rozdělení má charakter příruby, takže fakticky se jedná o přírubu DN600. Uvnitř vakuové komory se nachází samotný komparátor se šesti pozicemi pro závaží různých tvarů, především válců, koulí a klasických závaží až do nominální hmotnosti 1 kg. Závaží se dají pokládat přes čelní okénko anebo systémem „load-lock“.



Obr. 3: Pohled do prostoru hlavní komory vakuového komparátoru hmotnosti

Systém „load-lock“ je připojen přes přírubu o rozměru DN160, čerpací systém je připojen přes přírubu DN100. Nejdříve je zapojena turbomolekulární vývěva, za ní vývěva typu Scroll. Turbomolekulární vývěva je umístěna pod komparátorem na zemi, tedy zhruba 60 cm pod ním, a to kvůli zamezení přenosu vibrací. Vývěva Scroll je již poměrně daleko, a to za stěnou. Podobná konfigurace je použita i u systému „load lock“. Na spodním dílu hlavní komory je umístěno 15 přírub DN40, z nichž 2 jsou zabrány pro čidla tlaku pro turbomolekulární vývěvu. Na zadní straně je ještě jednotka pro pohyb karuselem se závažími.

Velikost dílku tohoto komparátoru je 100 ng, typická opakovatelnost je 300 ng (10×ABA, závaží o nominální hmotnosti 1 kg). Typická doba stabilizace je 40 s.

Vakuový komparátor bude sloužit především k měřením v prostředí vakua. Jak bylo zmíněno, celý systém je čerpán dvoustupňově, z atmosférického tlaku až na tlak přibližně 5 mbar vývěvou Scroll, při tomto tlaku se spustí turbomolekulární vývěva. Vzhledem k velikosti komory se minimálního tlaku, který činí přibližně 10^{-6} mbar, dosáhne až po zhruba třiceti minutách. Proto se při práci ve vakuu bude používat především „load-lock“, který je na potřebný tlak vyčerpán mnohem rychleji.

4 Výzkumné projekty laboratoře hmotnosti

4.1 Měření hmotnosti ve vakuu

Měření hmotnosti ve vakuu přináší několik problémů ve vztahu k závažím. Na povrchu každého závaží je tenká vrstva, složená z vodních par, oxidů a dalších látek. Pokud se taková vrstva umístí do vakua, s velmi vysokou pravděpodobností se poruší. Především dojde k uvolňování plynů z vrstvy, ale i z objemu závaží. Po opětovném napuštění vzduchu bude nutné vyčkat určitý čas, než se vrstva opět obnoví. Základní problém ovšem je, zda se vrstva obnoví tak, aby její složení bylo úplně stejné.

Dalším problémem je již to, že se v průběhu měření něco ze závaží uvolňuje, což ve skutečnosti znamená, že ve vakuu neměříme hmotnost původního závaží, ale hmotnost závaží mínus vodní páry a další uvolnění složky. Musíme tedy poznat složení vrstvy, jak se vrstva mění při čerpání do nízkých tlaků a do vakua a také proces obnovy vrstvy, všechno nejen kvantitativně, tedy o kolik se změní hmotnost závaží, ale především kvalitativně, abychom dokázali říci, že při určitých podmínkách naroste vrstva určitým způsobem.

Problém povrchových vrstev je závažný. Při čerpání do vakua se může jednat o chybu až 10 μg (tedy 100 dílků stupnice).

4.2 Optické metody analýzy tenkých vrstev

Jednou ze základních metod určování vlastností tenkých vrstev je elipsometrie. Ta spočívá v měření eliptických parametrů v šikmo dopadajícím světle. V kolmo dopadajícím světle by došlo k tomu, že azimut i fázový posuv světelného paprsku by byl stejný v dopadajícím i odraženém světle.

Během takových měření se nechá světlo dopadat na vzorek pod různými úhly. Pro každou vlnovou délku dopadajícího světla tak získáme několik údajů, ze kterých se dá již spočítat index lomu a index absorpce tenké vrstvy. Vzhledem k tomu, že se všechny parametry nedají zjistit úplně nezávisle, je nutné zavést některé předpoklady, například o tloušťce povrchové vrstvy. Tyto předpoklady pak můžeme zpřesňovat a poměrně dobře tak odhadnout i tloušťku povrchové vrstvy.

Získaná data je pak nutné proložit vhodnou funkcí, například klasickými modely pro index lomu a absorpce:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

$$k(\lambda) = ae^{-b\lambda}$$

Základní elipsometrickou metodou je nulová elipsometrie. Je založena na měření fázového rozdílu mezi p a s složkou dopadajícího světla. V případě nulové elipsometrie chceme dosáhnout toho, aby rozdíl byl nulový. Obecně můžeme měnit úhel polarizátoru a analyzátoru a po dosažení nulového rozdílu se elipsometrické parametry určí pomocí vztahů

$$\psi = A$$

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - P$$

kde A a P jsou úhly natočení analyzátoru a polarizátoru. Úhel komparátoru je v tomto případě $\frac{\pi}{4}$.

Takto získané informace pak můžeme využít pro odhad dějů ve vrstvě, a to jak za atmosférického tlaku, tak ve vakuu. Přibližně též můžeme sledovat, jak se mění tloušťka vrstvy v závislosti na tlaku a rychlosti čerpání, ale pouze za předpokladu, že zvolená metoda elipsometrie bude dostatečně rychlá na zaznamenání těchto změn.

Změna indexu lomu a absorpce pak může indikovat uvolňování určitých látek nebo porušování některých vazeb. Některé z těchto procesů jsou již do jisté míry známy pro jiné materiály a jiné tenké vrstvy, a proto se jich může do jisté míry využít pro ověření předpokladů.

Více o elipsometrii a jejím užití najde čtenář v řadě specializovaných publikací o optických metodách měření. Oborem se intenzivně zabývá například Katedra fyzikální elektroniky Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity [1]. Laboratoř počítá se spoluprací s tímto pracovištěm.

4.3 Termální desorpční spektroskopie

Zatímco optické metody umožnily poznat některé parametry vrstvy nedestruktivně, termální desorpční spektroskopie je již z principu metodou destruktivní, alespoň vzhledem k tenké vrstvě. Spočívá v zahřívání vzorku a čerpání uniklých atomů do hmotnostního spektrometru, který určí, o jaké produkty šlo. Tímto získáme přehled o tom, co všechno je obsahem tenké vrstvy. Vše ale musí probíhat ve vakuu, aby byly měřeny jen produkty z tenké vrstvy a ne například vzduch.

Touto metodou můžeme určit, zda při opakovaném čerpání do vakua má tenká vrstva na závaží stále stejné složení. V ideálním případě bude složení stejné, což se při této metodě projeví tím, že závislosti množství detekovaných částic na teplotě budou stejné.

Problémem této metody je, že je nutné závaží zahřívát. Tím se fakticky znehodnotí pro další běžné používání.

4.4 Depozice tenkých vrstev

Cílem celého výzkumu v této oblasti je nejen charakterizace povrchové vrstvy z hlediska složení a změn, ale také vyhodnocení možnosti přímého nanášení tenké vrstvy o vhodných parametrech tak, aby byl povrch vždy přesně definován. Probíhaly by na něm ve velké míře jen známé procesy, u kterých dokážeme říci, že při určitých podmínkách získáme dané výsledky.

Takovou metodou je například plazmochemická depozice tenkých vrstev z plynné fáze. Při této metodě se využí-

vá energie elektronů k usnadnění reakce plynu s povrchem vzorku. V komoře, kde probíhají reakce, se zažehne doutnavý výboj. Elektrony v něm získají teplotu okolo 2000 K, zatímco ionty mají jen teplotu okolí.

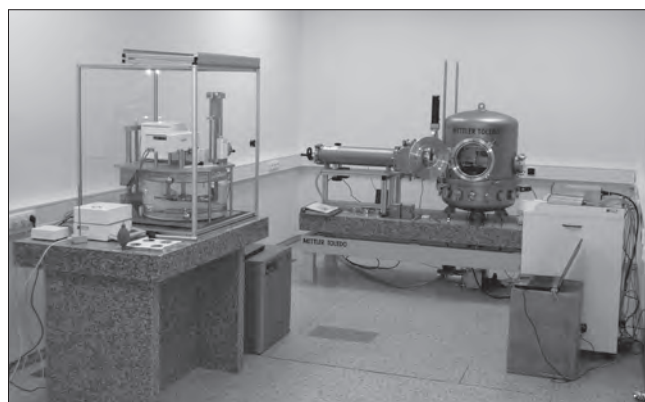
Nastavením vhodné směsi plynů a dalších parametrů, především pak doby depozice, lze dosáhnout téměř libovolné vrstvy. Taková vrstva pak může být odolná proti poškrábání, chemicky nereaktivní a především pak stálá jak za atmosférického tlaku, tak ve vakuu. Nicméně je nutné mít na paměti, že takový proces trvale mění závaží.

4.5 Přesné měření objemu

S využitím vakuového komparátoru lze mnohem přesněji určit objem a hustotu závaží. Podobně jako u objemového komparátoru byla nutná dvě měření ve vzduchu a v kapalině, i zde potřebujeme měřit ve vzduchu a poté ve vakuu. Ve vakuu se totiž zamezí nejvýraznějšímu vlivu ovlivňujícímu výsledek měření, a to vztlaku vzduchu. Ve vakuu pak změřený rozdíl hmotností odpovídá skutečnému rozdílu. Ve vzduchu tomu tak není, pokud bychom měřili platinoiridiový etalon s nerezovým závažím, komparátor ukáže rozdíl přibližně 100 mg, a to jen z důvodu vztlakových sil.

Úkolem v nejbližších letech bude porovnání metod určení objemu s využitím vakuového komparátoru a s využitím objemového komparátoru. Zároveň bude postupně zaváděno přesnější měření hustoty vzduchu s využitím speciálních artefaktů o různých objemech.

Kromě objemu klasických závaží se laboratoř zaměří také na objem křemíkových koulí, které budou nejspíše v příštích letech používány jako přenosové etalony k přenosu jednotky hmotnosti na jiné etalony. Objem zjištěný měřením na komparátoru pak můžeme porovnat s objemem vypočteným na základě změřeného průměru koule. Samo měření geometrických rozměrů koule je zajímavým problémem. Uvažuje se například možnost měření pomocí mikroskopu atomových sil (AFM), který by byl schopný měřit zakřivení povrchu. Odtud je pak již možné spočítat objem koule.



Obr. 4: Nová laboratoř primární metrologie hmotnosti

Literatura

- [1] Ohlidal, I. and Franta, D. Ellipsometry of Thin Film Systems, in Progress in Optics, vol. 41, ed. E. Wolf, Elsevier, Amsterdam, 2000, pp. 181–282

KONVENČNÍ A VAKUOVÁ HMOTNOST

1 Zavedení pojmu

V současné době je standardním výstupem měření hmotnosti pro zákazníka kalibrační list, na němž je uvedena hodnota hmotnosti měřeného závaží. Ovšem kromě výsledku je také uvedeno, že se jedná o konvenční hmotnost, nebo přesněji konvenční výsledek měření hmotnosti. To může vést ke zmatení, a proto v rámci tohoto článku vysvětlíme některé pojmy.

Vakuová hmotnost je, jak již název napovídá, hmotnost, kterou bychom určili vážením ve vakuu. Nicméně ji lze také označit jako skutečnou hmotnost, protože ve vakuu není potenciální měření ničím ovlivněno. Jakmile přecházíme do jiného prostředí, nutně dochází ke změnám, a to především z důvodu působení vztlakové síly.

Kvůli určité standardizaci se zavedl pojem konvenční hmotnosti. Ta je odlišná od hmotnosti vakuové, jak bude patrné z následující definice.

Konvenční hmotnost závaží je hmotnost referenčního závaží o definované hustotě 8000 kg/m^3 při přesně definovaných podmínkách prostředí (hustota vzduchu $1,2 \text{ kg/m}^3$ a teplota $20 \text{ }^\circ\text{C}$), kdy by komparátor ukázal stejné údaje pro obě závaží.

Stačí tedy, aby hustota závaží byla odlišná od definované a pak budou konvenční a vakuová hmotnost odlišné. Nicméně lze uvažovat i další druh hmotnosti, a to zdánlivou. Ta se od předchozích liší tím, že nemá definované žádné podmínky. Zjednodušeně řečeno se jedná o hmotnost zjištěnou z rozdílu tíhové a vztlakové síly a může se tedy rovnat hmotnosti konvenční i vakuové.

Z předchozího je tedy již na první pohled zřejmé, že jedním z důležitých parametrů při výpočtu hmotnosti bude hustota vzduchu. Ta se dá určit několika způsoby, ať už pomocí rovnic obsahujících jako vstupní veličiny například tlak vzduchu nebo při použití speciálních závaží. Dále též bude rozebráno měření hustoty závaží, což je další parametr potřebný pro správný výpočet hmotnosti.

2 Rovnice pro určení hmotnosti závaží

Měření hmotnosti porovnáním s referencí se dá označit za nepřímé měření. Je to patrné z rovnice

$$\Delta m = m_T - m_R,$$

kde Δm označuje rozdíl hmotnosti mezi referenčním závažím m_R a neznámým závažím m_T . Měření je to nepřímé z toho důvodu, že neznámou veličinu m_T neměříme přímo, ale zjistíme ji výpočtem, kde vstupem jsou zbývající dvě veličiny. Měření totiž získáme pouze rozdíl hmotností.

Ovšem předchozí vztah není použitelný pro určení hmotnosti, protože nezahrnuje další vlivy, jako například vztlakovou sílu. I bez započtení tohoto vlivu není předchozí vztah přesný, protože se neměří přímo hmotnost, ale působení gravitační síly.

Po započtení vlivu vztlakové síly se předchozí vztah upraví do podoby

$$\Delta m = (m_T - \rho_a V_T) - (m_R - \rho_a V_R),$$

kde ρ_a je hustota prostředí, ve kterém se měření provádí. Nemusí to být nutně vzduch, ale v něm se nejčastěji pracuje. V_T a V_R označují objemy neznámého a referenčního závaží. Tento vztah můžeme ještě upravit tak, aby se v něm nevykytoval objem závaží, ale hustota. Hustota je totiž jedním z parametrů, podle kterých se určuje příslušnost závaží do třídy přesnosti podle OIML R111.

Výsledný vztah, který bude používán v tomto článku i později, má pak tvar

$$m_T = \frac{\rho_T}{(\rho_T - \rho_a)} \Delta m + m_R \frac{(\rho_R - \rho_a)}{\rho_R},$$

kde ρ_T a ρ_R označují hustoty neznámého a referenčního závaží.

Na základě předchozího vztahu už můžeme určit vakuovou a konvenční hmotnost. Představme si měření ve vakuu, kde komparátor ukáže nulovou výchylku. Vzhledem k tomu, že pracujeme ve vakuu, je i hustota prostředí 0 kg/m^3 . Zůstane tedy pouze vztah

$$m_T = \frac{\rho_T}{(\rho_T - 0)} 0 + m_R \frac{(\rho_R - 0)}{\rho_R} = m_R,$$

takže závaží o stejné hmotnosti mají stejnou vakuovou hmotnost.

Nyní si představme měření, které probíhá ve vzduchu o hustotě $1,2 \text{ kg/m}^3$ a teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Opět uvažujme nulovou výchylku komparátoru, ale nyní také předpokládejme něco o referenčním závaží. Předpokládejme, že jeho hustota je 8000 kg/m^3 . Odvozením pak získáme

$$m_T = \frac{\rho_T}{(\rho_T - 1,2)} 0 + m_R \frac{(8000 - 1,2)}{8000} = 0,99985 m_R \frac{\rho_T}{(\rho_T - 1,2)} \Rightarrow$$

$$m_R = m_{CT} = \frac{m_T(\rho_T - 1,2)}{0,99985 \rho_T}.$$

Výpočet konvenční hmotnosti z vakuové již tedy potřebuje znalost dalšího parametru, a to hustoty závaží.

Jako příklad rozdílu mezi konvenční a vakuovou hmotností lze uvést platino-iridiový prototyp. Předpokládejme nyní pro jednoduchost, že jeho hustota je 22000 kg/m^3 a hmotnost 1 kg . Pak jeho konvenční hmotnost je

$$m_{CT} = \frac{1 \text{ kg} \cdot (22000 - 1,2)}{0,99985 \cdot 22000} = 1,00009547 \text{ kg} = 1 \text{ kg} + 95,4 \text{ mg}$$

Rozdíl je tedy téměř desetina gramu, což je bez problému měřitelné. Proto při měření s takovým prototypem musí být známa jeho hustota, aby mohla být zavedena správná velikost korekce. Na druhou stranu, pokud zvolené závaží má hustotu přesně 8000 kg/m^3 , je jeho hmotnost přesně rovna konvenční hmotnosti.

Požadavky na teplotu a hustotu vzduchu a na referenční hustotu závaží byly zvoleny tak, aby odpovídaly co nejlépe

reálným měřením a aby nebyly nutné další výrazné korekce. Vzhledem k tomu, že v současnosti je nejčastějším materiálem na výrobu závaží nerezová ocel, byla zvolena právě její hustota, která přibližně odpovídá právě hodnotě 8000 kg/m^3 . Referenční hustota vzduchu odpovídá přibližně hustotě vzduchu při hladině moře a referenční teplota byla přijata jako vhodný kompromis. Dá se ukázat a je to popsáno například i v dokumentu OIML D28, že, pokud se hustota vzduchu neliší o více než 10 %, nejsou potřebné další korekce. Pokud se již o více než 10 % liší, není doporučeno konvenční hmotnost používat a je lepší přejít na vakuovou hmotnost a počítat tak se všemi parametry.

Tímto se dostáváme k poslednímu pojmu, a to zdánlivé hmotnosti. Je potřebné zdůraznit, že to není běžně používaný pojem, i když je výhodné jej použít při odvozování některých dalších vztahů.

Zdánlivá hmotnost je taková hmotnost, kterou fakticky získáme z měření ještě před odečtením vlivu vztlakové síly, takže ji můžeme zavést následujícím způsobem:

$$m_{z_T} = m_T - V_T \rho_a = m_T \frac{\rho_T - \rho_a}{\rho_T}$$

Právě tento vztah se fakticky objevuje ve všech měřeních, ale na základě různých zjednodušení nebo předpokladů lze použít například konvenční hmotnost, kde právě jedním z těchto předpokladů je hustota vzduchu. Dá se říci, že na začátku uvedený velmi jednoduchý vztah popisuje celé měření, pokud budeme místo hmotností uvažovat zdánlivé hmotnosti.

Ze všech předchozích vztahů vyplývá, že měření hmotnosti není tak snadnou záležitostí, jak se může jevit. Kromě hmotnosti referenčního závaží potřebujeme znát některé vlastnosti prostředí a především další parametry neznámého závaží. Může být tedy zajímavé uvažovat případ, kdy hustotu neznámého závaží také neznáme.

3 Hustota závaží

Nyní se podívejme ještě jinak na vztah popisující výpočet hmotnosti neznámého závaží. Předpokládejme, že u referenčního závaží známe jak jeho hmotnost, tak i hustotu, a proto je kompletně určené. Předpokládejme také, že známe hustotu prostředí. Zbývají tedy dva neznámé parametry, které se oba vztahují na neznámé závaží. Z matematického pohledu je tato úloha neřešitelná, a proto je potřeba ještě další rovnice tak, aby vznikla soustava, která už řešitelná bude. Z fyzikálního hlediska tedy musíme přidat další měření, ale tak, aby alespoň některé známé veličiny byly odlišné od předchozích. Jednou z možností je měření v prostředí o jiné hustotě, ať už nižší nebo vyšší.

Uvažujme nejdříve hustotu nižší. Přirozeně se nabízí měření ve vakuu, tedy v prostředí o nulové hmotnosti. Zde je situace velmi jednoduchá, protože jedním měřením získáme skutečnou hmotnost a druhým pak hustotu.

$$m_T = \frac{\rho_T}{(\rho_T - 0)} \Delta m + m_R \frac{(\rho_R - 0)}{\rho_R} = m_R + \Delta m$$

$$m_T = m_R + \Delta m = \frac{\rho_T}{(\rho_T - \rho_a)} \Delta m_2 + m_R \frac{(\rho_R - \rho_a)}{\rho_R} \Rightarrow$$

$$\rho_T = \frac{\rho_a(m_R + \Delta m)}{\Delta m - \Delta m_2 + m_R \frac{\rho_a}{\rho_R}}$$

Taková měření v současné době nejsou v rámci Českého metrologického institutu prováděna, nicméně v blízké době po ověření všech parametrů bude pro podobné účely používán nový vakuový komparátor hmotnosti.

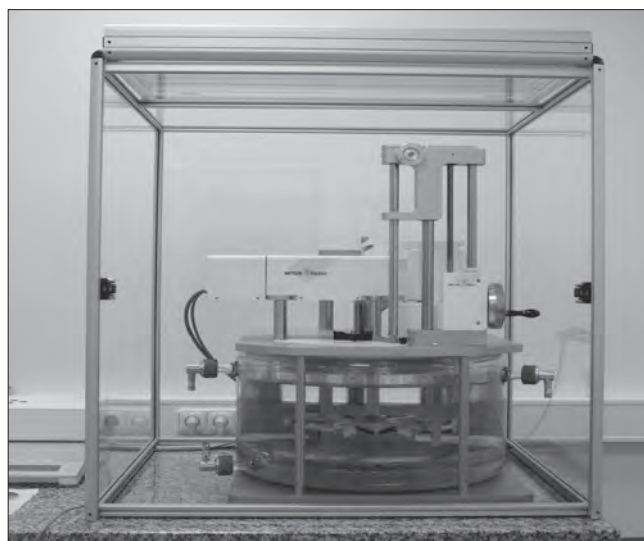
Náročnější případ je v momentě, kdy druhé měření je v prostředí o vyšší hustotě, což je současný stav v laboratoři primární metrologie hmotnosti, kdy se využívá objemového komparátoru hmotnosti. Nyní se jedná již o klasickou soustavu dvou rovnic o dvou neznámých, která je řešitelná. Vzhledem k tomu, že při takových měřeních pracujeme s konvenční hmotností závaží, přejdu i zde na tyto veličiny.

Řešení soustavy rovnic pro hustotu ρ_T dá výsledek

$$\rho_T = \frac{\rho_2 \Delta m_1 - \rho_1 \Delta m_2 + m_{c_R} \rho_R \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_R - \rho_0}}{\Delta m_1 - \Delta m_2 + m_{c_R} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_R - \rho_0}}$$

Na rozdíl od předchozích vztahů byla mírně přeznačena hustota prostředí. Nyní tedy ρ_1 označuje hustotu prostředí použitého v prvním měření, ρ_1 pak hustotu druhého prostředí. Můžeme si všimnout, že nezáleží na tom, jestli je první měření provedeno na vzduchu nebo jinde. Dokonce je tento vztah natolik obecný, že lze z něj odvodit vztah pro výpočet hustoty při měření ve vakuu, stačí jen dosadit za hustotu prostředí ρ_1 nebo ρ_2 0 kg/m^3 .

Při měření v současné době využíváme, jak bylo již naznačeno, prostředí o hustotě vyšší než vzduch. Takovým prostředím může být obecně jiný plyn nebo kapalina. Nabízí se jednoduše voda, v nejlepším případě alespoň destilovaná. Nicméně její některé vlastnosti nejsou pro měření příliš vhodné. Mezi ty patří například to, že se v ní nesnadno rozpouští vzduchové bubliny, což by mohlo ovlivnit výsledek měření. Na druhou stranu její hustota závisí jen velmi málo na teplotě.



Obr. 1: Objemový komparátor Mettler Toledo VC1005

V objemovém komparátoru, který se vyskytuje v laboratoři hmotnosti, se voda využívá jen ve vnější nádobě kvůli tepotní stabilizaci. Jako hlavní médium je použita fluorokarbonová kapalina s označením FC-40. Výhoda této kapaliny je v tom, že se v ní lépe rozpouští bublinky vzduchu, které mohou vzniknout při méně opatrném vkládání závaží. Další vlastnost je téměř dvakrát vyšší hustota oproti vodě, přibližně 1850 kg/m³. Na druhou stranu je její závislost na teplotě mnohem vyšší, koeficient objemové roztažnosti je přibližně desetkrát vyšší než u vody.

Tímto se tedy dostáváme k otázkám hustoty prostředí a především hustoty vzduchu.

4 Hustota vzduchu

Při určení hustoty vzduchu se dá vyjít ze stavové rovnice

$$\rho_a = \frac{pM_a}{ZRT},$$

kde p označuje tlak vzduchu, M_a molární hmotnost vzduchu, Z stlačitelnost, T teplotu a R molární plynovou konstantu. Vzhledem k tomu, že kromě tlaku a teploty vzduchu nelze další veličiny snadno určit, zavedly se korekce, kde se vyskytují buď konstanty nebo snadno měřitelné veličiny. Mezi tyto snadno měřitelné veličiny patří teplota rosného bodu a obsah CO₂ ve vzduchu. Mimo to existuje ještě další rovnice, kde se využívá už jen teploty, tlaku a relativní vlhkosti. Tato rovnice, která se také používá v ČMI, má tvar

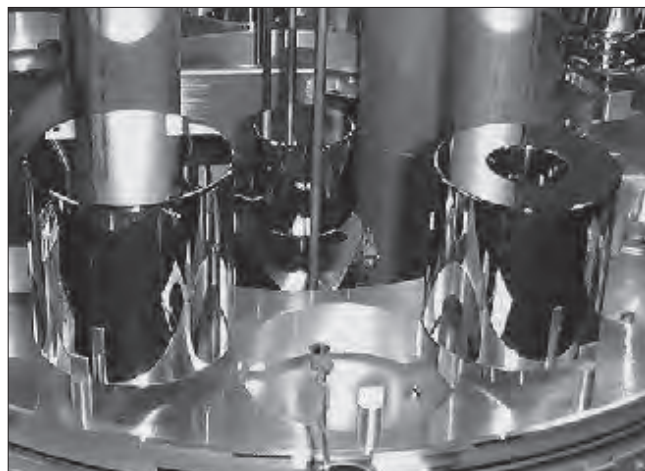
$$\rho_a = \frac{0,34848p - 0,009h_r \exp(0,061t)}{273,15 + t},$$

kde p je tlak vzduchu v jednotkách mbar, h_r relativní vlhkost v procentech a t teplota vzduchu ve °C. Vzhledem k tomu, že tato rovnice je pouze aproximační, má už sama o sobě relativní nejistotu v řádu 10⁻⁴. Pro přesnější určení lze využít buď přesnější rovnici o relativní nejistotě přibližně 10⁻⁵ nebo jiných metod, pomocí kterých se hustota určí přesně a výsledek nebude závislý na aproximační rovnici.

Takovou metodou může být měření hmotnosti pomocí závaží speciálních tvarů. Představme si, že máme dvě závaží o podobné hmotnosti, ale rozdílných objemech. První měření proběhne ve vakuu, druhé měření pak ve vzduchu, případně i v kapalině nebo libovolném jiném prostředí. Pak získáme vztahy

$$\begin{aligned} \Delta m_a &= I_1 - I_2 + \rho_a(V_1 - V_2) \\ \Delta m_v &= I_3 - I_4 \Rightarrow \rho_a = \frac{I_3 - I_4 - I_1 + I_2}{V_1 - V_2}, \end{aligned}$$

kde Δm_a a Δm_v označují rozdíl skutečných hmotností závaží ve vzduchu a ve vakuu. Vzhledem k tomu, že jsou použita stejná závaží, jsou oba tyto rozdíly stejné. Dále I_i označují indikaci komparátoru. Znamená to tedy, že nemusíme ani znát hmotnosti speciálních závaží, stačí znát pouze jejich objemy. Nejistota získaná z takového měření je menší než z aproximačních rovnic, pohybuje se v řádu 10⁻⁶ u relativní nejistoty. V blízké době se plánuje zavedení tohoto měření, čímž se ještě více omezí vliv nejistoty hustoty vzduchu na celkovou nejistotu závaží.



Obr. 2: Speciální závaží na měření hustoty vzduchu

Měření pomocí artefaktů dávalo původně odlišné výsledky od aproximačních rovnic. Na základě toho bylo nutné revidovat některé konstanty, především pak ty spjaté s obsahem argonu ve vzduchu. Tyto změny by měly být zavedeny v blízké době do aktualizované rovnice.

5 Shrnutí

V rámci tohoto článku byl stručně představen koncept konvenční hmotnosti. Byly uvedeny důvody pro její zavedení, přičemž bylo poukázáno na to, že při jejím použití je potřebné, alespoň v nejpřesnějších měřeních, znát hustotu závaží. Proto se další část zabývala tím, jak tuto hustotu určit. V neposlední řadě se bylo nutné zabývat hustotou vzduchu, která hraje důležitou roli při výpočtu konvenční hmotnosti ze zdánlivé, kde je započítána vztahová síla. Byla ukázána alternativní cesta, jak dosáhnout menší nejistoty, a to pomocí závaží speciálních tvarů, což je jedna z možných cest při celkovém rozvoji laboratoře hmotnosti. Všechny uvedené problémy tvoří každodenní práci při zpracovávání měření na nejvyšších úrovních, jako například při přenosu jednotky hmotnosti ze státního etalonu na referenční závaží z nerezové oceli.



PŘENOS JEDNOTKY HMOTNOSTI

Abstrakt

Jeden z problémů, se kterými se laboratoř hmotnosti potýká neustále, je přenos jednotky hmotnosti ze státního etalonu na sadu etalonů z nerezové oceli a z nich pak přenos na závaží jiných nominálních hmotností, od 1 mg do 10 kg, tedy 7 řádů. Vychází se ze systému rovnic, který popisuje daný problém. Systém samotný ovšem není dostačující, je také nutné správným způsobem pracovat s jednotlivými měřeními.

1 Úvod

Definice jednotky hmotnosti, kilogramu, je vztážena k platino-iridiovému prototypu. Běžně se ale v rámci ČMI používají závaží z jiných materiálů, například nerezové oceli, a jiných hmotností, od 1 mg až do 1000 kg. Úkolem laboratoří hmotnosti je navázat všechna tato závaží tak, aby bylo možné vysledovat návaznost až k mezinárodnímu prototypu. Čím blíže k mezinárodnímu prototypu se ve schématu návaznosti nacházíme, tím přesněji je potřeba měřit a tím jsou také kladeny větší nároky na metrology, na přístroje a na podmínky prostředí v laboratoři. To ovšem platí nejen pro oblast hmotnosti, ale i pro další veličiny. V rámci tohoto článku se budeme zabývat pouze oblastí hmotnosti, a to těch nejvyšších úrovní v rámci ČMI, tedy přenosu jednotky hmotnosti z platino-iridiového státního etalonu až na závaží o hmotnostech 1 mg – 10 kg.

V rámci návaznosti závaží je nutné vyřešit dva hlavní problémy, vliv vztlaku vzduchu a rozdělení kilogramu na díly a násobky. Praktické provedení je takové, že se nejdříve vyřeší vliv vztlaku vzduchu navázáním pracovního etalonu na státní etalon. Poté se na tento pracovní etalon postupně naváží díly a násobky.

2 Návaznost pracovních etalonů na státní etalon

Zatímco měření hmotnosti ve vakuu je poměrně triviální záležitostí, měření ve vzduchu přináší obtíž v tom, že na závaží kromě tíhové síly působí již nezanedbatelná síla vztlaková. Vzhledem k tomu, že všechna praktická měření probíhají právě ve vzduchu, je nutné se vztlakovými silami zabývat a správně je určovat.

Ze vztahu pro vztlakovou sílu vyplývá, že mimo hmotnost etalonu potřebujeme ještě znát jeho hustotu nebo objem a také hustotu nebo objem měřeného závaží a hustotu vzduchu. V případě státního etalonu hmotnosti známe hmotnost i hustotu z kalibračních listů vydaných Mezinárodním úřadem pro míry a váhy. Hustotu pracovních etalonů používaných v rámci ČMI také známe. Tím by mohl být problém návaznosti nejvyššího řádu vyřešen, nicméně kvůli rozdílné objemové roztažnosti obou materiálů nesmíme zapomenout na přesné měření teploty, které je tak jako tak potřeba pro výpočet hustoty vzduchu. Teplotu i další parametry pak musíme měřit kontinuálně kvůli případné změně hustoty vzduchu a tím i vztlakové síly a na tyto změny pak výsledky opravovat.

Jednou z možností, jak omezit změnu hustoty vzduchu, je využít vakuového komparátoru pracujícího v atmosférickém režimu, tedy bez čerpání vývěvami. Hlavní komoru lze totiž uzavřít ventily. Vzhledem k tomu, že objem vzduchu i jeho hmotnost uvnitř komparátoru jsou konstantní, hustota bude také konstantní. Poté stačí jen měřit teplotu vzduchu kvůli objemové roztažnosti závaží.

I když hmotnosti obou závaží jsou přibližně stejné, komparátor by přesto ukázal rozdíl přibližně 0,1 g. Vzhledem k tomu, že nelinearita komparátoru při takovém rozdílu už může hrát významnou roli při stanovení nejistoty hmotnosti pracovního etalonu, obvykle se přidává závaží právě o hmotnosti 0,1 g k primárnímu etalonu. Tím se sníží rozdíl mezi oběma závažími a zmenší se výsledná nejistota.

3 Dělení jednotky hmotnosti

V druhé fázi se pracovní etalon použije jako reference při rozdělování jednotky hmotnosti na díly. Sady závaží běžně obsahují závaží o hmotnostech $(1; 2; 2^*; 5) \times 10^n$ kg, kde n označuje dekádu závaží a bývá v intervalu $[-6; 3]$. Označení 2^* znamená, že se v dekadě vyskytují dvě závaží o nominálním násobku hmotnosti 2 a symbol $*$ se využívá jen pro odlišení. Navazování pak probíhá jednoduše tak, že vzájemně porovnáme skupinu závaží oproti jiné skupině závaží, ale o stejném součtu jejich hmotností. Prakticky to znamená, že například závaží o hmotnosti 1 kg porovnáme se závažími o hmotnostech 500 g, 200 g, 200 g* a 100 g.

Aby bylo možné určit v rámci jedné dekády hmotnosti všech závaží, je nutné provést minimálně tolik měření, kolik závaží je v dané dekadě obsaženo. Klasicky to bývají 4 závaží, je tedy potřeba provést minimálně 4 měření. Z matematického pohledu se jedná o soustavu 4 rovnic o 4 neznámých. Prakticky se používá model obsahující více rovnic, z nichž některé se mohou také opakovat. Z dekády o 4 závažích lze sestavit 10 různých měření, a tedy také 10 různých rovnic. Pomocí různých matematických postupů, například metodou nejmenších čtverců, lze pak nalézt řešení takové soustavy, a tím i hmotnosti jednotlivých závaží. Zároveň lze spočítat vlivy jednotlivých měření na nejistoty jednotlivých závaží.

Matematicky je tedy problém vyřešen. Nyní zbývá na první pohled snadná záležitost, a to výběr rovnic, které budou využity při měření. Ovšem právě tento problém patří mezi ty nejdůležitější, protože různé systémy mohou vnést do výsledku různé nejistoty. I když existují doporučené systémy s různými vhodnými vlastnostmi, někdy nemusí být možné je využít, například kvůli nedostatku místa v komparátoru, což je například problém laboratoře primární metrologie ČMI. Proto je někdy nutné zavést do systému další závaží o vhodnějších rozměrech, která budou sloužit jen jako náhrada jiného závaží, pro které by již v daném měření nebylo dost místa.

Podobným způsobem, tedy pomocí systému rovnic, lze i navázat objem závaží pomocí objemového komparátoru.

Ve skutečnosti se v takovém případě nenavazuje hmotnost, či přesněji konvenční hmotnost, ale zdánlivá hmotnost, ze které se pak již s pomocí konvenční hmotnosti dá objem vypočítat. I při tomto druhu měření se vyskytují stejné problémy jako při měření ve vzduchu, ale přidávají se i další, související s působením kapaliny na závaží.

4 Shrnutí

Přenos jednotky hmotnosti z mezinárodního prototypu až na nejméně přesná závaží není vůbec jednoduchou záležitostí, jak se může na první pohled jevit. Na nejvyšší úrovni, která tu byla ve stručnosti představena, se řeší problémy nejen fyzikálního, ale i matematicko-statistického charakteru, kde drobná změna ve vyhodnocení může přinést důsledky ve formě vyšší nebo naopak nižší nejistoty hmotnosti, pokud ne přímo ve velikosti hmotnosti závaží.



VYUŽITÍ KOMPARAČNÍCH VAH PRO MĚŘENÍ JINÝCH VELIČIN

Abstrakt

V posledních letech nabývá na důležitosti měření a detekce úniku plynů. V článku je popsána metoda detekce, založená na určení rozdílu mezi etalonovým závažím kalibrovanou netěsností. Metoda, kterou používají autoři, je použitelná pro libovolný plyn. Bylo provedeno několik měření za účelem určení opakovatelnosti metody. Ukázalo se, že pro dosažení výsledků s přijatelnou nejistotou zcela postačí jedno měření trvající dva dny. Jako „netěsnost“ se označuje také artefakt – speciální nádobka, plněná plynem.

1 Úvod

Z důvodu ochrany životního prostředí nabývá na důležitosti detekce halogenových hydrokarbonů (freonů). Z důvodu poškozování ozonové vrstvy byly již dříve opuštěny chlorované freony a nahrazeny fluorovanými. Naneštěstí tato změna nebyla vhodně zvolena, protože tyto freony jsou důležitými skleníkovými plyny s přibližně třikrát větším potenciálem k ohřívání Země než u oxidu uhličitého. Z tohoto důvodu je měření netěsností těchto plynů důležitým úkolem, alespoň do doby jejich dalšího nahrazení.

Detektory těchto netěsností mají obecně horší dlouhodobou stabilitu, a proto potřebujeme sekundární etalony pro jejich častou kalibraci. Ovšem tyto etalony také potřebují být kalibrovány pomocí primárních etalonů. Ty se dají rozdělit do dvou základních skupin, a to citlivých na druh plynu [1] a vhodných pro jakýkoliv druh plynu [2-4]. Problém u první metody je ten, že je vhodná jen pro určité plyny, zatímco u druhé metody se měří množství uniklého plynu. Jiná možnost, jak měřit únik plynů na základě druhé skupiny, přináší taktéž určité potíže [5]. Na druhou stranu se tyto potíže dají do určité míry eliminovat, jak ukáží autoři. Ve výsledku pak takto získaná nejistota je plně srovnatelná s jinými metodami.

Navrhovaná metoda se dá popsat jako dlouhodobé porovnání závaží. Na rozdíl od běžných kalibrací není potřebné u této metody znát hmotnost použitého etalonu.

2 Základy metody

Standardizovanou netěsnost jsme postavili do speciálně vyrobeného stojánku z mosazi kvůli zajištění stability. Dále byla použita drobná závaží pro dorovnání hmotnosti co

nejblíže k hodnotě 1 kg. Hmotnostní komparátor pak slouží k odečtu rozdílu mezi etalonovým závažím o hmotnosti 1 kg třídy E1 a měřeným závažím, v našem případě netěsností, viz též **obr. 1**. Rozdíl se spočítá ze tří po sobě následujících odečtů, kde první je odečet etalonového závaží, druhý netěsnosti a třetí opět etalonového závaží. Dále pro každé takové měření lze určit přesné datum a čas, kdy bylo měření provedeno.

Hodnota netěsnosti je dána změnou hmotnosti δ_m během časového intervalu δ_t :

$$Q_m = \frac{\delta_m}{\delta_t}$$

Rozdíl v indikaci pak je:

$$\Delta I = \frac{I_1 - I_m + I_2 - I_m}{2} = \frac{I_1 + I_2}{2} - I_m$$

Kde

I_1 je odečet prvního měření etalonového závaží,

I_m je odečet druhého měření s netěsností,

I_2 je odečet druhého měření s etalonovým závažím.

Takto určený rozdíl musí být ovšem převeden ze zdánlivého rozdílu na rozdíl vakuových hmotností etalonového závaží m_e a měřené netěsnosti:

$$\Delta I = \frac{m_e}{2} \left(1 - \frac{\rho_a(P_1, T_1, RH_1)}{\rho_e(T_1)} \right) + \frac{m_e}{2} \left(1 - \frac{\rho_a(P_2, T_2, RH_2)}{\rho_e(T_2)} \right) + (-1)m_m(t_m) \left(1 - \frac{\rho_a(P_m, T_m, RH_m)}{\rho_m(T_m)} \right)$$

Kde

1. ρ_e je hustota etalonového závaží,

2. ρ_m je hustota měřené netěsnosti a

3. ρ_a je funkce závislá na tlaku (P), teplotě (T) a relativní vlhkosti (RH).

Vzhledem k tomu, že čas mezi dvěma po sobě následujícími odečty je vždy nanejvýš 4 minuty a komparátor samotný

je umístěn v klimatizované laboratoři, můžeme předpokládat jen pomalé a lineární změny podmínek:

$$\Delta I(t_m) = m_e - m_e \frac{\rho_a(P_m, T_m, RH_m)}{\rho_e(T_m)} - m_m(t_m) + m_m(t_m) \frac{\rho_a(P_m, T_m, RH_m)}{\rho_e(T_m)}$$

Dále platí, že rozdíl dvou po sobě následujících odečtů $m_e - m_m$ je maximálně 0,03 mg. Pak můžeme psát:

$$m_m(t_m) = \bar{m}_e - \Delta I(t_m) - m_e \rho_a(P_m, T_m, RH_m) \times \left(\frac{1}{\rho_e(T_m)} - \frac{1}{\rho_m(T_m)} \right)$$

Vzhledem k tomu, že neznáme přesně hustotu netěsnosti, může být korekce na vztlak vzduchu vyšší než rozlišení komparátoru. To pak znamená, že nemůžeme určit hmotnost celé soustavy netěsnosti úplně přesně. My se ale zajímáme o změnu hmotnosti mezi dvěma měřeními:

$$\delta_m(t_p, t_k) = \bar{m}_m(t_k) - m_m(t_p)$$

Odtud pak máme:

$$\begin{aligned} \delta_m(t_p, t_k) &= \Delta I(t_p) - \Delta I(t_k) + \\ &+ m_e \left(-\frac{1}{\rho_e(T(t_k))} + \frac{1}{\rho_m(T(t_k))} \right) \rho_a(P(t_k), T(t_k), RH(t_k)) + \\ &+ m_e \left(\frac{1}{\rho_e(T(t_p))} - \frac{1}{\rho_m(T(t_p))} \right) \rho_a(P(t_p), T(t_p), RH(t_p)) \end{aligned}$$

Dále můžeme zanedbat korekční členy na vztlakové síly, a tak získáme vztah:

$$\delta_m(t_p, t_k) = \Delta I(t_p) - \Delta I(t_k)$$

Přesně tento výraz následně použijeme pro výpočet netěsnosti.

Jiný přístup, který se nabízí, je lineární aproximace metodou nejmenších čtverců. Typický záznam z měření obsahuje dvojice dat, vždy indikaci komparátoru a čas, kdy byla tato indikace zaznamenána. Tyto údaje nebudou využity pro výpočet hodnoty netěsnosti jako v předchozích výpočtech, ale jako souřadnice $[t_p; \Delta I(t_p)]$ pro výpočet parametrů přímky

Koeficient α je pak hledaný hmotnostní průtok, tedy v našem případě netěsnost.

4 Rozbor nejistot

Předpokládejme, že v laboratoři se teplota mění nanejvýš o 1 °C a tlak nejvýše o 1 kPa, pak relativní změna hustoty vzduchu bude nejvýše 1,5 %, zatímco změny objemu na základě změny teploty pouze 21 ppm. Pak získáme člen popisující chybu způsobenou zanedbáním korekce na vztlak vzduchu:

$$\xi = m_e \left(\frac{1}{\rho_e} - \frac{1}{\rho_m} \right) \times \left(\rho_a(P(t_p), T(t_p), RH(t_p)) - \rho_a(P(t_k), T(t_k), RH(t_k)) \right)$$

Předpokládejme, že hustota závaží je v intervalu 7500 – 8400 kg/m³. Pak zanedbáním vztaku vzduchu se do výpočtu vnese další zdroj nejistoty o maximální velikosti 0,15 mg.

Nejistota typu B pro netěsnost na základě prvního vztahu je:

$$u_B(Q_m) = Q_m \sqrt{\left(\frac{u(\delta_m)}{\delta_m} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta_t)}{\delta_t} \right)^2}$$

Nejistota $u(\delta_m)$ je složena z několika dalších zdrojů. Jedním z nich je rozlišení stupnice komparátoru, která vnese do výpočtu $u(\delta_t) = (0,01/\sqrt{3})$ mg. Nejistota daná opakovatelností je $u(\delta_s) = (0,03/\sqrt{3})$ a nejistota daná zanedbáním působení vztakových sil je $u(\delta_c) = (0,15/\sqrt{3})$ mg. Indikace

komparátoru je počítána jako integrace přes časový interval 10 s, což při předpokládaném rozlišení 1 s vnese do výpočtu nejistotu $u(\delta_t) = (22/\sqrt{3})$ s ..

Celkový vztah pro výpočet nejistoty netěsnosti má tvar:

$$u_B(Q_m) = Q_m \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{0,01^2 + 0,03^2 + 0,15^2}}{\delta_m} \right)^2 + \left(\frac{22}{\delta_t} \right)^2}$$

Hmotnosti a indikace jsou v mg, čas v s a průtok v mg/s.

Při použití druhého postupu, metodě nejmenších čtverců, použijeme jiný model pro výpočet nejistoty. Vzhledem k tomu, že v každém bodě $[t_p; \Delta I(t_p)]$ můžeme určit nejistoty v obou směrech, musíme použít modifikaci klasické metody, která je založena například na [6]. Pro vlastní výpočty jsme použili makra v tabulkovém editoru Excel [7].

5 Výsledek měření

Pro měření jsme použili hmotnostní komparátor společnosti Mettler Toledo s označením AT10005. Jeho maximální kapacita je 10 kg, rozlišení 0,01 mg a opakovatelnost 0,03 mg. Pro účely měření má tedy poměrně velkou kapacitu, ale také zároveň dostatek místa pro umístění netěsnosti.

Během celé doby měření byla všechna závaží a všechny ostatní části včetně netěsnosti deklarována jako závaží třídy E1 a bylo s nimi podle tohoto popisu zacházeno.

Typické měření trvalo 32 – 48 hodin a probíhalo přes víkend, kdy bylo možné dosáhnout nejlepší stability okolních podmínek.

První měření začalo 9. července 2010. Probíhalo jako dvě různé série porovnání typu ABA, které bylo opakováno desetkrát. Každá série pak byla provedena 15krát. Schéma měření bylo zvoleno jako 1kg závaží proti sobě samému kvůli ověření opakovatelnosti a 1kg proti netěsnosti. Teplota byla 20,8 °C, tlak byl 985 mbar a relativní vlhkost 60 %. Vzhledem k tomu, že skutečný start byl kvůli stabilizaci podmínek posunut, jsou výsledky označeny jako 10. 07. 2010.

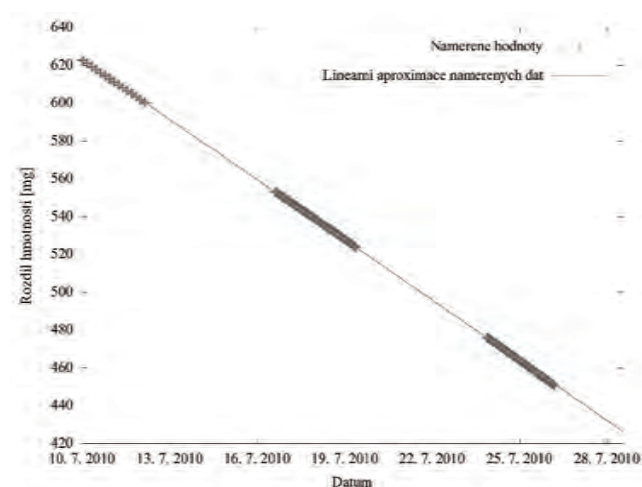
Druhé měření začalo 1. července. Nyní byla měřena jen jedna série 20 ABA porovnání 1 kg a netěsnosti. Tato série byla ještě zopakována také 20krát. Teplota byla 20,9 °C, tlak 980 mbar a relativní vlhkost 60 %. Opět byl začátek měření posunut, a proto jsou výsledky doprovázeny označením 17. 07. 2010.

Poslední měření začalo 23. července 2010. Opět se porovnávala pouze netěsnost vůči závaží o hmotnosti 1 kg. V každém porovnání proběhlo 15 měření typu ABBA, těchto porovnání proběhlo 17. Teplota byla 20,8 °C, tlak 976 mbar a relativní vlhkost 60 %. Obdobně jako v předchozích případech jsou data označena jako 24. 07. 2010.

Všechny podmínky měření jsou shrnuty v **tab. 1**.

Datum	Počet sérií	Počet porovnání	Typ	t [°C]	p [mbar]	h [%]
10. 7. 2010	15	10	ABA	20,8	985	60
17. 7. 2010	20	20	ABA	20,9	980	60
24. 7. 2010	17	15	ABBA	20,8	976	60

Výsledky z **obr. 1** ukazují, že všechna měření byla stabilní bez výrazných odchylek, takže žádné měření nemuselo být vynecháno. Naznačené přímkou byly spočteny pomocí metody nejmenších čtverců v programu GNUPlot.



Obr. 1: Přehled všech výsledků měření netěsnosti

Datum	Q_{LSa} [g/r]	$U(Q_{LSa})$ [g/r]	Q_{LSm} [g/r]	$U(Q_{LSm})$ [g/r]	Q_{Lm} [g/r]	$U(Q_{Lm})$ [g/r]
10. 7. 2010	3,80	0,05	3,80	0,06	3,80	0,08
17. 7. 2010	3,91	0,05	3,91	0,06	3,92	0,07
24. 7. 2010	4,02	0,05	4,02	0,05	4,00	0,07
Vše	3,88	0,05	3,87	0,06	3,85	0,06

Všechny výsledky v rámci jednoho víkendů si jsou podobné, ale odlišné od ostatních víkendů, jak je patrné z **tab. 2**. Poněkud paradoxně dochází ke zvyšování průtoku.

Odůvodnění může být takové, že jsme po pořízení netěsnosti nevyčkali potřebnou dobu na ustálení průtoku v nových podmínkách. Problém může být také v netěsnosti samotné, a to ten, že mimo hlavní zdroj úniku plynu je obsažena ještě jiná skrytá netěsnost. Dalším zdrojem může být nestabilita mosazného stojánku například kvůli oxidaci nebo kvůli nevhodnému zacházení.

Ačkoliv jsme zaznamenali několik potíží při vyhodnocování, můžeme říci, že metoda porovnání hmotnosti může být použita pro kalibraci definovaných netěsností. Získané nejistoty byly dostatečně malé, a to především při vyhodnocení pomocí metody nejmenších čtverců.

6 Závěr

Hlavní problémy metody porovnání hmotnosti jsou v zásadě tři. Tato metoda měří celkovou netěsnost, takže zaznamenává i skryté netěsnosti. Dále tato metoda neumožňuje měření netěsnosti při teplotě jiné než laboratorní. Dále pokud má netěsnost velké rozměry, nemusí být možné ji umístit do komparátoru.

Další problémy se mohou objevit při samotném měření jako například nestabilita průtoku z důvodu kratší doby stabilizace nebo nestabilita jakékoliv jiné části použité pro upevnění netěsnosti.

Tento článek vznikl na základě článku [8], který je teprve připravován k publikaci v rámci sborníku konference IMEKO TC3, TC5 a TC22 2010.

Literatura

- [1] Morgado, I., Legras, J. C. and Clodic, D.: "Primary standard for the calibration of refrigerant leak flow rates", *Metrologia*, vol. 47, n° 3, pp. 135-145, 2010.
- [2] Wälchli, U., Stöckli A. L., Rapp, F., Bösch, M. A. and Schmid, A.: "Fundamental leak calibration system for gas leaks with a defined pressure difference over the leak element", *Journal of Vacuum Science and Technology A*, vol. 14, n° 3, pp. 1247-1251, 1996.
- [3] Wang, J., Xu, H., Hu, Y. and Tang, J.: "Development of Pressure Leak Calibration System", *Vacuum Science and Technology (China)*, vol. 24, n° 6, pp. 439-441, 2004. Chinese.
- [4] Jousten, K. and Becker, U.: "A primary standard for calibration of sniffer test leak devices", *Metrologia*, vol. 46, n° 5, pp. 560-568, 2009.
- [5] Jitschin, W.: "Measurement of gas flow", in: *Proceedings of 11th European Vacuum Conference, Salamanca, 20th – 24th September 2010*, pp. 131.
- [6] Cameron Reed, B.: "Linear least-squares fits with errors in both coordinates", *American Journal of Physics*, vol. 57, n° 7, pp. 642-646, 1989.
- [7] Philip Kromer: "Least squares fitting in Excel with error in both variables", dostupné online [citováno 20. října 2010], <http://vzsage.com/other/leastsquaresexcel>.
- [8] Dominik Pražák, Jaroslav Žůda, Ladislav Peksa: "Calibration of secondary standard leaks by means of mass comparison", doposud nepublikováno.

OBLASTI MĚŘENÍ HMOTNOSTI

Abstrakt

Článek se zabývá různými oblastmi měření hmotnosti v praxi. Uvádí způsoby a možnosti měření hmotnosti v oblasti průmyslového vážení, kde na příkladech popisuje odlišné používané technologie vážení a především aplikace statického a dynamického vážení v kontextu definic vážení v neautomatickém a automatickém režimu. Popisuje rovněž vážení v oblasti kontroly tzv. hotově baleného zboží.

1 Úvod

Měření hmotnosti patří již celou řadu let k velmi přesným a velmi rozšířeným měřením. Samotný rozsah měření, se v praxi pohybuje od 10^{-7} g až do 150 tun. Měření hmotnosti nějakého tělesa se vykonává ve většině případů na základě posuzování jeho gravitačních účinků. Zařízení, které slouží k tomuto posuzování, nazýváme vahami. Měřidla hmotnosti, tedy váhy nalezneme ve vědě, výzkumu, výrobě, obchodu, službách, v oblasti zdravotnictví a ochrany životního prostředí, zemědělství. Tedy prakticky ve všech oblastech našeho života. Značnou část rozsahu aplikací pokrývá průmyslová vážicí technika, která u nás, v poměrně krátké době prodělala skutečně radikální změny. Moderní vážicí zařízení je dnes víc než pouhý přístroj sloužící k vážení. Poskytuje další důležité funkce, jako jsou výpočty, ukládání výsledků do paměti, porovnávání výsledků vážení, třídění produktů a tisk. Tuto radikální modernizaci průmyslového vážení a vážení vůbec umožnil nástup nové generace snímačů zatížení a mikroelektroniky.

2 Váhy a jejich definice

Obecně se za váhy považují měřicí přístroje, které slouží k určení hmotnosti tělesa využitím působení gravitace na toto těleso. Tato obecná definice je velmi důležitá, protože mohou existovat (a existují) i měřicí systémy nebo přístroje, které i když indikují výsledný údaj v jednotkách hmotnosti, nepracují na výše uvedeném principu působení gravitace a nejsou tudíž považovány za váhy nebo vážicí zařízení. To je důležité především v tom smyslu, že se na ně nevztahuje příslušná legislativa pro vážicí zařízení.

Jako zajímavý příklad lze uvést pásové „váhy“, zařízení, které určují hmotnost na principu absorpce radiace z radioaktivního zdroje. Dalším příkladem může být průtokoměr sypaných hmot pracující na Coriolisově principu, které se používají na jemné homogenní materiály jako je prach nebo mouka. Zařízení obsahuje měřicí kolo, na které dopadá materiál a je tímto kolem urychlován a vznikem Coriolisovy síly se vytváří reakční moment měřený snímačem zatížení. Velikost momentu je pak úměrná protékajícímu množství. Jiným principem průtokoměru (méně přesného než je Coriolisův průtokoměr) je průtokoměr sypaných hmot se šikmým skluzem. Tato zařízení mají šikmou skluzovou plochu, na kterou působí protékající materiál. Síla působená materiálem je úměrná okamžité hodnotě průtoku materiálu za stanovený čas. U těchto dvou popsaných principů je hlavním problémem jejich kalibrace.

Vážicí techniku lze obecně dělit různým způsobem a podle různých kritérií. Váhy mohou být děleny podle způsobu vážení na váhy diskontinuální a kontinuální. Při diskontinuálním způsobu vážení se břemena váží jednotlivě nebo po částech, přičemž se zobrazená hodnota hmotnosti odečítá po dosažení klidového stavu a břemena se nachází na nosiči zatížení. Pokud je hmotnost břemene měřena průběžně a udává se ve vztahu k časovému intervalu, pak se vážení nazývá kontinuální. Nejčastěji se tento způsob vážení používá při určování velikosti průtoku sypaných hmot. Jako příklad mohou být opět uvedeny pásové váhy.

Podle účelu vážení můžeme váhy rozdělit do dvou skupin, a to na váhy technologické, které jsou součástí různých výrobních procesů a váhy spadající do oblasti tzv. legální metrologie, jejichž správná aplikace je legislativně podmíněna. To jsou například váhy určené k obchodnímu styku, ale také aplikace ve zdravotnictví, ekologii a dalších oblastech.

Podle režimu vážení se pak dále váhy nebo vážicí zařízení dělí do dvou základních kategorií, a to na váhy s neautomatickou činností a váhy s automatickou činností. Toto rozdělení je velmi důležité z hlediska aplikace platné legislativy. Proto pro pochopení rozdílu mezi těmito dvěma kategoriemi vah dále uvedeme obě definice.

V každém případě je nutné, aby vážicí technika byla spolehlivá a zároveň splňovala příslušné zákonné normy a nařízení. U vah, jejichž aplikace spadají do oblasti legální metrologie má stát vyhrazeno právo na dohled nad jejich metrologickými parametry a způsobem používání. Nové typy vah této kategorie se uvádějí na trh na základě posouzení jejich shody s požadavky nařízení vlády č. 326/2002 Sb. Následné ověření se pak děje v pravidelných intervalech, které jsou stanoveny příslušným prováděcím předpisem k zákonu o metrologii. Všichni, kteří jsou zainteresováni na této kategorii měřidel a činnostech s tím souvisejících, musí znát aktuální legislativní dokumenty a ostatní normy, předpisy a nařízení, které se této problematiky bezprostředně týkají.

2.1 Váhy s neautomatickou činností

Váhy s neautomatickou činností jsou definovány jako váhy, které vyžadují zásah obsluhy během vážicího procesu. Přesněji řečeno se za váhy s neautomatickou činností (NAWI) považují měřicí přístroje, které slouží k určení hmotnosti tělesa využitím působení gravitace na toto těleso a které vyžadují zásah operátora během vážicího procesu. První část definice je již uvedena v úvodu článku.

Definici vah s neautomatickou činností lze nalézt i v dokumentech Mezinárodní organizace pro legální metrologii OIML a v Evropské spolupráci v legální metrologii WELMEC.

V definici NAWI, tak jak je obsažena v nařízení vlády č. 326/2002 Sb., je dále uvedeno, že

„Váhy smějí být také použity k určení dalších veličin, množství, parametrů nebo charakteristických vlastností souvisejících s hmotností.“

Druhou kategorií vah jsou z tohoto rozlišovacího hlediska váhy s automatickou činností (AWI) a jejich definice zní:

2.2 Váhy s automatickou činností (AWI)

Váhy, které určují hmotnost produktu bez zásahu operátora a postupují přitom podle předem stanoveného automatického programu, který je pro toto měřidlo charakteristický.

Tuto definici můžeme nalézt jednak v evropské směrnici 2004/22/ES o měřidlech a tedy v nařízení vlády č. 464/2005 Sb., které obsahují specifickou přílohu týkající se vah s automatickou činností a rovněž v řadě mezinárodních doporučení OIML pro tento druh měřidel. (OIML R50, OIML R51, OIML R61, OIML R 106, OIML R107 a OIML R134).

Na první pohled jsou obě definice poměrně jasné a je patrné, že zásadní rozdíl mezi těmito vahami tkví v roli operátora. Je však nutno podotknout, že v praxi mohou nastat případy, kdy pouze na základě těchto definic je obtížné rozhodnout, o jaký režim vážení se jedná. Přitom především v regulované sféře, tedy v oblasti legální metrologie, je toto rozhodnutí zásadní a to proto, že na něm závisí podle jaké legislativy se při posuzování vah bude postupovat. Pro váhy s automatickou činností platí totiž dost odlišná pravidla, co se týká jak technických požadavků, tak i pravidel při posuzování jejich shody s příslušnými směrnici. Jako příklad, kdy může dojít k pochybnostem při zařazení mohou sloužit váhy pro vážení takzvaných „Big Bagů“. Jak tedy v případě pochybností postupovat?

Je třeba se držet pravidla, že váhy schopné vykonávat posloupné vážicí cykly bez zásahu operátora jsou vždy považovány za váhy s automatickou činností. Role operátora, která předurčuje váhy pro neautomatický režim je dána tím, že se vyžaduje, aby operátor nějakým způsobem určil nebo ověřil výsledek vážení. Jinými slovy, operátor má na výsledek vážení zásadní vliv. Operátor například rozhoduje, zda je indikace stabilní.

Ověřením výsledku vážení se míní rozhodnutí týkající se toho, zda při sledování indikace lze výsledek přijmout. Vážicí proces umožňuje, aby operátor (obsluha váhy) provedl zásah, který ovlivní výsledek vážení v případě, že je výsledek nepřijatelný. Je třeba si uvědomit, že i když je v procesu vážení obsluha nezbytná pro spuštění vážení nebo uvolnění zátěže, nemá toto podstatný význam na kategorizaci vah.

Sporné mohou být následující případy:

- kontrolní váhy,
- kontrolní váhy s dopravníkem,
- váhy pro balené zboží ovládané manuálně,
- etiketovací váhy se statickým nebo dynamickým módem,
- váhy instalované na vozidlech pro vážení odpadu nebo jako kolové nakladače.

Je-li tedy někdy v praxi obtížné rozlišit zda se jedná o NAWI či AWI – váhy s automatickou činností, o kterých ještě bude dále řeč, můžeme pro rozlišení sporných případů použít pomocné definice obsažené v dokumentu WELMEC 2 zmiňovaném výše.

Pomocné definice zní:

- Váhy, které pracují se za sebou jdoucími vážicími cykly bez zásahu operátora jsou vždy považovány za AWI.
- Jestliže váhy potřebují zásah operátora jsou považovány za NAWI pouze když operátor musí určit nebo ověřit výsledek vážení.
- Nezbytnost zadání příkazu pro začátek vážicího procesu nebo sejmutí zátěže z nosiče zatížení není rozhodující pro rozhodnutí o kterou kategorii vah se jedná!

Pojem určení výsledků vážení

- Jakákoli inteligentní činnost operátora ovlivňující výsledek. (*Je to například rozhodování zda je indikace stabilní.*)

Pojem ověřováním výsledků vážení:

- Rozhodování operátora na základě sledování indikace zda je výsledek akceptovatelný.

Protože váhy s automatickou činností mají v praxi velmi široké uplatnění, podívejme se nyní na tento druh vah detailněji. O tom jaká je definice těchto vah z hlediska režimu vážení je již pojednáno výše.

2.2.1 Jak lze dělit váhy s automatickou činností

Již v úvodu jsme naznačili základní rozdělení automatických vah. Váhy automatické lze obecně rozdělit na váhy kontinuální a váhy diskontinuální.

I když v obou případech je účelem zjistit hmotnost materiálu nebo výrobku za jeho neustálého pohybu – vážení se děje při přepravě materiálu (účel automatických vah), je u diskontinuálních systémů hmotnost zjišťována v klidovém stavu, i když třeba jen relativně krátkém. Jako příklady lze uvést kontrolní váhy pracující systémem „start-stop“ nebo váhy plnicí a diskontinuální součtové. U kontinuálních systémů dochází k určování hmotnosti materiálu za jeho neustálého pohybu a hlavním zástupce jsou pásové váhy neboli kontinuální součtové váhy.

Dalším rozdělení již rovněž v úvodu naznačeným je rozlišení mezi vahami, které určují aktuální hmotnost materiálu a vahami dávkovacími – proporcionálními, jejichž smyslem je navážit předem nastavenou hodnotu hmotnosti.

Automatické váhy zahrnují váhy používané na přejímku nebo nakládání materiálu, který může být v sypké podobě nebo jako kapalina. V závislosti na funkci mohou do této kategorie spadat i váhy pro vážení železničních vozidel za pohybu. Mezi automatické proporcionální váhy patří všechny plnicí váhy, které automaticky plní přednastavené množství. Váhy pro nakládání materiálu jsou užívány především v zemědělství nebo v přístavech při nakládání obilí. Celková hmotnost naloženého a vyloženého materiálu je měřena diskontinuálním vážením v násypkové váze sčítání dílčích zatížení.

Porovnáme-li například kontinuální vážení na pásové váze s aplikacemi na diskontinuálních vahách, lze říci, že diskontinuální vážení poskytuje vyšší přesnost. U obou způsobů vážení se vyžaduje vysoký výkon a kvalita mechanického a elektronického systému. Kromě požadavků na objem násypky a dopravníkových pásů je kritické zajistit bezpečnost při vážicích operacích. Je třeba minimalizovány nebo

kompenzovány tlakové rozdíly na rozhraní mezi vázicí sekcí a stacionárními instalacemi.

Níže je pro názornost v krocích A) až D) popsán proces vážení na násypkové váze.

A) Plnění

Produkt je naplněn z horní násypky do vázicí násypky při otevření elektro-pneumatického segmentu.

B) Zaznamenání celkové hmotnosti

Dosáhne-li se požadované hmotnosti dávky, je nápuštní otvor uzavřen a je určeno množství produktu je ve vázicí násypce

C) Vyprázdnění

Po určení celkové hmotnosti je elektro-pneumatický segment otevřen a produkt je vyprázdněn do spodní násypky.

D) Určení táry

Jakmile je vázicí násypka prázdná, je vyprazdňovací otvor uzavřen a pokud v násypce zůstal zbytek materiálu je jeho množství určeno.

Čistá hmotnost vyprázdněné dávky je vypočítána a přidána k celkové vyprázdněnému množství, poté se cyklus opakuje. Automatický cyklus se zastaví, jakmile veškeré množství materiálu projde vahami a je dosaženo předem nastaveného požadovaného množství.

Nyní se blíže podíváme na některé automatické vázicí systémy a stručně si je popíšeme.

Plnicí váhy

Tyto váhy se v převážné míře používají pro vážení stejného předem daného množství. Protože proces vážení vždy zahrnuje plnění násypky (nádrže apod.), je vázicí část vždy součástí plnicího zařízení. Vázicí část tvoří tenzometrické snímače zatížení, elektronická část a systém s požadovanými dynamickými vlastnostmi. Klíčem k přesnosti těchto vah je automatická optimalizace plnicí rychlosti. Mikroprocesorový systém neustále optimalizuje řízení operace plnění v závislosti na právě měřené hodnotě, v závislosti na čase a výsledcích z předešlé plnicí operace. Problémem u tohoto způsobu vážení je to, na snímače zatížení nepůsobí jen síla vyvozená zatížením, ale velikost této síly je neustále zkreslována díky silovým účinkům materiálu, změnám tlaku vzduchu a dynamickém chování systému během přepravy materiálu a plnění.

Váhy pro vážení vozidel za pohybu

Účelem použití automatických systémů pro vážení vozidel za pohybu je co nejvíce redukovat čas vážení při dosažení ještě akceptovatelné přesnosti. Zatížení je těmito systémy měřeno obvykle při rychlostech 5 km/h až 15 km/h. Tyto systémy se uplatňují především při přepravě materiálu na železnici, kdy jsou váženy za pohybu vagony, respektive je určováno zatížení jejich os nebo podvozků. Systémy umožňují vážení různých druhů vagonů, a to i v případě že nejsou rozpojeny. Jednotlivá zatížení jsou pak sčítána pro určení hmotnosti jednotlivých vagonů a celých vlaků. Systém navíc umožňuje rovněž zaznamenávat údaje o rychlosti, směru a pozici vagonů. Při vážení je celý systém – vagony, koleje a vázicí můstek vystaven vibra-

cím a měřicí signál je tím samozřejmě ovlivněn a musí být elektronickým systémem analyzován, kde musí být rušivé vlivy odděleny.

Obdobnou aplikací je vážení silničních vozidel za pohybu. Toto vážení je ale více problematické, a to především proto, že přesnost vážení je signifikantně ovlivněna interakcí vozovky a váženého vozidla. Nicméně v současné době jsou již k dispozici systémy, které jsou schopny splnit požadavky pro legální aplikace.

Pásové váhy

Jak jsme již řekli, pásové váhy jsou typickým zástupcem kontinuálního vážení. Tyto váhy se skládají z pásového kolečkového dopravníku, kterým se transportuje materiál (většinou se jedná o sypké hmoty) a válečkové stolice, oddělené od základního rámu dopravníku, ve které je snímač zatížení, který snímá vertikální síly vyvozené dopravníkovým pásem, úměrné jeho zatížení. Váhy jsou dále vybaveny snímačem rychlosti pásu. Pásové váhy pak určují hmotnost materiálu přepravovaného dopravníkovým pásem tak, že zatížení pásu je násobeno jeho rychlostí. Výsledkem je průtok (P). Integrací můžeme vypočítat celkovou hmotnost materiálu, který je přepraven za určitý čas.

$$P = m/s \times s/t$$

kde m/s je zatížení pásu respektive hmotnost materiálu na jednotku délky pásu

a s/t je rychlost pásu respektive posun pásu za jednotku času.

Jak jsme již řekli, celkové přepravené množství materiálu M za časovou jednotku získáme integrací průtoku

$$M(\text{kg}) = \int_0^t P dt$$

Typická relativní přesnost těchto systémů se pohybuje v rozmezí 0,25 % až 2 %, a to podle typu váhy, přepravovaného materiálu a dalších okolnostech, které mají vliv na přesnost. Jedná se o následující vlivy, které musí být minimalizovány. Je třeba, aby materiál a dopravníkový pás, který se pohybuje ve vázicí části, byl co nejvíce uklidněn. To znamená, že mechanika váhy musí být dostatečně vzdálena od začátku a konce pásu, přesypů míst kde se mění profil. Důležitý je vliv sklonu pásu, protože při velkém sklonu může docházet k dodatečnému pohybu sypkého materiálu, a tedy k vícenásobnému vážení a vzniku chyb. Maximální sklon musí být volen v závislosti na sypkosti materiálu a pohybuje se normálně v rozmezí 15° až 20°. Důležité je zajistit konstantní napínání pásu. V praxi se většinou používá gravitační systém, což je napínání závažím přes kladku. Někdy se používá napínání šroubem nebo pružinami, ale toto nemusí vždy zajistit stabilní napínání. Pásové váhy bez systému napínání pásu nelze ověřovat, protože nelze zajistit dodržení chyb. Důležitým faktorem je příčný profil dopravníku. Aby se zamezilo vzniku nedefinovaných vertikálních rušivých sil ovlivňujících vážení, je optimální tvar rozveřeného písmene „U“.

Rychlost pásu je faktorem pro výpočet přepravního výkonu. Buď to se zadává jako konstanta nebo pro přesnější vá-

žení musí být měřena. Přesné podmínky pro tento druh vah, schopných ověřování jsou popsány v mezinárodním doporučení OIML a směrnici MID, jak bude ještě dále uvedeno.

Diferenciální kontinuální váhy

Nevýhodou pásových vah je nemožnost jejich použití pro materiály, které musí být při přepravě uzavřeny (toxické nebo těkavé materiály). V takovém případě se využívá systémů, kde je zajištěno dokonalé uzavření toku materiálu. Nevýhodou je to, že v hermeticky uzavřených přírodních a odvodních potrubích může vznikat přetlak nebo podtlak což působí rušivě. Takovéto vážicí zařízení se nazývají diferenciální váhy nebo se s nimi setkáme v anglické literatuře pod pojmem „Loss-in-weight hopper weighfeeders“. Jak napovídají oba názvy podstatou vah je, že úbytek materiálu v násypce je řízen tak, aby odpovídal předem nastavené hodnotě. Tyto systémy mohou být užity i pro kapaliny. Klíčovým zařízením je u těchto vah vyprazdňovací zařízení, které je voleno podle povahy materiálu. Tato zařízení mohou tvořit šnekové dopravníky, vibrační dopravníky nebo různá rotační zařízení.

Princip vah je takový, že zatížení násypky je snímáno tenzometrickými snímači zatížení a úbytek hmotnosti materiálu v násypce v čase odpovídá skutečnému odebranému množství. Vhodný regulátor zajišťuje, aby úbytek byl v čase konstantní. Používá se obvykle gravimetrický nebo objemový režim regulace. Hodnota úbytku je nepřetržitě porovnávána s předem nastavenou hodnotou.

3 Automatické váhy – evropská legislativa a mezinárodní doporučení OIML

Váhy s automatickou činností jsou legislativně pokryty evropskou směrnicí 2004/22/ES a nařízením vlády č. 464 ze dne 19. října 2005.

Směrnice 2004/22/ES dělí váhy s automatickou činností do několika kategorií, jejichž technické aspekty jsou pokryty normativními dokumenty (mezinárodní doporučení OIML).

- Dávkovací váhy s automatickou činností
Vážicí zařízení s automatickou činností, které určuje hmotnost předem seskupených samostatných zátěží (např. hotově baleného zboží) nebo jednotlivých množství volně loženého materiálu.
- Kontrolní váhy s automatickou činností
Vážicí zařízení s automatickou činností, které třídí zboží rozdílné hmotnosti do dvou nebo více podskupin podle hodnoty rozdílu mezi jejich hmotností a jmenovitým bodem nastavení.
- Etiketovací váhy
Dávkovací váhy s automatickou činností, které opatřují jednotlivé kusy zboží štítkem s hodnotou hmotnosti.
- Váhy s tiskem cenových etiket
Dávkovací váhy s automatickou činností, které opatřují jednotlivé kusy zboží štítkem s hodnotou hmotnosti a informací o ceně.

Technické aspekty výše uvedených kategorií vah jsou pokryty mezinárodním doporučením OIML R51.

- Gravimetrické plnicí váhy s automatickou činností
Vážicí zařízení s automatickou činností, které plní kon-

tejnery předem stanovenou a prakticky konstantní hmotností sypkého produktu.

Technické aspekty jsou pokryty mezinárodním doporučením OIML R61

- Diskontinuální součtové váhy (součtové zásobníkové váhy)
Vážicí zařízení s automatickou činností, které určuje hmotnost velkého množství sypkého produktu tak, že toto množství rozdělí do samostatných dávek. Určuje se hmotnost každé samostatné dávky a postupně se přičítá. Každá samostatná dávka se pak přidá k již odváženému celkovému množství.

Technické aspekty jsou pokryty mezinárodním doporučením OIML R107

- Kontinuální součtové váhy
Vážicí zařízení s automatickou činností, které určuje hmotnost určitého množství produktu na dopravním pásu bez systematického dělení produktu a bez přerušení pohybu dopravního pásu.

Technické aspekty jsou pokryty mezinárodním doporučením OIML R50

- Kolejové váhy
Vážicí zařízení s automatickou činností s nosičem zatížení, který zahrnuje koleje pro pohyb železničních kolejových vozidel.

Technické aspekty jsou pokryty mezinárodním doporučením OIML R106

Výše uvedené definice obsahují i pojmy jako „zboží“ a „hotově balené zboží“. Podívejme se tedy na tento druhý pojem podrobněji především z pohledu vah.

4 Váhy a hotově balené zboží

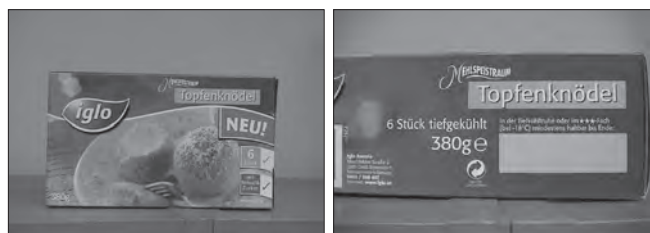
Automatické i neautomatické váhy jsou ve významné míře zastoupeny také při výrobě a kontrole takzvaného hotově baleného zboží. V této oblasti se používají váhy gravimetrické plnicí, dávkovací váhy, kontrolní váhy, etiketovací váhy a váhy s tiskem cenových etiket.

Protože vlastní problematika hotově baleného zboží je poměrně široká, navíc, různé kategorie hotově balených výrobků mohou podléhat různě legislativně, zaměříme se v této části pouze na tuto oblast z hlediska použití vah ve výrobě takovýchto výrobků (pro získání přehledu o legislativě a systému kontrol doporučuji čtenářům navštívit stránky ÚNMZ, kde lze nalézt sborník technické harmonizace věnovaný problematice hotově baleného zboží).

Pro lepší představu o podobě hotově baleného zboží si alespoň uveďme dva typické příklady.



Obř. 1: Hotově balené zboží – množství deklarováno objemem



Obr. 2: Hotově balené zboží – množství deklarováno hmotností

4.1 Využití vah ve výrobním procesu hotově baleného zboží

Výrobce je povinen zajistit vlastní kontrolu tak, aby při kontrole prováděné kompetentním orgánem prokázal splnění všech, legislativou daných, kritérií na množství obsahu. Striktní pravidla pro kontrolu prováděnou výrobcem nejsou stanovena, ale výrobce musí pro měření použít vhodná měřidla, například ověřené váhy. Pro svou kontrolu může použít jak stoprocentní kontrolu, tak i statistické zkoušky. Při stoprocentní kontrole (jsou kontrolovány všechny vyrobená balení) výrobce využívá váhy s automatickou činností AWI, které jsou schopny třídít výrobky podle předem nastavené hodnoty (vyřazovat vadné výrobky na konci procesu výroby).

Při statistické kontrole výrobce využívá manuálního vážení na vahách s neautomatickou činností (NAWI).

4.1.2 Použití vah s neautomatickou činností

Pro rozhodování o vhodnosti vah pro určitá balení lze specifikovat závislost mezi velikostí ověřovacího dílku a nominální hodnotou hotového balení a na tomto základě vygenerovat přehlednou tabulku.

Hodnota ověřovacího dílku vah (e)	Jmenovitá hodnota HBZ	
	Třída II	Třída III
< 0,1g	Všechna HBZ	-
0,1 g	≥ 5 g	≥ 5 g
0,2 g	≥ 10 g	≥ 10 g
0,5 g	≥ 25 g	≥ 25 g
1 g	≥ 110 g	≥ 110 g
2 g	≥ 330 g	≥330g - ≤1000g a ≥1330g
5 g	≥ 1670 g	≥1670g - ≤2500g a ≥3330g
10 g	≥ 3330 g	≥3330g - ≤5000g a ≥6670g
20 g	≥ 6670 g	≥6670g
> 20g	Nelze použít	

4.1.3 Použití vah s automatickou činností

Technické požadavky na tyto váhy jsou předmětem mezinárodního doporučení OIML R51. Obecně se jedná o zaříze-

ní vestavěná do plnicích linek, přes která kontinuálně putují kontrolované výrobky a je přítom měřena jejich hmotnost.

Pro metrologickou specifikaci těchto vah se používají dvě kritéria:

- maximální systematická chyba odvozená od velikosti ověřovacího dílku a
- maximální náhodná chyba (standardní odchylka) závislá na třídě přesnosti vah třídy X(x).

Na základě těchto kritérií lze opět vygenerovat přehlednou tabulku, která výrobcem usnadní rozhodování o tom jaké váhy pro vlastní kontrolu použít.

Hodnota ověřovacího dílku vah (e)	Jmenovitá hodnota HBZ	
	Pro (x) ≤ 1	Pro (x) > 1
0,1 g	≥ 5 g	Nelze použít
0,2 g	≥ 10 g	
0,5 g	≥ 25 g	
1 g	≥ 110 g	
2 g	≥330g - ≤1000g a ≥1330g	
5 g	≥1670g - ≤2500g a ≥3330g	
10 g	≥3330g - ≤5000g a ≥6670g	
20 g	≥6670g	
> 20g	Nelze použít	

Obě výše uvedené tabulky vychází z praktických zkušeností, nepředstavují striktní nařízení dané předpisy, ale lze je pro výrobce doporučit jako praktický nástroj při rozhodování o použitelnosti vah v procesu kontroly.

5 Závěr

Je tedy zřejmé, že praktické aplikace všech druhů a kategorií vah je velmi široká. Váhy zasahují prakticky do všech oblastí běžného života. Metrologie hraje v oblasti vah tedy velmi významnou roli a je zde důležitá i znalost legislativy a to nejen pro pracovníky státní metrologie, ale i pro výrobce a uživatele vah.

Literatura

- [1] ČSN EN 45501+AC: Metrologické aspekty vah s neautomatickou činností (1995)
- [2] Směrnice 2009/23/EC Evropského parlamentu a Rady z 23. dubna 2009 o vahách s neautomatickou činností
- [3] Mezinárodní doporučení OIML R 76 - 1: Váhy s neautomatickou činností. Část 1: Metrologické a technické požadavky – zkoušky (2006)
- [4] Nařízení vlády č. 326/2002 Sb.
- [5] Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2004/22/ES ze dne 31. března 2004 o měřicích přístrojích
- [6] Mezinárodní doporučení OIML R-51: Kontrolní a dávkovací váhy s automatickou činností

VÁŽENÍ V OBLASTI SILNIČNÍ DOPRAVY

Abstrakt

Článek popisuje problematiku vážení silničních vozidel a uvádí rešerši v současnosti používaných technologií vážení v této oblasti s porovnáním jejich vhodnosti pro různé aplikace a srovnání dosahovaných přesností a nejistot měření s ohledem na významné ovlivňující faktory.

1 ÚVOD

Vážení v oblasti silniční dopravy, které z hlediska z pohledu zákona spadá do oblasti legální metrologie se nazývá kontrolní vážení a je v České republice prováděno v souladu s platným zněním zákona č. 13/1997 Sb., o pozemních komunikacích, konkrétně pak podle ustanovení § 38a až § 38c. Vážení může probíhat buď pevně zabudovanými nebo přenosnými vahami pro stacionární kontrolní vážení (tj. vážení na místě stojícího vozidla) nebo vahami určenými pro vážení za pohybu a to za tzv. pomalé jízdy (v praxi se za pomalou jízdu považuje přejezd váženého vozidla za rychlostí 5 km/h až 20 km/h) nebo při vysokých rychlostech (obvykle 20 km/h až 90 km/h). Pro toto kontrolní vážení lze tedy využít celou řadu vážících technologií, které se ale mohou poměrně lišit co do přesnosti, nároků na instalaci, způsobů kalibrace, ověřování apod.

2 Způsoby kontrolního vážení, používané technologie a jejich možnosti

2.1 Statické vážení

Při tomto způsobu vážení lze zjišťovat následující parametry:

- měření celkové hmotnosti,
- zjišťování zatížení na nápravy, skupiny náprav a jednotlivá kola.

K tomu lze použít váhy s neautomatickou činností a to buď

- mostové váhy nebo
- přenosné váhy pro zjišťování zatížení na kolo, zatížení na nápravu a celkové hmotnosti silničních vozidel.

Váhy s neautomatickou činností – mostové váhy

Na těchto vahách lze určovat celkovou hmotnost silničních vozidel. Je samozřejmě možné při použití vhodného počtu mostů a jejich rozměrů, případně pojížděním váženého vozidla, pokud rozložení mostů nedovoluje tyto parametry určit při jednom najetí na váhy, docílit i možnosti určovat na takovýchto vahách zatížení na jednotlivých nápravách a skupinách náprav, nicméně legislativa ČR takovéto vážení neupravuje. Z hlediska legislativy musí tato měřidla splňovat:

- Zákon o metrologii č. 505/1990 Sb. v platném znění a jeho příslušné prováděcí předpisy.
- Požadavky nařízení vlády č. 326/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na váhy s neautomatickou činností.

- Metrologické požadavky jsou dány normou ČSN 45501 – Metrologické aspekty vah s neautomatickou činností a mezinárodním doporučením OIML R 76-1.

Při splnění výše uvedených předpisů lze tyto váhy považovat za stanovené měřidlo z hlediska platné legislativy a využívat je pro vybírání poplatků a pokut spojených s překročením limitů parametrů hmotnosti daných platnou příslušnou legislativou.

Váhy s neautomatickou činností – přenosná měřicí zařízení pro zjišťování zatížení na kolo, zatížení na nápravu a celkové hmotnosti silničních vozidel

Na těchto vahách lze určovat celkovou hmotnost silničních vozidel, zatížení na nápravu, skupinu náprav a na jednotlivých kolech. Z hlediska legislativy musí tato měřidla splňovat:

- Základní požadavky nařízení vlády č. 326/2002 Sb., ze dne 19. 6. 2002, kterým se stanoví technické požadavky na váhy s neautomatickou činností.
- Zákon o metrologii č. 505/1990 Sb. v platném znění.
- Metrologické požadavky jsou dány normou ČSN 45501 – Metrologické aspekty vah s neautomatickou činností a mezinárodním doporučením OIML R 76-1 a metrologickým předpisem MP 009-04 pro přenosné měřicí zařízení pro zjišťování zatížení na kolo, zatížení na nápravu a celkové hmotnosti silničních vozidel pro účely kontroly provozu na pozemních komunikacích.

Při splnění výše uvedených předpisů lze tyto váhy považovat za stanovené měřidlo z hlediska platné legislativy a využívat je pro vybírání poplatků a pokut spojených s překročením limitů parametrů hmotnosti daných platnou příslušnou legislativou.

U výše uvedených způsobů vážení je nutno měřit další vyžadované parametry vozidel (rozvory, dílčí rozvory atd.) manuálně pomocnými měřidly.

2.2 Dynamické vážení (vážení za pohybu)

- Měření celkové hmotnosti.
- Zjišťování zatížení na nápravy, skupiny náprav a jednotlivá kola.

Definice vážení za pohybu:

Vážení silničních vozidel za pohybu představuje měření působení kol nebo náprav vozidla prostřednictvím senzorů, které jsou obvykle umístěny na vozovce nebo jsou vestavěny přímo do vozovky a pomocí vhodného algoritmu je odhadována, těmto vlivům odpovídající, statická zátěž nebo hmotnost.

Obecně existují dva hlavní přístupy:

- vážení za pomalých rychlostí a
- vážení za vysokých rychlostí.

Vážení za tzv. pomalých rychlostí

Při vážení za pomalých rychlostí jsou vozidla odkloněna ze silničního provozu na speciální vážní místo, které má

specifikované parametry a je zde váženo za rychlostí, které se pohybují v rozsahu 5 km/h až 20 km/h. Vážení probíhá pod dohledem obsluhy, případně policie. Tento způsob vážení je převážně používán pro účely zákona, tj. vymáhání poplatků nebo ho lze použít v určitých způsobech pro obchodní transakce. Přesnost tohoto měření se pohybuje v rozmezí 1% až 10%.

Měřidla používaná tímto způsobem se nazývají „Automatické váhy pro vážení silničních vozidel za pohybu“. Metody měření a jejich ověření vychází z Mezinárodního doporučení OIML R134.

Vážení za tzv. vysokých rychlostí

Při vážení za vysokých rychlostí jsou senzory umístěny přímo v pružích vozovky a všechna projíždějící vozidla jsou automaticky zaznamenávána za rychlostí, kterými se po vozovce normálně pohybují. Tento způsob kontrolního vážení může sledovat několik cílů. Může to být získávání statistických údajů o provozu vozidel, monitorování provozu vozidel a využívání při projektování pozemních komunikací. Pro tyto aplikace je přesnost v rozsahu od 10 % do 25 %, vzhledem k statickému zatížení, plně dostačující. V současné době je technická úroveň systémů taková, že při měření celkové hmotnosti lze dosáhnout přesnosti 5 % při určování celkové hmotnosti a lze je tedy vzhledem k současné právní úpravě využít i v oblasti legální metrologie („direct law enforcement“).

3 Systémy pro vysokorychlostní vážení

Povšimněme si níže blíže technologií, které jsou používány pro tzv. vysokorychlostní vážení.

3.1 Původní účel těchto zařízení:

- monitorování silničního provozu,
- kontrola přetížení mostů,
- získávání podkladů pro specifikace investic do oprav pozemních komunikací,
- Law enforcement – vymáhání poplatků za přetížení (ve většině států EU ale pouze jako část systému tzv. předvýběr).

U posledně zmíněného jsou HS-VIM při tomto využití umístěny v dopravním pruhu, kde vozidla jedou dovolenou rychlostí a VIM systém vybere pravděpodobně přetížené vozidlo, které je pak odkloněno na vážní stanoviště s vázicím zařízením legálně použitelným pro tyto účely.

Hmotnostní parametry zjišťované pomocí vážení za pohybu:

- zjišťování zatížení na jednotlivá kola respektive montáže,
- zjišťování zatížení na nápravy respektive skupiny náprav,
- zjišťování celkové hmotnosti.

Parametry jsou uvedeny v pořadí, ve kterém systémy pro vážení za pohybu (dále jen WIM) generují příslušné hodnoty při algoritmu vyhodnocení výše uvedených hmotnostních parametrů.

Kromě parametrů plynoucích z definice dynamického vážení lze WIM systémy rovněž využít k měření okamžitých

silových účinků náprav silničních vozidel na vozovku. Zjišťování těchto parametrů však není předmětem kontrolního vážení.

3.2 Předpisy a specifikace používané v současnosti pro posuzování WIM systémů

Během vývoje WIM systémů došlo k významnému pokroku ve specifikování této problematiky různými předpisy a dokumenty. Je to především americká norma ASTM E 1318-00 a evropská specifikace COST 323 verze 3.0, z roku 1999. Tyto dva dokumenty využívají statistických metod pro určování přesnosti s použitím konfidenčního intervalu (95%) na rozdíl od mezinárodního doporučení OIML R134, který využívá systému maximálních dovolených chyb a odchylek. Na základě dokumentu COST 323 je v současnosti zpracovávána evropská norma pro tento druh měřidel.

3.3 Technologie používané WIM systémy

V současnosti používají WIM systémy různé technologie – senzory pro snímání dynamických sil. V zásadě lze tyto technologie rozdělit do dvou kategorií. Senzory, které lze kalibrovat staticky a které kalibrovat staticky nelze.

Senzory s možností statické kalibrace:

- tenzometrické snímače/bending plate,
- piezo-quartz senzory,
- kapacitní pásy,
- fibro-optické senzory.

I u těchto typů senzorů (kromě tenzometrických snímačů) je statická kalibrace velmi problematická, a to z důvodu velmi malé plochy senzorů a tedy obtížnosti aplikování kalibrační zátěže. Navíc podmínky zatěžování se u těchto typů senzorů liší od zatěžování způsobeného vozidly za provozu a nemusí docházet k integrování signálu. Proto se z těchto důvodů používá statická kalibrace především u systémů pro vážení za pomalých rychlostí, které využívají tenzometrické snímače zatížení.

Senzory staticky nekalibrovatelné:

- piezo-keramické kabely,
- piezo-polymerové kabely.

Podstatou technologie je převod aplikované síly (deformace vzniklé aplikovanou silou) nebo tlaku na elektrický signál vztažený k velikosti a směru síly nebo tlaku. Rezistivní senzory převádí působící sílu změnou jejich elektrického odporu.

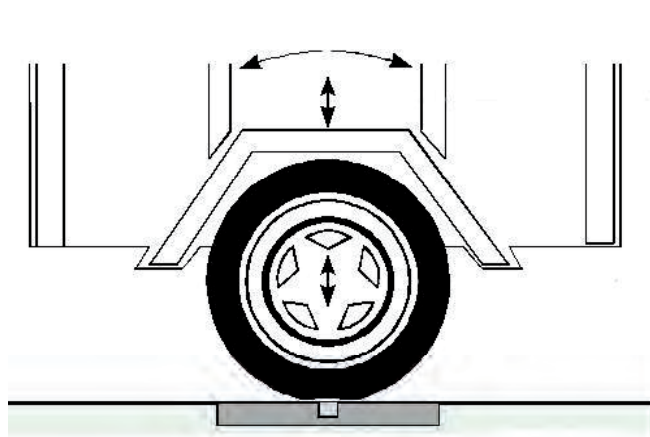
Pásové senzory jsou instalované kolmo na osu vozovky o délce rovnající se šířce nebo polovině šířky vozovky. Lze říci, že většina současných systémů využívá technologie quartzových senzorů ve formě pásů. Příklad této technologie je patrný z obrázku níže.

Systém se skládá ze dvou nebo více sad senzorů umístěných v mělkých drážkách přímo ve vozovce. Senzory pracují na piezo-elektrickém principu – výstupní napětí je proporcionální působící síle. Detektorové smyčky, které jsou součástí systému, zaznamenávají přítomnost (nebo nepřítomnost) vozidla a optické senzory detekují správnost přejíždění všech vážních senzorů vozidlem.



Obr. 1: quartz strip senzor

Dva nejvíce rozšířené typy WIM Senzorů (Bendinnig plates a strip sensory)



Obr. 2: Porovnání technologie bending palte a strip senzor

3.4 Metrologické a technické parametry WIM systémů

Metrologické a technické požadavky na WIM systémy podrobně specifikuje již výše zmíněný evropský předpis COST 323 „Weigh-in-motion of road vehicles, neboli tzv. evropská specifikace těchto systémů. Jako aktuální je v současné době k dispozici verze 3.0 z roku 1999.

V následujícím rozboru se soustředíme na parametry týkající se přesnosti systémů, postupů pro ověření jejich přesnosti a úrovně spolehlivosti WIM systémů (konfidenční úrovně ve vztahu k metodám a třídám přesnosti) podle specifikace COST.

3.4.1 Přesnost WIM systémů

Při specifikování přesnosti WIM systémů z principu klasifikace založeném na přiřazení konfidenčního intervalu δ při odpovídající úrovni spolehlivosti π . Tato úroveň spolehlivosti závisí na podmínkách zkoušek při použití referenčních vozidel, tedy na zvoleném plánu zkoušek a velikosti zkušební vzorku.

Třídy přesnosti – klasifikace WIM systémů

Protože dynamické efekty vzniklé interakcí vozovky a vozidla ovlivňují ve velké míře přesnost WIM systému, jsou tolerance pro jednotlivé parametry (zatížení na nápra-

vu, skupinu náprav, nápravu náležející do skupiny náprav a celková hmotnost) odlišné. V tabulce níže jsou uvedeny jednotlivé tolerance v % (třídy přesnosti) které lze přiřadit WIM systému.

Tolerance WIM systému

Parametr	Oblast působnosti	Třída přesnosti (konfidenční interval δ %)						
		A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)	E
Celková hmotnost	> 3.5 t	5	7	10	15	20	25	> 25
Zatížení na nápravu	> 1t							
Skupina náprav		7	10	13	18	23	28	> 28
Samostatná náprava		8	11	15	20	25	30	> 30
Náprava ve skupině		10	14	20	25	30	35	> 35

Číselné označení třídy 5, 7, 10, 15, 20 a 25 je v souladu s OIML R 134 a umožňuje použití jakékoliv třídy lepší než A(5) nebo interpolované třídy (např. 13).

Jak již bylo naznačeno, současné WIM systémy mohou být zařazeny do třídy A(5) nebo B+(7). Při posuzování přesnosti WIM systému lze na základě zjištěných výsledků zařadit systém do více tříd přesnosti.

3.4.2 Výběr třídy přesnosti v závislosti na aplikaci WIM systému

Lze definovat tři oblasti použití WIM systémů v závislosti na jejich přesnosti:

a) Statistika

Ekonomické a technické studie, posuzování provozu na pozemních komunikacích a mostech, shromažďování dat atd. – přesnost **20 % až 30 %** (odpovídá třídě **D+(20)** a **D(25)**).

b) Předvýběr a infrastruktura

Detailní analýzy provozu, projektování komunikací, klasifikace vozidel a předvýběr pro legální vážení – přesnost **15 % až 20 %** (odpovídá třídě **B(10)** nebo **C(15)**)

c) Legální sféra

Vymáhání poplatků na základě příslušného zákona (samozřejmě toto závisí na legalizaci WIM systémů pro tyto účely v jednotlivých státech!) – přesnost **5 % až 10 %** (odpovídá třídě **A(5)** nebo **B+(7)**)

Použití takového systému by mohlo být výhodné v případech, kdy se vyžaduje kromě určování hmotnostních parametrů pro legální účely rovněž zjišťování dalších údajů týkajících se provozu na pozemních komunikacích, a když zároveň není v daném místě možné vážít odpovídající vzorek vozidel staticky.

3.5 Výběr metod pro kontrolu přesnosti, při jejich přejímání a při jejich průběžné kontrole.

Podstatou prováděných zkoušek je použití opakovaných přejezdů několika referenčních vozidel, tedy vozidel se známou hmotností, za daných teplotních a klimatických podmínek. Lze definovat různé zkušební postupy. Rozsah zkoušení může být tedy různý v závislosti na požadované úrovni spolehlivosti WIM systému a lze ho v tomto směru optimalizovat a snížit tak nutné náklady na zkoušku.

Podstatou je definovat požadavky na výběr zkušebních metod WIM systémů, u kterých je předpoklad použití pro legální účely, ve vztahu k režimu zkoušení: zkouška typu, prvotní ověření, kontrola v provozu.

Rozsah zkoušek se bude lišit v závislosti a uvedeném režimu zkoušení. Největší rozsah budou mít zkoušky pro schválení typu. Rozsah zkoušek pro ostatní režimy lze pak dále modifikovat.

Základem všech testovacích metod by měla být takzvaná zkouška reprodukovatelnosti při základní minimální úrovni pravděpodobnosti 95%. Tato zkouška je označena ve specifikaci COST jako R1. Zkouška představuje použití 4 typů vozidel při různých rychlostech a různým rozsahem přejezdů.

3.5.1 Zkouška typu

Při tomto režimu zkoušení je vyžadován největší počet přejezdů, tak aby zkouška byla co nejrepresentativnější. Při této zkoušce může být vyžadován zkušební plán, který reprezentuje až 120 přejezdů referenčních vozidel. Obvykle je zkušební plán rozložen do dvou dnů.

3.5.2 Prvotní ověření a kontrola v provozu

Při těchto režimech lze modifikovat respektive zredukovat zkušební plán na menší počet přejezdů, lze redukovat i počet referenčních vozidel, stále však musí být použity různé reprezentativní typy vozidel (nejméně tři). Celkový počet přejezdů lze oproti plánu pro zkoušku typu rovněž zredukovat.

3.6 Konfidenční úroveň

Při použití zkušební metody R1 v různých režimech zkoušky (zkouška typu, prvotní ověření a kontrola v provozu) se obecně používá úroveň pravděpodobnosti $\pi = 90\%$ až 95% . Pro legální aplikace, například vymáhání poplatků může být požadována vyšší úroveň spolehlivosti 99% nebo $99,5\%$. Se zvyšujícími se požadavky na úroveň spolehlivosti se zvyšuje rovněž i rozsah zkušebního plánu R1. Tabulka níže uvádí příklad pro zkoušku typu zkušební metodou R1 v závislosti na počtu zkušebních vzorků.

Maximální úroveň spolehlivosti v závislosti na metodě a počtu vzorků

Metoda/ velikost vzorku	10	20	30	60	120	> 120
R1	85	90,8	92,5	94,2	95,2	97,0

Vyšší úroveň spolehlivosti lze rovněž zajistit použitím (přeřazením systému) nižší třídy přesnosti.

Nespornou výhodou takovýchto systémů je však to, že kromě určování hmotnostních parametrů je lze využívat pro jiné účely spojené s provozem na pozemních komunikacích (statistika, infrastruktura, projektování). Systémy mohou být dále vybaveny technologií pro snímání vozidel, měření rychlosti a podobně. Další výhodou je jejich nasazení v lokalitách, kde se vyžaduje velký vzorek vážení, který nelze realizovat na statických systémech nebo systémech pro pomalé vážení nebo lokalita vylučuje nasazení těchto statických systémů a systémů vážení za pomalých rychlostí. Důležitým faktorem při rozhodování o nasazení těchto systémů do legální oblasti je znalost množství přetížených vozidel a znalost rozsahu jejich přetížení. Na základě těchto údajů lze pak usuzovat o vhodnosti aplikací těchto WIM systémů v legální oblasti. Jinými slovy je třeba stanovit poměr mezi reálnou přesností systémů a velikostí přetížení a množstvím přetížených vozidel pohybujících se na určitém území.

4 Typické instalace WIM systémů



Obr. 3: Instalace ve všech dopravních pruzích

Všechny pruhy jsou osazeny:

- registrace všech vozidel (klasifikace, rychlost, zatížení a identifikace),
- data na síti.

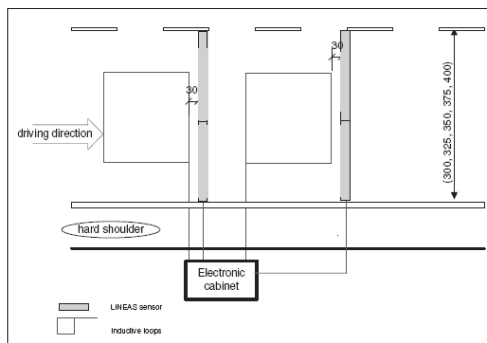
Co jsou systémy schopny měřit:

- zatížení náprav a skupiny náprav,
- celkové zatížení vozidla,
- kategorizace vozidel,
- měření rychlosti,
- časy přejezdů,
- lokalizace.

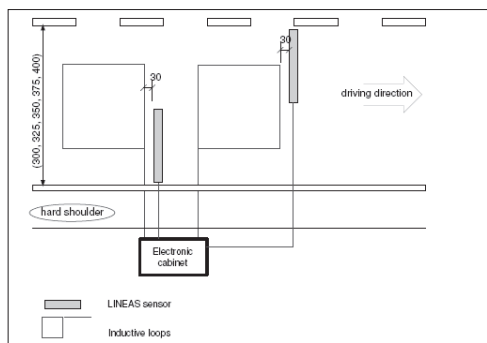
Při vybavení kamerovým systémem:

- fotografie vozidla,
- identifikace,
- identifikace nebezpečného nákladu.

Schématy typických instalací s technologií strip senzorů



Obr. 4: Standardní osazení dopravního pruhu



Obr. 5: Osazení dopravního pruhu s předsažením

5 Závěr

Je zřejmé, že využití technologií pro kontrolní vážení v oblasti silniční dopravy je velké a v poslední době zejména v oblasti tzv. vysokorychlostního vážení tyto technologie prodělaly značný pokrok. To umožňuje jejich nasazování v legální oblasti a na druhé straně klade vysoké nároky na orgány, které mají systémy používající tyto technologie



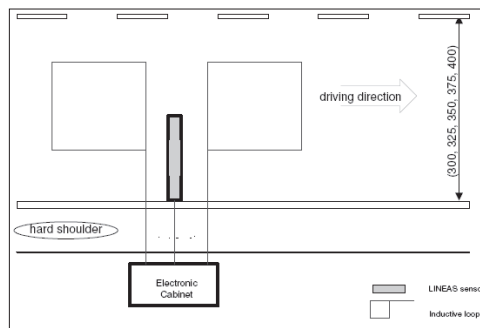
KALIBRACE VAH

Abstrakt

Článek popisuje problematiku měření hmotnosti v tzv. neregulované sféře, především oblast kalibrace vah s neautomatickou činností a ostatních vážicích zařízení. Článek především poukazuje na mezinárodní dokumenty, popisující tuto problematiku, dále popisuje různé metodiky kalibrace a způsoby vyjadřování nejistot měření při kalibraci vah. V článku je nastíněna problematika vyjadřování tzv. nejlepších měřicích schopností laboratoře a problematika jejich prezentace.

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 návaz-



Obr. 6: Osazení dopravního pruhu pomocí single senzoru

ověřovat. Metrologické a technické požadavky na měřidla, která jsou určena v ČR pro legální účely, jsou uvedeny v opatření obecné povahy, které stanoví technické a metrologické požadavky, metody zkoušení a ověřování pro vysokorychlostní váhy. Český metrologický institut je v této oblasti rovněž zapojen do projektů mezinárodní vědecké spolupráce EMRP.

Literatura

- [1] ČSN EN 45501+AC: Metrologické aspekty vah s neautomatickou činností (1995)
- [2] Směrnice 2009/23/EC Evropského parlamentu a Rady z 23 dubna 2009 pro váhy s neautomatickou činností
- [3] Mezinárodní doporučení OIML R 76 - 1: Váhy s neautomatickou činností. Část 1: Metrologické a technické požadavky – zkoušky (2006)
- [4] Nařízení vlády č. 326/2002 Sb.
- [5] Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2004/22/ES ze dne 31. března 2004 o měřicích přístrojích
- [6] OIML R 134 – 1 Zařízení pro vážení silničních vozidel za pohybu a měření zatížení na nápravě
- [7] COST 323 – European specification

2 Mezinárodní dokumenty pro kalibraci vah a jejich srovnání

Porovnejme nyní některé evropské dokumenty, na základě nichž se kalibrace v různých státech EU prováděly nebo provádějí. Jedná se především o metodiky DKD, COFRAC a EURAMET,

Tyto dokumenty a metodiky lze vzájemně porovnat v závislosti na následujících hlediscích:

- rozsah použitelnosti metodiky (použitelnost pro druhy vah, váživosti atd.),
- členění metodiky podle přesnosti vah a způsobu jejich zatěžování,
- použitelnost pro mechanické váhy,
- způsob nakládání s korekcemi (součástí nejistoty nebo ne),
- rozsah prováděných zkoušek při kalibracích,
- způsob vyjadřování nejistot, druh vyjadřované nejistoty (nejistota měření nebo nejistota používání vah), identifikace zdrojů nejistot, nároky na matematické vybavení (znalosti) uživatele metodiky,
- Uvádění příkladů.

2.1 Metodiky Deutschen Kalibrierdienstes (DKD)

Metodiky jsou vydány pracovním výborem pro hmotnost Německé kalibrační služby (DKD) ve spolupráci s Fyzikálně technickým spolkovým ústavem (PTB). Je třeba říci, že původní metodiky, které jsou dále analyzovány, jsou již nyní nahrazeny dokumenty, které implementují dokument EURAMET/cg-18/v.02 a odstraňují tak výše zmíněné důsledky nejednotnosti přístupů ke kalibracím vah. Berme tedy tyto metodiky a jejich analýzu jako příklad popisující problém harmonizace přístupů k těmto kalibracím.

Jednotlivé metodiky byly začleněny do směrnice DKD R 7-1, která se člení na tři oddíly (část 1, část 2 a část 3). Část 1 tvořila obecnou část směrnice a další části 2 a 3 tvořily konkrétní postupy a metodiky vypracované pro určité druhy vah podle zvoleného členění (způsob členění je popsán dále).

Metodiky jsou použitelné pro elektronické váhy s neautomatickou činností s automatickou indikací. Použití metodiky není limitováno váživostí a dělí se podle počtu dílků a povahy vah (počet rozsahů) na dvě oblasti pro váhy s jedním a více rozsahy s počtem dílků stupnice $n \leq 1.000.000$ a hodnotou dílku $d > 0,01$ mg a váhy jednorozsahové a s vícenásobným rozsahem s počtem dílků stupnice $n > 1.000.000$, nebo s hodnotou dílku $d \leq 0,01$ mg.

Kalibrace podle této směrnice se vztahují na hodnoty hmotnosti při zvyšující se zátěži.

Je zde snaha o dosažení určité harmonizace s Mezinárodním doporučením OIML R 76-1 respektive EN 45 501 (Metrologické aspekty vah s neautomatickou činností) v co největší míře ačkoliv se jedná o neregulovanou sféru.

Metodiky jsou vypracovány především pro elektronické váhy, nicméně jsou použitelné i pro mechanické váhy v případě, že se jedná o váhy s automatickou indikací.

Metodiky použité ve směrnici jsou tvořeny v rámci následujících požadavků:

- návaznost na národní etalon,
- údaj o (ne)přesnosti měření pro udávané hodnoty hmotnosti (netto údaje) bez korekce systematických odchylek při úrovni spolehlivosti přibližně 95 % podle směrnice DKD-3 a EA-4/02 ($k=2$). Jinými slovy korekce systematické odchylky je součástí udávané nejistoty (v celkové nejistotě je jednostranně zahrnuta střední relativní chyba),
- započtení vlivu prostředí v místě použití vah.

Kalibrace podle této směrnice se vztahují na hodnoty hmotnosti při zvyšující se zátěži. Zkoušky při kalibraci se omezují na zkoušky vážení a vážení s tárou, zkoušky excentricity a opakovatelnosti. Jako parametr při vyhodnocování se bere hodnota skutečného dílku (neuvažuje se metoda použití pomocných závaží – hledání klopného bodu digitální indikace a ani dílku s menší hodnotou než je skutečná hodnota dílku).

Pomocí metod uvedených ve směrnici se vyjadřují nejistoty, které jsou orientovány spíše jako nejistoty vah při používání (při kalibraci je zde však požadavek, aby byla kalibrace provedena za podmínek blízkých normálnímu užívání). Viz metoda vyjadřování chyby a nejistoty v místech stupnice, kde nebyla provedena kalibrace (vyjádření pomocí rovnice), tedy podle této metody lze k libovolným zobrazeným údajům přiřadit odpovídající nejistoty. Dokument striktně nedělí nejistoty na dvě kategorie A a B. Uživatel metodiky musí mít znalosti z vyjadřování nejistot a základů teorie pravděpodobnosti. Neuvažuje se nejistota plynoucí z dlouhodobé stability etalonu. Pro vyjádření nejistoty plynoucí s excentrického zatížení a s digitální indikace je používáno rovnoměrné rozdělení. Nejistota plynoucí z vlivu teploty je určována způsobem, aby reflektovala případy používání vah (nikoliv podmínky při kalibraci).

Směrnice obsahuje v částech 1 a 2 konkrétní příklady zpracování naměřených hodnot a výpočtů nejistot.

2.2 Metodika COFRAC 2089

Název dokumentu je „Specifické požadavky, které se vztahují ke kalibraci vah s neautomatickou činností“.

Účelem tohoto dokumentu je definovat specifické požadavky při akreditacích ve vztahu ke kalibracím vah s neautomatickou činností, které nejsou předmětem regulované sféry. Dokument má dále vztah k dokumentu COFRAC 2035 a COFRAC 2002.

Dokument má víceméně obecný charakter a vztahuje se z hlediska druhů vah k vahám s automatickou indikací. Dále není dokument dělen na dílčí postupy podle druhů vah. Pro váhy s poloautomatickou a neautomatickou indikací (mechanické váhy) ho lze použít jako základ pro specifické metodiky. Ačkoliv se dokument nezabývá regulovanou sférou, definice a pojmy ponejvíce vychází z EN 45501. Dokument vyžaduje návaznost na státní etalon a použití etalonových závaží splňující požadavky OIML R111. Dokument je k dispozici v anglickém jazyce.

Rozsah není omezen váživostí. Dokument uvádí všechny aspekty měření hmotnosti, které je nutno při kalibraci vah zohledňovat. Dokument nečlení metody kalibrace např. pod-

le počtu dílků. Obsahuje kapitoly, které řeší analýzu nejistot pro váhy s analogovou indikací.

Dokument popisuje řešení při určování nejistot v případě, že je indikace korigována a rovněž v případě, kdy korekce indikovaných hodnot není prováděna.

Dokument obecně dělí postup kalibrace do tří částí:

- Určení chyb indikací a jejich nejistot.
- Určení nejistoty vah.
- Návod pro určení výsledku při vážení objektu a nejistoty.

Část třetí lze považovat při analýze nejistot za problematiku vah při používání, kdy je dáván uživateli návod jak přepočítat v určitých případech indikaci vah na hmotnost váženého objektu. Dokument dále uvádí, že za akreditované lze považovat pouze části 1 a 2. Část třetí lze zmiňovat v kalibračním certifikátu jako informaci pro uživatele „pod čarou“.

Pro účely kalibrace jsou v dokumentu zmíněny zkoušky vážení, opakovatelnosti a excentricity. Podle dokumentu by způsob zatěžování měl odrážet reálné používání vah.

Dokument striktně dělí nejistoty na kategorie A a B. Jako základ pro vyjádření výsledků se bere velikost skutečného dílku, nicméně, je zde zmíněná a popsána metoda při použití přídavných závaží nebo dílku s nižší hodnotou.

Dokument se podrobně zabývá analýzou zdrojů nejistot a jejich vyhodnocením. Uživatel dokumentu musí mít pokročilé znalosti z matematiky fyziky a statistiky.

V části nejistot kategorie B používá dokument pro určení nejistoty plynoucí z digitální indikace, na rozdíl od ostatních zmíněných dokumentů, trojúhelníkové rozdělení pravděpodobnosti, čímž mírně zvyšuje nejistotu plynoucí z tohoto zdroje. V tomto ohledu zde dochází zřejmě i k mylné interpretaci a záměně nejistoty typu B za nejistotu typu A. V metodice použití přídavných závaží pro hledání klopného bodu (a použití dílku s menší hodnotou než je hodnota skutečného dílku) pak již používá rozdělení rovnoměrné. Pro určení nejistoty plynoucí s excentrického zatížení používá dokument trojúhelníkové rozdělení.

Dokument obsahuje podrobný rozbor týkající se určování driftu etalonů hmotností (dlouhodobé stability) a návody na posuzování a případné minimalizace tohoto efektu. Dokument řeší určování nejistoty plynoucí z vlivu teploty a uvádí i přehlednou tabulku vlivu tohoto efektu na různé druhy vah. Dokument řeší rovněž případ, kdy se při kalibraci kromě etalonových závaží používá i náhradní zátěž.

Dokument uvádí konkrétní příklady výpočtů.

2.3 Dokument EURAMET/cg-18/v.01

Dokument má název „Příručka pro kalibraci vah s neautomatickou činností“ a je vydáván organizací EURAMET a je k dispozici k volnému stažení na internetových stránkách EURAMET. Původně byl publikován jako Guide EA pod kódem EA-10/18.

Dokument má obecný charakter a je použitelný pro váhy s neautomatickou činností s automatickou indikací. Je tedy přednostně určen pro elektronické váhy. Uvádí požadavky na zkoušky prováděné při kalibracích, podrobnou analýzu zdrojů nejistot, kalkulace a metody vyjadřování výsledků měření a nejistot. Obsahuje specifické přílohy týkající se

jednotlivých aspektů měření hmotnosti, které by měly být brány na zřetel při kalibracích vah včetně konkrétních příkladů výpočtů. Dokument předpokládá použití etalonových závaží odpovídající požadavkům OIML R111 a jejich návaznost na státní etalon.

Dokument nečlení použité metody podle druhu vah (například podle velikosti a počtu dílků) a nedělí se na dílčí dokumenty, které by kalibrační postupy pro určité druhy vah obsahovaly. Jako způsob zatěžování preferuje použití zatěžování, které odpovídá praktickému použití vah tzn. vzrůstající nebo klesající zatížení, použití táry apod. Dokument řeší i případ, kdy se při kalibraci kromě etalonových závaží používá i náhradní zátěž.

Dokument dělí nejistoty na nejistoty indikace a nejistoty použitého zatížení. Z tohoto hlediska striktně nerozlišuje nejistoty kategorie A a B. Systematické odchylky nejsou obecně zahrnuty v nejistotách a vyžaduje se prezentování výsledku pomocí chyby a nejistoty. Nicméně dokument obsahuje samostatnou kapitolu hovořící o tzv. „globální nejistotě“, která používá metodu, kdy se systematické odchylky zahrnují do nejistoty. V každém případě se z hlediska dokumentu jedná o nejistotu, která má v certifikátu o kalibraci pouze informativní charakter a nebývá předmětem akreditované kalibrace.

Dokument popisuje pro účely kalibrace zkoušky vážení, vážení s tárou, zkoušky opakovatelnosti a excentricity. Doporučuje provádět zkoušky v podmínkách co nejvíce podobných podmínkám v praktickém použití, tak aby se výsledné nejistoty co nejvíce přibližovaly nejistotám při používání.

Dokument přednostně vyžaduje použití nejistoty kalibrace (tedy nejistoty měření při podmínkách kalibrace). Obsahuje však kapitoly, které řeší i nejistoty vah při používání a způsoby jejich určování a prezentace. Dokument podrobně popisuje možné zdroje nejistot a jejich analýzu. Pro vyjádření nejistoty plynoucí z digitální indikace a excentrického zatížení používá rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti. U nejistoty plynoucí z excentrického zatížení používá u nejistoty vztažené k podmínkám kalibrace parametr $\frac{1}{2}$, kterým odlišuje tuto nejistotu od nejistoty vztažené k podmínkám při používání vah. Uživatel dokumentu musí mít pokročilé znalosti z matematiky a statistiky.

Dokument v přílohách obsahuje konkrétní příklady výpočtů.

3 Podrobněji k dokumentu EURAMET /cg-18/v.01

Ačkoliv někteří členové technického výboru pro hmotnost EURAMET brali tento dokument na začátku s rezervou a s určitými výhradami, vyčítali mu především přílišnou obšáhlost a řekněme „handbookový“ charakter, je dnes jednoznačně materiálem, jehož implementací je možno řešit harmonizaci přístupů v oblasti kalibrací vah a je k tomu tak již v současné době v rámci Evropy přístupováno. Je důležité, že je k tomu přístupováno i u nás. Český metrologický institut jako kalibrační laboratoř má vytvořeny postupy kalibrací vah s neautomatickou činností na bázi tohoto dokumentu již od roku 2008. V rámci ostatních akreditovaných laboratoří se rovněž dosáhlo významného pokroku a to především

díky dvěma po sobě jdoucími úkoly technické rozvoje financované státem prostřednictvím ÚNMZ, které byly řešeny pod hlavičkou Českého kalibračního sdružení. Tyto projekty probíhaly ve spolupráci s Českým metrologickým institutem a s Českým institutem pro akreditaci. Cílem těchto projektů bylo vytvořit v praxi použitelné validované kalibrační postupy, které implementují podstatné kapitoly dokumentu EURAMET a staly by se nástrojem harmonizace v oblasti kalibrací vah tím, že jsou Českým institutem pro akreditaci přímo akceptovatelné. To velmi usnadní většině kalibračních laboratoří zabývajících se kalibrací vah život a to především tam, kde je potvrzení metrologické kvality vyžadováno normami ISO 9001 nebo ISO/IEC 17025. Takovými laboratorím se dostanou do ruky již validované postupy, které v praxi pokryjí většinu aktivit v oblasti vah. Použití takovýchto dokumentů umožní i sjednocení přístupů auditorů při akreditacích. Harmonizace této oblasti má tedy význam pro všechny zainteresované strany.

3.1 Základní aspekty EURAMET cg-18/v.01

Tento dokument obsahuje návody pro statickou kalibraci vah s neautomatickou činností s automatickou indikací (dále „váhy“), především pro

1. měření, která mají být provedena,
2. výpočty výsledků měření,
3. určování nejistoty měření,
4. obsah kalibračních certifikátů.

Předmětem kalibrace je podle tohoto dokumentu indikace poskytovaná vahami jako odezva na aplikované zatížení. Výsledky jsou vyjádřeny v jednotkách hmotnosti. Hodnota zatížení indikovaná vahami je ovlivněna místní gravitací, teplotou a hustotou zatížení a teplotou a hustotou okolního vzduchu.

3.1.1 Přístupy k nejistotám

Nejistota měření významně závisí na vlastnostech samotných vah, nejen na zařízení kalibrační laboratoře; do jisté míry může být snížena zvyšujícím se počtem měření provedených při kalibraci. Dokument nespecifikuje dolní a horní hranice nejistoty měření.

Je na kalibrační laboratoři a zákazníkovi, aby se dohodli na předpokládané hodnotě nejistoty měření, která je vhodná z hlediska použití vah a ceny za kalibraci.

3.1.2 Aspekt harmonizace

Ačkoliv není úmyslem tohoto dokumentu prezentovat jeden nebo několik jednotných postupů, jejichž použití by bylo povinné, poskytuje tento dokument obecný návod pro stanovení kalibračních postupů, jejichž výsledky mohou být považovány za ekvivalentní v rámci členů organizace SIM. Jakýkoliv takový postup musí obsahovat, pro omezený počet zkušebního zatížení, určení chyb indikací a nejistot měření přiřazených těmto chybám. Takovýto postup by se měl co nejvíce blížit činnostem při vážení, které jsou běžně prováděny uživatelem, např. vážení oddělených zatížení. Postupně při vážení i při vzrůstajícím a/nebo klesajícím zatížení, použití funkce vážení vyvažování táry.

Postup může dále obsahovat pravidla pro odvození informací pro uživatele týkající se chyb, přiřazených nejistot měření, indikací, které se mohou objevit za normálních podmínek použití vah a/nebo pravidla přepočtu získané indikace váženého objektu na hodnotu jeho hmotnosti nebo konvenční hmotnosti.

Informace uvedené v této příručce by měly být brány v potaz:

1. orgány akreditující laboratoře pro kalibrace vah,
2. laboratořemi akreditovanými pro kalibrace vah s neautomatickou činností,
3. zkušebnami, laboratořemi nebo výrobci používajícími kalibrované váhy s neautomatickou činností pro významná měření v rámci řízení kvality, která jsou předmětem QM požadavků (např. řady ISO 9000, ISO 10012, ISO/IEC 17025).

Terminologie použitá v tomto dokumentu je především založená na následujících existujících dokumentech:

- GUM pro výrazy související s určováním výsledků a nejistot měření,
- OIML R111 pro výrazy související s etalonovým závažím,
- OIML R76 (nebo EN 45501) pro výrazy související s funkcemi, konstrukcí a popisem metrologickými vlastnostmi vah s neautomatickou činností,
- VIM pro výrazy související s kalibrací.

3.2 Obecné aspekty kalibrace popisované dokumentem EURAMET

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 sledováním 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 vážící plošiny (misky), jsou pak tímto způsobem, pokud možno zahrnuty do naměřených hodnot a tudíž jsou zahrnuty v nejistotě měření.

4 Základní vztahy a rozbor vlivů

4.1 Zkušební zatížení a indikace

Základní vztah mezi zatížením a indikací

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

$$I \sim m \times g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} \right) \quad (4.1 - 1)$$

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.

4.2 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:

$$I_s = m_c \quad (4.2 - 1)$$

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):

$$I = m_c * g/g_s \{ 1 - (\rho_a - \rho_0) (1/\rho - 1/\rho_s) - (\rho_a - \rho_{as})/\rho_s \} \quad (4.2 - 2)$$

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

Vzorec 4.2 - 2 je dále zjednodušen v případech, kde některé hodnoty hustot jsou stejné:

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

$$I = m_c * \{ 1 - (\rho_0 - \rho_{as})/\rho_s \} \quad (4.2 - 3)$$

b) vážení tělesa se stejnou hustotou jako má justovací závaží:

$\rho = \rho_s$, pak opět (jako v případě výše))

$$I = m_c * \{ 1 - (\rho_a - \rho_{as})/\rho_s \} \quad (4.2 - 4)$$

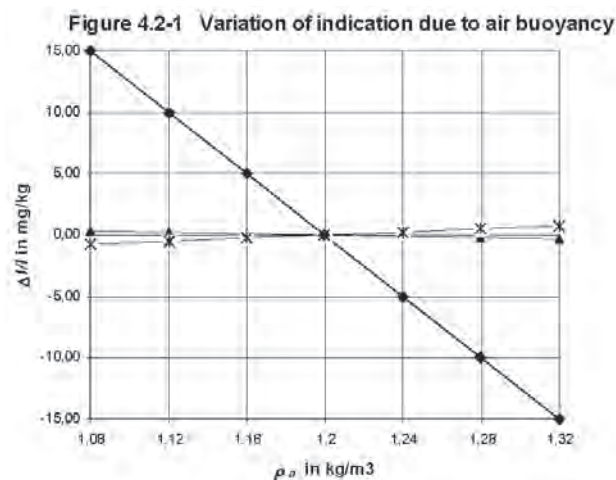
c) vážení ve stejné hustotě vzduchu jako v době justování:

$\rho_a = \rho_{as}$, pak

$$I = m_c * \{ 1 - (\rho_a - \rho_0) (1/\rho - 1/\rho_s) \} \quad (4.2 - 5)$$

Obrázek 4.2-1 ukazuje příklady velikosti relativních změn $\Delta I / I_s = (I - I_s) / I_s$ u vah justovaných etalonovým závažím $\rho_s = \rho_c$, při kalibraci etalonovým závažím o rozdílné aletypické hustotě.

Na obrázku níže je znázorněna změna indikace v důsledku vztlaku vzduchu



- 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.

4.3 Účinek konvekce

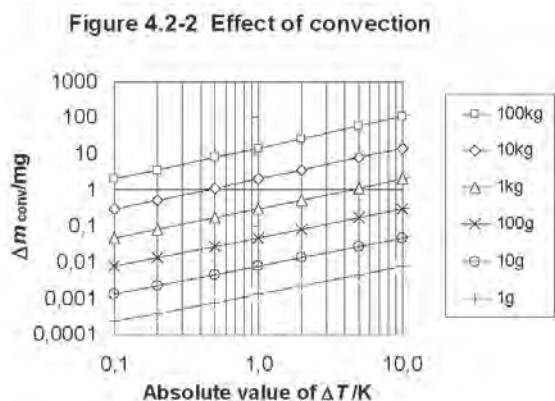
Tam, kde byla závaží převezena na místo kalibrace, nemusí mít stejnou teplotu jako váhy a jejich okolí. V tomto případě by mělo být zajištěno, aby se rozdíl teplot snížil v závislosti na cílené nejistotě na určitou míru.

Počáteční teplotní rozdíl ΔT_0 lze snížit na menší hodnotu ΔT aklimatizací za určitou dobu Δt ; toto nastává u malých závaží rychleji nežli u velkých.

Při položení závaží na nosič zatížení, způsobí aktuální rozdíl ΔT proudění vzduchu okolo závaží vedoucí k parazitickým silám, jejichž výsledkem je zdánlivá změna jeho hmotnosti Δm_{conv} . Znaménko Δm_{conv} je normálně opačné ke znaménku ΔT , jeho hodnota je větší u větších závaží než u malých.

Vztahy mezi jakýmkoli zmíněnými veličinami: ΔT_0 , Δt , ΔT , m a Δm_{conv} nejsou lineární a závisí na podmínkách výměny tepla mezi závažím a jejich okolím.

Na obrázku 4.2-2 „Účinek konvekce“ níže je uveden vliv velikosti zdánlivé změny hmotnosti ve vztahu k teplotnímu rozdílu pro některé vybrané hodnoty závaží.



Absolutní hodnota $\Delta T/K$
(Δm_{conv} je zdánlivá změna hmotnosti v důsledku konvekce)

Tento účinek by měl být vzat v úvahu buďto přizpůsobením závaží do té míry, aby zbývající změna Δm_{conv} byla zanedbatelná z pohledu nejistoty požadované zákazníkem nebo zahrnutím možné změny indikace do rozpočtu nejistoty. Tento účinek může být pro závaží vysoké přesnosti např. závaží třídy E2 nebo F1 podle R 111 již významný a musí být u přesných kalibrací zohledňován.

4.4 Referenční hodnota hmotnosti

K určení chyb indikací vah se používají etalonová závaží o známé hodnotě konvenční hmotnosti m_{cCal} . Jejich hustota ρ_{cCal} 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

$$E = I - m_{ref} \quad 4.4 - 1$$

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

$$m_{ref} = m_{cCal} + \delta m_B + \delta m_{conv} + \delta m_D + \delta m_{...} \quad 4.4 - 2$$

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 $\rho_s = \rho_c$. (4.4-2) pak udává obecné vyjádření pro tuto korekci

$$\delta m_B = -m_{cCal} [(\rho_{aCal} - \rho_0)(1/\rho_{cCal} - 1/\rho_c) + (\rho_{aCal} - \rho_{as})/\rho_c] \quad 4.4 - 3$$

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

A Váhy byly najustovány bezprostředně před kalibrací, takže

$$\rho_{as} = \rho_{aCal} \cdot \text{To zjednodušuje výše uvedený vztah na:}$$

$$\delta m_B = -m_{cCal} (\rho_{aCal} - \rho_0)(1/\rho_{cCal} - 1/\rho_c) \quad 4.4 - 4$$

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:

$$\delta m_B = -m_{cCal} [(\rho_{aCal} - \rho_0)(1/\rho_{cCal} - 1/\rho_c) + \delta \rho_{as}/\rho_c] \quad 4.4 - 5$$

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

$$\delta m_B = -m_{cCal} (\rho_{aCal} - \rho_0)/\rho_{cCal} \quad 4.4 - 6$$

4.5 Zkušební zatížení

Zkušební zatížení by mělo přednostně obsahovat závaží navázané na SI jednotku hmotnosti. Nicméně, jiná zkušební zatížení mohou být použita pro zkoušky mající komparativní charakter – např. zkouška excentrickým zatížením, zkouška opakovatelnosti – nebo pro prosté zatížení vah – např. předběžné zatížení, tárovací zatížení, které má být vyváжено, náhradní zatížení.

5 Závěr

Je třeba říci, že žádný jiný ucelený dokument takto srozumitelně a detailně neposkytuje rozbor vlivů, na kterých výsledek kalibrace závisí. Mám na mysli především rozbor účinků vztlačku vzduchu, jehož vliv je významný u velmi

přesných vah a u kalibrací, kde chceme dosáhnout co nejlepší nejistoty. V praxi je tento vliv i u přesných měření často neoprávněně zanedbáván, což v důsledku vede k neoprávněnému „nadlepšení“ výsledné nejistoty. Dokument dále podává srozumitelný rozbor u vlivů teplotní konvekce, který u jiných takto pojatých dokumentů, chybí. Lze tedy závěrem říci, že tento dokument je jednoznačně potřebným nástrojem harmonizace v oblasti kalibrací vah a lze ho jednoznačně všem solidním kalibračním laboratořím doporučit.

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 E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} a M_3 , 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] Glaeser, M.: 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.01: Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments (vydání 2007)
- [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)



ZÁVĚREČNÉ SLOVO

Vážení čtenáři,

dovolte nám jako autorům přílohy přidat ještě několik závěrečných slov.

Tato příloha se svým obsahem snažila popsat nejvýznamnější odborné oblasti měření hmotnosti a poskytnout čtenářům přehled o vlastním oboru – metrologii hmotnosti. Oboru, který musí v současné době reagovat na rychle se rozvíjející technologie jak v oblastech vědeckého výzkumu vedoucího

k nové definici jednotky hmotnosti, tak i v oblasti vážicí techniky. Příklady najdeme v oblasti automatického vážení a monitorování silničních vozidel nebo v aplikacích software a volně programovatelných zařízení při vážení.

Protože metrologie hmotnosti zahrnuje velmi širokou oblast měření, nebylo možné v této publikaci pojmout tento obor v celé jeho šíři. Předpokládáme však, že ty oblasti a témata, na které se zde nedostalo, budou čtenářům přiblíženy v samostatných článcích příštích čísel časopisu *Metrologie*.



Redakční rada:

Ing. Emil Grajciar (předseda), Ing. František Jelínek, CSc. (místopředseda), Ing. Jiří Kraus, Doc. Ing. Jiří Horský, CSc., Ing. Zdeněk Tůma, Ing. Milan Badal, Prof. Ing. Jaroslav Boháček, DrSc., Ing. Otokar Buzek, CSc., Ing. Pavel Ducháček, CSc., Ing. Jiří Kazda, Bc. Kateřina Čábelová, Ing. Jindřich Mlejnek, RNDr. Klára Popadičová, Jitka Hrušková.
PhDr. Bořivoj Kleník – šéfredaktor.

Časopis vychází 4 x ročně. Cena výtisku 80,- Kč, roční předplatné 320,- Kč + 10 % DPH + poštovné a balné. Vydavatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem, Českou metrologickou společností a Českým kalibračním sdružením. Sídlo vydavatele: ÚNMZ, Gorazdova 24, 128 01 Praha 2. IČO: 48135267. Povolení tisku: registrace MK ČR 6111, MIČ 46 676, ISSN 1210-3543.

Místo vydávání: Praha. Datum vydání: prosinec 2010. Nakladatelský servis, předplatné a inzerce: PhDr. Bořivoj Kleník, Bezdědice 19, 294 25 Katusice, tel./fax: +420 326 394 888, mobil: 603 846 527, e-mail: klenik@q-art.cz. Nevyžádané materiály se nevracejí. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři.

Tato Tematická příloha je součástí č. 4/2010 časopisu Metrologie. © ÚNMZ

Foto na obálce – Jan Kriho:

Závaží o hmotnosti 1 kg připravené k přesunu do vakuového komparátoru

Photo on the front page – Jan Kriho:

Weight of 1 kg ready for transportation into vacuum mass comparator

