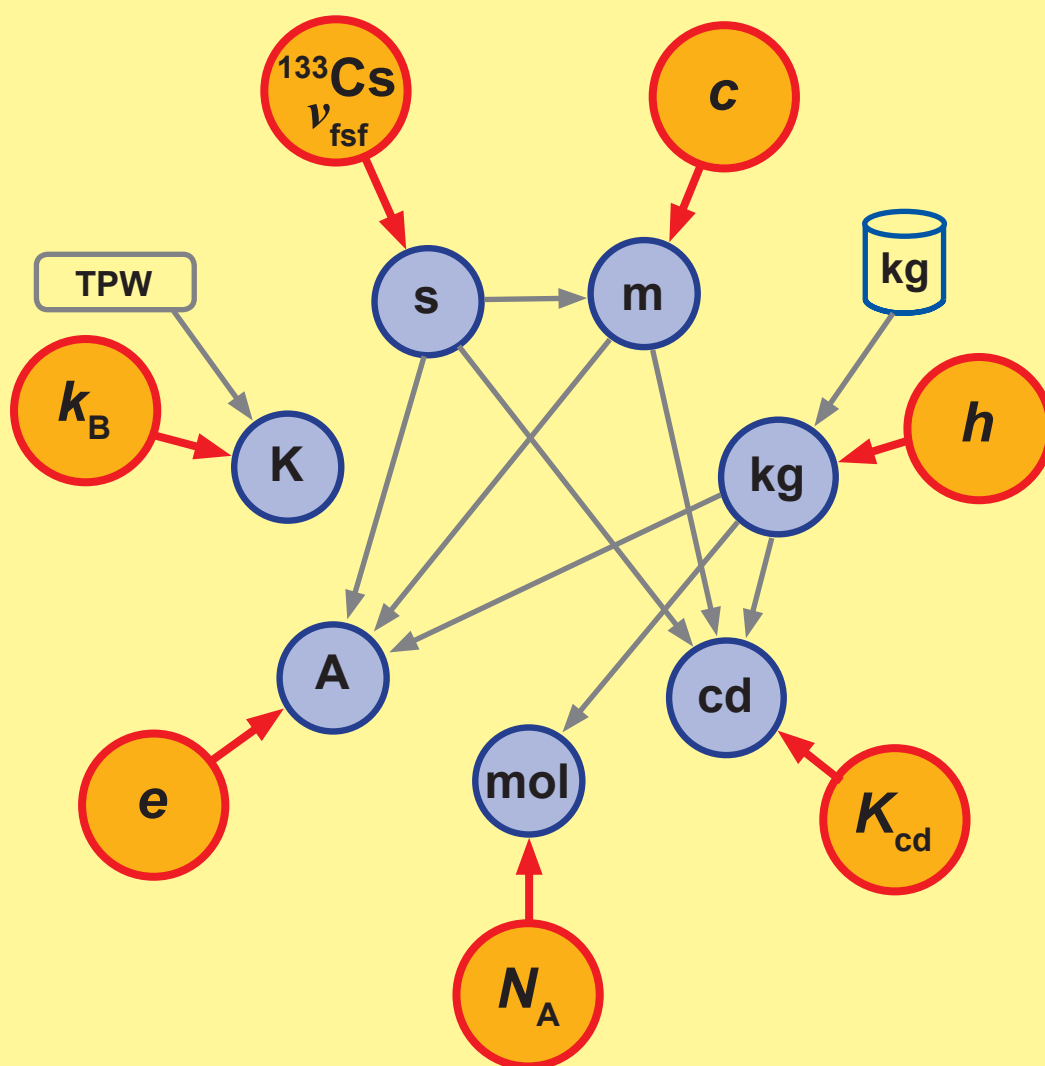


TEMATICKÁ
PŘÍLOHA č. 4/2011

METROLOGIE

VĚDECKÁ
LEGÁLNÍ
PRAKTICKÁ



ZÁKLADNÍ JEDNOTKY SOUSTAVY SI

Ing. Emil Grajciar, <i>ÚNMZ</i> Ing. František Jelínek, CSc., <i>Český metrologický institut</i> PŘEDMLUVA	2
Doc. Ing. Jiří Horský, CSc. Doc. RNDr. Jan Obdržálek, CSc., <i>MFF UK</i> ÚVOD	3
RNDr. Petr Balling, Ph.D. <i>Český metrologický institut</i> 1 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA DÉLKY - METR	6
Mgr. Jaroslav Zůda, Ing. Ivan Kříž <i>oba Český metrologický institut</i> 2 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA HMOTNOSTI - KILOGRAM	9
Ing. Alexander Kuna <i>Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR</i> 3 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA ČASU – SEKUNDA	14
Ing. Pavel Svoboda, CSc. <i>Fyzikální ústav AV ČR</i> 4 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA ELEKTRICÉHO PROUDU - AMPÉR	18
Dr. Ing. Radek Strnad <i>Český metrologický institut</i> 5 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA TERMODYNAMICKÉ TEPLoty - KELVIN	24
Ing. Jan Beránek <i>Český metrologický institut</i> 6 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA LÁTKOVÉHO MNOŽSTVÍ - MOL	29
Dr. Ing. Marek Šmíd <i>Český metrologický institut</i> 7 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA SVÍTIVOSTI - KANDELA	32
Ing. František Jelínek, CSc. <i>Český metrologický institut</i> ZÁVĚR	37
ZKRATKY	40

SI BASE UNITS

Ing. Emil Grajciar, <i>ÚNMZ</i> Ing. František Jelínek, CSc., <i>Czech Metrology Institute</i> FOREWORD	2
Doc. Ing. Jiří Horský, CSc. Doc. RNDr. Jan Obdržálek, CSc., <i>MFF UK</i> INTRODUCTION	3
RNDr. Petr Balling, Ph.D. <i>Czech Metrology Institute</i> 1 BASE UNIT OF LENGTH - METRE	6
Mgr. Jaroslav Zůda, Ing. Ivan Kříž <i>both Czech Metrology Institute</i> 2 BASE UNIT OF MASS - KILOGRAM	9
Ing. Alexander Kuna <i>Institute of Photonics and Electronics ASCR</i> 3 BASE UNIT OF TIME - SECOND	14
Ing. Pavel Svoboda, CSc. <i>Institute of Physics ASCR</i> 4 BASE UNIT OF ELECTRICAL CURRENT - AMPER	18
Dr. Ing. Radek Strnad <i>Czech Metrology Institute</i> 5 BASE UNIT OF THERMODYNAMIC TEMPERATURE - KELVIN	24
Ing. Jan Beránek <i>Czech Metrology Institute</i> 6 BASE UNIT OF AMOUNT OF SUBSTANCE - MOL	29
Dr. Ing. Marek Šmíd <i>Czech Metrology Institute</i> 7 BASE UNIT OF LUMINOUS INTENSITY - CANDELA	32
Ing. František Jelínek, CSc. <i>Czech Metrology Institute</i> SUMMARY	37
ACRONYMS	40

PŘEDMLUVA

Časopis Metrologie přináší v příloze ke čtvrtému číslu ročníku 2011 aktuální informace o připravované redefinici základních jednotek soustavy SI. Cílem je poskytnout čtenářům přehled dění v oborech, které odpovídají sedmi základním jednotkám. Podle toho jsou také uspořádány kapitoly textu.

Mezinárodní úřad pro váhy a míry (BIPM) a národní metrologické instituty vynaložily během posledních desetiletí značné úsilí na zdokonalení Mezinárodní soustavy jednotek (SI), a to nejen po stránce technické realizace etalonů, ale i při přípravě nového pojetí definic jednotek. Ukazuje se, že perspektivním (ne-li již současným) požadavkům na preciznost měření, přinejmenším v oborech špičkové vědy a technologie, lze vyhovět jen odstraněním závislosti jednotek na hmotných artefaktech a definováním jednotek SI vazbou na základní fyzikální konstanty (např. rychlost světla) nebo alespoň na neměnné vlastnosti vybraných atomů (např. energiové hladiny cesia). Příkladem úspěšnosti těchto snah je současná definice jednotky délky, metru – jeho délka je určena prostřednictvím pevně zvolené číselné hodnoty rychlosti světla ve vakuu. Ze sedmi základních jednotek SI je už jen kilogram definován na základě hmotného artefaktu, a to mezinárodního prototypu kilogramu. Na kilogram se dále odvolávají definice ampéru (prostřednictvím síly), molu a kandely (prostřednictvím energie). Podobně by bylo možné nahlížet i na kelvin, jehož definice i realizace se opírají o hmotný artefakt – realizaci trojného bodu vody.

Mezinárodní výbor pro váhy a míry (CIPM) dospěl k názoru, že je vhodné navrhnout revizi soustavy SI tak, že základní jednotky budou definovány prostřednictvím zadaných číselných hodnot fyzikálních konstant – buď přímo funda-

mentálních (např. Planckovy konstanty), nebo těch, u nichž lze předpokládat neproměnnost (např. Boltzmannovy konstanty). Návrhem se zabývala letošní 24. Generální konference pro váhy a míry (CGPM) a vzala ho v celém rozsahu na vědomí. Uskutečnění návrhu lze sice očekávat až za několik let, ale již nyní je rozumné uvažovat o jeho důsledcích pro realizaci jednotek pomocí etalonů a o dalších souvislostech. Letošní zasedání CGPM vyzývá ve svém usnesení k zahájení informační kampaně, upozorňující komunitu uživatelů a širokou veřejnost na záměr redefinovat základní jednotky SI a odborné instituce k tomu, aby podpořily úvahy o praktických, technických a legislativních důsledcích tohoto kroku tak, aby bylo možné získat připomínky a příspěvky širší vědecké a uživatelské veřejnosti.

Redakční rada časopisu Metrologie proto dne 12. 7. 2011 doporučila publikovat formou přílohy podrobnější informace a toto doporučení vydavatel časopisu akceptoval. Věříme, že vydání přílohy je mimo jiné vhodnou reakcí na výzvu CGPM.

Připravovaná redefinice základních jednotek se pravděpodobně téměř neprojeví ve sféře obchodních měření a v tradičním průmyslu, odrazí se ale zcela jistě ve vědeckém výzkumu, v rozvoji špičkových technologií a ve vzdělávacím procesu. Nový přístup k definici jednotek navíc vyvolává nutnost hlubšího pohledu do fyzikální podstaty měření a tím je pro každého metrologa inspirativní. Proto je redakční rada časopisu přesvědčena, že každého čtenáře zaujmou i informace mimo jeho vlastní užší obor.

Díky za podporu vydání přílohy patří panu Ing. M. Holečkovi, předsedovi UNMZ a za cenné podklady a připomínky panu RNDr. P. Klenovskému, generálnímu řediteli ČMI.

Za redakční radu Ing. E. Grajciar, Ing. F. Jelínek, CSc.

listopad 2011



Obr.: Logo užívané Mezinárodním úřadem pro váhy a míry

ÚVOD – MĚŘENÍ A SOUSTAVA JEDNOTEK, HISTORIE

1 Měření

Měření je činnost, jejímž cílem je stanovit hodnotu veličiny (délky, hmotnosti,...). Děje se tak porovnáním měřené veličiny s jednotkou této veličiny, jejíž hodnota musí být stanovena (definována). Každé vyjádření množství – výsledek měření – se skládá ze dvou složek. Jednou z nich je název některého známého množství stejného druhu jako množství, které se vyjadřuje – to je referenční, technicky nazváno **jednotka**. Druhou složkou je vyjádření toho, kolikrát je třeba tuto jednotku opakovat, aby se dosáhlo požadovaného (měřené) množství. Toto číslo se nazývá číselná hodnota měření. Číselná hodnota tedy vyjadřuje poměr zkoumaného množství veličiny k hodnotě jednotky.

Cílem této přílohy časopisu je informovat především o současném trendu vývoje soustavy jednotek SI, který navazuje na historický vývoj. V úvodu je uveden stručný přehled vývoje měřicích jednotek a jejich soustav. V následujících kapitolách se podrobněji popisuje historie každé základní jednotky, fyzikální princip její definice a možné důsledky navrhované redefinice pro realizaci jednotky a pro zajištění metrologické návaznosti výsledků měření. V každé kapitole zvláště je uveden seznam doporučené literatury; přehled použitých zkratk je uveden pro všechny kapitoly společně na konci přílohy.

2 Měření a rozvoj vědy a techniky

Zhruba do 18. století se prakticky vystačilo s jednotkami pro hmotnost, délku a objem. Teprve s rozvojem vědy, která postupně začala hlouběji rozvíjet mechaniku, a techniky, která vědu prakticky aplikovala, rostl okruh měřených veličin. Začalo se pracovat s elektrickými veličinami a později s jevy na úrovni molekul a atomů a ze všech těchto důvodů muselo být jednotek více.

V průběhu první vědecké a průmyslové revoluce v 16. a 17. století se v rozvoji vědy výrazně projevil dva odlišné přístupy:

- **Přístup teoretický** vyrůstal z filosofie; jeho tvůrci byli např. Descartes, Laplace, Galileo; rozvíjel se hlavně ve Francii a Itálii 17. století. Tak se rozvíjela nauka o teple, elektřině, magnetismu, chemie.
- **Přístup praktický** naopak zdůrazňoval experiment; reprezentován byl jmény jako Bacon, Boyle, Newton, Hooke a rozvíjel se hlavně v Anglii. Experimenty ovšem vyžadovaly zručnost a zkušenosti řemeslníků: (vzduchové čerpadlo, teploměr, optické přístroje...).

Druhá vědecká a průmyslová revoluce (1800 – 1850) se už vyznačuje masivním shromažďováním číselných dat. Jako příklady uveďme tabulky atomových vah, refrakčních indexů, teplotních vlastností látek. Měření se stalo nezbytným nástrojem obchodu, výroby, státní správy a dalších činností a silně se začala projevovat potřeba zavedení pořádku do soustavy měřicích jednotek.

3 Vznik metrické soustavy

Ve středověku vládli v jednotkách a mírách doslova chaos. Definice jednotek byly nedokonalé, míry byly časově nestálé a regionálně nejednotné, lišily se dokonce i podle měřeného zboží. Jednotky byly voleny dosti nahodile, bez ohledu na vzájemné souvislosti s jinými jednotkami. Proto soubor jednotek neměl charakter soustavy s vnitřními vazbami. Nejstarší jednotky délky například byly definovány ve vztahu k rozměrům lidského těla (stopa, loket, sáh) a nemohly být snadno a nezávisle reprodukovány vzhledem k rozmanitosti lidských postav.

Snahy po nalezení soustavy jednotek, která by byla odvozena od neměnných a univerzálních objektů vedly ke snaze odvodit je od **rozměrů Země**. Odtud počátek metrické soustavy, kde byla jednotka délky metr definována jako desetimiliontá část zemského kvadrantu. Snaha o zavedení metrické soustavy, vypracované ve Francii, pochází z doby francouzské revoluce a panování Ludvíka XVI. Roku **1790** pověřilo francouzské Národní shromáždění francouzskou Akademií věd vypracováním **návrhu jednotné měrové soustavy**. Významným přínosem byly zásady, na nichž bylo vybudování měrové soustavy založeno na **snaze opřít základní jednotky o přírodní veličiny, které se časem nemění, tedy o přírodní konstanty**. Ostatní jednotky by se pak odvodily z těchto základních jednotek. Tento soubor jednotek se nazýval **desetinná metrická soustava**.

Spolu se zavedením desetinné soustavy bylo nasnadě odvození dalších jednotek – například pro hmotnost, kde byla jednotka definována jako hmotnost decimetru krychlového vody za určitých podmínek, kalorie byla definována jako množství tepla, potřebné k tomu, aby se 1 litr vody ohřál o 1 Celsiův stupeň atd. Zvláštní postavení měly jednotky pro měření teploty a času, které se vytvořily historicky a tradicí nezměnily ani převratné změny při zavádění metrické soustavy. Pokus o zavedení desetinného dělení jednotek času (podniknutý v revoluční Francii) neuspěl.

Poznamenejme, že v době vzniku metrické soustavy se rozvíjela mechanika odděleně od zkoumání elektrických jevů a nebylo ani řeči o systému jednotek pro měření elektrických veličin. Ty se pro tehdejší experimenty volily zpravidla ad hoc. Teprve mnohem později vedly objevy silového působení elektrického náboje a elektrického proudu k myšlence propojení jednotek elektrických veličin s jednotkami mechanickými. Podrobnosti najde čtenář níže a také v [2] (str. 183).

Velmi podstatnou výhodou metrického systému bylo zavedení a důsledné používání dekadických násobků a dílů jednotek, které velmi zjednodušilo a zpřehlednilo počítání i pochopení velikosti měřené veličiny. Byly stanoveny předpony a symboly jednotně používané od 10^{24} násobku jednotky až do 10^{-24} násobku jednotky a jednotně používané symboly pro tyto násobky. To velmi zpřehlednilo vyjadřování i počítání. Jak složité jsou systémy nepoužívající dekadické násobky, je zřejmé třeba na délce u imperiálního

ZÁKLADNÍ JEDNOTKY SI – HISTORIE, SOUČASNOST, BUDOUCNOST

(UK) měrného systému (uvedeno v originále, bez překladu názvů jednotek). Platí tam:

12 inches	= 1 foot,
3 feet	= 1 yard,
22 yards	= 1 chain,
10 chains	= 1 furlong,
8 furlongs	= 1 mile;

je tedy úhrnem

5280 feet	= 1 mile,
1760 yards	= 1 mile.

Desetinná metrická soustava byla ve Francii legálně přijata v roce 1795. Podle provedených měření realizoval Lenor platinové a železné etalony jako **prototypy jednotek délky a hmotnosti**. Etalonem metru byla koncová měrka 4 x 25 mm, jejíž konce byly vzdáleny 1 m při teplotě tání ledu, etalonem kilogramu byl válec o výšce a průměru 39 mm. Oba prototypy byly uloženy ve státním archivu.

4 Další vývoj metrické soustavy

Postupné zdokonalování měřicích přístrojů odhalilo odchylky archivovaných prototypů od původních definic: vůči své definici byl metr asi o 0,2 mm kratší). Ještě podstatnější ale bylo, že ani samy definice nebyly dostatečně přesné pro stoupající požadavky na přesnost měření. Pokud by se ovšem měly „zpřesňovat“ – tedy měnit – prototypy, bylo by nutné opravit všechny míry a měřidla a přepočítat dosavadní měření, což bylo zcela neúnosné. Proto byly změněny definice metru a kilogramu ve prospěch prototypů: metr a kilogram je definován tím, co jsme vyrobili, nikoli tím, co jsme chtěli změřit.

Dalším ústupkem od původních zásad bylo ponechání původních dělení v čase: den na 24 hodin, hodina na 60 minut, minuta na 60 sekund. Původně měl být dekadický systém používán ve Francii i pro časové údaje, včetně udávání data. Ale ani tam se nový systém neprosadil a dosud používáme časové dělení vycházející až z dávné historie, z Babylonu. Minuty a sekundy byly zavedeny až ve 14. až 16. století našeho letopočtu.

Přes tyto nedůslednosti však i jiné státy mimo Francii brzy shledaly výhody metrického systému, spočívající v jednoduchosti a v logické výstavbě. Roku 1875 podepsalo 18 států **Metrickou konvenci**, tj. zavedení metrických jednotek do svých národních hospodářství. Mezi státy bylo i bývalé Rakousko-Uhersko i USA. V roce 1922 se stalo členem Metrické konvence i Československo, Česká republika pak po svém vzniku v roce 1993.

Uzlové body zavádění soustavy SI a soustav jí předcházejících na našem území je možné sledovat v následující tabulce. Skutečné zavádění soustavy nových jednotek ale bylo vždy doprovázeno stanovením různě dlouhých přechodných období, kdy se používaly staré i nové jednotky, v Rakousko-Uhersku se uplatňovaly i rozdíly mezi Předlitavskem a Zalitavskem (ještě po roce 1920 bylo velkým úkolem přepočítávání katastru na Slovensku na celostátně unifikované jednotky), a proto je úplná historie včetně výčtu zákonných aktů nesmírně složitá i v posledních sto letech a v jedné

zemi. Další podrobnosti najde čtenář v [1] a [2]. Zajímavé je, že zákon č. 16/1872 Ř.z. z 23. 7. 1871 [3] byl zrušen teprve zákonem č. 35/1962 Sb.

1871-2	V Rakousku-Uhersku stanoven metrický systém za základ soustavy – tedy ještě před podepsáním Metrické konvence! [3] .
1875	Rakousko-Uhersko přistoupilo k Metrické konvenci
1893	Rakousko získalo národní prototyp metru č. 15, prototyp kilogramu č. 33
1922	Československo přistoupilo k Metrické konvenci
1962	Zákon č. 35/1962 Sb. o měrové službě
1963	ČSN 01 1300 Zákonné měrové jednotky
1974	Usnesení vlády ČSSR o zavádění mezinárodní soustavy jednotek [4]
1980	od 1. ledna 1980 závazné užívání jednotek SI
1990	Zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii
1993	Česká republika přistoupila k Metrické konvenci

K zavádění SI soustavy u nás není možné nezpomenout úsilí, které mu věnoval Ing. Dr. Václav Šindelář, CSc. Akce zavedení SI byla široce publikována, sledována a koordinována. Starší metrologové ještě pamatují používání jednotky kilopond pro měření síly nebo přechod od vžitých jednotek gauss pro magnetickou indukci (soustava CGS) na jednotku tesla v soustavě SI.

5 Jiné soustavy jednotek

Metrická konvence v roce 1875 a následná definice soustavy jednotek se stala přelomem v přístupu k metrologii. Mimo „klasické jednotky“ v rámci soustavy jednotek dělaly potíže hlavně definice pro elektrické jednotky. Od původní myšlenky navázání na prototyp uložený v BIPM, kdy se ještě elektrické veličiny neuvažovaly, šel vývoj k realizaci metod umožňujících vytvořit primární etalon kdekoliv na světě. Metody klasické fyziky k realizaci takových etalonů pro elektrické veličiny, jako jsou např. proudové váhy pro realizaci ampéru, se neosvědčily a veškeré úsilí je nyní směřováno do oblasti kvantových jevů, které umožňují lépe definovat jednotky napětí, odporu a kapacity. Pro průmyslovou praxi tyto primární etalony (někdy označované jako „intrinsické“) mají hlavní vliv pouze na úrovni navázání referenčních etalonů. Pro rozvoj průmyslové metrologie je nejdůležitějším požadavkem možnost kalibrace v celém požadovaném rozsahu měření s ohledem na jakost vyráběné produkce.

Soustava jednotek MKS, „přímá dědička“ původní francouzské metrické soustavy, byla třírozměrná soustava jednotek používaná v mechanice. Měla základní jednotky

metr, kilogram a sekundu. V elektrotechnice se v té době používala mezinárodní praktická soustava elektrotechnických jednotek.

Po stanovení metru a podepsání Metrické konvence se používala třírozměrná **soustava jednotek CGS**, založená na základních jednotkách **centimetr, gram a sekunda**. Vznikla ve 2. polovině 19. stol. a doznala širokého uplatnění. Byla původně míněna pouze pro mechaniku, později se při snaze postihnout také veličiny elektrické a magnetické z ní vyvinuly další soustavy.

Soustava jednotek **CGS absolutní elektrostatičká**, značená zpravidla **ESU**, přijala Coulombův zákon elektrický s konstantou úměrnosti – permitivitou vakua ϵ_0 – definitoricky rovnou číslu jedna (bez rozměru). Dříve, než se pro některé jednotky přijaly samostatné názvy, byly jednotky jednotlivých veličin vyjadřovány slovně, např. elektrostatičká jednotka elektrického náboje apod. Později, po přijetí samostatných názvů, se vkládala před název předpona **ab-** (např. abampér, abvolt apod.)

Soustava jednotek **CGS absolutní magnetická**, značená zpravidla **EMU**, přijala Coulombův zákon magnetický s konstantou úměrnosti – permeabilitou vakua μ_0 – definitoricky rovnou číslu jedna (bez rozměru). Po přijetí samostatných názvů se vkládala před název předpona **stat-** (např. statampér, statvolt apod.) Uvedené dvě soustavy nešlo jednoduše sloučit, protože součin $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c_0^2$, kde je rychlost světla ve vakuu; má tedy rozměr i číselnou velikost různou od jedné.

Gaussova soustava jednotek CGS, značená **CGSG** (ale zpravidla jen **CGS** jakožto jediná přeživší z této rodiny), vyřešila dvoucestnost jednotek pro elektřinu a magnetismus. Pro elektrické veličiny používá jednotek soustavy ESU, pro magnetické veličiny opět jednotek EMU, vsouvá ale do vzorců „chybějící“ veličinu c_0 . Proto se též nazývá smíšenou soustavou jednotek CGS. Byla r. 1891 přijata pro obor elektřiny a magnetizmu. Definice jejich základních jednotek na základě definičního vztahu k jednotkám CGS („**absolutní**“ jednotky) byla však obtížná a nepřesná. Proto byly čtvrtým mezinárodním kongresem roku 1893 v Chicagu stanoveny experimentální způsoby realizace ohmu, ampéru a voltu. Jednotky definované těmito primárními etalony dostaly název „**internacionální**“, stejně jako jednotky z nich odvozené. Internacionální ohm byl realizován jako odpor rtuťového sloupce, internacionální ampér byl realizován jako proud, který za sekundu vyloučí určité množství stříbra z roztoku dusičnanu stříbrného a internacionální volt byl posléze realizován Westonovým článkem. Hlavním důvodem pro zavedení internacionálních jednotek byla předpokládaná možnost realizace primárních etalonů v každé dobře vybavené laboratoři, což s absolutními jednotkami nebylo možné. Později se ukázalo, že zavedené definice internacionálních jednotek nezaručují dostatečnou přesnost a stálost, zatímco přesnost absolutních jednotek se neustále zvyšovala. V roce 1933 bylo dohodnuto, že se přejde od internacionálních jednotek zpět k absolutním jednotkám, což vyžadovalo rozsáhlé experimentální práce pro stanovení převodních součinitelů mezi těmito jednotkami. Tyto práce a příslušná jednání byly přerušeny válkou, takže byly ukončeny teprve v roce 1948.

Soustava jednotek CSVA, je soustava základních jednotek: **centimetr, sekunda, volt a ampér**, navržená 1891 Perrym, dodnes známá pod názvem **Mieova** soustava jednotek. Hmotnost i síla jsou v ní tedy veličiny odvozené z výkonu (s jednotkou VA), délky (s jednotkou cm) a času (s jednotkou s).

Giorgim (1901) navržená úprava soustavy CGS pro potřeby elektřiny a magnetismu, měla základní jednotky **centimetr, gram, sekunda, ohm**. Byla tedy čtyřrozměrná. Hlavní odvozené jednotky elektrické a magnetické měly již dnešní názvy, ale hodnoty se poněkud lišily od absolutních hodnot dnešních. V roce 1933 bylo také dohodnuto přejít od soustavy CGS k soustavě **MKS** (m, kg, s). Rozhodnutím z roku 1954 byla přidána čtvrtá základní jednotka **ampér** a tato čtyřrozměrná soustava dostala název **MKSA**. Někdy se jí také říkalo soustava **Giorgiho**. Ujala se a rychle se rozšířila na aplikační sféru elektrotechniky. Po doplnění dalšími základními jednotkami (**kelvinem** pro teplotní rozdíl, **kandelou** pro svítivost a **molem** pro látkové množství) byla tato měrová soustava označena **Mezinárodní měrová soustava SI**.

6 Soustava jednotek SI

Tato soustava, Mezinárodní soustava jednotek, má označení SI odvozené z prvních písmen francouzského názvu System International d'Unités. (Protějškem soustavy jednotek je odpovídající soustava veličin označená **ISQ**, International system of quantities.) Soustava SI byla přijata v roce 1960 a její jednotky byly postupně dále upřesňovány. Mezi odvozené jednotky se samostatným názvem jsou v oblasti elektrotechniky významné zejména coulomb, farad, henry, hertz, ohm, siemens, tesla, volt, watt a weber. Soustava SI je na rozdíl od soustavy jednotek CGS mnohem universálnější, protože vyhovuje pro všechny fyzikální obory a zasahuje i do ostatních věd, zejména do chemie.

Elektrický proud není jako základní veličina zvolen nešťastněji. Je sice v elektrotechnice jednou z nejčastěji měřených veličin, ale „fundamentálnější“ veličinou je jistě náboj, protože proud je jen projevem pohybu náboje. Rovněž z hlediska realizace etalonů je ampér jakožto jednotka proudu zvolen dosti nešťastně. Při klasické realizaci podle definice se těžko získá potřebná přesnost. Všechny práce na realizaci etalonů založené na kvantových jevech vedou k etalonům napětí, odporu a kapacity.

Na rozdíl od Gaussovy soustavy byla v soustavě SI důsledně provedena racionalizace, výhodná pro elektrotechniku a vystihující polní pojetí elektromagnetismu (oproti „částicové“ soustavě Gaussově). Oba Coulombovy zákony (elektrický i magnetický) jsou pojaty nikoli jako přímá interakce částic (náboje elektrického resp. magnetického), ale jako jev zprostředkovaný polem (elektrickým resp. magnetickým). Protože koule, na kterou se pole při interakci rozšíří, má povrch $4\pi r^2$ a válec $2\pi r z$, vyskytují se tyto činitele v odpovídajících zákonech v trojrozměrném, resp. dvojrozměrném případě ve jmenovateli.

Racionalizací se dosáhlo toho, že se činitele 4π a 2π vyskytují jen v malém počtu vztahů a to v těch, kde je jejich

existence oprávněna teoreticky. Činitel 4π je oprávněn ve vztazích, které vyjadřují veličiny s kulovou symetrií, činitel 2π je obdobně oprávněn ve vztazích vyjadřujících veličiny s kruhovou symetrií.

7 Perspektivy rozvoje soustavy SI

Jak již bylo řečeno, vývoj vede k definicím měřicích jednotek co nejobjektivnějším, co nejméně závislým na artefaktech nebo na naší dobré či špatné volbě. Proto se obrací pozornost metrologů zejména k fundamentálním fyzikálním konstantám (rychlost světla ve vakuu, Planckova konstanta) nebo ke konstantám, u nichž lze právem předpokládat dlouhodobou neproměnnost (Boltzmannova či Avogadrova konstanta), případně alespoň k dobře známým a stabilním vlastnostem vhodných atomů (hyperjemná struktura cesia).

Jestliže je Q fundamentální konstantou, není na nás, abychom její hodnotu volili – je to neměnná vlastnost přírody. Jenže hodnota konstanty Q je součinem její jednotky $[Q]$ a číselné hodnoty $\{Q\}$ při této jednotce, tedy $Q = \{Q\} \cdot [Q]$, například $c = \{c\} \cdot [c] = 299\,792\,458$ m/s.

Můžeme nyní volit ze dvou činitelů a jít tak dvěma odlišnými cestami:

- Jestliže definujeme nezávisle jednotku $[Q]$, musíme určit číselnou hodnotu $\{Q\}$ měřením. To je případ dosavadního kilogramu – konstanty jako Planckova nebo Avogadrova musí být zjišťovány náročnými experimenty.
- Jestliže ale definujeme číselnou hodnotu $\{Q\}$ tak, aby vyhovovala našim potřebám, potom tato hodnota definuje jednotku $[Q]$. To je příklad metru – první jednotky definované již nyní popisovanou cestou – jestliže jsme zvolili hodnotu $\{c\}$ rovnou přesně 299 792 458, definovali jsme jednotku délky m (mimořádně již v roce 1983).

Čili – zvolením číselné hodnoty fundamentální konstanty definujeme jednotku. A to je právě přístup, který je zvolen pro připravovanou změnu definic jednotek a tímto přístupem se za-

bývá tato příloha. Pochopitelně budou číselné hodnoty fundamentálních konstant voleny tak, aby se zachovala kontinuita. To ostatně není nic nového – již současná definice metru byla postupně pozměňována tak, aby výsledky měření v určitém pásmu nejistoty odpovídaly vždy definici předchozí. I proto je stále kvadrant Země dlouhý 10^7 m (i když nová měření ukázala, že 10 002 288,2 m).

Poznámky:

Tento článek vznikl za podpory grantu MŠMT LA 09037.

V příloze používáme na mnoha místech termínu „výkonové váhy“ pro anglický ekvivalent „watt balance“. Označení „wattové váhy“ je nevhodné tím, že užívá jména jednotky tam, kde má být jméno veličiny. Jednotka je watt, veličina je výkon, takže jde jasně o výkonové váhy. Odůvodnění podporuje i to, že se běžně používá termínu „proudové váhy“, nikoli „ampérové váhy“.

Literatura

- [1] ŠINDELÁŘ V., SMRŽ L. *Nová soustava jednotek*. Státní pedagogické nakladatelství Praha, čtvrté, upravené vydání, 1968.
- [2] ŠINDELÁŘ V., TŮMA Z. *Metrologie, její vývoj a současnost*. Česká metrologická společnost, Praha, 1982.
- [3] *Gesetz No. 16/1872 Rgb. vom 23. Juli 1871, womit eine neue Mass- und Gewichtsordnung festgestellt wird*. Reichsgesetzblatt 29/1872. (K dispozici v Národním archivu ČR)
- [4] *Usnesení vlády ČSSR ze dne 17. ledna 1974, č. 7 o zavádění mezinárodní soustavy jednotek v československém národním hospodářství*. (K dispozici v Národním archivu ČR)
- [5] HORSKÝ, J. Měření a jeho vyhodnocení, historický přehled. In: *Sborník semináře „Nejistoty při kalibraci“*. ČKS 2011
- [6] OBDRŽÁLEK, J. Základní fyzikální jednotky po roce 2011. *Metrologie*, 2010 č. 7



1 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA DÉLKY – METR

V tomto příspěvku nepopisujeme možnou budoucí změnu SI definice metru, ale její historii, protože metr je definován pomocí zafixování hodnoty rychlosti světla již od roku 1983 (a změna definice, snad kromě úpravy formulace, se tedy neplánuje). Historie definice metru a její realizace státním etalonem délky byla popsána v tomto časopise před dvěma lety [1].

Během historie byla definice metru změněna třikrát (dvakrát v rámci SI) a délka byla první veličinou, která přešla na definici pomocí zafixování hodnoty základní fyzikální kon-

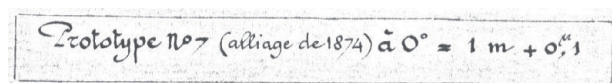
stanty. Při každé změně byla zajištěna kontinuita tak, aby se výsledky měření realizované podle nové definice shodovaly s dosavadními – a nebylo tak třeba měnit žádné tabulky s údaji vztaženými k metru a nebyly ovlivněny odvozené jednotky.

V článku je stručně shrnuta historie definice metru od mechanických artefaktů přes vlnovou délku kryptonu po současnou definici fixující hodnotu základní fyzikální veličiny – rychlosti světla. Dále je popsána souvislost etalonáže délky a času.

1.1 Historie definice metru

Dekadický metrický systém byl vytvořen v době francouzské revoluce, v roce 1799 byly v archívu v Paříži uloženy platinové etalony metru a kilogramu. Metr byl vytvořen jako koncová měřka (reprezentující desetimiliontinu zemského kvadrantu) – metr byl určen vzdáleností čel platinového hranolu; používáním se tedy zdatelně opotřeboval. V roce 1875 byla podepsána Metrická konvence, založen Mezinárodní úřad pro váhy a míry (BIPM) v Sevres u Paříže, zaveden Mezinárodní systém jednotek (SI) a zahájena výroba etalonů metru a kilogramu ze slitiny platiny a iridia. Metr byl definován jako vzdálenost dvou rysek na mezinárodním prototypu při teplotě 0 °C. Členské země Metrické konvence dostaly každá svůj etalon a jejich odchylky od mezinárodních etalonů byly určovány při kalibracích v BIPM. Československo získalo svůj národní etalon tohoto typu (No. 7) až v roce 1930.

Již před vznikem Metrické konvence upozorňoval J. C. Maxwell, že absolutně stálé jednotky/etalony by neměly být odvozovány z rozměrů nebo pohybu planety, ale pomocí vlnových délek, period vibrací nebo hmotností molekul (nebo elementárních částic), které jsou nezníčitelné a nezměnitelné. Trvalo však dlouho, než se podařilo vytvořit prakticky použitelné kvantové etalony, které by dosahovaly lepší přesnosti než klasické hmotné míry. První veličinou, jejíž jednotka byla v SI takto definována (v roce 1960) byla délka; metr byl určitým násobkem vlnové délky oranžové spektrální čáry kryptonu [2]. Nejistota realizace této definice byla až 4×10^{-9} relativně, tedy o několik řádů lepší než dlouhodobá stabilita hmotných metrů – jejich porovnání bylo sice možné s nejistotou okolo 100 nm (1×10^{-7} relativně), ale například československý metr No. 7 (tzv. národní kopie) podle výsledků kalibrací v BIPM mezi lety 1929 a 1962 změnil hodnotu o 500 nm (5×10^{-7} relativně). Nelze tedy samozřejmě vyloučit, že délku mění i mezinárodní prototyp (přestože jeho délka v tehdejších SI jednotkách byla z definice vždy přesně 1 m).



Mètre N° 7 = 1 m - 0,40 μm, à 0°C.

Na obrázku je uvedeno faksimile údajů ze dvou kalibračních listů československého prototypu metru, vydaných BIPM v letech 1929 a 1962.

Výhodou definice pomocí vlnové délky také bylo, že v sobě přímo obsahuje stupnici – pomocí interferometru bylo možné měřit libovolné délky, zatímco mezinárodní prototyp metru bylo možné porovnat jen s měřítka délky 1 m.

Druhou veličinou, která přešla na kvantovou definici, byl čas – od roku 1968 je SI sekunda definována jako násobek periody kmitů, odpovídajících přechodu mezi dvěma hyperjemnými hladinami atomu cesia 133. S rostoucí přesností realizace těchto kvantových definic se začaly projevovat

odchylky dané ovlivněním kvantových atomových přechodů okolím (atomy jsou sice dokonale stejné, ale jejich okolí ne), proto bylo třeba definici doplnit o jednotné pracovní parametry. U kryptonové výbojky a později u stabilizovaných laserů to byly prakticky použitelné „optimální“ parametry – například tlak a teplota výbojky tak nízké, aby čára byla dostatečně úzká (blízká přirozené šířce), ale současně aby signál byl ještě dobře detektovatelný. U atomových cesiových hodin byla v roce 1997 definice doplněna o vysvětlení, že je míněna pro (izolovaný) cesiový atom v základním stavu při teplotě 0 K. Při těchto podmínkách ovšem hodiny nepracují, ale hodnota generované frekvence je na reálné odchylky korigována.

Brzy po změně SI definice metru na variantu s vlnovou délkou kryptonu byly vyvinuty jednofrekvenční lasery, které jsou díky vyššímu jasů a delší koherentní délce vhodnějším zdrojem záření pro interferometrická měření než výbojka a brzy se také podařilo stabilizovat jejich frekvenci s lepší opakovatelností, než byla nejistota etalonu délky. Uvažovalo se tedy o změně definice metru pomocí jiného (přesnějšího) kvantového přechodu – ovšem vývoj v laserové technice a metrologii postupoval rychle a hrozilo nebezpečí, že i pečlivě vybraný model bude rychle překonán a definice by musela být často měněna.

V roce 1972 se pro metanem stabilizovaný infračervený laser 3,39 μm poprvé podařilo změřit současně vlnovou délku (porovnáním s kryptonem ve vakuovém interferometru) a frekvenci (porovnáním s frekvencí cesiových hodin pomocí koherentního řetězce přesných zdrojů) – tenkrát to znamenalo nejpřesnější určení rychlosti světla [3], [4].

	definice	realizace	mezinár. etalon		rel. nejistota návaznosti
1799	Meter des Archives	Pt koncová měřka			> 1×10^{-6}
1889	Mezinárodní prototyp metru	PtIr čárkové měřítko	Ano		1×10^{-6} 1×10^{-7}
1960	násobek vlnové délky ⁸⁶ kryptonu	Kr výbojka + interferometr	Ne		1×10^{-8} 2×10^{-9}
1983	zafixovaná hodnota rychlosti světla	laser o známé frekvenci + interferometr nebo dálkoměr	Ne		< 1×10^{-10}

Tab. 1: Přehled vývoje definice metru

Protože realizace SI sekundy atomovými hodinami byla přesnější než tehdejší optické etalony (vlnové délky), byla v roce 1982/3 zvolena změna SI definice metru, která fixuje hodnotu rychlosti světla ve vakuu a převádí měření délky na měření času a která je značně nezávislá na technickém vývoji – je tedy pravděpodobně, že ji dlouho nebude třeba měnit.

Tehdejšího jednání Poradního výboru pro definici metru (CCDM) se účastnil i Ing. Jan Blabla, CSc, vedoucí oddělení délky ČSMÚ, který řídil vývoj jodem stabilizovaných laserů – primárních etalonů vlnové délky. První mezinárodní porovnání těchto laserů proběhlo v BIPM v roce 1981 a ČSMÚ se ho velmi úspěšně účastnil.

Na základě aktivity Ing. Blably později ČMI získal plné členství v tomto poradním výboru (přejmenovaném na CCL).

1.2 Současná definice metru a její realizace

Od roku 1983 je základní jednotka SI pro délku – metr – definována jako vzdálenost, kterou proběhne světlo ve vakuu za 1/299 792 458 sekundy, tato definice je také uvedena v Zákoně o metrologii č. 505.

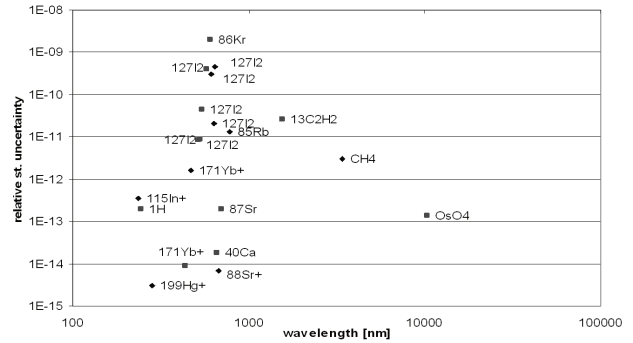
Realizace této definice je podle doporučení *Mise en pratique* [5], [6] možná třemi způsoby:

- a) pomocí délky dráhy l , kterou ve vakuu urazí rovinná elektromagnetická vlna za čas t ; délku určíme po změření času t pomocí vztahu $l = c_0 \cdot t$, kde $c_0 = 299\,792\,458$ m/s je rychlost světla ve vakuu (měříme časový interval),
- b) pomocí vakuové vlnové délky λ rovinné elektromagnetické vlny frekvence f použitím vztahu $\lambda = c_0 / f$, kde $c_0 = 299\,792\,458$ m/s je rychlost světla ve vakuu (měříme frekvenci a počet vln),
- c) pomocí záření ze seznamu uvedeného v doporučení [5],[6], jehož vakuové vlnové délky a frekvence mohou být použity s uvedenou nejistotou za předpokladu, že jsou dodrženy předepsané parametry a správná praxe (frekvence je známá, měříme počet vln).

Ve všech případech musí být provedeny korekce na případné vlivy difrakce, gravitace a nedokonalost vakua (index lomu vzduchu).

Přímá realizace – měření času, metoda a) – je ale vhodná jen pro dlouhé vzdálenosti, kvůli nízkému rozlišení (v řádu desetin nebo setin pikosekund, kterým odpovídá délka desetin nebo setin milimetru). V technické praxi (od desítek metrů do nanometrů) se pro měření používají interferenční metody, kde je měření času nahrazeno znalostí periody (frekvence) optického záření (s frekvencí ve stovkách THz, periodou v jednotkách femtosekund). Měření periody/frekvence optického záření bylo až donedávna velice obtížné (pomocí koherentního řetězce řady generátorů spojujícího radiofrekvenční oblast s oblastí optickou), proto byl vytvořen seznam primárních etalonů, jejichž hodnota s příslušnou nejistotou je uznávána bez nutnosti nového navazování – jen na základě úspěšného mezinárodního porovnání s obdobnými etalony jiných národních metrologických institutů – podle metody c).

Seznam doporučených zdrojů záření je vždy po několika letech podle potřeby aktualizován, současná verze zahrnuje dvacet typů referenčních kvantových přechodů v atomech a molekulách (obr. 1). Je v něm z důvodu kontinuity uvedena i vlnová délka kryptonové výbojky z předchozí definice metru.



Obr. 1: Přehled vlnových délek a nejistot etalonů podle doporučení *Mise en Pratique* (2005)

1.3 Souvislost etalonů času a délky

Od přijetí současné definice metru jsou etalony (vlnové) délky navazovány na etalony času. Od roku 2000 je k dispozici nová podstatně jednodušší a přesnější metoda měření pomocí femtosekundového hřebene frekvencí [4], která umožňuje porovnávat optické a radiofrekvenční etalony se zanedbatelným příspěvkem k nejistotě a lze ji i použít pro generování časových signálů z kmitů optických „hodin“.

Etalony vlnové délky či optické frekvence řízené velmi úzkými („zakázanými“) kvantovými přechody detekovanými v chladných zachycených atomech nebo iontech v posledních dvou desetiletích zvyšují přesnost dokonce rychleji než cesiové hodiny a v současnosti je jejich vnitřní nejistota již nižší (jejich nejistota v SI hertzech či sekundách je dána nejistotou porovnání s cesiovými hodinami).

Aby byla vyloučena případná kolize hodnot v seznamech etalonů vlnové délky – optických frekvencí (vydáváných CCL) a seznamech sekundárních etalonů frekvence (vydáváných CCTF), byla v roce 2003 ustavena společná pracovní skupina JWG CCL-CCTF, která sestavuje společný seznam etalonů (<http://www.bipm.org/en/publications/mep.html>) a poradní výbor pro délku pak z něj vybírá etalony doporučené pro realizaci definice metru a poradní výbor pro čas a frekvenci etalony doporučené jako sekundární reprezentace sekundy. Dokumenty zmíněné pracovní skupiny viz <http://www.bipm.org/wg/AllowedDocuments.jsp?wg=CCL-CCTF>. Přibližně od roku 2010 jsou již optické frekvenční etalony přesnější než radiofrekvenční cesiové hodiny – porovnání dvou takových optických etalonů je přesnější než porovnání s cesiovými hodinami a v blízké době pěti až deseti let se očekává změna SI definice sekundy. Vývoj optických frekvenčních standardů a metod jejich vzdálených porovnání doporučila národním metrologickým institutům mj. i 24. Generální konference pro váhy a míry v 8. usnesení z října 2011.

1.4 Stav v ČR a ve světě

Laboratoře, které přinášejí nejvýznamnější pokrok v primární etalonáži délky a etalonů optických frekvencí jsou především JILA/NIST Boulder (USA), NPL

Teddington (Velká Británie), PTB Braunschweig (Německo), LNE-SYRTE/Pařížská observatoř (Francie), NRC Ottawa (Kanada), ILP Novosibirsk (Rusko), NMIJ/AIST Cukuba (Japonsko). Na některých těchto pracovištích byly také vyvinuty koherentní frekvenční řetězce pro absolutní měření optických frekvencí.

Desítky národních metrologických institutů disponují jódem stabilizovanými helio-neonovými lasery 633 nm (červená), které si instituty samy vyvinuly, případně zakoupily. Více než deset z nich má i etalony dalších vlnových délek a femtosekundový hřeben pro absolutní měření optických frekvencí. ČMI patří mezi ně [1]. Kromě realizace SI definice metru ČMI dále zajišťuje metrologickou návaznost od primárních etalonů do širokého spektra oblastí technické praxe – včetně spektroskopie, nanometrologie, koncových měrek, čárkových měřítok, souřadnicových měření, odchylek tvaru, a řady dalších.

Projekt vývoje optických hodin se zachycenými částicemi chlazenými blízko k 0 K se v ČMI připravuje.

1.5 Závěr

Současná definice metru je již tvořena zafixováním hodnoty konstanty (rychlosti světla ve vakuu) a není třeba ji měnit. I realizace této definice je s dostatečnou rezervou přesná a spolehlivá a vyhovující praktickým potřebám. V souvislosti se změnami definic jiných základních jednotek SI byla pouze navržena změna formulace této definice na:

„Metr, m, je jednotka délky, její velikost je dána zafixováním číselné hodnoty rychlosti světla ve vakuu vyjádřené v jednotkách $m s^{-1}$ na 299 792 458 přesně“

Literatura

- [1] BALLING P. Primární etalonáž délky. *Metrologie*, Tematická příloha č. 4/2009, str. 3-10
- [2] *SI brochure The International System of Units (SI)*. 8th edition 2006, BIPM, URL http://www.bipm.org/en/si/si_brochure/.
- [3] EVENSON, K. M., WELLS, J.S., PETERSEN, F. R., DANIELSON, B. L., DAY, G. W., BARGER, R. L. and HALL J. L. Speed of Light from Direct Frequency and Wavelength Measurements of the Methane-Stabilized Laser, *Phys. Rev. Lett.* 29, 1346-1349 (1972).
- [4] BALLING P. Nobelova cena 2005 pro Johna L. Halla a Theodora W. Hänsche a pokrok v měření optických kmitočtů. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, ročník 51 (2006), č. 1, str. 12-22
- [5] QUINN, T. J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001). *METROLOGIA* 40, 103-133 (2003)
- [6] FELDER R. Practical realization of the definition of the metre. *METROLOGIA* 42 pp. 323-325 (2005) URL <http://www.bipm.org/en/committees/cc/ccl/mep.html>
- [7] BIPM. *Databáze klíčových porovnaní a kalibračních měřících schopností vzájemně uznávaných národními metrologickými instituty* URL <http://kcdb.bipm.org>
- [8] LONG SHENG MA, SUSANNE PICARD, MASSIMO ZUCCO, JEAN-MARIE CHARTIER AND LENNART ROBERTSSON, PETR BALLING AND PETR KREN, JIN QIAN, ZHONG YOU LIN, CHUNYING SHI, MIGUEL VILIESID ALONSO, GAN XU AND SIEW LENG TAN, KAJ NYHOLM, JES HENNINGSEN AND JAN HALD, ROBERT WINDELER. Absolute Frequency Measurement of the R(12) 26-0 and R(106) 28-0 Transitions in $^{127}I_2$ at $\lambda=543$ nm. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, No. 3, June 2006.
- [9] BALLING P., FISCHER M., KUBINA P., AND HOL-ZWARTH R. Absolute frequency measurement of wavelength standard at 1542 nm: acetylene stabilized DFB laser. *Opt. Express* 13, 9196-9201 (2005)
- [10] *Věstník Úřadu pro normalizaci a měření, Číslo 4*, duben 2008. Označení č. 08/08, str. 118 URL <http://web.unmz.cz/v/vest0804.pdf>
- [11] BALLING P., KREN P. Absolute frequency measurements of wavelength standards 532 nm, 543 nm, 633 nm and 1540 nm. *Eur. Phys. J. D* 48, (2008), str. 3–10



2 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA HMOTNOSTI – KILOGRAM

Metrologie hmotnosti zažívá v posledních letech nebývalý rozvoj. Přístroje na měření hmotnosti ve vakuu se stále častěji stávají běžnou součástí laboratoří, pracuje se na vývoji a zdokonalování metod a zařízení pro extrémní přesnosti měření. To je spojeno s úsilím o úpravu definice jednotky hmotnosti, která by nebyla závislá na artefaktu vyrobeném pro tento účel – mezinárodním prototypu kilogramu. Redefinice kilogramu je hlavním motivem revize celé soustavy jednotek SI; od artefaktu, mezinárodního prototypu kilo-

gramu, se přejde k definici na základě Planckovy konstanty, jedné z fundamentálních konstant. Protože ale na kilogramu jsou dosud závislé i ampér, mol a kandela, dojde k podstatné změně i zde.

Bude ale nutné pečlivě analyzovat praktické důsledky zavedení nové definice. Protože se po zavedení nové definice „přesune“ nejistota hodnoty Planckovy konstanty na mezinárodní prototyp a jeho kopie, nemusí být nová definice bez následků. Jak bude ukázáno v článku, může dokonce nastat

případ, kdy bude pro primární laboratoře obtížnější kalibrovat závaží třídy E1 při zachování současných nákladů.

Zatímco v tematické příloze roku 2010, která pojednávala výhradně o hmotnosti, byly zmíněny podrobněji projekty vedoucí k nové definici a aktuální situace v rámci Českého metrologického institutu, tento článek je zaměřen na mezipřelohový krok, tedy proces přenosu jednotky hmotnosti mezi novou realizací a běžnými závažími, čímž loňskou přílohu vhodně doplňuje.

2.1 Historie jednotky hmotnosti

Současná definice jednotky hmotnosti, kilogramu, byla zavedena již v roce 1889 spolu s dalšími jednotkami. Realizace je založena na mezinárodním prototypu kilogramu ve formě rovnostranného válce o průměru podstavy a výšce přibližně 39 mm. Ze stejného materiálu, kterým je slitina platiny a iridia v poměru 90:10, byly vyrobeny kopie o stejných rozměrech a se stejnými povrchovými úpravami. Prvních 30 kopií bylo věnováno členským státům metrické konvence, kde plnily a v mnohých případech dodnes plní úlohu státních či národních etalonů hmotnosti [1].

Tyto státní etalony podléhají pravidelné kalibraci v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy (BIPM). V České republice byl zvolen interval 10 let na základě zkušeností dalších států. Pro tyto kalibrace není používán hlavní artefakt, ale jeho oficiální kopie používané jako pracovní standardy BIPM. Těch je v současnosti 6, při zavedení definice byly pouhé dvě. Všechny oficiální kopie jsou uloženy ve stejném trezoru za stejných podmínek jako mezinárodní prototyp kilogramu, ale ten se používá pouze během vzájemných porovnání mezi oficiálními kopiemi a státními etalony velkého množství států. Poslední takové porovnání proběhlo v letech 1989 – 1992, ve kterém se ukázalo, že se hmotnost většiny oficiálních kopií zvětšila o průměrnou hodnotu 37 μg . Je nutné zdůraznit, že nelze s jistotou rozhodnout, zda hmotnost těchto kopií skutečně vzrostla. Prozatím není k dispozici nezávislé měření, které by ukázalo, k jakým hmotnostním změnám skutečně došlo [2]. Zde je třeba hledat důvod snahy po definování jednotky na základě konstanty, která je z principu neměnná. Artefakt zjevně není dostatečně stabilní. V současnosti proto probíhají intenzivní práce na experimentech, jejichž cílem je definice jednotky hmotnosti pomocí některé z fyzikálních konstant. Prozatím nejlepších výsledků se dosahuje v projektech využívajících Planckovu konstantu (výkonové váhy/watt balance) a Avogadrovu konstantu (projekt Avogadro).

2.2 Rozbor současné a nové definice jednotky hmotnosti

Otázkou zůstává, jaké budou důsledky zavedení nové definice hmotnosti. Prozatím je vše jednoduché, kilogram je znám absolutně přesně – definitoricky. V současné době je to ovšem fakticky jen víra v to, že mezinárodní prototyp je stabilní. Zdá se totiž, že právě tento mezinárodní prototyp je ten, který podléhá největším změnám, jejichž důsledkem je změna hmotnosti oficiálních kopií a návazně i státních etalonů. Nutno podotknout, že v daném porovnání

probíhalo měření vždy po čištění metodou nettoyage-lavage, proto všechny artefakty měly při daných měřeních vždy stejné výchozí podmínky, stejně jako v předchozích porovnáních. Jen pro srovnání, bylo rozhodnuto, že státní etalon České republiky (č. 67) nebude čištěn, což vyústilo v jeho novou hodnotu 1 kg + 0,188 mg, což je o 0,021 mg více než v roce 1999, kdy proběhla poslední kalibrace před převozem na naše území. Tuto změnu ovšem z výše uvedeného vysvětlení nelze odůvodnit změnou hmotnosti mezinárodního prototypu. Dá se pouze předpokládat, že v případě čištění by hmotnost etalonu byla v rámci nejistoty stejná.

V případě nové definice hmotnosti na základě některé univerzální konstanty by pochybnosti o změně hmotnosti prototypu vymizely, protože by bylo možné nezávisle prokázat případnou změnu. Vzhledem k nejistotám takových měření by bylo možné celý proces dokazování uzavřít až po několika letech. Bude také třeba, aby existovalo ve světě alespoň několik nezávislých laboratoří, schopných příslušná měření uskutečnit.

Pro další přenos jednotky bude výhodné hledat pro zhotovení závaží (v nejvyšších patrech metrologické návaznosti) takový materiál, který bude stabilnější než v současnosti používaná slitina platiny a iridia. Přesněji řečeno, jeho povrch bude muset být stabilnější i v podmínkách přechodů vakuum – inertní plyn – vzduch. Dá se také předpokládat, že po zavedení nové definice přejdou primární laboratoře hmotnosti buď na nové materiály, nebo si vybudují vlastní způsob realizace kilogramu. CGPM ve svém usnesení požaduje také vypracování nové „mise en pratique“ pro realizaci všech základních jednotek.

2.3 Možné realizace nového kilogramu

Všeobecně je známo a v úvodu tohoto článku též bylo zmíněno, že se v současné době intenzivně pracuje na dvou možných realizacích nové definice jednotky hmotnosti, přičemž každý z těchto směrů pracuje s jinou univerzální konstantou. Podle Rezoluce č. 1 24. zasedání CGPM (2011) vítězí Planckova konstanta h . Jednak doposud publikované výsledky dávají větší šance projektu výkonové váhy, jednak se má za to, že definice na základě h je výhodná pro celou oblast elektrických veličin a nezávislost na Avogadrově konstantě umožní jasně odlišit povahu jednotky hmotnosti od jednotky látkového množství. Redefinice kilogramu vyžaduje vysoce přesná měření směřující k určení Planckovy konstanty h . Cílová nejistota takových měření je 20 μg na kg.

Je zřejmé, že se oba postupy blíží cíli. Jedním z nich je využití speciálních elektronických výkonových vah (watt balance) – kilogram se měří ve vztahu k Planckově konstantě. Druhým přístupem je porovnání s hmotností atomu křemíku. Dosavadní výsledky poskytují pro Planckovu konstantu nejistotu 44 μg na kg. Situace je sledována CODATA a CGPM vyzvala všechny národní metrologické instituty k velkému úsilí při dalších projektech velmi přesných měření.

Pokud jde o první okruh experimentů, pracuje se v současnosti s výkonovými vahami v několika institutech. Prozatím se pouze ve dvou z nich, v NPL (Velká Británie)

a v NIST (USA), podařilo dosáhnout použitelných výsledků. Projekt v NPL byl však již ukončen a zařízení se přestěhovalo do Kanady. Ostatní projekty jsou prozatím ve fázi vývoje, i když se očekává brzká publikace výsledků například ze švýcarského institutu METAS [3, 4].

Základním principem těchto vah je srovnání virtuálního mechanického a elektrického výkonu. Vzhledem k sestavení experimentu není možné měřit přímo tyto výkony, ale ve vhodném sestavení vztahů popisujících daná měření vyjde právě vztah

$$UI = mgv$$

kde U , resp. I označují elektrické napětí, resp. proud, na druhé straně pak m označuje hmotnost, g tíhové zrychlení a v rychlost pohybu cívky (podrobný a názorný popis najde čtenář například v [5]).

Elektrický proud, tíhové zrychlení a hmotnost se vyskytují ve statické části experimentu, kdy jde o pouhé běžné měření hmotnosti. Porovnává se tedy tíhová síla mg s elektrickou IB . Ve vztahu

$$mg = IB$$

se vyskytují i veličiny l , což je délka cívky a B , tedy velikost magnetické indukce. Tyto veličiny není snadné měřit, především pak indukci.

Proto ve druhé fázi probíhá dynamická část experimentu, kdy se měří napětí procházející cívkou, která se pohybuje konstantní rychlostí. V tomto případě již není přítomno závaží (v BIPM však pracují na zařízení, které umožňuje měřit dynamickou část i s přítomným závažím). Příslušný vztah má tvar

$$U = Blv.$$

Jednotku elektrického proudu, ačkoliv je základní jednotkou soustavy SI, není v současné době prakticky možné realizovat podle definice. Proto se používá kvantové realizace elektrického napětí a odporu, tedy Josephsonova a kvantového Hallova jevu a určení proudu podle Ohmova zákona.

Měření napětí je realizováno Josephsonovým přechodem, kdy se na rozmezí dvou supravodičů, které jsou odděleny tenkým izolantem, vytváří stejnosměrné napětí po přivedení mikrovlnného záření. Velikost tohoto napětí závisí jen na frekvenci f a kvantovém stavu n podle vztahu

$$V = nf \frac{h}{2e}$$

kde h je Planckova konstanta a e velikost elektrického náboje.

Velikost odporu lze měřit kvantovou verzí Hallova jevu v tenkých polovodičích. K jeho vybuzení je potřeba generovat silné magnetické pole a udržovat systém při velmi nízké teplotě. Hallův odpor nabývá v takových případech jen určitých hodnot daných vztahem

$$R = \frac{h}{ne^2}.$$

Pokud tedy dosadíme do původního vztahu, získáme vztah

$$m = \frac{u'_1 u'_2 f_{j1} f_{j2}}{r'} \frac{1}{gv} \frac{h}{4},$$

kde u' a r' označují konstanty Josephsonova a kvantového Hallova jevu, f_j frekvenci mikrovlnného záření v Josephsonově jevu a h Planckovu konstantu [6].

Pro druhý přístup je třeba si uvědomit, že podle definice je hmotnost počtu atomů uhlíku ^{12}C rovného Avogadrově konstantě rovna přesně 12 gramům. Kilogram tedy může být v principu definován jako hmotnost $1000/12 \times N_A$ atomů uhlíku ^{12}C . Avogadrova konstanta sama se získá z poměru molární hmotnosti k hmotnosti atomu.

Pro projekt AVOGADRO byl zvolen křemík jako materiál, jehož parametry krystalu jsou dobře známy a poměrně snadno lze vyrobit téměř dokonalý monokrystal velkých rozměrů. U krystalu jako takového lze určit mřížkový parametr a počet atomů v jedné buňce krystalu. Oba údaje jsou pro křemík velmi dobře známy a lze je pomocí příslušných měření dále zpřesnit nebo určit nově. Současně lze určit hmotnost jednoho atomu křemíku pomocí vztahu

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

kde a označuje zmíněný mřížkový parametr, tedy délku jedné hrany základní buňky krystalu, n pak označuje počet atomů v jedné takové buňce, přičemž pro křemík platí $n = 8$. Symboly M a V pak označují hmotnost a objem celé křemíkové koule, čímž lze tedy přejít od makroskopických veličin k mikroskopickým [7]. Hmotnost jednoho atomu můžeme vypočítat podle vztahu

$$m_{\text{Si}} = \frac{M_{\text{Si}}}{N_A},$$

kde M_{Si} nyní označuje molární hmotnost křemíku a N_A Avogadrovu konstantu. Odtud tedy plyne vztah pro výpočet hmotnosti na základě Avogadrovy konstanty

$$M = \frac{M_{\text{Si}} V n}{N_A a^3}.$$

V projektu Avogadro je sdruženo několik metrologických institutů a dalších ústavů, protože pro účely potřebných měření je nutné vyrobit co nejpřesnější křemíkovou kouli. Pro účely projektu byly vyrobeny dvě koule o nominální hmotnosti 1 kg, s průměrem přibližně 93,6 mm. Maximální odchylka od dokonalé koule je u obou verzí nanejvýš 50 nm, jedná se tedy nejspíše o nejdokonalejší člověkem vyrobené koule makroskopických rozměrů. Další zvláštností je izotopové složení, kdy se jedná o velmi čistý monokrystal křemíku ^{28}Si .

Tvar koule byl zvolen z jednoduchého důvodu; pro daný objem tělesa lze dokázat, že jeho povrch je pro kouli nejmenší možný. Hmotnost celého objektu je pak nejméně ovlivně-

na například kontaminacemi na povrchu. Další výhodou je absence rohů a hran, kde se mohou projevovat různé hraniční jevy související s růstem povrchové oxidové vrstvy nebo vrstvy vodní páry.

Aby bylo možné určit hmotnost na základě Avogadrovy konstanty, je nutné provést tři základní měření, a to určit objem jednoho atomu v krystalu křemíku, objem celé koule a střední molární hmotnost křemíku. Objem jednoho atomu lze určit například pomocí rentgenového interferometru, objem celé koule pak měřením průměru, čímž je vztažen na definici jednotky délky, která je v současné době realizována s menší relativní nejistotou než jednotka hmotnosti. Střední molární hmotnost lze pak určit z izotopového složení krystalu, což je jeden z hlavních požadavků na potřebnou čistotu křemíku.

Aby bylo možné zavést novou definici hmotnosti, byly ve zprávě poradního výboru CCM CIPM vysloveny tři základní požadavky, které by měly být splněny [8]:

1. Nesmí zůstat nevyřešené rozdíly mezi nezávislými experimenty. Hodnoty Planckovy nebo Avogadrovy konstanty určené z příslušných experimentů by měly být shodné na úrovni 95% spolehlivosti.
2. Relativní nejistota nejlepšího experimentu má být nanejvýš 2×10^{-8} po převedení na nominální hmotnost 1 kg.
3. Alespoň tři další nezávislé experimenty musí dosáhnout relativní nejistoty alespoň 5×10^{-8} .

Prozatím nejlepší realizace výkonové váhy je v institutu NIST (USA), kde byla publikována relativní nejistota $3,6 \times 10^{-8}$ [9]. V rámci projektu NPL (Velká Británie) bylo publikováno měření s nejistotou $6,6 \times 10^{-8}$, ale v roce 2010 došlo ke zvýšení tohoto údaje na $1,7 \times 10^{-7}$ [10]. Je tedy vidět, že prozatím nebylo dosaženo požadavků CIPM. I tak ovšem může být nová definice zavedena, pouze prvotní výsledky standardních kalibrací se budou muset být uvádět s vyšší nejistotou než doposud.

2.4 Metrologická návaznost po zavedení nové definice

Po zavedení nové definice jednotky hmotnosti bude nutné jistým způsobem změnit myšlení alespoň na úrovni primárních laboratoří hmotnosti po celém světě. Již totiž nebude existovat závaží, jehož hmotnost bude 1 kg přesně. I hmotnost mezinárodního prototypu bude objektem měření. Proto i jeho hodnota bude zatížena určitou nejistotou.

V současné době primární laboratoře hmotnosti běžně udávají výsledky kalibrace závaží s relativní nejistotou $1,5 \times 10^{-8}$ až 5×10^{-8} , jak je patrné z tabulek CMC, které udávají schopnosti kalibrace a měření jednotlivých laboratoří. Běžná hodnota rozšířené nejistoty při kalibraci prováděné ČMI pro závaží třídy E1 (dle OIML R111) o nominální hmotnosti 1 kg je 0,17 mg s koeficientem rozšíření $k = 2$, což odpovídá relativní nejistotě $8,5 \times 10^{-8}$. Dosavadní výsledky různých realizací výkonových vah a projektu Avogadro se však vzájemně liší až o přibližně 1×10^{-7} , tedy o více, než je udávaná nejistota pro závaží při běžné kalibraci.

Kvůli odlišnostem jednotlivých realizací se uvažuje o zavedení referenční hodnoty hmotnosti, která by byla dána váženým průměrem jednotlivých experimentů provedených v rámci klíčového porovnání nebo váženým průměrem jednotlivých artefaktů z různých laboratoří pro stanovení své referenční hmotnosti. I z těchto důvodů nebude možné zaručit alespoň zpočátku lepší nejistoty při běžných kalibracích pro závaží nižších řádů. **Tab. 1** ukazuje současný systém návaznosti i s přibližnými hodnotami nejistot závaží v jednotlivých krocích. Jak je vidět, při dodržení doporučení CIPM budou ovlivněny pouze nejistoty závaží třídy E1 používaných v laboratořích hmotnosti [11]. Běžné kalibrace tedy nebudou ovlivněny.

Jiná situace nastává, pokud by se přijala nová definice za podmínky, kdy by nejlepší realizace hmotnosti vykazovala nejistotu 30 μg a další dvě nejistotu 60 μg , což je přibližně na úrovni současných experimentů. Zde by už kalibrace pro zákazníky byly téměř na hranici doporučení OIML R111, podle něhož má mít rozšířená nejistota kalibrace závaží nanejvýš hodnotu 1/3 maximální povolené chyby pro danou třídu.

Ve třetím případě by nejlepší realizace v době zavedení nové definice měla nejistotu 50 μg a další dvě realizace 100 μg , což přibližně odpovídá aktuálnímu stavu publikovaných nejistot. V takovém případě by nebylo možné kalibrovat závaží třídy E1 pro běžné zákazníky a v rámci ČMI i pro další oblastní inspektoráty, které takovými závažími disponují. Nezáleželo by přitom na přístrojovém vybavení, protože hlavní zdroj nejistoty v takovém případě je již na začátku celého procesu přenosu jednotky hmotnosti. Jedinou možností by v takovém případě bylo zavedení kalibračních postupů platných pro přenos jednotky hmotnosti ze závaží o nominální hmotnosti 1 kg na sadu závaží o hmotnostech 1 mg až 10 kg. Prakticky by to též znamenalo výrazné zvýšení cen takových kalibrací a především výrazné prodloužení doby kalibrace. Jen pro ilustraci, kalibrace celé sady závaží v laboratoři hmotnosti trvala přibližně 1 měsíc čistého času a 3 měsíce od prvního do posledního měření.

Tab. 1: Přenos nejistot mezi jednotlivými kroky v přenosu jednotky hmotnosti

Současný stav		Po zavedení nové definice		
		Případ 1 (dle CCM)	Případ 2	Případ 3
nejistota v μg		nejist. v μg	nejist. v μg	nejist. v μg
0	Nejlepší realizace jednotky	20	30	50
6	Oficiální kopie BIPM	30	42	71
6	Pracovní etalony BIPM	30	43	71
6	Státní etalony	30	43	71
14	Referenční etalony metrol. institutů	32	43	71
25	Pracovní etalony metrol. institutů	44	53	77
83	Zákaznická závaží	83	85	100

Jak je z předchozího vidět, důsledky zavedení nové definice jednotky hmotnosti mohou být velmi závažné z hledis-

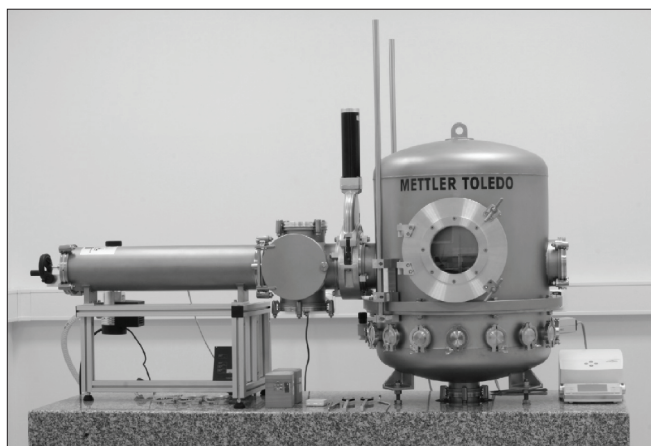
ka nabídky služeb kalibrace pro zákazníky. Další důsledek není na první pohled tak zřejmý, ale také je do jisté míry důležitý. Bude nutné totiž změnit kompletně řádky v tabulkách CMC pro oblast hmotnosti, přičemž se odhaduje, že v průměru bude navýšení dvojnásobné.

2.5 Praktická realizace přenosu jednotky hmotnosti na nejvyšších úrovních

Prozatím byly zmíněny projekty zaměřující se na novou definici jednotky hmotnosti a důsledky zavedení. Ještě nebylo uvedeno, jak bude probíhat přenos jednotky hmotnosti v laboratořích, jejichž cílem alespoň prozatím není vybudování vlastní realizace kilogramu, ale pouze kalibrace na nejvyšším možném stupni. Vzhledem k tomu, že nová definice zatím není zavedena, jsou následující řádky spíše úvahou, co vše bude nutné vykonat před jejím zavedením.

Zde je nutné si uvědomit, že jak výkonové váhy, tak projekt Avogadro předpokládají samotná měření ve vakuu, zatímco současná měření probíhají výhradně ve vzduchu za standardních podmínek. Bude tedy nutné vyřešit další krok v řetězci návaznosti, a to přenos jednotky mezi vakuem a vzduchem, případně vakuem a inertním plynem a poté mezi inertním plynem a vzduchem. Z toho důvodu je nutné studium vlastností závaží, a to především povrchových a materiálových, s ohledem na použití ve vakuu a různých plynech. Zatímco v 19. století bylo snahou najít materiál, který bude dostatečně stabilní v podmínkách běžného vzduchu, ve 21. století je nutné nalézt materiál, který zcela jistě nemění své vlastnosti nejen ve vzduchu, ale i ve vakuu, a to navíc při opakovaném dlouholetém použití v obou prostředích. Problém je tedy mnohem náročnější než před zhruba 150 lety.

Prozatím bylo provedeno několik experimentů s cílem sledovat závislost mezi změnou hmotnosti a tlakem atmosféry v daném prostředí. Ukázalo se, že změny jsou zjištěitelné a mají významný vliv, ale nejsou opakovatelné, dokonce i pro stejné druhy závaží. Prozatím nebyly podrobně studovány zákonitosti na povrchu závaží, jejichž plně pochopení je však potřebné, pokud se mají využít k výrobě nových etalonů hmotnosti vyhovujících novým podmínkám.



Obr. 2: Vakuový komparátor hmotnosti primární laboratoře hmotnosti ČMI

Tyto povrchové efekty lze sledovat dvěma způsoby. Jedním z nich je gravimetrická metoda, tedy klasické porovnání dvou závaží v různých podmínkách. Laboratoř primární metrologie hmotnosti je pro tento druh měření vybavena vakuovým komparátorem (obr. 2).

Další možnosti zahrnují optická měření, měření tvrdosti a tloušťky vrstvy, případně i zjišťování jejího složení pomocí hmotnostní spektroskopie.

Otázkou zůstává i způsob uložení artefaktu, který bude pravděpodobně plnit úlohu nového státního etalonu, a to nejen v případě ČMI. Prozatím bylo provedeno jen několik málo experimentů zaměřených na možnost přechovávání etalonů v podmínkách vakua. Prozatím ani nebylo možné provést mezilaboratorní porovnání s etalonem, který by byl permanentně uložen ve vakuu. Ačkoliv již několik institutů vlastní vakuový komparátor hmotnosti, nebyla prozatím vybudována infrastruktura pro taková porovnání.

Všechny podstatné body z předchozích řádků jsou obsahem jednoho z projektů EMRP, jehož se účastní i ČMI prostřednictvím laboratoře primární metrologie hmotnosti [12]. V době psaní tohoto článku se čeká na vyhodnocení soutěže mezi projekty, které proběhne na konci listopadu v Berlíně. Projekt je rozdělen na 5 technických a 2 administrativní části. Jednotlivé technické části jsou zaměřeny na problémy zmíněné na předchozích řádcích.

První úkol je tedy zaměřen na vývoj a vyhodnocení etalonů či artefaktů, jejichž vlastnosti budou takové, že budou moci být použity pro přenos jednotky hmotnosti v podmínkách zavedené nové definice.

Druhý úkol je zaměřen na výzkum možností přechodu mezi vakuem a vzduchem s možností využití mezikroku ve formě inertního plynu, přičemž se nejčastěji uvažuje argon a dusík.

Třetí úkol je zaměřen již na výzkum povrchových vlastností a dynamických změn při přechodu do vakua či obecně do jiného prostředí. Lze říci, že zatímco první dva úkoly jsou zaměřeny na závaží, a tedy velké objekty, tento úkol bude zaměřen na povrchy, proto nebude nutný vývoj speciálních měřidel. Na druhou stranu bude muset být provedena řada měření s různými vzorky povrchů, které lze nanášet různými způsoby, například plazmochemickou depozicí z plynné fáze nebo magnetronovým naprašováním.

Čtvrtý úkol se zaměří na vyhodnocení stability etalonů s ohledem na způsob uložení, čištění a transportu. Výsledky této části se pak budou používat při mezilaboratorních porovnáních, kdy se některá závaží transportují.

Poslední technický úkol je pak zaměřen na vyhodnocení všech zdrojů nejistot a jejich vlivu na celkovou nejistotu nových artefaktů a jejich přenos mezi jednotlivými články kalibračního řetězce.

2.6 Závěr

V tomto článku byla stručně představena problematika praktické realizace návaznosti po zavedení nové definice jednotky hmotnosti. Pro připomenutí byly uvedeny i základní informace o projektu Avogadro a projektu výkonové váhy.

Také byl zmíněn jeden z projektů EMRP, jehož se ČMI též účastní.

Ačkoliv by bylo přirozené předpokládat, že po zavedení nové definice bude možné zlepšit nejistoty při běžných kalibracích, ukázali jsme, že tomu tak nemusí být a dokonce bude nutné zvýšit hodnoty nejistot uvedené v tabulkách CMC. V nejhorším případě ani nebude možná kalibrace závaží třídy E1 při zachování současných nákladů, a to nejen v laboratoři hmotnosti ČMI, ale i v primárních laboratořích jiných národních metrologických institutů. Je tedy zřejmé, že se vývoj v oblasti hmotnosti nezastaví ani po zavedení nové definice. V dalších letech můžeme očekávat nové materiály vhodné pro etalony, nové postupy pro kalibrace závaží nejvyšších tříd a také zavedení nových státních etalonů hmotnosti.

Literatura

- [1] KRÍŽ, I. Historie jednotky hmotnosti. *Metrologie*, 2010, č. 4 – tematická příloha, s. 3 – 5.
- [2] DAVIS, R. The SI unit of mass. *METROLOGIA*, December 2003, vol. 40, no. 6, s. 299 – 305.
- [3] SPURNÝ, R. Nová definícia jednotky hmotnosti. *Metrológia a skúšobníctvo*, 2011, č. 1, s. 15 – 20.
- [4] ZŮDA, J. Nová definice hmotnosti. *Metrologie*, 2010, č. 4, Tematická příloha, s. 7 – 9.
- [5] BOHÁČEK, J. Wattové váhy a elektronický kilogram. *Metrologie*, 2011, č. 3, s. 33 – 34.
- [6] EICHENBERG, A., JECKELMANN, B., RICHARD, P. Tracing Planck's constant to the kilogram by electro-mechanical methods. *METROLOGIA*, December 2003, vol. 40, no. 6, s. 356 – 365.
- [7] BECKER, P. Tracing the definition of the kilogram to the Avogadro constant using a silicon single crystal. *METROLOGIA*, December 2003, vol. 40, no. 6, s. 366 – 375.
- [8] *Report of the CCM to the CIPM*, 15 May 2007. URL: <<http://www.bipm.org/wg/AllowedDocuments.jsp?wg=CCM-WGSI-kg>> [cit. 2011-10-18]
- [9] STEINER, R. L., WILLIAMS, E. R., LIU, R., NEWELL, D.B. Uncertainty improvements of the NIST electronic kilogram. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 2007, vol. 56, no. 2, s. 592 – 596.
- [10] ROBINSON, I. A., KIBBLE, B. P. An initial measurement of Planck's constant using the NPL Mark II watt balance. *METROLOGIA*, December 2007, vol. 44, no. 6, s. 427 – 440.
- [11] BORYS, M., GLÄSER, M., RATSCHKO, D., SCHWARTZ, R. *Redefinition of the kilogram: Status and potential consequences for mass metrology*. In *Traceability of mass measurements, 10-12 October, 2011*. Radom: Radwag, 2011. Publikováno na CD-ROM.
- [12] EMRP. *Developing a practical means of disseminating the new kilogram*. URL : <<http://www.emrponline.eu/call2011/SRT-s07.pdf>> [cit. 2011-10-18]



3 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA ČASU – SEKUNDA

Čas je veličinou, jež se trvale a spojitě mění a kterou nelze zpětně reprodukovat. Čas je veličinou skalární a je třeba rozlišovat *časový interval* a *časovou stupnici*. Vzhledem k Einsteinově teorii relativity nelze hovořit o absolutním čase v Newtonově pojetí, a tak nelze čas měřit přímo z jeho fyzikální podstaty, ale jen nepřímo počtem periodicky se opakujících jevů (oběh Země kolem Slunce, rotace Země kolem její osy, kmity křemenného oscilátoru apod.). O absolutním čase nelze hovořit také proto, že neznáme jeho počátek. Čas jako přírodní, fyzikální entita vyjadřující pouze rozdíly určitých časových bodů (okamžiků), má vždy jen relativní charakter [1].

3.1 Historie definice sekundy

Helénští astronomové včetně Hipparcha a Ptolemaia definovali hodinu jako čtyřicetkrát středního slunečního dne. Dvojnásobným dělením této hodiny tak vznikla definice sekundy jako $1/86\,400$ středního slunečního dne. Jeden *sluneční den* je čas, který uplyne za jedno otočení Země, tj. mezi dvěma průchody Slunce jedním poledníkem. *Sluneční*

čas je tedy čas určený otáčením Země vzhledem ke Slunci. Je dán hodinovým úhlem Slunce a je měřen na sluneční dny a jejich části. *Střední sluneční čas* je čas měřený podle druhého středního slunce (myšleného bodu na nebeské sféře, který se pohybuje rovnoměrně po světovém rovníku východním směrem). Jednotkou středního času je *střední sluneční den* – doba mezi dvěma průchody druhého středního slunce jedním poledníkem.

Roku 1938 byl Adolfem Scheibem a Udo Adelsbergerem u Fyzikálně-technického říšského úřadu (Physikalisch-Technische Reichsanstalt - PTR) předložen důkaz toho, že rychlost rotace Země není stálá (kvůli zpomalování slábnutím silami a některým nepravidelným změnám způsobeným prouděním magmatu mezi pláštěm a zemským jádrem). Astronomická délka dne není tedy dostatečně přesným základem časových norem. Kvůli zpomalování zemské rotace se tak sluneční den oproti dennímu času posouvá. Ke kompenzaci byly zavedeny přestupné sekundy, aby byl běžně užívaný čas dostatečně přesný a přitom se nelišil od pohybu Slunce po obloze.

V roce 1956 byla sekunda definována na základě doby oběhu Země okolo Slunce pro konkrétní *ekvinokcium* (astronomický pojem, definující okamžik v čase, ke kterému je zafixována soustava souřadnic, v níž se popisují polohy nebeských objektů – hvězd, galaxií, okamžité polohy planet a jiných objektů na obloze, tedy jejich souřadnice, případně veličiny ze souřadnic odvozené), protože v té době se už zemská rotace kolem vlastní osy nepovažovala za dostatečně rovnoměrnou, aby mohla být základem pro měření času. Časová stupnice založená na pohybu Země vzhledem ke Slunci byla nazývána *efemeridním časem*. Jedná se o čas určovaný podle *efemerid*, tj. publikovaných periodik obsahujících časové údaje o poloze nebeských těles. Jeho základním rytmem je rok.

Na 11. generální konferenci pro váhy a míry (CGPM), konané roku 1960, byla ratifikována definice:

Sekunda je 1 / 31 556 925,974 741 5 tropického roku pro 12 hodin 0. ledna 1900 efemeridního času.

Tropický rok v definici nebyl změřen, ale byl vypočítán na základě vzorce popisujícího tropický rok, jehož délka se v čase lineárně zkracuje.

1 rok tropický = $(31\,556\,925,974\,7415 - 0,5303 \cdot T)$ sekund,

kde T je počet juliánských století (od počátku našeho letopočtu) [1], [5].

Protože tato sekunda byla nezávisle proměnná na čase ve slunečních a měsíčních efemeridách během většiny 20. století, byla nazvána *efemeridová sekunda* [4].

3.2 Současná definice sekundy a její realizace

S vývojem atomových hodin bylo rozhodnuto, že jejich užití bude vhodnějším základem definice sekundy než doba oběhu Země kolem Slunce. Po uvážení, že zvýšení přesnosti definice jednotky času SI je nezbytné, přijala 13. CGPM konaná v Paříži v roce 1967 definici:

Sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133.

Definice sekundy byla později roku 1997 doplněna na jednání CIPM následujícím dodatkem:

Tato definice odkazuje na atom cesia v klidu při teplotě 0 K.

Revidovaná definice se vztahuje k ideálním atomovým hodinám s jediným atomem cesia, emitujícím jen jednu frekvenci [6].

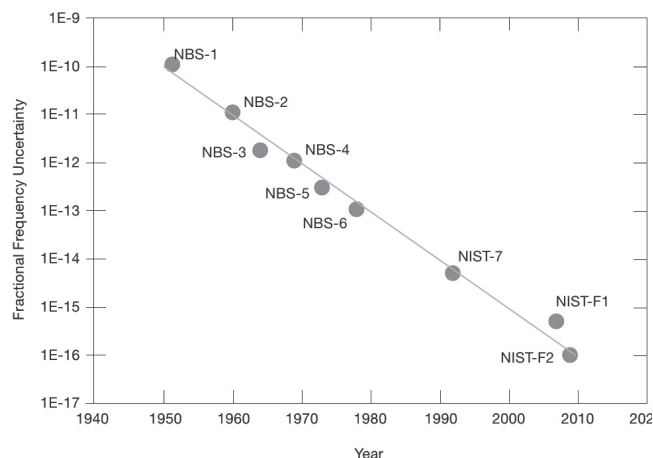
Stávající definice sekundy je tedy již vztažena k přesné hodnotě dobře určené vlastnosti atomu cesia, která je také přirozeně neměnná, a vyhovuje beze zbytku záměru na redefinici základních jednotek SI a měnit se bude pouze její formulace tak, aby byla formou shodná s definicemi ostatních jednotek.

Ve většině národních metrologických laboratoří se sekunda realizuje pomocí průmyslově vyráběných cesiových

svazkových generátorů 5071A/001, tedy s trubicí vysoké kvality (angl. *high-performance tube*).

Z primárních laboratorních frekvenčních etalonů, které jsou trvale v provozu, má nejmenší nejistotu ($u_B = 8 \cdot 10^{-15}$) cesiový svazkový generátor CS1 v PTB.

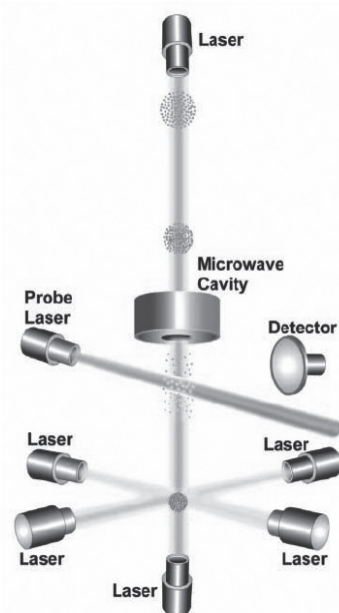
Na **obr. 1** je ilustrován vývoj nejistoty cesiových hodin zhruba v posledním půlstoletí:



Obr. 1: Vývoj nejistoty cesiových svazkových hodin NBS a cesiových fontán v NIST.

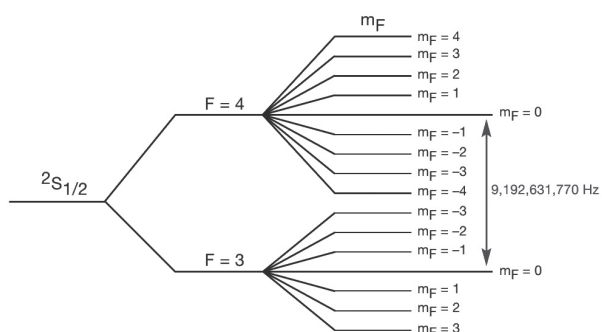
Nejpřesněji dnes definici sekundy realizují cesiové fontány. Ty vykazují nejistotu $u_B = 2,3 \cdot 10^{-16}$. [7]

Ve stručnosti několik slov k principu fontány. Atomy cesia se nacházejí v plynné formě uvnitř nádoby s vakuem. Interakcí s paprsky chladicích laserů se rychlost atomů snižuje a tím i jejich teplota až na hodnotu několika mikrokkelvinů. Současně je na atomy aplikováno magnetické pole pomocí anti-Helmholzových cívek, což způsobí, že atomy vytvoří shluk o průměru několika milimetrů uprostřed magneto-optické pasti, viz **obr. 2**.



Obr. 2: Schématické znázornění atomové fontány.

Následně je magnetické pole vypnuto a pomocí dvojice laserů je shluk atomů uveden do pohybu směrem vzhůru skrze mikrovlnný rezonátor. Zde dochází ke změně energetického stavu atomů vlivem mikrovlnného záření. Je-li jeho frekvence 9 192 631 770 Hz, atomy cesia změní svůj stav z energetické hladiny $F(4, 0)$ do hladiny $F(3, 0)$, jak ukazuje **obr. 3**. Doba interakce s mikrovlnným zářením je v řádu jednotek sekund. Navíc vlivem gravitace atomy prolétnou rezonátorem ještě jednou opačným směrem.



Obr. 3: Schematické znázornění energetických hladin základního stavu atomu cesia 133.

Změna stavu atomů je detekována pomocí dalších pársků laseru. Ty způsobí další změnu energetické hladiny atomů, která je provázána fluorescencí atomů – atomy cesia emitují světlo, které dopadá na fotodetektor. Úroveň signálu fotodetektoru je úměrná počtu atomů v energetické hladině $F(3, 0)$. Pokud všechny atomy změní svůj stav, signál fotodetektoru je na maximu. Intenzita signálu pak slouží k ladění frekvence mikrovlnného rezonátoru. Uvedené kroky se periodicky opakují.

Fontány obvykle nejsou trvale v provozu, nýbrž slouží ke kalibraci dalších frekvenčních zdrojů, jako jsou například vodíkové masery.

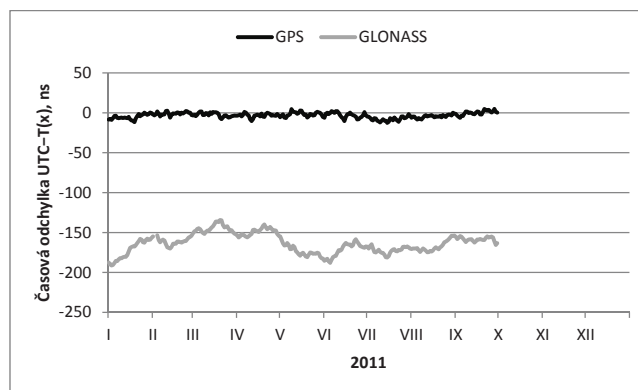
Realizace sekundy SI je v současné době již natolik přesná, že je třeba brát v úvahu i vliv relativistických efektů. Každé hodiny, které realizují sekundu SI podle definice, ve skutečnosti vytvářejí svůj vlastní čas (angl. *proper time*), který je závislý na gravitaci v místě hodin. V okolí zemského povrchu se frekvence hodin a tedy i realizovaná sekunda SI mění s nadmořskou výškou, a to přibližně o $1,1 \cdot 10^{-16}$ na 1 m výšky. V silnějším gravitačním poli bude sekunda delší a hodiny půjdou pomaleji, [2]. Pro představu, přesuneme-li běžící atomové hodiny o 1000 m do výše, jejich frekvence se změní relativně o $1,1 \cdot 10^{-13}$, tedy např. frekvence 10 MHz se zvýší o 1,1 μ Hz na 10 000 000,000 001 1 Hz.

3.3 Přenos časové informace

Metrologie času a frekvence je dnes nemyslitelná bez rádiového přenosu časové informace. Po řadu desetiletí hrály nezastupitelnou roli při distribuci a porovnávání přesného času pozemní vysílače časových signálů v různých frekvenčních pásmech. V ČR se v minulosti k časovému transferu i distribuci přesného času využíval signál analogové televize, jeho frekvence byla koherentní se Státním etalonem času a frekvence.

Pokusné vysílání etalonové frekvence a časového signálu u nás začalo rokem 1955, kolektivní stanicí OK1KAA na frekvenci 3,5 MHz, a dále pokračovalo vysíláním krátkovlnných stanic OMA 2,5 MHz a OLB5 3,170 MHz. Dlouhovlnné vysílání začalo 17. května 1957 stanicí OLP 48,6 kHz a vyústilo v dubnu 1958 ve vysílání stanice OMA 50 na frekvenci 50 kHz. Tato stanice šířila etalonovou frekvenci a časové signály vysílačem OMA 50 z Liblic u Českého Brodu výkonem 50 kW. V lednu 1969 vysílala OMA 50 tento čas v mikrosekundové shodě se světovým koordinovaným časem UTC, odvozeným z cesiových hodin v ÚŘE. Od roku 1974 bylo zavedeno kódování v BCD tvořené klíčováním fáze nosné o 180° , což byl technicky vyspělejší systém než jaký používal v té době vysílač DCF-77 (vysílající teprve od září roku 1970). Na jaře roku 1995 byl vysílač OMA 50 vypnut [3].

Kvalitativně nová éra v přenosu přesného času však nastala s rozvinutím systému GPS a později dalších družicových navigačních systémů (GLONASS, GALILEO, COMPASS) souhrnně označovaných jako GNSS (Global Navigation Satellite System). Díky jejich existenci je nyní časová informace trvale dostupná kdekoliv na zemském povrchu s přesností v řádu jednotek nanosekund. **Obr. 4** ukazuje průběh odchylky systémového času družicových systémů GPS a GLONASS od světového koordinovaného času UTC v roce 2011 tak, jak je stanovil Mezinárodní úřad pro váhy a míry BIPM a v měsíčních intervalech publikoval v dokumentech označovaných Cirkulář-T. Čas GPS se od UTC ve skutečnosti liší o 15 s, protože do času GPS nejsou vkládány přestupné sekundy. Tento rozdíl je v grafu odečten.



Obr. 4: Odchylka systémového času GPS a GLONASS od světového koordinovaného času UTC. Čas GPS se od UTC liší o 15 s, tento rozdíl je v grafu odečten.

3.4 Metoda společných pozorování

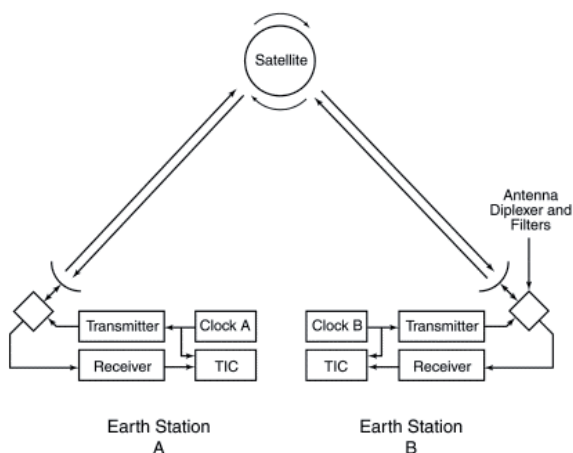
Častým úkolem je porovnat časové stupnice hodin na dvou nebo více stanovištích. Takové porovnání se dnes standardně provádí s využitím metody společných pozorování (angl. *common view*): na obou stanovištích jsou instalovány přijímače signálů GNSS. Ty přijmou signál vyslaný stejnou družicí a určí čas příjmu vzhledem k místním hodinám. Od změřených časů se odečtou dráhová zpoždění na trase od družice k přijímači. Odečtením výsledných časů pak dostaneme odchylku mezi časy hodin na jednotlivých stanoviš-

tích. S využitím této metody je možné dosáhnout mimořádné přesnosti porovnání, viz níže.

Tato metoda se standardně používá při porovnávání etalonů času a frekvence. Využívají se přitom k tomu určené přijímače, do kterých jsou přivedeny signály hodin, které je třeba porovnat. Většina časových přijímačů provádí pouze kódová měření. Při jejich použití se dosahuje nejistoty porovnání v řádu 1 ns, na malou vzdálenost stanovišť i méně než 1 ns. V poslední době se stále častěji využívá i fázových měření na nosné. Na malou vzdálenost je pak možné dosáhnout nejistoty porovnání hluboko pod 1 ns. Nejistotu přenosu času ovlivňuje řada faktorů, např. ionosférické zpoždění, troposférické zpoždění, chyby polohy družice a přijímače, mnohacestné šíření signálu a chyby (zpoždění) způsobené přijímačem. Detaily uvádí [4].

3.5 Dvoucestný družicový transfer času a frekvence

Vyšší přesnosti časového transferu lze dosáhnout plně duplexním přenosem signálu mezi oběma stanovišti prostřednictvím geostacionární telekomunikační družice, viz **obr. 5** Tato technika označovaná TWSTFT (angl. *Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer*) poskytuje ve srovnání s metodou společných pozorování GPS vyšší stabilitu a přesnost, jelikož se všechna zpoždění při přenosu signálu vlivem symetrie vyruší.



Obr. 5: Princip dvoucestného družicového přenosu času a frekvence.

Princip metody je následující: pomocí čítačů časových intervalů (TIC) se na obou stanovištích měří zpoždění mezi signálem místních hodin a přijatým signálem hodin vzdálených. Současně je signál místních hodin přenášen do vzdáleného stanoviště. Naměřená zpoždění se zaznamenávají, následně dojde k výměně naměřených dat a výpočtu odchylky časových stupnic obou hodin. Kapacita přenosových kanálů je dostatečná pro okamžitý přenos naměřených dat spolu se signálem místních hodin, časový transfer je tedy možné provozovat v reálném čase.

Hlavní nevýhodou této metody je nutnost na obou stanovištích provozovat k tomuto účelu potřebný vysílač (Transmitter) i přijímač (Receiver). Rovněž náklady jsou mnohem

vyšší, protože kromě uvedeného vybavení jsou zde i poplatky za využití telekomunikační družice.

Stabilita dvoucestného časového a frekvenčního porovnání v průměrovacím intervalu 24 hodin je typicky méně než 1 ns [8].

3.6 Časový transfer pomocí optických vláken

Vzhledem k rozvoji optické infrastruktury využívané zejména pro telekomunikace a Internet nabízí se tuto využít i k přesnému transferu nebo distribuci času a frekvence prostřednictvím optických vláken.

Princip transferu je podobný dvoucestnému družicovému transferu. I v tomto případě se jedná o plně duplexní přenos signálu mezi dvěma stanovišti prostřednictvím optických vláken nebo vyhrazených kanálů v multiplexované optické síti.

Stabilita dvoucestného časového a frekvenčního porovnání v průměrovacím intervalu 500 s je řádově 10 ps, [10], [11], [12].

V případě optické stabilizace vláknového spojení lze však dosáhnout relativní nejistoty i 10^{-19} na vzdálenost více než 100 km pro průměrování 30 000 sekund [13].

3.7 Trendy

Změna definice sekundy

24. Generální konference pro váhy a míry (2011) vzala na vědomí návrh Mezinárodního výboru pro váhy a míry na novou definici sekundy. Stávající definice sekundy je vztažena k přesné hodnotě dobře určené vlastnosti atomu cesia, která je také přirozeně neměnná, a proto se změna týká **pouze formulace** definice, aby měla zcela ekvivalentní tvar pro všechny základní jednotky. Definice sekundy bude mít podle návrhu znění:

Sekunda, symbol s, je jednotkou času; její velikost je určena stanovením číselné hodnoty frekvence hyper-jemného rozštěpení základního stavu atomu cesia 133 v klidu a při teplotě 0 K tak, aby se rovnala přesně 9 192 631 770, je-li vyjádřena v jednotce soustavy SI s⁻¹, což je rovno Hz.

Optické hodiny

Optické hodiny mají obrovský potenciál vyšší stability v porovnání s cesiovými hodinami nebo fontánami díky řádově mnohem vyšším frekvencím oscilací. Nové generace etalonů času a frekvence budou založeny na změnách metastabilních stavů neutrálních atomů nebo iontů vybraných prvků zchlazených pomocí laseru na teplotu blízkou 0 K. Změna stavu je v tomto případě doprovázena vyzářením/absorpcí energie formou elektromagnetického záření v optické oblasti.

Neutrální atomy (např. Ca nebo Yb) vykazují extrémní stabilitu způsobenou vysokým poměrem signálu k šumu v souvislosti k velkému počtu atomů, které mohou být zachyceny.

Hodiny s atomy vápníku v současnosti vykazují stabilitu frekvence lepší než $4 \cdot 10^{-15}$ v průměrovacím intervalu 1 s. Ukazuje se, že stabilita hodin s atomy ytterbia může v budoucnu být řádu 10^{-17} [9]. Takové stability však již nyní dosahuje pouze Al⁺ hodiny v NIST a blíží se jí hodiny s ionty Hg⁺.

Literatura

- [1] ŠINDELÁŘ, V., TŮMA, Z. *Metrologie, její vývoj a současnost*, Česká metrologická společnost, 2002.
- [2] ČERMÁK, J., BUZEK, O., ČEMUSOVÁ, B., KUNA, A., PÁNEK, P., ŠOJDR, L. Státní etalon času a frekvence, *Metrologie* 2/2007, ročník 16.
- [3] PTÁČEK, V. OMA 50 in memoriam, *Říše hvězd* 1-6/1997 str. 20-21, ISSN 0035-5550
- [4] PÁNEK, P. Přenos přesného času pomocí družicových navigačních systémů, *Metrologie* 3/2011, ročník 20.
- [5] Wikipedia, *Tropický rok*. URL : <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tropick%C3%BD_rok>
- [6] BIPM, *SI Brochure, English text*. URL: <http://www.bipm.org/utls/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf>
- [7] LI, R., GIBBLE, K., SZYMANIEC, K. Improved accuracy of the NPL-CsF2 primary frequency standard: evaluation of distributed cavity phase and microwave lensing frequency shifts, *METROLOGIA* 48, pp. 283, 2011.
- [8] NIST: *Two Way Time Transfer*, URL: <<http://tf.nist.gov/time/twoway.htm>>
- [9] NIST: *Optical atomic clocks based on neutral atoms*, URL: <<http://tf.nist.gov/ofm/calcium/Intro2.htm>>.
- [10] SMOTLACHA, V., KUNA, A., MACHE W. Time Transfer Using Fiber Links. *Proc. 24th European Frequency and Time Forum*, Noordwijk, Nizozemí, 2010.
- [11] SMOTLACHA, V., KUNA, A., MACHE, W. Time Transfer In Optical Network, *Proc. 42nd Annual Precise Time and Time Interval Meeting*, Reston, Virginia, USA, pp. 427-436, 2010.
- [12] SMOTLACHA, V., KUNA, A., MACHE, W. Optical Link Time Transfer between UFE and BEV, In: *Proc. 43rd Annual Precise Time and Time Interval Meeting*, Long Beach, California, USA, 2011.
- [13] GROSCHE, G., TERRA, O. at al. Optical frequency transfer via 146 km fiber link with 10^{-19} relative accuracy, *Optics Letters*, Vol. 34, Issue 15, pp. 2270-2272 (2009)



4 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA ELEKTRICKÉHO PROUDU – AMPÉR

První koherentní soustavu jednotek měření fyzikálních jevů navrhl v roce 1832 C. F. Gauss pro účely absolutního měření magnetického pole Země. Tvořily ji 2 mechanické jednotky, milimetr a gram, a jedna jednotka z astronomie, sekunda. Později ji Gauss spolu s W. E. Weberem použili i na měření dalších elektrických jevů. Rozvoj teorie elektromagnetického pole v 60. letech 19. století, vedený J. C. Maxwellem, W. Thomsonem a dalšími fyziky, vyústil v r. 1874 do zavedení soustavy CGS (centimetr – gram – sekunda), na které byl do značné míry založen rozvoj fyziky až do 2. poloviny 20. století. Její používání zjednodušilo i zápis fyzikálních vzorců a rovnic; v elektrostatice se široce uplatnila modifikace CGSE (v níž byla permitivita vakua ϵ_0 definitoricky rovna 1), v popisu magnetických jevů se prosadila soustava CGSM (s permeabilitou vakua μ_0 rovnou 1).

Pro praktická měření však velikost základních jednotek soustavy CGS nebyla příliš vhodná a proto byl již v 80. letech 19. století vytvořen systém tzv. praktických jednotek. Mezi nimi byly i **volt** (pro elektromotorickou sílu), **ohm** (pro elektrický odpor) a **ampér** (pro elektrický proud).

Metrická konvence, ustavená 20. 5. 1875, zavedla soustavu obdobnou soustavě CGS, avšak se základními jednotkami metr, kilogram (které měly být realizovány mezinárodními prototypy) a sekunda. V roce 1901 ukázal italský elektroinženýr Giovanni Giorgi, že je možno zkombinovat mechanické jednotky soustavy MKS s praktickými elektrickými jednotkami do koherentního systému tak, že k nim přiřadíme 4. jednotku elektrickou, např. ohm nebo ampér, a přepíšeme

rovnice elektromagnetického pole do tzv. racionálního tvaru. Do rovnic se tak, k nelibosti zvláště teoretických fyziků, vrátily veličiny ϵ_0 a μ_0 a navíc faktor 4π .

Následovala mnohaletá diskuse o tomto návrhu, jejímž konečným výsledkem bylo oficiální zavedení soustavy MKSA v roce 1946. Spíše z historických důvodů byl za čtvrtou základní jednotku zvolen ampér (ačkoliv Giorgi původně preferoval ohm), aby byla zdůrazněna vazba mezi elektrickými a mechanickými jednotkami. Pokrok ve fyzice a posléze i v chemii si poté vyžádal zavedení dalších tří základních jednotek, až konečně 14. kongres CGPM v roce 1971 oficiálně schválil dnešní podobu Mezinárodní soustavy jednotek SI.

Mezi sedmi základními jednotkami soustavy SI je **ampér**, jednotka elektrického proudu, jediným zástupcem elektrických veličin. Jeho dodnes platná definice, vycházející ze silových účinků elektrického proudu procházejícího vodičem, pochází vlastně již z onoho roku 1946, v roce 1948 se v její formulaci pouze zaměnila původně uváděná „jednotka síly v soustavě MKS“ jejím nově zaváděným pojmenováním „newton“ (N) a v této podobě platí definice dodnes. Je tak vlastně ze všech aktuálně používaných definic základních jednotek soustavy SI druhou „služebně“ nejstarší, hned po kilogramu.

4.1 Stávající definice ampéru a její důsledky

Pro definici ampéru v soustavě SI tedy dosud platí následující formulace:

Ampér je takový konstantní proud, který při průchodu dvěma přínými paralelními vodiči nekonečné délky a zanedbatelného kruhového průřezu, umístěnými ve vakuu a vzdálenými od sebe 1 metr, vyvine mezi těmito vodiči sílu rovnou 2×10^{-7} newtonů na metr jejich délky.

Z této definice vyplývá, že magnetická konstanta μ_0 , zvaná též permeabilita vakua, je přesně rovna $4\pi \times 10^{-7}$ H/m, je to tedy v soustavě SI konstanta fixovaná s nulovou nejistotou. Magnetická konstanta μ_0 souvisí s dalšími důležitými veličinami, elektrickou konstantou neboli permitivitou vakua ϵ_0 a s charakteristickou impedancí vakua Z_0 prostřednictvím vztahů $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$ a $Z_0 = \mu_0 c$, kde c je rychlost světla ve vakuu. Jelikož aktuální definice jednotky délky, metru, fixovala v roce 1983 rychlost světla ve vakuu na hodnotě $c = 299\,792\,458$ m/s přesně, jsou tedy i veličiny ϵ_0 a Z_0 v dnešní soustavě SI fixovány s nulovou nejistotou.

Ukázalo se však, že praktická realizace ampéru na základě výše uvedené definice je velmi obtížná a už z principu může být pouhým přiblížením, neboť nelze realizovat nekonečné paralelní vodiče. Nejlepším přiblížením jsou tzv. **proudové váhy**, jejichž uspořádání a princip činnosti popisuje na stránkách tohoto časopisu J. Boháček [1]. V praxi jde o velmi složité zařízení, a proto byl (a ve většině metrologických laboratoří stále je) ampér realizován prostřednictvím jednotek jiných elektrických veličin, napětí U a elektrického odporu R , které jsou s proudem I svázány Ohmovým zákonem $I = U/R$. Základní jednotka soustavy SI, **ampér** (A), tak byla v praxi reprezentována primárními etalony jednotek odvozených, **voltu** V a **ohmu** Ω .

Již od konce 19. století byl jako etalon **voltu** používán tzv. Westonův článek, který poskytoval vysoce stabilní a reprodukovatelné napětí $U = 1,0183$ V (při 20 °C). Pro praktickou etalonáž je toto napětí poměrně malé a navíc Westonovy články je obtížné spojovat do série. Řešením bylo použití polovodičové Zenerovy diody. Na jejím základě byly sestaveny etalony napětí, které (na rozdíl od Westonových článků) snesou elektrickou zátěž a které ve špičkovém provedení dosahují na úrovni 10 V relativní nejistoty řádu 10^{-8} [2]. Oba tyto typy etalonů napětí se používají dosud, dnes však už nikoliv jako primární.

Klasické etalony **ohmu** vesměs využívaly vlastnosti vhodně zvoleného kovu. Od r. 1862 byl ohm definován jako odpor měděného vodiče definovaného tvaru. Od r. 1884 byla měď nahrazena sloupcem rtuti dané délky (106,3 cm) a průřezu (1 mm²). Krátce nato ale byly objeveny odporové slitiny s minimálním teplotním koeficientem odporu a malým termoelektrickým napětím vůči materiálu elektrických přívodů (zpravidla Cu). Nejznámější je manganin (slitina Cu, Mg a Ni) a dodnes používaný evanohm. Postupnou optimalizací materiálových parametrů a konstrukce odporových etalonů byla nejistota realizace ohmu touto cestou snížena až na cca 5×10^{-8} [2].

V obou případech jde tedy o podstatně menší nejistoty, než které bylo možno dosáhnout přímou realizací ampéru pomocí proudových vah (cca 10^{-6}). Je však třeba uvážit, že klasické etalony odporu a napětí vyžadují vysokou úroveň

stabilizace podmínek, ve kterých jsou etalony uchovávány (především okolní teploty), jsou v různé míře závislé na vnějších podmínkách (atmosférický tlak, magnetické pole) a mohou stárnout, tzn. měnit svou hodnotu v čase.

Zásadní změnu vneslo do metrologické praxe zavedení Josephsonova jevu (JJ) a kvantového Hallova jevu (KHJ) k 1. 1. 1990. Tyto tzv. makroskopické kvantové jevy poskytly možnost realizovat etalony elektrického napětí (JJ) resp. elektrického odporu (KHJ), které prakticky vůbec nezávisí na vnějších podmínkách měření, nemění se s časem a jejichž hodnoty jsou reprodukovatelné s nejistotami až o několik řádů menšími, než u nejlepších klasických etalonů. Hlavně však tyto kvantové jevy svazují volt a ohm s jednoduchými kombinacemi dvou fundamentálních fyzikálních konstant, Planckovy konstanty h a elementárního náboje e . A právě to odstartovalo intenzivní diskusi o nutnosti zásadní změny definice ampéru a ostatních základních jednotek soustavy SI tak, aby lépe odpovídaly dosaženému stavu rozvoje moderních přírodních věd. Deklarovaným cílem bylo dosáhnout toho, aby každá ze základních jednotek byla jednoznačně vztahována k nějaké fundamentální přírodní konstantě, invariantní v prostoru i čase. Pro ampér se jako nejvhodnější referenční konstanta nabízí elementární náboj e . To je zjevné i z elementární fyzikální definice elektrického proudu $I = N \cdot e/t$: Elektrický proud je dán počtem N elementárních nábojů, procházejících vodičem za jednotku času t . Výchozí diskuse a předpoklady zavedení takto pojaté nové definice ampéru v soustavě SI, jakož i očekávané důsledky jejího zavedení do metrologické praxe, budou diskutovány v následujících odstavcích této kapitoly.

4.2 Kvantová metrologie elektrických veličin

Objev Josephsonova jevu (1962) a kvantového Hallova jevu (1980), spolu s pokrokem v technologiích vytváření tenkovrstvových struktur supravodičů a polovodičů, zcela změnil metodiku přesného měření elektrických veličin, napětí a odporu. U těchto veličin tak byl splněn základní požadavek metrologie, aby měření bylo v principu možno provést kdekoli a kdykoli s maximální přesností a s výsledkem, reprodukovatelným s nejistotou řádu 10^{-9} či lepší. Reprodukovatelnost měření obou veličin dnes dosáhla relativních nejistot řádu 10^{-10} , nejméně o 2 řády nižších, než s jakými je možno prakticky realizovat odpovídající jednotky soustavy SI. K výše zmíněným dvěma kvantovým jevům přistoupil později i třetí, tunelování jednotlivých elektronů (JET), který by potenciálně mohl umožnit realizaci kvantového etalonu proudu přímo z definice $I = N \cdot e/t$ a tedy praktickou reprezentací ampéru. Dosažení dostatečné přesnosti součástek, využívajících JET, by umožnilo uzavřít tzv. kvantový metrologický trojúhelník a mj. tak potvrdit i experimentálně správnost fyzikálních teorií, popisujících tyto makroskopické kvantové jevy.

4.2.1 Josephsonův jev

Pro systém, tvořený dvěma supravodiči oddělenými dostatečně tenkou vrstvou izolátoru nebo normálního, nesupra-

vodivého kovu – tzv. *slabý spoj* – předpověděl v r. 1962 Brian Josephson existenci dvou různých jevů, které byly krátce na to experimentálně potvrzeny :

- Stejnoseměrný proud o hustotě $J < J_c$ může procházet izolační vrstvou, aniž by na ní vznikalo jakékoliv napětí (*stejnoseměrný Josephsonův jev*). Kritický proud J_c je dán parametry použitého slabého spoje.
- Je-li slabý spoj ozářen elektromagnetickým zářením o frekvenci f , vytváří se na izolační bariéře konstantní napětí U , jehož velikost je úměrná f (*střídavý Josephsonův jev*).

Stejnoseměrný Josephsonův jev se záhy uplatnil v měřicí technice při konstrukci tzv. skvidů – extrémně citlivých detektorů magnetického toku. Kvantový etalon elektrického napětí vychází ze střídavého Josephsonova jevu. Je-li slabý spoj, kterým prochází stejnosměrný proud, ozářen mikrovlnným zářením o frekvenci f , objeví se v jeho volt-ampérové charakteristice (tj. v závislosti měřeného stejnosměrného napětí U na procházejícím proudu J) stupňovitá struktura, tzv. *Shapirovy schody*. Jednotlivým stupňům, jejichž šířka závisí na amplitudě mikrovlnného záření a parametrech slabého spoje, odpovídá konstantní napětí U , jehož velikost je dána vztahem $U = U_n = n (h/2e) f = (n f)/K_J$, kde n je celé číslo a $K_J = 2e/h$ je tzv. *Josephsonova konstanta*.

Optimální frekvence budícího záření f se nachází v oblasti mikrovln; při nejčastěji používané frekvenci $f = 70$ GHz je výška Shapirových schodů na jednom slabém spoji cca 145 μ V. K realizaci napětí potřebných k etalonáži je třeba zkombinovat na jedné součástce velké množství slabých spojů a ke každému z nich přivést miniaturním vlnovodem mikrovlnné záření. Technologie přípravy takovýchto součástek je dnes dobře zvládnuta a k dispozici jsou komerčně dostupné čipy různého typu o ploše několika cm^2 , které obsahují několik desítek tisíc vhodně propojených slabých spojů. S pomocí takových čipů a doladěním budící frekvence mikrovln f a napájecího proudu J je tak možno prakticky spojitě a vysoce reprodukovatelně generovat jakékoliv napětí v oboru od -10 V do + 10 V. Podrobnější popis Josephsonova kvantového etalonu napětí lze nalézt v článku [2].

Takto generované napětí je přitom prostřednictvím Josephsonovy konstanty K_J svázáno s dvěma fundamentálními fyzikálními konstantami h a e . Jejich numerické hodnoty v jednotkách soustavy SI však bylo (a stále je) možné určit pouze s relativními nejistotami řádu 10^{-8} , tedy podstatně horšími než je reprodukovatelnost praktické realizace etalonu napětí. Již na konci 80. let minulého století se tedy uvažovalo o principiální změně soustavy jednotek SI. K tomu nakonec nedošlo, stávající definice jednotek byly zachovány a návaznost Josephsonova etalonu elektrického napětí na jednotky SI byla uskutečněna postulováním numerické hodnoty Josephsonovy konstanty v jednotkách SI:

$$K_{J-90} = 2e_0/h_{90} = 483\,597,9 \text{ GHz/V.}$$

Index 90 zde zdůrazňuje fakt, že tato hodnota je od 1. 1. 1990 závazná pro všechny metrologické laboratoře a je dodnes používána při primární etalonáži elektrického napětí. Její stanovení vycházelo z váženého průměru nejpřesnějších experimentů, které přední metrologické laboratoře uskuteč-

nily do r. 1988. Tyto experimenty však probíhají stále, jsou stále přesnější a ukazují, že konstanta $K_J = 2e/h$ by měla být readjustována. Dosadíme-li totiž do K_J neaktuálnější doporučené hodnoty fundamentálních konstant h a e (CODATA 2010, viz [3]), dostaneme pro Josephsonovu konstantu měřitelnou relativní odchylku od hodnoty K_{J-90} rovnou $-6,41 \times 10^{-8}$. Používání hodnoty K_{J-90} tak sice zajistilo jednotnost měření napětí po celém světě, formálně to však znamená, že se dnešní primární etalony napětí vědomě odchylojí od soustavy SI.

4.2.2 Kvantový Hallův jev

Kvantový Hallův jev (KHJ) objevil Klaus von Klitzing v roce 1980. Při průchodu proudu I strukturou s dvourozměrným elektronovým plynem (2DEG) v kolmém magnetickém poli B vznikají na křivce příčného (Hallova) napětí U_H charakteristické prodlevy, na nichž je toto napětí s vysokou přesností konstantní a jeho hodnota odpovídá výrazu $U_H(i) = h/(i e^2) \times I = (R_K/i) I$, kde i je přirozené číslo a $R_K = h/e^2$ je tzv. *von Klitzingova konstanta*. Je pozoruhodné, že hodnota Hallova odporu $R_H(i) = U_H(i) / I$ na těchto prodlevách je s vysokou přesností (zcela nesrovnatelnou s tou, s kterou se běžně elektronové transportní vlastnosti v pevných látkách měří) stejná pro různé typy struktur s 2DEG a nemění se ani při poměrně výrazných fluktuacích magnetického pole a změnách teploty měření. Fyzikální podstata KHJ a jeho aplikace v kvantovém etalonu elektrického odporu byla diskutována např. v článku [4].

Nejpřesnější experimenty prokázaly, že odpor kvantové struktury v režimu KHJ je reprodukovatelný s relativní nejistotou cca 10^{-10} , opět nejméně o 2 řády nižší než nejistota, se kterou je možno realizovat jednotku elektrického odporu v soustavě SI. Situace je tedy obdobná té, se kterou se metrologická komunita musela vyrovnat u Josephsonova jevu. Pečlivé porovnání nejpřesnějších experimentů 10 špičkových národních metrologických laboratoří, provedených v 80. letech minulého století vedlo k tomu, že s platností od 1. 1. 1990 byla postulována závazná hodnota von Klitzingovy konstanty na hodnotě

$$R_{K-90} = h_{90}/e_{90}^2 = 25\,812,807 \, \Omega,$$

kterou stále používají metrologické laboratoře při praktické realizaci primárního kvantového etalonu elektrického odporu.

I zde došlo v posledních 20 letech k zpřesnění hodnot fundamentálních fyzikálních konstant h a e v jednotkách SI a při dosažení hodnot z nejnovější adjustace [3] do definice $R_K = h/e^2$ zjistíme relativní odchylku $+1,63 \times 10^{-8}$ od R_{K-90} . Ačkoliv takto malá odchylka nemá přílišný význam pro praktickou metrologii elektrického odporu, striktně řečeno to znamená, že i dnešní primární etalony elektrického odporu se měřitelným způsobem odchylojí od soustavy SI.

4.2.3 Tunelování jednotlivých elektronů

Tunelováním jednotlivých elektronů rozumíme řízený proces, při němž známý počet elektronů prochází za jednotku času součástkou, obsahující tzv. *tunelové spoje*, to jest tenké izolační bariéry oddělující od sebe dvě vodivé oblas-

ti. Elektrický proud tekoucí součástkou pak bude vyjádřen vztahem $I = e f$, kde frekvence f udává četnost průchodu elektronů součástkou. Je tedy zjevné, že tento proces v principu nabízí cestu k praktické realizaci ampéru přímo z definice, tedy „počítáním“ elektronů, které za jednotku času projdou součástkou v daném směru. Fyzikální popis tohoto jevu a podmínky jeho uplatnění v primárním etalonu elektrického proudu diskutoval na stránkách tohoto časopisu P. Středa již v r. 1995 [5].

Existuje několik typů součástek, kde je takovýto proces možno uskutečnit. Jejich podstatou je vždy manipulace s nábojem uskutečňovaná prostřednictvím elektrostatické energie v ultraminiaturních vodivých „ostrůvcích“ oddělených tunelovými spoji. Takové součástky, ve kterých je možno experimentálně pozorovat kvantování proudu po stupních popsaných vztahem $I = e f$, se objevily v poslední dekádě minulého století a technologie jejich přípravy a ovládání se stále zdokonaluje. Je možno je rozdělit do dvou příbuzných typů, pro které se vžil označení *jednoelektronový turniket* a *jednoelektronová pumpa*. V obou případech jde o součástky s konečným počtem tunelových spojů, liší se pouze konfigurací hradel a napěťových zdrojů, které řídí průchod jednotlivých elektronů součástkou.

Uvažujeme-li potenciální metrologická využití JET, je pochopitelně klíčovou otázkou přesnost, s jakou lze realizovat vztah $I = e f$. Je totiž principiálně nemožné přesně prostorově lokalizovat kvantově mechanickou částici, takže výraz $I = e f$ má vždy pouze omezenou platnost. Existuje řada faktorů, které ovlivňují činnost JET turniketu i jiných obdobných součástek. Jejich rozbořem lze dospět k následujícím požadavkům, kladeným na jejich parametry. Předně, optimální pracovní frekvence f je v praxi omezena na hodnoty $f \leq 10$ MHz; při vyšších frekvencích stoupá pravděpodobnost, že během charakteristického času $\tau = 1/f$ nedojde k tunelování elektronu a tím roste i nejistota měření. Toto omezení vede k tomu, že dostupné kvantované proudy jsou velmi malé, typicky $I \leq 1,6$ pA! Dalším požadavkem je co nejmenší kapacita tunelového spoje; v reálných součástkách je zpravidla $C < 1$ fF = 1×10^{-15} F, jedná se tedy o ultraminiaturní prvky nanometrových rozměrů. Konečně kompromis je třeba hledat i při stanovení počtu tunelových spojů resp. vodivých ostrůvků v JET turniketu nebo pumpě. Na jedné straně s rostoucím počtem spojů jsou potlačeny některé rušivé efekty a stoupá tak přesnost kvantování proudu, na druhé straně se tím komplikuje technologie výroby součástek i jejich ovládání.

Součástky tohoto typu dnes již dosahují dostatečně vysoké přesnosti; proud je v nich kvantován s relativní nejistotou řádu 10^{-8} . Chceme-li však realizovat kvantový etalon elektrického proudu, stojíme stále před problémem, jak měřit proud $I \cong 1$ pA s přesností lepší než 1 ppm (10^{-6}). Pro ilustraci uvedme, že to znamená rozlišit proudy, při kterých se za sekundu přemístí 6 elektronů!

Klíčem ke kvantovému etalonu proudu je tedy přesné měření velmi malých proudů. Nejjednodušší metoda měření proudu je založena na konverzi proudu na napětí prostřednictvím známého ohmického odporu, kalibrovaného pomocí

KHJ. V našem případě by to však vyžadovalo použití odporů velikosti alespoň 100 M Ω , které je obtížné oceňovat s dostatečnou přesností. Proud je ovšem možno měřit přímo pomocí kryogenního proudového komparátoru (CCC). CCC by vlastně působil jako jakýsi zesilovač proudu s koeficientem zesílení daným poměrem počtu závitů $N_1 : N_2$. Ten sice z praktických důvodů nemůže být libovolně veliký, byly však již představeny fungující komparátory s poměrem $N_1 : N_2 = 1 : 20\,000$ a dokonce i $1 : 30\,000$. Tato zařízení jsou schopna detekovat proudy s přesností řádu 0,1 fA (tj. 10^{-16} A !!), což je stále nedostačující, pokud se nějakým způsobem nepodaří zvýšit hodnotu budící frekvence f a tím i velikost proudu generovaného součástkami na bázi JET.

Nabízejí se zjevně 2 strategie, jak zvýšit výstupní proud JET součástek: Použít jiný princip resp. hnací sílu, která nutí jednotlivé elektrony procházet kontrolovaně součástkou nebo použít paralelního propojení většího množství JET turniketů resp. pump. Zkoumány jsou dnes obě tyto cesty. První skupinu reprezentují např. součástky, v nichž hnací silou pro elektrony jsou povrchové akustické vlny (SAW) v piezoelektrických materiálech typu GaAs. Pro kvantovaný proud zde platí $I = e f_{\text{SAW}}$ přičemž pro GaAs struktury je $f_{\text{SAW}} \cong 2,8$ GHz, což dává výstupní proud $I \cong 0,5$ nA. Přesnost realizovaných součástek tohoto typu však stále není dostatečná a nedosahuje ani nejistoty 10^{-6} . Na druhou stranu byly nedávno popsány experimenty s až 10 paralelně propojenými JET turniketami speciální konstrukce, kde by výstupní proud mohl dosáhnout až 100 pA. Tyto práce jsou však teprve v počátcích.

Dnes pravděpodobně nejnadějnější přístup k měření velmi malých proudů ze součástek, pracujících na základě JET, je založen na tzv. *proudovém integrátoru*, v němž je proud převáděn na napětí prostřednictvím kondenzátoru C_s známé velikosti. Kondenzátor je nabíjen kvantovaným proudem I a měří se časový průběh napětí na kondenzátoru $V(t)$. Proud je pak určen ze vztahu $I = C_s (dV/dt)$. Abychom nabili proudem $I = 1$ pA kondenzátor C_s za 100 s na napětí 1 V, potřebujeme kondenzátor o kapacitě $C_s = 100$ pF.

Experimenty tohoto typu probíhají již přes 15 let a zdrojem kvantovaného proudu jsou jak JET turnikety, tak i pumpy s různým počtem spojů. Experiment je však také možno obrátit. Nejde pak o absolutní měření proudu, nýbrž o pokus realizovat *kvantový etalon kapacity*, vycházející přímo z definice této veličiny. Příkladem je experiment, poprvé realizovaný v NIST již v r. 1994 a od té doby neustále zpřesňovaný. JET pumpa s 5 tunelovými spoji sloužila jako čítač elektronů, přiváděných na kondenzátor C a měřilo se napětí, které se na něm vytvářelo. Problém přesného měření malého napětí V , při kterém se neodebírá prakticky žádný proud, byl vyřešen použitím další součástky využívající jevu tunelování jednotlivých elektronů, totiž JET tranzistoru. Elektronová pumpa s 5 spoji pracovala s nejistotou 500 ppb (5×10^{-7}). V roce 2000 pak bylo představeno zařízení, sestávající z jednoelektronové pumpy se 7 spoji, která dodává známý počet elektronů N (s nejistotou $\delta N/N \approx 10^{-8}$) na desku speciálního kryogenního kondenzátoru s vakuovou mezerou o $C \approx 2$ pF a svodovém odporu $R > 10^{19}$ Ω . Známý náboj Ne indukují na tomto kondenzátoru napětí ΔV , které se měří vysoce citlivým

JET transistorem se 2 tunelovými spoji. Celková neurčitost takto stanovené kapacity kondenzátoru činila

$$\delta C / C \cong 1 \times 10^{-7}.$$

Na rozdíl od kvantových etalonů elektrického napětí a odporu tedy dosud vyvinutá zařízení na bázi JET ještě nedospěla do komerčního stádia a nedovolují realizovat jednotku elektrického proudu ani kapacity s přesností lepší, než kterou poskytují „klasické“ postupy, i když se k ní v obou případech postupně blíží. Je ostatně pochybné, že se kdy podaří realizovat součástku poskytující elektrický proud kvantovaným obdobně přesně, jako je tomu u napětí na Josephsonových spojích a u odporu v režimu kvantového Hallova jevu. I tak však již vývoj kvantového etalonu proudu pokročil natolik, že je možno vážně uvažovat o praktické realizaci tzv. kvantového metrologického trojúhelníku.

4.2.4 Kvantový metrologický trojúhelník

Kvantový metrologický trojúhelník (KMT) spojuje jednotlivé kvantové jevy, diskutované v předchozích odstavcích, do jednoho experimentu, který má klíčovou roli pro navrhovanou novou soustavu jednotek SI prostřednictvím souboru vybraných fundamentálních přírodních konstant. Cílem KMT má být redefinovat všechny elektrické jednotky měření prostřednictvím pouhých dvou fundamentálních konstant, Planckovy konstanty h a elementárního náboje e . V neposlední řadě by úspěšná realizace KMT také představovala důležitý test konzistentnosti řady základních fyzikálních teorií.

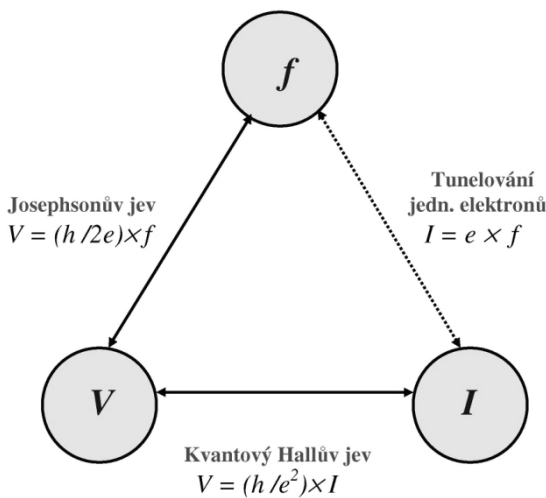


Schéma kvantového metrologického trojúhelníku

Základní schéma KMT je naznačeno na obrázku. Tři měřitelné fyzikální veličiny, elektrické napětí V , proud I a frekvence f jsou v něm propojeny základními vztahy z teorie tří makroskopických kvantových jevů. Dvě z odvěšen KMT, reprezentující KHJ a JJ, jsou již etablovanou součástí praktické metrologie elektrických veličin. Třetí odvěsna, JET, zatím nedosáhla požadované úrovně přesnosti (relativní nejistota pod 10^{-6}), díky úsilí špičkových národních metrologických laboratoří se jí však již blíží [6].

V praktické realizaci KMT se současně uplatňují dva odlišné přístupy. První z nich je přímou aplikací tzv. „kvantového“ Ohmova zákona, který lze zapsat vztahem $V_J = R_H \times I_{JET}$. Elektrický proud I_{JET} , generovaný např. jednoelektronovou pumpou pracující na frekvenci f , zde prochází kvantovým odporem v režimu KHJ a úbytek napětí na tomto odporu je přímo porovnáván s polem Josephsonových spojů, generujících napětí V_J .

Nedávno, na konferenci CPEM 2010, představily skupiny vědců z LNE a PTB konkrétní příklad využití tohoto přímého přístupu. Kvantovaný proud $I_{JET} = Q_x \times f$, generovaný kovovou JET pumpou se 3 tunelovými spoji buzenou různými frekvencemi v rozmezí $f = 10 - 100$ MHz, byl nejprve zesílen prostřednictvím kryogenního proudového komparátoru s poměrem závitů $N_1:N_2 = 1:20\,000$. Zesílený proud procházel odporem R_{cal} , který byl předem kalibrován vůči kvantovému etalonu odporu. Úbytek napětí na něm byl pak srovnán s napětím V_J Josephsonova etalonu elektrického napětí. V praxi měl tedy kvantový Ohmův zákon tvar $V_J = R_{cal} \times G \times I_{JET}$, kde $G = (N_2/N_1)$ je zisk „zesilovače“ CCC. Přesnost experimentu byla hodnocena srovnáním experimentálně získané hodnoty náboje Q_x s hodnotou elementárního náboje e doporučenou výborem CODATA. Zjištěná odchylka činila 5×10^{-5} , což je dobrý příslib brzkého uzavření KMT na požadované úrovni nejistoty 10^{-6} .

Druhý slibný přístup k uzavření KMT spočívá ve využití kvantového etalonu kapacity (ECCS – „electron counting capacitance standard“), tedy k experimentálnímu uplatnění definičního vztahu $Q = C \times V$. Při tomto experimentu jednoelektronová pumpa, kontrovaná JET transistorem ve funkci elektrometru, dodává tok jednotlivých elektronů, které postupně nabíjejí kondenzátor o známé kapacitě C , kalibrováný vůči KHJ. Napětí V , které se na kondenzátoru vytváří, je pak měřeno pomocí Josephsonova etalonu napětí. Tím je nepřímou uzavřen KMT. Tento přístup je rozvíjen především pracovníky NIST a nedávno zde byl dokončen experiment, kde byl oznámen první průlom „magické“ hranice nejistoty 10^{-6} ; KMT byl uzavřen s relativní standardní odchylkou hodnoty náboje Q_x (JET) od doporučené hodnoty elementárního náboje e (CODATA) rovnou $9,2 \times 10^{-7}$.

I když tedy existující součástky aplikující jev JET nedokázaly realizovat plnohodnotný kvantový etalon elektrického proudu, jejich využití v třetí větvi KMT poskytlo mimo jiné i alternativní metodu upřesnění hodnoty elementárního náboje, který je klíčovou přírodní konstantou pro nově navrhovanou definici ampéru v soustavě SI.

4.3 Návrh nové definice ampéru v soustavě SI

V posledních letech bylo dosaženo značného pokroku při navazování mezinárodního prototypu kilogramu na Planckovu konstantu h , především v experimentech s výkonovými (často wattovými, viz úvod) váhami (viz [1]) a s tzv. křemíkovým kilogramem (viz kap. 2 této Přílohy). Stalo se současně zřejmým, že nejistoty všech elektrických jednotek SI, realizovaných přímo či nepřímou prostřednictvím kvantových jevů JJ a KHJ a navázaných na jednotky SI pomocí

vhodně zvolených hodnot Josephsonovy konstanty K_J a von Klitzingovy konstanty R_K , bude možno značně snížit, bude-li kilogram navázán na přesnou hodnotu Planckovy konstanty h a ampér na přesnou hodnotu elementárního náboje e . Mnohaleté diskuse metrologů o tom, jak nejlépe navázat základní jednotky soustavy SI na vhodné fundamentální přírodní konstanty byly shrnuty v obsáhlém článku [7]. Bylo navrženo několik alternativních formulací, které byly v následujících letech podrobně posuzovány a vyústily v definitivní verzi, která byla předložena 24. zasedání CPMG v říjnu 2011 [8]. Konečný termín schválení nové definice závisí, stejně jako u ostatních základních jednotek SI, na splnění dalších podmínek viz také závěr této přílohy.

Pro definici ampéru byla nakonec zvolena tato formulace:

Ampér je jednotkou elektrického proudu. Její velikost je taková, že numerická hodnota elementárního náboje je přesně rovna $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$, je-li vyjádřena v jednotkách SI A·s (ampér × sekunda), která je rovna C (coulomb).

Symbol X zde reprezentuje všechny číslice na dalších desetinných místech, které budou doplněny před oficiálním vyhlášením této definice na základě poslední dostupné adjustace CODATA. Pro zajímavost zde uvedme, že aktuální doporučená hodnota elementárního náboje v adjustaci CODATA 2010 činí $e = 1,602\,176\,565(35) \times 10^{-19}$ C.

Byla tedy dána přednost definici, kde je explicitně uvedena numerická hodnota příslušné referenční konstanty. Uvažovala se i ekvivalentní formulace s explicitním uvedením měřených veličin. Ta by v případě elektrického proudu zněla takto:

Ampér je elektrický proud ve směru toku přesně $1/1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ elementárních nábojů za sekundu.

Pro ampér se tato formulace, která přímo vychází z definičního vztahu $I \cdot t = N \cdot e$, zdá být intuitivně pochopitelnější, byl však akceptován výše uvedený přístup jednotný pro všechny základní jednotky. U nich může být naopak jednodušší formulace s explicitním vyjádřením hodnoty referenční konstanty. To platí i pro definici kilogramu, který je prostřednictvím JJ a KHJ neoddělitelně spojen s ampérem:

Kilogram je jednotkou hmotnosti. Jeho velikost je taková, že hodnota Planckovy konstanty je přesně rovna $6,626\,068\,96 \times 10^{-34}$, je-li vyjádřena v jednotkách SI $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, které jsou rovny J·s (joule × sekunda).

Aktuální doporučená hodnota Planckovy konstanty dnes činí $h = 6,626\,069\,57(29) \times 10^{-34}$ J·s. Zdá se, že právě jisté rozpory při experimentálním určení hodnoty této konstanty jsou jednou z hlavních příčin toho, že vyhlášení nových definic bylo prozatím odloženo [8].

K objasnění tohoto problému je třeba zmínit, na základě jakých dat vlastně výbor CODATA stanoví nejpřesnější dostupné hodnoty jednotlivých fyzikálních konstant. Těch je celá řada a lze je rozdělit zhruba do dvou kategorií. Některé z nich jsou tzv. přímo adjustované konstanty a mezi ně patří i Planckova konstanta h . Další jsou však získány výpočtem

podle relací, odvozených z fyzikálních zákonů. Sem patří i elementární náboj, který se počítá z výrazu $e = (2ah/\mu_0 c)^{1/2}$. Do výpočtu tedy kromě hodnoty h vstupuje také konstanta jemné struktury α ; magnetická konstanta μ_0 a rychlost světla ve vakuu c jsou v dnešní sestavě SI přesně fixovanými konstantami s nulovou nejistotou. Konstanta α je již řadu let stanovena s relativní nejistotou menší než 10^{-9} , hlavní příspěvek k nejistotě stanovení náboje e tedy pochází od Planckovy konstanty.

Data pro určení hodnoty h pocházejí z několika typů přesných měření. Přímé určení h poskytují experimenty s výkonovými váhami [1], nepřímo je možno ji vypočítat z nezávisle stanovené hodnoty Josephsonovy konstanty K_J a hlavně z molárního objemu křemíku $V_m(\text{Si})$, určeného v rámci experimentů pro realizaci tzv. křemíkového kilogramu. Problém spočívá v tom, že hodnoty Planckovy konstanty z prvních dvou typů měření spolu sice poměrně dobře souhlasí, hodnota vycházející z $V_m(\text{Si})$ se však od nich citelně odchyľuje. Tento rozpor dosud nebyl zcela odstraněn, přestože nejistoty jednotlivých experimentů se v poslední době podstatně zmenšily. Do poslední adjustace v roce 2010 vstoupila nová přesná data určení Avogadrovy konstanty N_A z monokrystalu Si, tvořeného téměř výhradně izotopem ^{28}Si . Nejistota činila $3,0 \times 10^{-8}$ a prakticky se stejnou nejistotou byla odtud určena hodnota h . Poslední přímá měření Planckovy konstanty výkonovými váhami dosáhla relativní nejistoty $3,6 \times 10^{-8}$, tedy zcela srovnatelné. Problém spočívá v tom, že obě tyto nejpřesnější hodnoty se od sebe liší a velikost odchylky leží mimo rámec obou zmíněných nejistot. Kombinovaná nejistota stanovení Planckovy konstanty z obou těchto experimentů pak činí $4,4 \times 10^{-8}$, zatímco cílová hodnota, stanovená CPMG pro definitivní vyhlášení nové definice kilogramu a dalších základních jednotek SI, je 2×10^{-8} [9]. Zdá se, že k vyhlášení nových definic kilogramu a ampéru bude moci dojít až poté, co další, přesnější experimenty tento rozpor odstraní. Podle tiskové zprávy, kterou BIPM vydalo 23. 10. 2011 na závěr 24. kongresu CGPM, to však nebude dříve než v roce 2014 [9].

4.4 Důsledky zavedení nových definic pro metrologii elektrických veličin

První z důsledků je očividný: Fixováním konstant h a e se automaticky fixují i přesné hodnoty jakýchkoliv jejich kombinací, tedy i Josephsonovy konstanty $K_J = 2e/h$ a von Klitzingovy konstanty $R_K = h/e^2$. Tím tedy odpadne nutnost používat postulované hodnoty K_{J-90} a R_{K-90} . Tady ovšem vyvstává jistý problém pro Národní metrologické instituty resp. pro jejich primární etalony elektrického napětí a odporu. Z důvodů, které jsme zmínili na konci odstavců 4.2.1. a 4.2.2 se budou muset vyrovnat s jistou diskontinuitou v hodnotách těchto primárních etalonů. Tento problém se však těžko nějak měřitelně projeví v praktické metrologii elektrických veličin.

To, že hodnoty K_J a R_K budou přesně známé, umožní používat Josephsonův a kvantový Hallův jev k realizaci všech elektrických jednotek SI, nejen voltu a ohmu, nýbrž i wattu, faradu a henry bez jakékoliv nejistoty, pocházející od těchto konstant.

Magnetická konstanta μ_0 , s ní související elektrická konstanta ϵ_0 a charakteristická impedanace vakua Z_0 nadále nebudou fixovanými konstantami, bude třeba je určovat experimentálně a budou tedy zatíženy jistou nejistotou. Pro μ_0 ovšem bude nadále platit $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{A}^{-2} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ s nejistotou danou nejistotou určení konstanty jemné struktury α , která při poslední adjustaci CODATA 2010 činila nepatrných $3,2 \times 10^{-10}$. Stejnou nejistotou pak budou zatíženy i veličiny ϵ_0 a Z_0 a všechny 3 budou zřejmě zahrnuty mezi konstanty adjustované v pravidelných intervalech výborem CODATA.

Očekává se, že současně s vyhlášením nových definic budou zveřejněny i „*mises en pratique*“, tedy podrobný soubor instrukcí a doporučení, jak je implementovat do metrologické praxe. Obdobné instrukce již existují např. pro aplikaci kvantového Hallova jevu v primární metrologii elektrického odporu. Ty by měly usnadnit zavádění nových definic a sjednocení praktické realizace jednotek elektrických veličin. Lze očekávat, že bude nějaký čas trvat, než se nové definice a jejich důsledky vžijí. Vzhledem k tomu, že soustava základních jednotek SI se formálně nemění, bude to asi problém pouze na úrovni primárních metrologických laboratoří, pro praktické účely bude kontinuita měření zachována.

Literatura:

- [1] BOHÁČEK, J.: Wattové váhy a elektronický kilogram, *Metrologie* 2011, č. 3
- [2] VRABČEK, P.: Súčasná realizácia ampéra a jej perspektívy, *Metrológia a skúšobníctvo* 2011, č. 1
- [3] NIST. *The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty*. URL: <<http://physics.nist.gov/cuu/Units/index.html>>
- [4] SVOBODA, P.: Etalony na bázi kvantového Hallova jevu, *Metrologie* 2007, č. 4, Tématická příloha, kap. 2.3
- [5] STŘEDA, P.: Elektronový turniket jako etalon elektrického proudu, *Metrologie* 1995, č. 2
- [6] KELLER, M. W.: Current status of the quantum metrology triangle, *METROLOGIA* **45**, 2008, pp. 102-109
- [7] MILLS I. M., MOHR P. J., QUINN T. J., TAYLOR B. N. a WILLIAMS E. R.: Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005), *METROLOGIA* **43**, 2006, pp. 227-246
- [8] BIPM. *On the possible future revision of the International System of Units, the SI, Resolution 1* URL <http://www.bipm.org/utis/en/pdf/24_CGPM_Resolution_1.pdf>
- [9] BIPM. *General Conference on Weights and Measures approves possible changes to the international system of units, including redefinition of the kilogram*. 23 October 2011 – Sèvres, France. URL <[http://www.bipm.org/utis/en/pdf/Press release resolution 1 CGPM.pdf](http://www.bipm.org/utis/en/pdf/Press%20release%20resolution%201%20CGPM.pdf)>



5 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA DYNAMICKÉ TEPLoty – KELVIN

5.1 Měření teploty, historie a principy

Počátky měření teploty spadají do období antiky, kdy staří Řekové považovali teplo a chlad za zvláštní vlastnosti hmoty (společně se suchem a vlhkem). Výroba opravdu prvního teploměru asi zůstane navždy zahalena tajemstvím. Za nejstarší přístroj k indikaci tepelných stavů se považuje vzduchový termoskop, který popsal a používal alexandrijský Heron. Jeho spisy koncem 16. století studoval italský přírodopisec Galileo Galilei, který si takový termoskop sestrojil. Podstatně jej zdokonalil K. Schott (1608–1666), a to tím, že použil uzavřený systém se dvěma baňkami na koncích spojovací trubice ve tvaru písmene U, v níž byla indikační kapalina. Byl to vlastně rozdílový teploměr se vzduchem jako teploměrnou látkou. Francouzský lékař Jean Rey použil v roce 1631 jako teploměrnou látku vodu v otevřené baňce. Další zdokonalení navrhl a realizoval Galileův žák, toskánský vévoda Ferdinand II., v roce 1641; ten plnil lihem teploměry tvarem již podobné současným. Stupnice však byly nezávisle volené, takže údaje se navzájem lišily. Později florentinská Akademie používala pro meteorologické účely teploměry se

spirálovitě stočenou trubičkou rozdělenou na 300 až 400 stejných dílků. Tyto teploměry byly velmi citlivé a členové Akademie s jejich pomocí zjistili, že teplota tajícího ledu je velmi stabilní. Tuto teplotu začal používat jako základní R. Boyle v roce 1664.

Vývoj spolehlivého přístroje pro měření teploty vyžadoval vytvoření vědecké teorie tepla a teploty tak, aby jeho údaj byl opakovatelný a nezávislý na místě, času, metodě a pracovníkovi. Proto bylo nutné definovat stupnici pro měření teploty.

O stanovení všeobecné teplotní stupnice se jako první zasloužil D. G. Fahrenheit. Teplotní stupnici založil na třech teplotách a teploměru naplněném lihem. Za základní bod použil teplotu chladicí směsi ledu a salmiaku a označil ji nulou (domníval se, že nelze vytvořit teplotu nižší). Jako druhou zvolil teplotu tání ledu a označil ji číslem čtyři. Třetím bodem byla teplota zdravého lidského těla, označená číslem dvanáct. Od roku 1720 plnil teploměry rtutí. Poněvadž došední díly se mu zdály velké, rozdělil každý na osm částí, které nazval stupně, takže teplota tání ledu má na jeho stupnici hodnotu 32 stupňů (značka °F), teplota zdravého lidského těla je 96 °F a teplota varu vody je 212 °F. Teploměry vy-

ráběné Fahrenheitem se rychle rozšířily a stupnice označená jeho jménem se dodnes používá v Anglii a v USA.

V Evropě se delší dobu používala teplotní stupnice, kterou asi v roce 1740 navrhl pařížský zoolog René de Réaumur. Teplotu tání ledu na ní označil číslem 0 a teplotu varu lihu číslem 80. Později, u rtuťových teploměrů, odpovídalo číslo 80 teplotě varu vody (s připojenou značkou °R).

Švédský matematik a geodet Anders Celsius (1701–1744) zavedl v roce 1742 do měření teplot desítkovou soustavu. Teplotu tání ledu označil číslem 100, teplotu varu vody 0. Po něm profesor Martin Strömer (1707–1770) navrhl v roce 1750 Švédské akademii, aby úsek mezi teplotou tání ledu a teplotou varu vody byl ponechán rozdělený na sto stupňů, ale označení teploty tání ledu se změnilo na 0 a teplotě varu vody byla přiřazena číselná hodnota 100. Tato stupnice se dodnes nazývá Celsiova (se značkou °C).

Pokrok termodynamiky vedl k termodynamické teplotní stupnici (značka °K), kterou v roce 1852 popsal lord Kelvin: Teplotu je možné definovat nezávisle na jakémkoliv látce podle II. věty termodynamické, jednající o přeměně tepla v práci. Poměr teplot dvou těles lze považovat za poměr dvou tepelných množství – tepla odebraného a tepla odevzdaného ve vratném Carnotově cyklu, pracujícím mezi dvěma teplotami, takže měření teploty se převádí na měření množství tepla. Je nutné zvolit jeden pevný bod a stanovit jeho teplotu. To později udělala 13. generální konference pro míry a váhy v roce 1967, když stanovila, že jeden kelvin, jak byl nazván základní díl Kelvinovy termodynamické teplotní stupnice (přijátý také za jednotku rozdílu teplot), je 1/273,16 termodynamické teploty trojného bodu vody.

Termodynamická teplotní stupnice je definována na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. Účinnost těchto vratných cyklů pracujících mezi stejnými lázněmi určitých teplot je závislá jen na těchto teplotách a nezávislá na použité teploměrné látce. Pro teplotu $T_2 > T_1$ platí

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}, \quad (1)$$

kde η je účinnost cyklu, T je termodynamická teplota, Q_2 je teplo odebrané teploměrnou látkou z lázně s teplotou T_2 a Q_1 je teplo odebrané teploměrnou látkou z lázně s teplotou T_1 .

Termodynamickou teplotní stupnici založenou na Carnotově vratném cyklu nelze v praxi realizovat. Proto termodynamická teplotní stupnice vychází z vlastností ideálního plynu a k její realizaci slouží plynový teploměr. Údaje získané prostřednictvím skutečného plynu, kterým je použitý teploměr naplněn, je nutné korigovat. Plynový teploměr je založen na stavové rovnici ideálního plynu

$$PV = NkT, \quad (2)$$

kde P je tlak plynu, V je jeho objem, N je počet molekul plynu v daném objemu, k je Boltzmannova konstanta a T je termodynamická teplota.

Protože je absolutní měření přesných hodnot veličin z rovnice (2) obtížné, používá se v praxi poměrová verze

tohoto zákona (vztažené na nějaký pevný bod s indexem 0)

$$\frac{PV}{P_0V_0} = \frac{T}{T_0}. \quad (3)$$

Pro velmi přesná měření je výsledná rovnice komplikovanější korekcemi na neideální chování plynu a na reálné chování vlastní aparatury. Jako médium se obvykle používají izotopy hélia.

Pro praktické účely jsou používány tzv. *primární teploměry*. Jedná se o zařízení, které je možné popsat explicitní rovnicí, vyjadřující vztah mezi měřenými hodnotami a teplotou. Tato rovnice neobsahuje žádné další konstanty nebo funkce závislé na teplotě.

Prvním příkladem primárního teploměru je plynový teploměr. Častěji zde bývá využívána modifikace rovnice (2)

$$PV = nRT, \quad (4)$$

kde n je počet molů média a R je univerzální plynová konstanta. Tento vztah platí pro ideální plyn. Pro reálný plyn je využívána viriálová rovnice

$$PV = nRT \left(1 + B(T) \frac{n}{V} + C(T) \left(\frac{n}{V} \right)^2 + \dots \right), \quad (5)$$

kde B a C je druhý a třetí viriálový koeficient (závislý na teplotě). Vztahy pro výpočet těchto koeficientů jsou poměrně složité i pro plyny blízké ideálnímu chování (používá se helium). Proto se v praxi obvykle používá dvoukomorového zapojení s jednou komorou referenční (na známé teplotě, nejčastěji 273,16 K). Výsledkem měření je termodynamická teplota.

Další možností je tzv. *šumový teploměr*. Na vývodech každého rezistoru je v důsledku teplotně závislého volného pohybu elektronů ve vodivostním pásmu měřitelné elektrické napětí, které má stochastický charakter. Toto napětí se označuje jako *Johnsuův*, *Nyquistův* nebo jednoduše tepelný šum. Energie tohoto šumu je rovnoměrně rozložena po celém frekvenčním pásmu, odpovídá tedy bílému šumu. Tepelný šum je dán spektrální výkonovou hustotou S podle následujícího vztahu

$$S(f) = 4kT \operatorname{Re}(Z(f)), \quad (6)$$

kde k je Boltzmannova konstanta, f je frekvence a $\operatorname{Re}(Z)$ je reálná část impedance rezistoru. V praxi se obvykle používá vztahu

$$\bar{u}^2(T) = 4kTR\Delta f \quad \text{nebo} \\ u_{\text{eff}} = \sqrt{\bar{u}^2(T)} = \sqrt{4kTR\Delta f}, \quad (7)$$

kde u_{eff} je efektivní hodnota šumu a R je zde elektrický odpor, který je v daném frekvenčním pásmu Δf frekvenčně nezávislý. V praxi se opět volí poměrová realizace, která má menší nároky na instrumentaci.

Velmi často používaným primárním teploměrem je pyrometr *celkového záření*. Celková intenzita vyzařování černého tělesa L při teplotě T je dána vztahem

$$L(T) = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4, \quad (8)$$

kde c je rychlost světla, h je Planckova konstanta, k Boltzmannova konstanta a σ je Stefan-Boltzmannova konstanta. Podobně jako u předešlých typů bývá používán poměrový vztah (vůči teplotě trojného bodu vody)

$$\frac{L(T)}{L(T_{273,16})} = \left(\frac{T}{273,16} \right)^4. \quad (9)$$

Výše uvedené typy jsou nejčastěji používané primární teploměry. Slouží k určování termodynamické teploty. Jejich používání je ale drahé a náročné. Proto bývají používány pro úkoly vědeckého charakteru.

Postupem času se vývoj začal ubírat čtyřmi hlavními směry:

1. **Fyzikální interpretace** – co je podstata teploty? Trvalo téměř 300 let od prvního praktického teploměru k vytvoření dobré fyzikální teorie měření teploty.
2. **Stupnice** – jak by měla být definována stupnice teploty? V průběhu let docházelo k vývoji teplotních stupnic a do současné doby se jedná o oblast neustálého vylepšování.
3. **Měření** – výsledek měření teploty je ovlivňován celou řadou faktorů. Vědecká interpretace výsledných vlivů a chyb vyžaduje systematický přístup.
4. **Návaznost** – co je vyžadováno, aby byl výsledek měření akceptován ostatními? Návaznost jako koncept je neustále rozvíjena. Pouze laboratoře, které se systematicky věnují výše uvedeným problémům a mají zajištěnou metrologickou návaznost výsledků měření, mohou dosáhnout toho, že jejich výsledky jsou obecně akceptovány.

5.2 Teplotní stupnice

Jak bylo výše ukázáno, je měření teploty zprostředkováno měřením jejího vlivu na jinou veličinu, například objem nebo tlak. Lineární interpolací mezi dvěma pevnými teplotami bylo zavedeno více teplotních stupnic, realizovaných jako například rtuťová, lihová, platinová. Ty se od sebe lišily tím více, čím větší byla vzdálenost měřené teploty od zvolených pevných teplotních bodů, protože měřená veličina (např. objem nebo tlak) se v závislosti na teplotě u různých realizací liší.

V roce 1887 přijal Mezinárodní výbor pro váhy a míry (CIPM) dohodu o způsobu měření teplot. Vyšel ze stodílkové stupnice vodíkového teploměru se dvěma pevnými teplotami. Byly to teplota tání ledu (0°C) a teplota varu destilované vody při normálním atmosférickém tlaku (100°C). Počáteční tlak vodíku v plynovém teploměru byl 1 000 torrů (133,32 kPa). V téže době P. Chappius porovnal čtyři rtuťové teploměry z tvrdého skla mezi 0 až 100°C a mezi 0 až 32°C se svým vodíkovým teploměrem. Tyto velmi přesné

rtuťové teploměry vyráběla francouzská firma Tonnelot. Od roku 1898 je vyráběla i firma Boudin, takže si je mohla opatřit, a poté měřit teplotu v rozmezí 0 až 100°C s rozlišením $\pm 0,01$ stupně, každá laboratoř.

V roce 1911 se ředitelé národních laboratoří Německa (PTR), Velké Británie (NPL) a Spojených států amerických (NBS) dohodli na sjednocení teplotní stupnice pro použití ve svých zemích. Toto úsilí bylo formálně schváleno v roce 1913 na 5. Generální konferenci pro váhy a míry. Postupně se chystal návrh teplotní stupnice. Prvním příspěvkem bylo oznámení německé laboratoře PTR, jakým způsobem bude kalibrovat teploměry od 1. 4. 1916. Mezinárodní spolupráci omezila válka, takže výsledek práce vykonané s cílem vytvořit praktickou teplotní stupnici byl zveřejněn až v roce 1927 na 7. Generální konferenci pro váhy a míry, kde se sešli zástupci 31 států. Na doporučení tří zmíněných laboratoří, které se poradily o problematice nízkých teplot s Leidenskou kryogenickou laboratoří, byla na této konferenci jednomyslně přijata rezoluce navržená CIPM: „Výbor uznává praktický význam ustanovení mezinárodní teplotní stupnice a doporučuje konferenci prozatímně přijmout základní teplotní body, interpolační vzorce a metody měření společně navržené třemi národními laboratořemi: Německa, Anglie a Spojených států amerických. Výbor také doporučuje, aby prozkoumání připojeného textu bylo zařazeno jako zvláštní bod programu konference o termometrii, která bude pořádána pod jeho dohledem.“ Tak byla přijata tzv. Mezinárodní teplotní stupnice 1927 (The International Temperature Scale of 1927 – ITS-27).

Teplotní stupnice se vyznačuje minimální a maximální hodnotou, pevnými body a interpolačním postupem pro určování teploty mezi nimi.

Pevný bod je reprezentován fyzikálním systémem s reprodukovatelným chováním. Nejběžněji se jedná o velmi čistou látku (nominální čistota často přesahuje 99,99999%), která taje, tuhne, vypařuje se nebo je v tzv. *trojném bodě*. Z obecně platných zákonů vyplývá, že pokud se vyskytuje v koexistenci jedna látka o dvou fázích (např. kapalina, pevná látka) v izobarickém systému není možné měnit teplotu, aniž by došlo k vymizení jedné fáze. Pro systém v trojném bodě (koexistence všech tří fází média) nemusí být splněna ani podmínka izobarického systému, počet stupňů volnosti je nulový, tedy není možné změnit ani tlak ani teplotu, aniž by došlo k vymizení jedné fáze.

Do současné doby vzniklo několik teplotních stupnic, vždy pojmenovaných podle roku zavedení. Liší se od sebe svojí přesností, metodami interpolace, rozsahem a typem jednotlivých fixních bodů. Jednalo se postupně o stupnice ITS-27, ITS-48 (s modifikací z roku 1960), ITS-68 (s modifikací z roku 1975) a poslední ITS-90 (s modifikací z roku 2000). **Tabulka č. 1** ukazuje příklady pevných bodů používaných v těchto teplotních stupnicích.

V současně platné stupnici ITS-90 je jako základní bod vzat *trojný bod vody* s definovanou hodnotou 273,16 K. Trojný bod vody (TPW) je realizován v baňce z křemenného nebo borosilikátového skla, uložené ve speciální lázni nebo v Dewarově nádobě s ledem – viz **obr. 1**.

Tab. 1: Vybrané body mezinárodních teplotních stupnic.

Označení prodlev: V – var; T – trojný bod; M, F – tání, tuhnutí

Látka (prvek)	Prodleva	Teplota ve °C pro mezinárodní teplotní stupnice z roku					
		1927	1948	1960	1968	1975	1990
vodík	T				-259,34	-259,34	-259,346 7
vodík	V				-252,87	-252,87	
dusík	T				-210,002	-210,004	
kyslík	T				-218,789	-218,789	-218,791 6
argon	T					-189,352	-189,344 2
rtuť	T	-38,87	-38,87	-38,87	-38,862	-38,841	-38,834 4
voda	M, F	0	0	0	0	0	
voda	T			0,01	0,01	0,01	0,01
galium	M						29,764 6
voda	V	100	100	100	100	100	
indium	F			156,61	156,634	156,634	156,598 5
cín	F	231,85	231,9	231,91	231,9681	231,9681	231,928
kadmium	F	320,9	320,9	321,03	321,108	321,108	
rtuť	V	356,58	356,58	356,66	356,66		
stříbro	F	960,5	960,8	960,8	961,93		961,78
zlato	F	1 063	1 063	1 063	1 064,43		1 064,18
měď	F	1 083	1 083	1 083	1 084,50		1 084,62
platina	F		1 769	1 769	1 772		



Pro přesné měření teploty (kalibrace) je důležité tento základní bod realizovat s nejistotami co nejlepšími (primární laboratoř teploty ČMI OI Praha vlastní banku několika trojných bodů a realizuje tento základní bod s nejistotou 0,07 mK).

Obr. 1: Kyveta trojného bodu vody

5.3 Budoucnost měření teploty

V současné době platí teplotní stupnice ITS-90 s dodatkem pro nízké teploty PLTS-2000. V říjnu 2005 přijalo CIPM doporučení komise CCT na specifikaci isotopické čistoty vody, používané v definici jednotky kelvin. Takto definované složení má označení V-SMOW. Po této specifikaci bylo možné vysvětlit rozdíly mezi jednotlivými laboratořemi primární metrologie na úrovni 0,17 mK. Další úlohou bylo používání kyvet z křemenného skla, které jsou časově stálejší než kyvety borosilikátové. V současné době se pohybuje standardní nejistota předních světových pracovišť na úrovni 30 μ K ($k=2$). Podobné aktivity jsou pozorovány i pro ostatní pevné body, kde je možné pozorovat varianty v isotopickém složení, hlavně v pevném bodě vodíku. Stávající výsledky ale zatím nejsou dostatečně konzistentní, a proto je nutné provést další sérii nezávislých měření. Přípravuje se dodatek teplotní stupnice, věnovaný problémům isotopického složení

látěk, problémům isotopické segregace při tání kovů a vlivu chemických nečistot. Problém realizace teplotní stupnice ilustruje následující tabulka několika příkladů rozdílů při měření teploty primárním teploměrem (označené T) s měřením teploty podle platné teplotní stupnice (označené T_{90}). Nejistota u je v tabulce uvedena pro koeficient rozšíření rovný 1.

T_{90} [K]	$T-T_{90}$ [mK]	u [mK]	T_{90} [K]	$T-T_{90}$ [mK]	u [mK]
4,2	-0,02	0,12	290	2,19	0,4
17,035	0,51	0,16	335	7,62	0,5
20,27	0,32	0,17	373,124	9,74	0,6
70	-1,57	1,9	692,677	13,8	6,9
130	-8,07	1,6	903,778	27,6	7,6
195	-6,97	1,8	1150	46,3	20
273,16	0	0	1357,77	52,1	20

Stále se zvyšující disproporce mezi měřením termodynamické teploty a realizací teplotní stupnice vytváří prostor pro vývoj realizace jednotky kelvin změnou mezinárodní teplotní stupnice. Výhodou zavedení nové stupnice bude zejména:

- Nová stupnice bude blíže k termodynamické teplotě.
- Nebude nutné uvádět referenci, jedná-li se o teplotu podle ITS-90, PLTS-2000 nebo termodynamickou.

- Nová stupnice zahrne nejnovější vědecké poznatky o pevných bodech, měřicích přístrojích a interpolačních rovnicích.
- Nová stupnice umožní odstranění nestandardního chování výpočtových funkcí pro průmyslové teploměry. Nelze ale vyloučit ani nevýhody:
- Náklady pro implementaci nové stupnice v průmyslu budou značné a výhody, které to průmyslu přinese minimální, protože současná stupnice je pro průmyslové účely dostatečná. Jedná se o změny v programovém vybavení, převodnicích a přístrojích.
- Hodnoty jednotlivých pevných bodů musí být konzistentní napříč různými implementacemi různých metod primární termometrie.

Nedílnou součástí těchto úvah musí také být připravovaná nová definice jednotky kelvin, která už nebude vztažena k trojnému bodu vody, ale k fixované Boltzmannově konstantě. Předpokládané navýšení nejistoty je dáno tím, že teplota trojného bodu nebude už známa přesně, ale bude zatížena nejistotou, která, při současné nejistotě určení Boltzmannovy konstanty, bude mít hodnotu 0,49 mK.

Tab. 2: Předpokládaný vývoj nejistot měření teploty u vybraných PB stupnice T_{90} .

Pevný bod	T_{90} [K]	Současný stav		Po redefinici
		$u(T_{90})$ [mK]	$u(T)$ [mK]	$u(T_{k\text{fix}})$ [mK]
Cu	1357,77	15	60	60,1
Au	1337,33	10	50	50,1
Ag	1234,93	1	40	40,1
Al	933,473	0,3	25	25,1
Sn	505,078	0,1	5	5,10
In	429,7485	0,1	3	3,11
Ga	302,9146	0,05	1	1,15
TPW (H ₂ O)	273,16	0,02	0	0,49
Hg	234,3156	0,05	1,5	1,55
Ar	83,8058	0,1	1,5	1,50
O ₂	54,3584	0,1	1	1,00
⁴ He	4,2221	0,1	0,3	0,30

5.4 Navrhovaná definice jednotky kelvin

Současná definice jednotky je navázána na definitoricky danou hodnotu teploty trojného bodu vody, která je tedy udána s nulovou nejistotou. Teplota trojného bodu vody, dosud využitá v definici, je ovlivněna například isotopovým složením vody a je tedy sice „konstantou“, ale napříště nevyhovující. Kelvin se proto vztáhne k fundamentální Boltzmannově konstantě.

Nová definice prováže klasickeu povahu vnímání teploty se statistickou termodynamikou a fyzikou – s mírou neuspořádanosti pohybu částic v látkách.

Nová definice kelvinu je navržena v následujícím znění:

Kelvin je jednotkou termodynamické teploty; jeho velikost je určena hodnotou Boltzmannovy konstanty, jejíž číselná hodnota se rovná přesně $1,380\ 6X \times 10^{-23}$, je-li vyjádřena v jednotkách SI $m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$, což se rovná $J\ K^{-1}$.

Neznámé hodnoty prozatím označeny jako X budou do definitivního přijetí nových definic upřesněny přesnými měřeními.

Význam definice můžeme chápat také tak, že *kelvin je taková změna termodynamické teploty, která odpovídá změně tepelné energie kT o hodnotu $1,3806X \cdot 10^{-23}$ Joulu*.

Důsledky změny definice jednotky se v běžné praxi měření a kalibrace na průmyslové úrovni neprojeví; znatelné ale budou v laboratořích národních metrologických institutů a ve vědeckých laboratořích. Před zavedením nové definice kelvinu (stejně jako kilogramu, ampéru a molu) bude nutné provést ještě velkou řadu náročných měření s cílem určit hodnoty fixovaných konstant a zejména dosáhnout shody výsledků experimentů, používaných k tomuto účelu, v požadovaných nejistotách.

V následující tabulce je porovnán současný stav nejistot měření hodnoty Boltzmannovy konstanty se stavem, který se předpokládá v době přijetí nové definice jednotky.

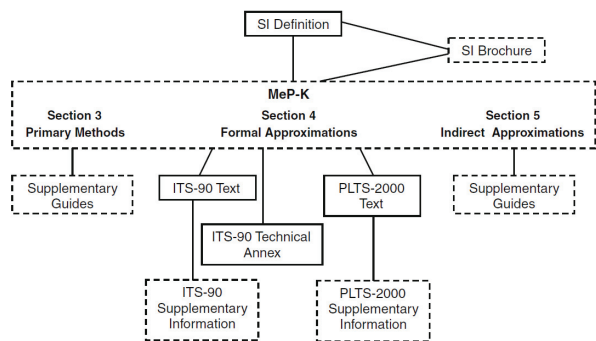
Tab. 3: Hodnoty nejistoty určení Boltzmannovy konstanty

Metoda	Současný stav	Předpoklad po dalším stanovení hodnoty k
AGT – Acoustic gas thermometer	2 ppm	1 ppm
DCGT – Dielectric constant gas thermometer	10 ppm	2 ppm
TRT – total radiation thermometer	32 ppm	10 ppm
SRT – spectral radiation thermometer	200 ppm	50 ppm
DBT – Doppler broadening thermometer	26 ppm	10 ppm
JNT – Johnson noise thermometer	40 ppm	5 ppm

Z uvedeného rozboru je zřejmé, že nová definice jednotky kelvin a nová teplotní stupnice ITS-XX spolu úzce souvisí, ale není pravděpodobné jejich přijetí ve stejném termínu.

Společně s novou definicí jednotky teploty vznikne nová verze brožury, popisující SI soustavu jednotek. Laboratoře teploty do současné doby neměly možnost standardizace v primárních metodách měření teploty. Proto vznikne další „Supplementary guide“, kde budou popsány základní metody přímého a nepřímého měření teploty podle následujícího

schématu. Zde plné rámečky reprezentují podmiňující (nařizovací) dokumenty, čárkované rámečky jsou dokumenty doporučující.



Obr. 2: Schematická reprezentace souvislosti mezi dokumenty při realizaci jednotky kelvin.

Literatura

- [1] Běřák, J., Teplotní stupnice, *AUTOMA*, 2003, roč. 9, č. 1, s. 43–46.
- [2] Report CCT/08-13. Working Group 4, *Thermodynamic temperature determinations and extension of the ITS-90 to lower temperatures*, Report to CCT, 25 June 2008, URL: <http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/24/D13_rev_WG4_report_CCT_25_June_2008.pdf>
- [3] Report CCT/08-17.: *The next international temperature scale and the mise en pratique for the definition of the kelvin*. Report from the Mise en Pratique Task Group URL: <http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/24/D17_rev_MePK_Report_2008c.pdf>
- [4] Report CIPM. *On the implication of changing the definition of the base unit Kelvin*. 02 May 2007. Prepared by the task group TG-SI of the CCT. URL: <http://www.bipm.org/wg/CCT/TG-SI/Allowed/Documents/Report_to_CIPM_2.pdf>
- [5] Quinn, T. J., *Temperature*, Second edition, Academic Press limited, 1990.
- [6] Krejdl, M., *Měření teploty*, BEN, 2005.
- [7] Kryl, J.: Teplotní stupnice v ČR a návaznost měřidel teploty. *AUTOMA*, 2003, roč. 9, č. 1, s. 47.
- [8] Nicholas J.V., White D. R., *Traceable Temperatures*, Wiley, 1994.
- [9] Preston, Thomas H. The International Temperature Scale of 1990, *Metrologia*, 27, pp. 3-10.
- [10] D. C. Ripple, R. Davis, B. Fellmuth, J. Fischer, G. Machin, T. Quinn, P. Steur, O. Tamura, D. R. White: The Roles of the Mise en Pratique for the Definition of the Kelvin, *International Journal of Thermophysics* (2010) 31:1795–1808.
- [11] Strnad, R. Vybavení primární laboratoře teploty. In: *Sborník semináře ČMS Problematika teploty*, Praha, 27. 2. 2008.
- [12] Strnad, R. Základy měření teploty v měřicích sestavách protečeného množství tekutin. In: *Sborník semináře Metrologie průtoku 2008*, ČMI 10-12. 6. 2008.
- [13] Šindelář, M., Strnad, R. *Zpráva o etalonu teploty, 2005 až 2010*, interní materiál ČMI Praha. Dostupné u autora.



6 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA LÁTKOVÉHO MNOŽSTVÍ – MOL

6.1 Mol a metrologie v chemii

Mol (mezinárodní zkratka: mol) je **látkové množství** soustavy, která obsahuje právě tolik elementárních jedinců (entit), kolik je atomů v 0,012 kilogramu izotopu uhlíku ^{12}C . Při udávání látkového množství je třeba elementární jedince (entity) specifikovat; mohou to být atomy, molekuly, ionty, elektrony, jiné částice nebo blíže určená seskupení částic.

Jeden mol látky obsahuje určitý počet elementárních částic, rovný číselně hodnotě Avogadrovy konstanty N_A , tedy $6,022\,140\,17 \cdot 10^{23}$. (Připomeňme, že Avogadrova konstanta má rozměr mol^{-1} , takže označení Avogadrovo číslo není správné).

Má-li obecně těleso N částic, potom jeho látkové množství n bude:

$$n = \frac{N}{N_A} \quad (1)$$

Všimněme si, že $N(x)$ je bezrozměrné, a $n(x)$ má jednotku SI mol, Avogadrova konstanta má tudíž v jednotkách SI rozměr mol^{-1} .

Pro pochopení látkového množství si představíme příklad: 5 molů PH_3 (fosfan) obsahuje tedy $5 \times 6,022\,140\,17 \cdot 10^{23}$ molekul PH_3 . Každá z těchto molekul obsahuje 1 atom fosforu a 3 atomy vodíku. 5 molů PH_3 tedy obsahuje 5 molů atomů P a 15 molů atomů H.

Původně se pro určení množství chemické látky užívaly jednotky zvané *gram-atom* a *gram-molekula*. Tyto jednotky souvisely přímo s „atomovou“ a „molekulovou hmotností“, které jsou ve skutečnosti relativní hmotnosti, původně vztažené k atomové hmotnosti kyslíku, všeobecně uznané v hodnotě 16. Problémy vznikaly tím, že se ve fyzice atomová hmotnost přisuzovala jedinému isotopu kyslíku 16, zatímco v chemii přirozeně se vyskytující směsi isotopů 16, 17 a 18. Rozpory skončily dohodou Mezinárodní unie pro čistou a aplikovanou fyziku (IUPAP)

a Mezinárodní unie pro čistou a aplikovanou chemii (IUPAC) z let 1959/60.

Bylo dohodnuto přiřadit hodnotu 12, přesně, relativní atomové hmotnosti izotopu uhlíku s nukleonovým číslem 12. Takto určené jednotné měřítko určuje relativní atomové a molekulární hmotností dodnes.

Zavedení molu jako základní jednotky SI zjednodušilo zápis množství látky (kvantity) a zápis chemických reakcí. Poměr množství látky (molární zlomek) je vyjádřen v mol/mol a zřetelně se liší od hmotnostního poměru vyjádřeného v kg/kg. Tento rozdíl je dán různou molární hmotností různých látek – např. 1 mol fosforu má hmotnost 30,973 g a 1 mol vodíku má hmotnost 1,007 94 g. Počet elementárních částic v obou případech je shodný, ale liší se hmotnost těchto částic.

Látkové množství (mol) bylo přijato jako základní jednotka SI v roce 1971 na 14. Generální konferenci pro váhy a míry (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) na doporučení těchto organizací: Mezinárodní unie pro čistou a užitou chemii (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC), Mezinárodní unie pro čistou a aplikovanou fyziku (International Union of Pure and Applied Physics, IUPAP) a Mezinárodního výboru pro míry a váhy (International Committee for Weights and Measures, CIMP). V roce 1980 byla definice molu ještě zpřesněna podmínkou, že atomy uhlíku nesmí být vázány a musí být v základním stavu (s ohledem na teorii relativity, podle níž energie soustavy – zde vazebná – přispívá k její hmotnosti). Jeden mol uhlíku ^{12}C má tedy podle definice hmotnost přesně 12 g, naproti tomu 1 mol přirozeného uhlíku má hmotnost 12,011 g. To je způsobeno tím, že přirozený uhlík je směsí několika izotopů (zhruba 99 % ^{12}C a 1 % ^{13}C) a pro výpočet hmotnosti jednoho molu přirozeného uhlíku se používá hodnota, která zohledňuje i izotopové zastoupení daného prvku na Zemi. [1]

Avogadrova konstanta má v podle současných měření hodnotu $6,022\ 141\ 29 \times 10^{23}$ mol $^{-1}$ elementárních částic s relativní nejistotou $4,4 \times 10^{-8}$. Doporučené hodnoty jsou pravidelně uveřejňovány v rámci systému CODATA, např. na stránce <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>.

CODATA byla založena v roce 1966 jako interdisciplinární výbor Mezinárodní rady pro vědu (ICSU), dříve Mezinárodní rady vědeckých svazů. Pracovní skupina pro CODATA základních konstant byla založena v roce 1969. Jejím cílem je pravidelně poskytovat mezinárodní vědecké a technologické společnosti mezinárodně uznávaný soubor dat – fyzikálních konstant. První soubor dat byl zveřejněn v roce 1973, potom 1986, 1998, 2002, 2006 a v současné době platný v roce 2010.

Látkové množství je dále spojeno s dalšími molárními veličinami jako je např. molární hmotnost, molární objem, molární koncentrace apod.

$$\text{Molární hmotnost: } M = \frac{m}{n} \quad [\text{kg mol}^{-1}] \quad (2)$$

kde m je hmotnost [kg] a n je látkové množství [mol].

$$\text{Molární objem: } V_m = \frac{V}{n} \quad (3)$$

kde V_m je molární objem [m 3 mol $^{-1}$] a V je objem [m 3].

Molární hmotnost látky je hmotnost jednoho molu látky a značíme ji M . Jejím rozměrem je g/mol. Vypočítáme ji tak, že sečteme relativní atomové hmotnosti všech atomů v molekule. Tak dostaneme relativní molekulovou hmotnost M_r a tu vynásobíme součinem Avogadrovy konstanty a atomové hmotnostní jednotky (daltonu, Da):

$$N_A \times m_u = 6,022 \cdot 10^{23} \times 1,66 \cdot 10^{-24} = 1 \text{ g/mol.}$$

Příklad: Molární hmotnost dusíku je tedy rovna

$$M(\text{N}_2) = (14,0067 + 14,0067) \times 1 \text{ g/mol} = 28,0134 \text{ g/mol.}$$

Pomocí molární hmotnosti snadno přepočítáme hmotnost látky na její látkové množství, viz rovnice (1).

6.2 Historie realizace jednotky: Avogadrova konstanta

Na počátku 19. století se A. Avogadro (celým jménem Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro di Quaregna e Cerreto, 9. srpna 1776, Turín – 9. července 1856) zabýval chováním plyných směsí. Na základě výsledků svých výzkumů došel k závěru, že látka má svou vnitřní částicovou (molekulární) strukturu. Rozborem Gay-Lussacova zákona a Daltonových výsledků dospěl v roce 1811 Avogadro k zákonu označovanému jako Avogadrův zákon, který lze formulovat následujícími slovy: Počet molekul v daném objemu plynu při dané teplotě je stejný pro všechny plyny bez ohledu na jejich chemické a fyzikální vlastnosti. [2]

Máme-li dva různé plyny, přičemž hmotnost jedné molekuly prvního plynu je m_1 a hmotnost jedné molekuly druhého plynu je m_2 , pak Avogadrův zákon říká, že za stejných podmínek obsahují dva stejné objemy (V) plynu stejný počet (n) molekul. Celková hmotnost prvního plynu tedy bude

$$m_{c1} = nm_1 = \rho_1 V$$

(kde ρ je hustota plynu)

a celková hmotnost druhého plynu

$$m_{c2} = nm_2 = \rho_2 V$$

Pro poměr hustot obou plynů dostaneme:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\frac{m_{c1}}{V}}{\frac{m_{c2}}{V}} = \frac{m_{c1}}{m_{c2}} = \frac{nm_1}{nm_2} = \frac{m_1}{m_2}$$

Poměr hustot dvou plynů je tedy za stejné teploty a tlaku stejný jako poměr hmotností jejich molekul.

Ačkoliv Avogadrova konstanta nese jméno italského fyzika Avogadra, tak sám Avogadro její číselnou hodnotu ještě neznal. Avogadrova konstanta se určuje experimentálně, např. Loschmid porovnával hustotu látky v kapalném a plyném stavu, Perrin měřil trajektorii částic a v současné době se používá metoda XRCD (X-ray crystal density).

Avogadrovu konstantu jako první odhadl Johann Josef Loschmidt (15. březen 1821 – 8. červenec 1895), rakouský chemik původem z Čech. Loschmidt odhadl průměr molekul

ve vzduchu metodou, která je ekvivalentní výpočtu počtu částic v daném objemu plynu. Jeho odhad průměru molekul byl 0,970 nm (což je 2,7 krát více, než hodnota) a rovněž odhadl, že N_A má hodnotu $7,2 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. [3]

Začátkem dvacátého století se francouzský fyzik Jean Baptiste Perrin (30. září 1870 – 17. dubna 1942) zabýval experimentálním studiem Brownova pohybu. Perrin měřil trajektorii částice látky zvané *gamboge* (pryskyřice používaná jako žlutý pigment) při sedimentaci ve vodě. Výškové rozdělení mikročástic gamboge sledoval Perrin mikroskopem a částice přímo počítal. Pomocí této metody zjistil velikost a množství molekul v daném objemu. Na základě těchto experimentů Perrin zpřesnil hodnotu Avogadrovy konstanty na $7,15 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. [4]

Jean Baptiste Perrin obdržel Nobelovu cenu za fyziku v roce 1926 za práci na nespojitě struktuře hmoty, a to zejména za objev sedimentační rovnováhy.

V roce 1914 publikoval Bragg využití Avogadrovy konstanty na určení mřížkového parametru krystalů soli (NaCl). Následně byl tento experiment obrácen k výpočtu hodnoty N_A za použití rentgenového záření. Stanovení Avogadrovy konstanty pomocí rentgenového záření vyžaduje také střední molární hmotnost a hustotu makroskopických krystalů, obvykle se zjišťuje metodou hydrostatického vážení. Většina z prvních prací v této oblasti použila krystaly vápence nebo diamantu. V roce 1960 se začaly používat krystaly křemíku (Si), u kterého lze zhotovit monokrystaly s menším počtem mřížkových poruch. Technologie výroby monokrystalů Si je díky průmyslu polovodičů na vysoké úrovni, stejně jako technika kontroly příměsí.

V současné době se Avogadrova konstanta stanovuje pomocí metody XRCD (X-ray crystal density). Rentgenový svazek záření zasáhne krystal a paprsek se rozptýlí do mnoha konkrétních směrů. Z úhlu a intenzity těchto paprsků lze vypočítat trojrozměrný obraz hustoty elektronů v krystalu. Z této elektronové hustoty lze zjistit pozice atomů v krystalu a stejně také určit jejich chemické vazby, jejich poruchy a další důležité informace.

6.3 Projekt Avogadro

Významný mezinárodní projekt Avogadro se zabývá vztahem kilogramu (jednotky hmotnosti) k určitému počtu atomů cestou měření počtu atomů v křemíkové kouli.

Tento přístup k definici jednotky hmotnosti vychází z toho, že je možné definovat kilogram ve vztahu k hmotnosti specifikovaného atomu, tedy k atomové hmotnosti. Jak již bylo řečeno, je pro tento projekt velmi vhodný křemík, protože je možné vyrobit jeho monokrystal dostatečných rozměrů s vysokou čistotou. Pro takový materiální artefakt s molární hmotností M a objemem V_0 s n atomy může být hmotnost krystalu m odvozena z určení jeho objemu V , je-li známa Avogadrova konstanta N_A :

$$m = (M/N_A) \cdot (V \cdot n/V_0)$$

čili m = hmotnost jednoho atomu násobená počtem přítomných atomů.

Molární hmotnost m , objem unit cell V_0 a objem artefaktu V mohou být přímo změřeny. Předchozí vztah může upraven pro výpočet N_A :

$$N_A = (M/\rho)/(V_0/n),$$

čili N_A = molární objem dělený objemem atomu.

Hustota artefaktu se vypočítá z jeho hmotnosti m (určené podle dosavadní definice kilogramu) a objemu V .

Tento postup určení Avogadrovy konstanty N_A zřejmě vede k relativní nejistotě 10^{-8} , rovné dnes dosažitelné nejistotě určení hmotnosti. Další podrobnosti viz kapitola o jednotce hmotnosti.

Rozhodující fáze projektu Avogadro, který je koordinován PTB, začala v roce 2003. V tomto roce několik národních metrologických institutů zahájilo společně s Mezinárodním úřadem pro váhy a míry (BIPM) a ve spolupráci s ruskými výzkumnými ústavy projekt s přibližně 5 kg vysoce obohaceného ^{28}Si (99,99%), vyrobeného jako monokrystal. Předpokládaná nejistota měření byla stanovena na $2 \cdot 10^{-8}$. První měření bylo dokončeno na dvou 1 kg koulích, byla stanovena jejich hustota a další důležité parametry.

Po rozsáhlé kontrole krystalů byl hodnocen vliv poruch krystalické mřížky. Mřížkové parametry byly stanoveny v italském metrologickém institutu (INRIM) pomocí rentgenového interferometru a potvrzeny srovnávacím měřením přírodního krystalu Si v americkém NIST. V příslušných pracovních skupinách v NMIJ (Japonsko) NMI (Austrálie) a PTB (Německo) byl objem koule měřen opticky (velmi dobrá shoda) pomocí interferometrů s různou geometrií paprsků. Bylo stanoveno neočekávaně vysoké kovové znečištění povrchu koule mědi a niklem, které nastalo během procesu leštění. Dále byl vyhodnocen vliv nečistot na výsledky zjištěné v oblasti objemu a hmotnosti koule. To vedlo ke zvýšení nejistoty určení Avogadrovy konstanty. Celková relativní nejistota měření byla $3 \cdot 10^{-8} \text{ mol}^{-1}$, tedy vyšší než předpokládaná.

Výsledek je nicméně milníkem na cestě k úspěšné realizaci nové definice kilogramu na základě fundamentálních konstant, jejichž hodnoty byly opraveny. V současné době je možné v projektu Avogadro na základě nových měření snížit nejistotu měření na $2 \cdot 10^{-8}$ požadovanou Poradním výborem pro hmotnost (CCM). [5,6]



Křemíková koule použitá při projektu Avogadro

6.4 Definice molu stávající a předpokládaná

Pokud jde o jednotku mol, uvádí se v usnesení CGPM, že je také možné předefinovat mol tak, aby byl vztažen k přesné číselné hodnotě Avogadrovy konstanty N_A a nebyl tak již závislý na definici kilogramu, dokonce ani při kilogramu definovaném vztahem k přesné číselné hodnotě h . Tím, že se pro definici kilogramu využije vazba k Planckově konstantě a nikoliv k hmotnosti atomu, zdůrazní se rozdíl mezi látkovým množstvím a hmotností.

Je zřejmé, že i nadále jeden mol specifického souboru jedinců jich bude obsahovat počet, rovný Avogadrově konstantě N_A . Bude to ale počet určený bez nejistoty, definitivně, protože Avogadrova konstanta bude pevně dána definicí, zatímco dosud byla určena s relativní nejistotou $4,4 \times 10^{-8}$.

Definice již tedy neobsahuje žádnou vazbu na hmotnost atomů ^{12}C a zjevně fixuje hodnotu Avogadrovy konstanty $N_A = 6,022\,140\,17 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, zachovává však základní význam této jednotky jako počet jedinců v molu. Nemění se tedy ani definice molární hmotnosti M . Je však třeba si uvědomit, že hmotnost uhlíku 12 již nebude přesně známa a musí být experimentálně stanovena. [7]

Bude sice $0.012 \text{ kg mol}^{-1}$, ale s relativní nejistotou rovnou nejistotě doporučené hodnoty N_A před novou definicí a následně její bude její hodnota upřesňována v souladu s pokrokem experimentů.

Důsledky změny definice molu se projeví pouze na nejvyšší úrovni metrologie a u vrcholně přesných experimentů. Nicméně, bude nutné upravit výpočty spojené s Avogadro-

vou konstantou. Protože je molární hmotnost přímo spojena s hodnotou Avogadrovy konstanty, bude nutné po zavedení nové definice při nejmenším upravit používané hodnoty molární hmotnosti včetně nejistot. V této souvislosti se budou muset upravit normy, které využívají molární hmotnosti, např. ISO 6142:2001 Gas analysis -- Preparation of calibration gas mixtures -- Gravimetric Method.

Literatura

- [1] NIST. *The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty*. URL: <<http://physics.nist.gov/cuu/Units/index.html>>
- [2] Pierson, S. Amedeo Avogadro and his work. *Science* 226 (4673): 432–433, 1984, Oct 26
- [3] Becker, P., Friedrich, H., Fuji, K., Giardini, W., Mana, G., Picard, A., Pohl, H.J., Riemann, H. and Valkiers, S. (2009). The Avogadro constant determination via enriched silicon-28 *Measurement Science and Technology* 20 (9), 2002.
- [4] Perrin, J. *Brownian Movement and Molecular Reality*, trans. F.Soddy . London: Taylor and Francis, 1910.
- [5] Becker P., Bettin H. *The „new“ kilogram is approaching*. URL: <<http://www.ptb.de/de/aktuelles/archiv/presseinfos/pi2011/pitext/pi110127.html>> ,2011.
- [6] Brown. R., Milton M. Towards an improved determination of the Avogadro constant, *NPL report COAM 17*, January, 2003.
- [7] Horálek J. *Didaktické aspekty přenosu fyzikálního poznání*. Univerzita Hradec Králové, 2007.



7 ZÁKLADNÍ JEDNOTKA SVÍTIVOSTI – KANDELA

Současná definice základní jednotky svítivosti – kandela – tvoří pevný základ pro přesná měření v oblastech optické radiometrie, fotometrie a v odvozených oborech. Ta jsou dnes nepostradatelná pro mnoho aplikací vyžadujících přesnou kvantifikaci zářivého toku elektromagnetického záření, zejména pak záření, které je vnímáno lidským okem (světlo). Kandela byla jednou ze základních veličin Mezinárodní metrické soustavy jednotek SI od roku 1954 [1] a je jedinou základní jednotkou, která kvantifikuje fundamentální fotobiologický proces – lidské vidění. V několika posledních desetiletích probíhal vskutku revoluční rozvoj zdrojů optického záření, detektorů, měřicích přístrojů i metod, který přinesl výrazný pokrok a zpřesnění radiometrických a fotometrických měření v klasických aplikacích, jako jsou vývoj svítidel, výrobní technologie vyžadující optické zdroje, detektory a optické materiály a ochrana zdraví a životního prostředí. Tento článek stručně shrnuje historii definice kandelu a vývoje jejích realizací, podrobněji popisuje současný stav zajištění metrologické návaznosti

v oboru a v závěru naznačuje možné perspektivy budoucího vývoje.

Radiometrie je část optiky, která se zabývá měřením elektromagnetického záření (včetně světla) v rozsahu frekvencí od $3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$ až $3 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$. Tento rozsah odpovídá vlnovým délkám od 10 nm až po 1000 μm a zahrnuje oblasti běžně nazývané ultrafialová, viditelná a infračervená spektrální oblast. Typické radiometrické jednotky jsou watt, [W] (zářivý tok), watt na steradián (zářivost), watt na metr čtvereční (ozářenost), a watt na metr čtvereční na steradián (zář).

Fotometrie oproti tomu se zabývá měřením světla, které je definováno jako elektromagnetické záření vnímatelné lidským okem. Je tak omezena výlučně na viditelnou oblast (vlnové délky od 360 nm do 830 nm) a všechny veličiny jsou integrálně vázány spektrální odezvou lidského oka. Fotometrie používá buď optické detektory záření konstruované tak, aby napodobily spektrální odezvu oka, nebo spektrometry v kombinaci s širokopásmovými absolutními detektory viditelného záření, kde je vážení na

citlivost lidského oka provedeno výpočtem. Typickými fotometrickými jednotkami jsou lumen [lm] (světelný tok), kandela [cd] (svítivost), lux [lx] (osvětlenost), a kandela na metr čtvereční [cd/m²] (jas).

Rozdíl mezi radiometrií a fotometrií spočívá tedy v tom, že radiometrie zahrnuje celé spektrum optického záření a často zahrnuje spektrálně rozlišená měření, zatímco fotometrie se zabývá výlučně viditelnou oblastí spektra váženou spektrální citlivostí lidského oka.

7.1 Historie jednotky

Historie fotometrických etalonů sahá až do počátku devatenáctého století, kdy se intenzita světelných zdrojů měřila srovnáním s etalonovou svíčkou pomocí vizuálního fotometru. V té době byl tedy jako etalon svítivosti používán plamen svíčky a podle toho byla jednotka také tak nazvána – candle – svíčka. Etalonové svíčky byly postupně nahrazovány plamenem etalonové olejové lampy.

Na počátku dvacátého století započal v některých národních metrologických laboratořích výzkum záření černého tělesa na teplotě tání platiny – jedné z realizací tzv. Planckova zářiče. V roce 1860 zjistil Kirchhoff, že ideální černé těleso v termodynamické rovnováze emituje záření, jehož spektrum je funkcí pouze jeho termodynamické teploty a je zcela nezávislé na druhu a povrchu materiálu tohoto černého tělesa. Teoretická interpretace tohoto jevu se stala poté jedním z nejdůležitějších úkolů teoretické fyziky na následujících 30 let, neboť přesný matematický popis měřeného spektra nebyl na půdě klasické statistické mechaniky ani termodynamiky dosažitelný. Na základě spektrálních dat naměřených v roce 1899 Lummerem a Pringsheimem formuloval v roce 1900 Planck svůj zákon o vyzařování černého tělesa, známý jako Planckův zákon, založený na kvantové hypotéze. Tak byl položen základní kámen kvantové fyziky, ale také optické radiometrii jako nové oblasti metrologie. Řešení problému černého tělesa zajistilo také řešení mnohaletého výzkumu referenčních zdrojů pro měření optického záření [2] až [4]. Veličinou popisovanou původním Planckovým zákonem byla spektrální hustota vyzařené energie. Nicméně vhodnější veličinou z hlediska využití v optické radiometrii je spektrální zář, $L(\lambda, T)$. Protože jsou si tyto dvě veličiny velmi blízké, dnes se Planckův zákon vyjadřuje více ve tvaru vyjadřujícím spektrální zář černého tělesa. V této formě nabývá Planckův vztah pro spektrální zář absolutně černého tělesa o teplotě T ve vakuu tvaru:

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right) \quad (1)$$

kde k je Boltzmannova konstanta ($1,3807 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$) a teplota T je vyjádřena v absolutní stupnici v kelvinech.

Černé těleso nebo Planckův zářič je tak realizací absolutního primárního etalonového zdroje fotonů, jehož spektrum vyzařování může být stanoveno absolutně na základě měření jeho teploty a aplikace Planckova zákona. Černé těleso navíc emituje zcela nepolarizované záření.

Jako výsledek těchto prací byla v roce 1909 uzavřena dohoda mezi několika národními metrologickými laboratořemi o používání takového černého tělesa jako nového etalonu jednotky svítivosti a nová jednotka byla nazvána „international candle“. Nová realizace byla pak přijata Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) v roce 1921. Takto realizovaná jednotka svítivosti byla konečně přijata CPMG v roce 1948 pod novým, latinským názvem „candela“ (cd), česky kandela, s následnou definicí:

Kandela je svítivost 1/600 000 čtverečního metru absolutně černého tělesa ve směru kolmém k tomuto povrchu při teplotě tuhnutí platiny (1768 °C) při normálním tlaku 101 325 newtonů na metr čtvereční.

Díky této definici se podařilo poprvé v historii ustavit základ pro celosvětově ekvivalentní fotometrická měření, to byl její hlavní záměr a byl bezesbýtku naplněn.

Již v průběhu třicátých let se objevovaly práce, které poukazovaly na řadu technických i fyzikálních úskalí spojených s výrobou velmi přesných černých těles a na praktickou nemožnost zvýšení přesnosti realizace jednotky touto cestou. V praxi není totiž žádná realizace černého tělesa ideálním černým tělesem, tedy absolutním absorbérem s konstantní emisivitou rovnou jedné, nýbrž tato spektrálně závislá emisivita musí být přesně měřena a stanovena a zavádí tak významnou korekci při realizaci primární stupnice spektrální záře. To samozřejmě tuto realizaci primárního etalonu výrazně diskvalifikovalo.

7.2 Současný stav realizace jednotky

V padesátých letech minulého století se začaly objevovat názory na možnou změnu definice jednotky svítivosti v návaznosti k jednotce optického výkonu tak, aby komplikovaného etalonového zdroje už dále nebylo potřeba. V této době se již začaly objevovat možnosti nabízené optickou radiometrií na měření výkonu optického záření s nižší nejistotou. Tato měření byla hlavním argumentem pro následnou a dodnes platnou změnu definice jednotky kandela, která byla přijata na 16. CPMG (Resoluce 3) v roce 1979 v následujícím tvaru:

Kandela je svítivost zdroje, který v daném směru vysílá monochromatické záření s kmitočtem 540 x 10¹² hertzů a jehož zářivost v tomto směru je 1/683 wattu na steradián.

Tato definice je vyjádřena pro monochromatické záření na rozdíl od té předcházející, pracující s širokopásmovým zdrojem ve formě černého tělesa. To byl základní posun v definici kandely. Hodnota K_{cd} (683 lm/W) byla stanovena tak, aby zajistila konzistenci nové definice s tou předchozí, a byla stanovena na základě řady měření prováděných předními laboratořemi té doby. Takto se kandela vyvinula z velice úzce vymezené definice založené na hmotném artefaktu – specifickém zdroji záření – v mnohem obecnější definici, která umožňuje mnoho různých metod realizace – fotometrické i radiometrické – s přesně známou hodnotou

tou poměru lumen/watt na jedné definované vlnové délce optického záření. Je však nutné připomenout, že samotné fotometrické veličiny jsou spektrálně integrovány přes poměrně široký spektrální rozsah a abychom mohli odvodit fotometrické jednotky z radiometrických spektrálních měření, je nutné spektrální radiometrická data spektrálně integrovat přes celé viditelné spektrum s normovanou váhovou funkcí – fotopickou spektrální citlivostí lidského oka [5]. Takto začaly být optická radiometrie a fotometrie velmi úzce provázány v tom smyslu, že fotometrické veličiny mohou být přímo odvozovány od radiometrických měření. Ve snaze poskytnout praktický návod na implementaci nové definice jednotky a na její možné praktické realizace schválil CCPR (Poradní výbor pro fotometrii a radiometrii CIPM) v roce 1983 monografii „Principles of Governing Photometry“ [6], shrnující definice a tabulky numerických hodnot, které byly doposud přijaté jak na půdě CIPM, tak také CIE. Mimochodem, je z historie patrné, že tyto dvě organizace zásadně přispívaly k budování základů fyzikální fotometrie bok po boku po dobu celých 75 let, často i personálně úzce provázány. Tato spolupráce byla oficiálně stvrzena v roce 2007 podepsáním Memoranda o porozumění a Dohody o spolupráci mezi CIPM a CIE, kde je potvrzeno, že CIPM je zodpovědné za definici a návaznost jednotky v rámci systému SI a CIE je zodpovědné za vývoj a zpřesňování spektrálních závislostí citlivosti lidského oka.

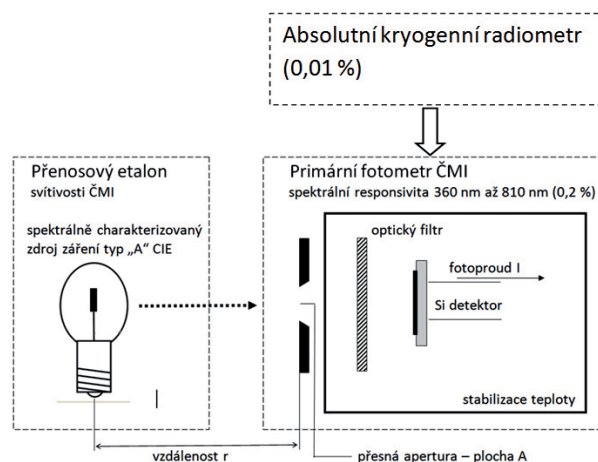
Současná definice umožňuje více možných realizací jednotky svítivosti. Většina národních metrologických institutů dnes realizuje kandelu radiometrickou cestou. Jedna ze špičkových v současnosti dostupných realizací byla vybudována v Českém metrologickém institutu v Oddělení optické radiometrie a fotometrie v letech 2000 – 2008.

Jako přesný absolutní primární radiometr je zde použit v současné době nejpřesnější radiometrický měřicí systém – absolutní kryogenní radiometr [7], [8]. V Českém metrologickém institutu byl ve spolupráci s pracovištěm National Physical Laboratory Teddington ve Velké Británii vybudován systém, založený na mechanicky chlazeném radiometru pracujícím na teplotě přibližně 12 K a na aplikaci laserového záření o vysokém stupni lineární polarizace na stupnici až 12 vlnových délek ve spektrálním rozsahu od 330 nm do 800 nm. Časová konstanta měření kryogenního radiometru je přibližně 70 s, externí výkonová stabilizace laserového svazku využívající elektro-optickou modulaci dosahuje stability celkového zářivého toku na úrovni $2 \cdot 10^{-6}$ relativně na úrovni přibližně 1 mW po dobu cca 1000 s.

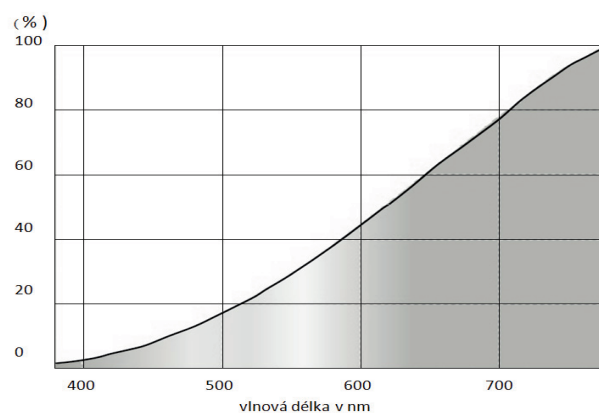
Citlivost tohoto systému se pohybuje zhruba na úrovni 5 nW. Nejistota měření samotného kryogenního radiometru dosahuje hodnoty 0,005 % relativně. Jako interpolační prvek v systému metrologické návaznosti jsou používány past'ové detektory [9], [10], jejichž model externí kvantové účinnosti je absolutně kalibrován porovnáním s kryogenním radiometrem na diskretních vlnových délkách laserového záření. Nejistota spektrální responsivity těchto past'ových detektorů ve viditelném spektrálním pásmu dosahuje hodnoty 0,02 % relativně, což bylo potvrzeno výsledky mezinárodního porovnání kryogenních radiometrů CCPR-S3 v roce 2008 [11].

Nehledě na finanční náročnost realizace takového radiometru, jeho měření samotné vyžaduje velké časové a materiální nároky a zejména velmi zkušený a odborně kvalifikovaný tým. To jsou důvody toho, že je v současné době tento systém provozován v Evropě pouze sedmi národními metrologickými instituty včetně ČMI, celosvětově pak počet takových NMI rozhodně nepřesahuje číslo 20.

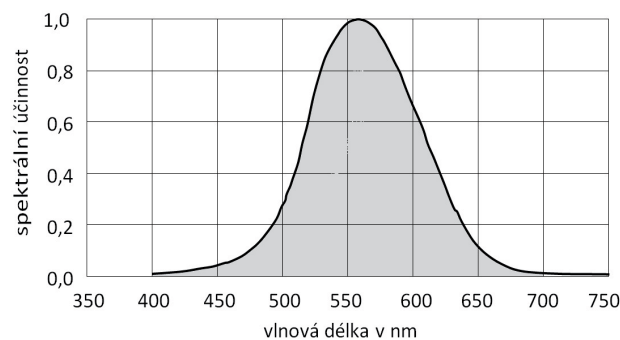
Tento přesný radiometr vytváří základ pro radiometrickou cestu realizace jednotky – pro primární fotometr ČMI, jehož principiální uspořádání je patrné z obr. 1 až obr. 3.



Obr. 1: Principiální schéma realizace jednotky svítivosti v ČMI



Obr. 2: Spektrální charakteristika zdroje záření – přenosového etalonu ČMI



Obr. 3: $V(\lambda) \approx s_n(\lambda)$ – fotopická citlivostní křivka

Primární fotometr ČMI je, obecněji vyjádřeno, etalonově filtrovaný radiometr v měřicím uspořádání pro spektrálně korigované integrální měření ozářenosti.

Matematický model fotometru je založen na následujících vztazích [5]:

Světelný tok Φ_v (lm) lze vyjádřit jako

$$\Phi_v = K_m \int_{\lambda} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

kde $\Phi_e(\lambda)$ je spektrální zářivý tok světla (W/nm) a K_m je proporcionální konstanta v definici kandely. $K_m = 683 \text{ lm/W}$.

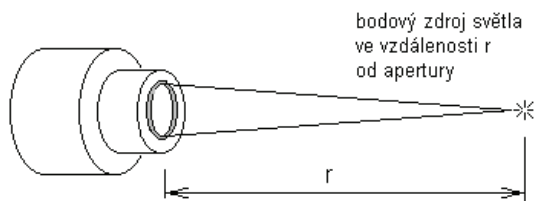
Výstupní proud fotometru I (ampér, A) je

$$I = \int_{\lambda} \Phi_e(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

kde $s(\lambda)$ (A/W) je jeho spektrální responsivita detektoru. Lze vyjádřit

$$s(\lambda) = s(555) \cdot s_n(\lambda) \quad (4)$$

kde $s(555)$ je hodnota $s(\lambda)$ při 555 nm.



Obr. 4: Geometrie pro měření svítivosti etalonovým fotometrem

Na obr. 4 je celková geometrie pro měření svítivosti etalonovým fotometrem. Leží-li bodový světelný zdroj ve vzdálenosti r od roviny apertury na kolmici k jejímu středu, potom z elementárních geometrických úvah vyplývá, že jeho svítivost I_v (lm/sr, tj. cd) lze vyjádřit vztahem

$$I_v = \frac{K_m F I \cdot r^2}{s(555) \cdot A} \quad (5)$$

Pro ideální fotometr bude $s_n(\lambda)$ rovno $V(\lambda)$ a jeho světelná citlivost musí být nezávislá na rozložení výkonu světelného zdroje. Pro reálné fotometry tento případ samozřejmě nenastává. V praxi tento postup vyžaduje znalost $\Phi_e(\lambda)$, aby mohl být stanoven spektrální korekční faktor F .

Tento spektrální korekční faktor F se určí dle vztahu

$$F = \frac{\int_{\lambda} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_n(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (6)$$

$V(\lambda)$ je fotonická citlivostní křivka – k nejistotě stanovení korekčního faktoru F nepřispívá

$\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ je spektrální hustota zářivého toku měřeného světelného zdroje s relativní rozšířenou nejistotou měření stanovenou jako 1 % s normálním pravděpodobnostním rozdělením

$s_n(\lambda)$ je relativní spektrální citlivost (responsivita) detektoru změřená s relativní rozšířenou nejistotou 0,14%.

i je foto-proud detektoru zpracovaný trans-impedančním zesilovačem I/U a měřený digitálním voltmetrem s nejistotou 0,01% s normálním rozdělením

r je vzdálenost od zdroje měřená s nejistotou ± 2 mm s rovnoměrným rozdělením

$s(555)$ je absolutní spektrální responsivita detektoru na vlnové délce 555 nm stanovená s relativní rozšířenou nejistotou 0,1% s normálním rozdělením, je navázána na absolutní kryogenní radiometr

A je plocha apertury vypočtená z naměřených souřadnic x, y bodů rovnoměrně rozložených po jejím obvodu, souřadnice x i y byly naměřeny s nejistotou $\pm 1 \mu\text{m}$ s rovnoměrným rozdělením

Z důvodů poměrné složitosti matematického modelu primárního fotometru a zejména jeho nelinearity byla analýza šíření nejistoty provedena metodou Monte Carlo. Výsledná nejistota měření svítivosti primárním fotometrem ČMI byla vyhodnocena na úrovni 0,2 % relativně.

7.3 Perspektivy dalšího vývoje

Pro fotometrické měření a pro fotometrické jednotky je návaznost na SI uspokojivě řešena současnou definicí jednotky svítivosti a fotometrickým systémem CIE. Problémem ovšem je překlenutí velkého dynamického rozsahu měření, který sahá přes více než 15 dekad. Problém dynamického rozsahu ve fotometrii „řeší“ lidské oko samo tím, že pro různě úrovně jasu používá různých typů receptorů.

Jiná je situace u radiometrie, protože tady jsou používány velmi různé typy detektorů, založené na velmi odlišných a vzájemně vzdálených fyzikálních principech pro různé úrovně celkových zářivých toků. Proto je pro radiometrická měření a radiometrické jednotky mnohem složitější realizovat návaznost na SI v celém dynamickém rozsahu měření. V klasickém světě radiometrie na úrovni vysokých toků je návaznost optických detektorů a zdrojů optického záření na SI systém realizována většinou kryogenním radiometrem navázáním na elektrické veličiny. Jak je ilustrováno výše, ve viditelném spektrálním rozsahu lze dosáhnout na diskretních vlnových délkách na výkonech od 0,1 mW do 1 mW standardní nejistoty kolem 0,005 % relativně. Posuneme-li se se zářivými toky do velmi nízkých úrovní zářivého toku, do světa kvantové radiometrie, jsou zde používány detektory na bázi fotonových čítačů a to je nevyhnutelně spojeno s výraznou degradací v přesnosti měření. Nutnost zajištění přesných absolutních radiometrických měření na těchto úrovních vyvolává potřebu po vývoji přesných, modelem předpověditelných, quasi-jedno-fotonových zdrojů a detektorů založených na technikách a metodách kvantové optiky.

Významný krok tímto směrem byl vykonán konsorciem 7 evropských Národních metrologických institutů, včetně ČMI, v rámci společného výzkumného programu „Kvantová kandela“ uskutečněného díky programu iMERA PLUS v letech 2008 – 2011 [12]. Projekt jednak na klasických úrovních fotonových toků zkoumal možnou alternativu k současným primárním absolutním kryogenním radiometrům.

Výzkum se týkal nového absolutního kvantového detektoru s předpověditelnou kvantovou účinností (PQED, Predictable Quantum Efficacy Detector) s teoretickým potenciálem nejistoty měření celkového zářivého toku na diskretní vlnové délce ve viditelném spektrálním rozsahu $1 \cdot 10^{-6}$ relativně [13], [14]. Po tříletém vývoji prokázala měření prováděné formou porovnání PQED se současným nejpřesnějším radiometrickým systémem, kryogenním radiometrem (CR), paralelně v ČMI LPM Praha a PTB Berlín na různých vlnových délkách, shodu výsledků výrazně v rámci nejistoty měření CR [15], [16].

Vedle toho proběhl ve velmi nedávné době výrazný pozitivní posun v oblasti vývoje jedno-fotonových zdrojů záření [17], který staví vizi jedno-fotonových kvantových zdrojů záření emitujících foton na zaslaný požadavek s účinností blížící se 99% na reálnější základy. Přirozeně tyto výsledky obracejí dnes pozornost radiometrických laboratoří tímto směrem. Tyto nové směry umožňují rozvoj nových technologií, jako například kvantová kryptografie.

7.4 Závěr

Vývoj přesného měření byl v oblasti optické radiometrie a fotometrie po dobu posledních více než sta let poháněn vpřed zásadními objevy dosaženými ve výzkumu jak detektorů, tak i zdrojů optického záření. Nejvyšší úroveň přesnosti měření, dosahovaná v současné době na základě současné definice a současné špičkové technologie, ve velké většině vyhovuje požadavkům velice různorodé skupiny uživatelů „klasické“ radiometrie a fotometrie z průmyslu, telekomunikací, dopravy, ochrany zdraví a životního prostředí. Nicméně nedávný prudký vývoj v oblasti jedno-fotonových detektorů a jedno-fotonových zdrojů, který se pomalu stává katalyzátorem vývoje řady nových perspektivních průmyslových odvětví, si může v budoucnu vyžádat zcela nový pohled jak na definici jednotky tak i na její nové, přesnější realizace.

Pokud jde o připravované změny definic základních jednotek soustavy SI, jak se jimi zabývá tato příloha časopisu, je ve smyslu Usnesení 1 24. zasedání CGPM (2011) v případě kandely situace specifická; kandela sice není vztahena k fundamentální fyzikální konstantě, ale je možné pohlížet na ni jako na takovou vzhledem k tomu, že úlohu konstanty zastává pevně určené číslo, udávající velikost světelné účinnosti K_{cd} monochromatického záření o frekvenci 540×10^{12} Hz v jednotkách SI, a to 683 lumenů na watt. Definice kandely se tedy až na úpravu formulace nezmění, dokonce v ní bude nadále vystupovat jednotka kg ($K_{cd} = 683 \text{ m}^{-2} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^3 \text{ cd sr}$), ale „nový“ kg už bude definován na základě univerzální konstanty.

V budoucnu lze pravděpodobně očekávat posun k nové formulaci definice kandely ve smyslu kvantových jednotek – fotonů [12].

Literatura:

- [1] The International System of Units: 8th edn., SI Brochure, BIPM 2006
- [2] Kangro, H. *Vorgeschichte des Planckschen Strahlungsgesetzes*. F. Steiner Verlag, Wiesbaden 1970
- [3] Cahan, D. *Meister der Messung*. Weinheim: Wiley-VCH. An Institute for an Empire. Cambridge University Press, 1992
- [4] Hoffmann, D. Schwarze Körper im Labor, *Physikalische Blätter*. 56 43–7, 2000
- [5] *The Basis of Physical Photometry*. Central Bureau of the CIE, Publication No 18.2, International Commission on Illumination (CIE), 1983
- [6] Wyszecki, G., Blevin, W. R., Kessler, K. G. and Mielenz, K. D., *Principles Governing Photometry*. BIPM Monographie 83/1, 1983
- [7] Quinn, T. J. and Martin, J. E. A Radiometric determination of Stefan-Boltzmann Constant ..., *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 316, No. 1536 (Nov. 26, 1985), pp. 85-189
- [8] Fox, N. P. and Rice, J. P. *Absolute radiometers Optical Radiometry*, edited A C Parr et al. Amsterdam: Elsevier, Academic, 2005
- [9] Zalewski, E. F. and Duda, C. R. Silicon photodiode device with 100 % external quantum efficiency *Applied Optics*, 22, pg. 2867, 1983
- [10] Fox, N. P. Trap Detectors and their Properties *METROLOGIA* 28 197–202, 1991
- [11] Smid, M., White, M. W. Final report on the bilateral supplementary comparison of cryogenic radiometers CCPR-S3. *METROLOGIA*, 2010, 47, *Tech. Suppl.*, 02006
- [12] EMRP. *Quantum candela Project outline*. URL: <<http://www.quantumcandela.org/project.html>>
- [13] Geist, J. Spectral response self-calibration and interpolation of silicon photodiodes *J. Appl. Phys.* 51 3993, 1980
- [14] Geist, J., Brida, G. and Rastello, M. L. Prospects for improving the accuracy of silicon photodiode self-calibration with custom cryogenic photodiodes, *METROLOGIA* 40 S132, 2003
- [15] Manoocheri, F., Smid, M. at al. *Predictable Quantum Efficient Detector*, Invited talk, Proceedings of NEWRAD 2011, Mai, (2011)
- [16] Cheung, J. Y., Smid, M., Porrovecchio, G. Low optical power reference detector ..., *Optics Express*, Vol. 19 Issue 21, pp. 20347-20363 (2011)
- [17] Lee et al. A planar dielectric antenna for directional single-photon emission and near-unity collection efficiency. *Nature Photonics* 5, 166 (2011)



SHRNUTÍ A ZÁVĚR

V říjnu 2011 proběhlo v Paříži za přítomnosti 42 delegací členských států a řady přidružených členů 24. zasedání Generální konference pro váhy a míry. Jedním z nejvýznamnějších bodů jednání byl návrh usnesení o možné budoucí změně definice základních jednotek soustavy SI. CGPM vzala tento návrh na vědomí a vyzvala zúčastněné instituce k další práci na vytvoření podmínek pro přijetí návrhu a zavedení nových definic.

Návrh je motivován především redefinicí kilogramu, ale i molu, kelvinu a ampéru, která by odstranila jejich vazbu na hmotný artefakt (u ampéru a molu prostřednictvím kilogramu). Definice metru a sekundy takové jsou již nyní. V případě kandely je situace specifická – není sice vztažena k fundamentální fyzikální konstantě, ale je možné pohlížet na ni jako na takovou vzhledem k tomu, že úlohu konstanty zastává pevně určené číslo, udávající velikost světelné účinnosti K_{cd} monochromatického záření o frekvenci 540×10^{12} Hz v jednotkách soustavy SI, a to 683 lumenů na watt, čili $m^{-2} kg^{-1} s^3 cd sr$. A zde již je zřejmé, proč je i pro kandelu nezbytné, aby kg byl definován na základě přírodní konstanty. Ani kelvin nezůstane pozadu. Teplota trojného bodu vody, dosud využitá v definici, je ovlivněna například isotopovým složením vody a je tedy sice „konstantou“, ale napříště nevyhovující. Kelvin se proto vztáhne k fundamentální Boltzmannově konstantě.

Návrh rezoluce CGPM je výsledkem mnohaleté práce BIPM, národních metrologických institutů, vědeckých pracovišť a expertních komisí. Jeho uplatnění povede k naplnění dávného záměru, totiž definovat jednotky na základě neměnných jevů, nezávislých na člověku a stejných všude ve vesmíru.

Krok, který na letošním zasedání Generální konference pro váhy a míry ve věci soustavy základních jednotek učinila, je důležitý, dalo by se říci historický; uplatnění návrhu na redefinici základních jednotek ve smyslu Usnesení 1 završí dlouhodobý proces, kterým se dospěje k definici všech základních jednotek nezávisle na nějakém artefaktu.

Zasedání CGPM také stanovilo nutné kroky k ukončení tohoto historicky významného projektu. Ke změně definic dojde podle požadavků CGPM po ukončení dalších prací, zaměřených především na přesnější stanovení hodnot fundamentálních konstant a na vývoj metod realizace jednotek a jejich využití. Předpokládá se vypracování „mises en pratique“ pro nové definice. Požaduje se také další práce na zpřesňování formulace definic tak, aby byly co nejlépe přizpůsobeny praxi a pochopení uživatelů. Navržené definice vycházejí ze základní myšlenky:

Mezinárodní systém jednotek SI bude systémem jednotek, ve kterém:

- frekvence přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury atomu cesia ^{133}Cs v základním stavu je přesně $9\,192\,631\,770$ Hz,
- rychlost světla ve vakuu c je přesně $299\,792\,458$ metrů za sekundu,

- Planckova konstanta h je přesně $6,626\,068\,96 \times 10^{-34}$ joule sekundy
- elementární náboj e je přesně $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ coulombu,
- Boltzmannova konstanta k je přesně $1,380\,658\,371 \times 10^{-23}$ joulu na kelvin,
- Avogadrova konstanta N_A je přesně $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ na mol,
- světelná účinnost K_{cd} monochromatického záření o frekvenci 540×10^{12} Hz je přesně 683 lumeny na watt,

kde

hertz, joule, coulomb, lumen, a watt, se značkami jednotek Hz, J, C, lm a W, souvisí s jednotkami sekunda, metr, kilogram, ampér, kelvin, mol a kandela, se symboly m, kg, A, K, mol, a cd, podle vztahů $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{s A}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{sr cd}$, a $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$.

Důležitý je symbol X v návrhu, který znamená další číslici (nebo číslice), která se přidá v okamžiku schválení nových definic (aniž by se měnila definice) k číselné hodnotě h , e , k a N_A . Použijí se hodnoty podle nejnovějších úprav CODATA, získané novými experimentálními pracemi.

Návrhu redefinice předcházela dlouhá doba úvah, diskusí, experimentů. Bylo například nutné rozhodnout, zda bude pro definici kilogramu vhodnější určit jako fixní velikost hmotnosti atomu uhlíku ^{12}C nebo velikost Planckovy konstanty. Jiným příkladem je volba mezi nábojem elektronu a permeabilitou vakua. Obojí by dovolovalo definovat elektrické veličiny, ale náboj elektronu e se ukázal jako výhodnější kandidát proto, že realizace jednotek elektrických veličin V a Ω s využitím Josephsonova jevu a von Klitzingovy konstanty vede tak jako tak ke vztahům $K_J = 2e/h$ a $R_K = h/e^2$. Nadto je snad v budoucnu možné realizovat etalon elektrického proudu přímo počítáním elementárních nábojů za časový interval, čili opět e .

Konečné schválení nové soustavy SI s datem jejího zavedení provede CGPM teprve po splnění nutných podmínek, což nebude před rokem 2014. Je ale třeba uvědomit si, jak krátká už je to doba proti období, ve kterém se změna připravuje.

Soustava SI má velkou přednost v tom, že se její jednotky používají ve všech oblastech měření, od denního praktického života přes přesnou výrobu až k pokročilé vědě. Vědecký pokrok, kterého bylo dosaženo v národních metrologických institutech a v BIPM dovoluje předpokládat, že nová definice jednotek bude dalším krokem vpřed.

V usnesení 24. zasedání CGPM (celkové znění je k dispozici na www.bipm.org v rubrice Metric Convention, česká verze bude zveřejněna také v časopise Metrologie) se zmiňuje to, že vynikajícím příkladem úspěšnosti snah o definování jednotek pomocí fundamentálních konstant nebo vlastností atomů je současná definice jednotky SI délky, metru (17. zasedání CGPM, 1983, Usnesení 1), která jej váže na přesnou hodnotu rychlosti světla ve vakuu c . O postavení mezinárodního prototypu kilogramu se říká, že, ačkoliv sloužil vědě a technice dobře od schválení CGPM na prvním

zasedání v roce 1889, má řadu významných omezení, z nichž jedním z nejvýznamnějších je to, že jeho hmotnost není výslovně spojena s neměnným přírodním jevem a v důsledku toho není zaručena jeho dlouhodobá stabilita. V posledních letech byl zaznamenán velký pokrok ve vztažení hmotnosti mezinárodního prototypu k Planckově konstantě h metodami, které zahrnují výkonové váhy (watt balance) a měření hmotnosti atomu křemíku.

Pro obor elektrických veličin je důležité to, že při definování kilogramu v návaznosti na přesnou hodnotu h a při definování ampéru vazbou na přesnou hodnotu elementárního náboje e by se nejistoty všech jednotek elektrických veličin SI, realizovaných přímo či nepřímo prostřednictvím Josephsonova a kvantového Hallova jevu spolu s hodnotami SI Josephsonovy a von Klitzingovy konstanty K_J a R_K podstatně snížily.

Pokud jde o jednotku mol, uvádí se v usnesení CGPM, že je také možné předdefinovat mol tak, aby byl vztažen k přesné číselné hodnotě Avogadrovy konstanty N_A a nebyl tak již závislý na definici kilogramu, dokonce ani při kilogramu definovaném vztahem k přesné číselné hodnotě h . Tím, že se využije na jedné straně vazba k Planckově konstantě a nikoliv k hmotnosti atomu a na druhé straně vazba k Avogadrově konstantě, zdůrazní se rozdíl mezi látkovým množstvím a hmotností.

Výhodou nové definice jednotek bude také to, že nejistoty hodnot mnoha dalších důležitých fundamentálních konstant a energetických převodních koeficientů pro energii by byly odstraněny nebo výrazně sníženy, pokud by konstanty h , e , k a N_A měly přesné číselné hodnoty při vyjádření v jednotkách SI.

Nicméně, kilogram bude i nadále jednotkou hmotnosti, ale jeho velikost bude stanovena tak, aby se číselná hodnota Planckovy konstanty rovnala přesně $6,626\ 06 \times 10^{-34}$, vyjádřena v jednotkách SI $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$, což se rovná J s,

ampér bude i nadále jednotkou elektrického proudu, ale jeho velikost bude stanovena tak, aby se číselná hodnota elementárního náboje rovnala přesně $1,602\ 17 \times 10^{-19}$, vyjádřena v jednotkách SI s A, což odpovídá C,

kelvin bude i nadále jednotkou termodynamické teploty, ale jeho velikost bude stanovena tak, aby se číselná hodnota Boltzmannovy konstanty rovnala přesně $1,380\ 6 \times 10^{-23}$, vyjádřena v jednotkách SI $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$, což se rovná J K^{-1} ,

mol bude i nadále jednotkou látkového množství specifikované základní entity, kterou může být atom, molekula, iont, elektron, jiná částice nebo určitá skupina těchto částic, ale jeho velikost bude stanovena tak, aby se číselná hodnota Avogadrovy konstanty rovnala přesně $6,022\ 14 \times 10^{23}$, vyjádřeno v jednotce SI mol^{-1} .

Generální konference pro váhy vzala na vědomí, že:

- nové definice kilogramu, ampéru, kelvinu a molu budou typu přesně stanovené konstanty, to znamená definice, ve které je jednotka definována nepřímo výslovným určením přesné hodnoty dobře známé a všeobecně uznávané fundamentální konstanty,

- stávající definice metru je vztažena k přesné hodnotě rychlosti světla ve vakuu, která je také dobře známou základní konstantou,
- stávající definice sekundy je vztažena k přesné hodnotě dobře určené vlastnosti atomu cesia, která je také přirozeně neměnná,
- přestože stávající definice kandely není vztažena k základní konstantě, může se na ni pohlížet, jako by byla vztažena k přesné hodnotě přirozené konstanty.

S cílem dosáhnout dobré srozumitelnosti (*a patrně je míněno také snadné dosažení jednotné interpretace*) navrhne CIPM zcela ekvivalentní tvar definic i pro zmíněné poslední tři jednotky, takže by měly znění:

- sekunda, symbol s, je jednotkou času; její velikost je stanovena tak, aby se číselná hodnota frekvence přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury atomu cesia ^{133}Cs v základním stavu, v klidu a při teplotě 0 K, rovnala přesně 9 192 631 770, je-li vyjádřena v jednotce SI s^{-1} , což se rovná Hz (*poznámka – zmiňovaná frekvence přechodu se často označuje ν_{hfs}*),
- metr, symbol m, je jednotkou délky; její velikost je stanovena tak, aby se číselná hodnota rychlosti světla ve vakuu rovnala přesně 299 792 458, je-li vyjádřena v jednotkách SI m s^{-1} ,
- kandela, značka cd, je jednotkou svítivosti v daném směru; její velikost je stanovena tak, aby se číselná hodnota světelné účinnosti monochromatického záření o frekvenci 540×10^{12} Hz rovnala přesně 683, je-li vyjádřena v jednotkách SI $\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{cd sr}$, nebo cd sr W^{-1} , což se rovná lm W^{-1} .

Takto bude definice všech sedmi základních jednotek chápána jako přirozeně vycházející ze souboru sedmi základních fyzikálních konstant, jak byly uvedeny výše.

V důsledku toho budou k datu, zvolenému pro revizi systému SI zrušeny

- definice kilogramu platná od roku 1889, založená na hmotnosti mezinárodního prototypu kilogramu (1. zasedání CGPM, 1889, 3. zasedání CGPM, 1901),
- definice ampéru, platná od roku 1948 (9. zasedání CGPM, 1948), založená na definici navržené Mezinárodním výborem (CIPM, 1946, Usnesení 2),
- definice kelvinu, platná od roku 1967/68 (13. zasedání CGPM, 1967-1968, Usnesení 4) založená na méně explicitní, dřívější definici (10. zasedání CGPM, 1954, Usnesení 3),
- definice molu, platná od roku 1971 (14. zasedání CGPM, 1971, Usnesení 3), založená na definici, podle níž má molární hmotnost uhlíku 12 hodnotu přesně 0.012 kg mol^{-1} .
- Stávající definice metru, sekundy a kandely, platné od přijetí CGPM na jejím 17. zasedání (1983, Usnesení 1), 13. zasedání (1967-1968, Usnesení 1) a 16. zasedání (1979, Usnesení 3), budou zrušeny.

Konvenční hodnoty Josephsonovy konstanty $K_{J,90}$ a von Klitzingovy konstanty $R_{K,90}$, přijaté Mezinárodním výborem (CIPM, 1988, Doporučení 1 a 2) na žádost Generální konference (18. zasedání CGPM, 1987, Usnesení 6) pro stanovení

reprezentace voltu a ohmu pomocí Josephsonova a kvantového Hallova jevu, budou zrušeny.

V usnesení CGPM se dále praví, že po redefinici základních jednotek:

- hmotnost mezinárodního prototypu kilogramu $m(\mathcal{K})$ bude 1 kg, avšak s relativní nejistotou, která se rovná nejistotě doporučené hodnoty h před novou definicí a že následně jeho hodnota bude stanovena experimentálně,
- že magnetická konstanta (permeabilita vakua) μ_0 bude $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$, ale s relativní nejistotou, která se rovná nejistotě doporučené hodnoty konstanty jemné struktury α , a že následně její hodnota bude určena experimentálně,
- že termodynamická teplota trojného bodu vody T_{TPW} bude 273,16 K, ale s relativní nejistotou, která se rovná nejistotě doporučené hodnoty k před novou definicí a že následně její hodnota bude určena experimentálně,
- že molární hmotnost uhlíku 12 $M(^{12}\text{C})$ bude 0,012 kg mol⁻¹, ale s relativní nejistotou rovnou nejistotě doporučené hodnoty N_A před novou definicí a následně její hodnota bude určena experimentálně.

Z Usnesení 1. 24. zasedání CGPM (2011) vyplývá, že i po redefinici bude pro běžnou praxi nadále kilogram kilogramem, voda bude mrznout při nule stupňů Celsia atd. Navržené změny nebudou pozorovatelné v denním životě, ale budou mít bezprostřední vliv ve špičkově přesných měřeních prováděných ve specializovaných laboratořích. Jejich uplatnění je nutné pro další rozvoj vědy a některých technologií. Bude ještě nutné analyzovat účinky v nejvyšších patrech etalonáže (zejména hmotnosti), protože státní etalon může

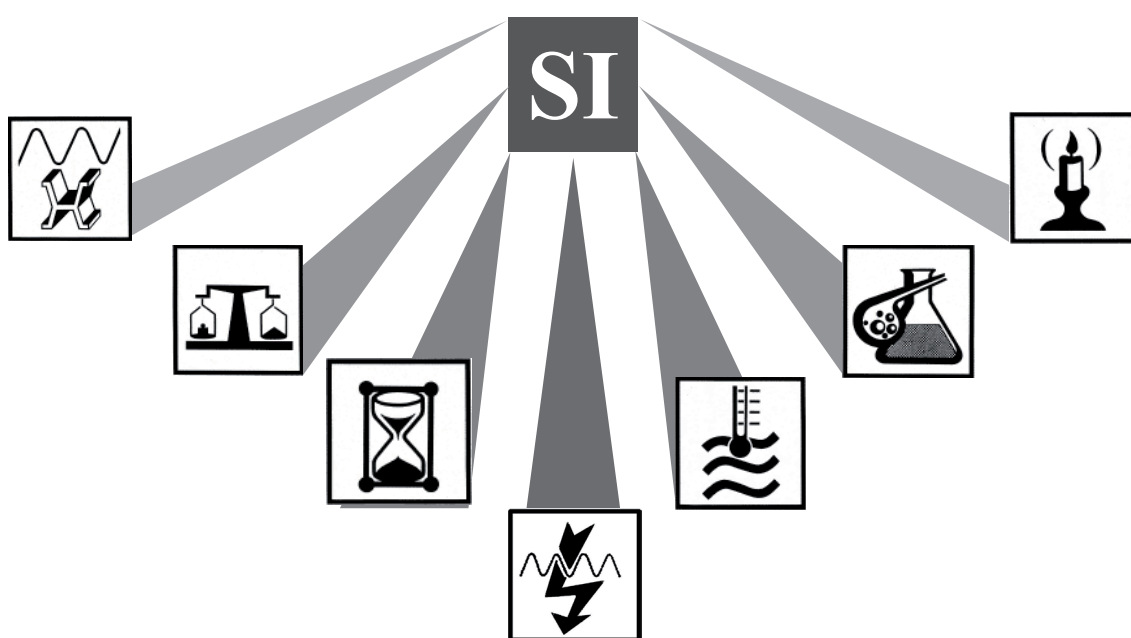
být proti dnešku zatížen větší nejistotou; podobné účinky se mohou projevit i v dalších oborech.

Především redefinice kilogramu vyžaduje vysoce přesná měření jak pro určení fundamentální konstanty h , tak pro kalibraci hmotných etalonů na nejvyšší úrovni. Bude třeba několika laboratoří, schopných tato měření provádět k tomu, aby bylo možné novou definicí užívat. Cílová nejistota takových měření je 20 μg na kg. Je zřejmé, že dva typy experimentu se blíží tomuto cíli. Jedním z nich je využití speciálních elektronických výkonových vah – kilogram se měří ve vztahu k Planckově konstantě. Druhým přístupem je porovnání s hmotností atomu křemíku. Dosavadní výsledky poskytují pro Planckovu konstantu nejistotu 44 μg na kg. Situace je sledována CODATA a CGPM vyzvala všechny národní metrologické instituty k velkému úsilí při dalších projektech velmi přesných měření.

Je jisté, že pokrok a zdokonalování soustavy jednotek a stupňování preciznosti její realizace se nezastaví. Jako příklad jmenujme například rozvoj optických generátorů frekvence, sbližování primární metrologie času a délky nebo úvahy o dalším vývoji definice kandely ve vztahu k fotonům.

Poděkování

Redakční rada děkuje všem autorům příspěvků, panu doc. RNDr. Janu Obdržádkovi, CSc. za pomoc a posouzení jednotlivých kapitol a panu PhDr. B. Kleníkovi a jeho spolupracovníkům za zpracování textů ve velmi krátkém termínu. V neposlední řadě poděkování patří také panu Ing. F. Jelínkovi, CSc., který byl koordinátorem a editorem této přílohy.



ZÁKLADNÍ JEDNOTKY SI – HISTORIE, SOUČASNOST, BUDOUCNOST

ZKRATKY

BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen	Spolkový úřad pro cejchování a měřictví, Rakouský národní metrologický institut
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures	Mezinárodní úřad pro váhy a míry
CCAUV	Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations	Poradní výbor pro akustiku, ultrazvuk a vibrace
CCEM	Comité consultatif d'électricité et magnétisme	Poradní výbor pro elektřinu a magnetismus
CCL	Comité consultatif des longueurs	Poradní výbor pro délku
CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées	Poradní výbor pro hmotnost a příbuzné veličiny
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie	Poradní výbor pro fotometrii a radiometrii
CCQM	Comité consultatif pour la quantité de matière	Poradní výbor pro látkové množství
CCRI	Comité consultatif des rayonnements	Poradní výbor pro ionizující záření
CCT	Comité consultatif de thermométrie	Poradní výbor pro termometrii
CCTF	Comité consultatif du temps et des fréquences	Poradní výbor pro čas a kmitočet
CCU	Comité consultatif des unités	Poradní výbor pro jednotky
CGPM	Conférence Générale des Poids et Mesures	Generální konference pro váhy a míry
CIE	International Commission on Illumination	Mezinárodní komise pro osvětlení
CIPM	Comité Internationale des Poids et Mesures	Mezinárodní výbor pro váhy a míry
CIPM MRA	CIPM Mutual Recognition Arrangement	CIPM Ujednání o vzájemném uznávání
CMC	Calibration and Measurement Capabilities	Kalibrační a měřicí schopnosti
FZÚ AVČR	Institute of Physics ASCR	Fyzikální ústav AV ČR
KCDB BIPM	Key Comparison Database	Databáze klíčových porovnání BIPM
MFF UK	Faculty of Mathematics and Physics, Charles University in Prague	Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze
MKSA		Soustava měřicích jednotek založená na metru, kilogramu, sekundě a ampéru
MRA		viz CIPM MRA
NIST	National Institute of Standards and Technology	Federální metrologický institut USA
NMI	National Metrological Institut,	Národní metrologický institut– obecně používaná zkratka
NPL	National Physikal Laboratory	Národní metrologický institut Spojeného království
OIML	Organisation Internationale de Metrologie Légale	Mezinárodní organizace legální metrologie
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt	Fyzikálně-technický ústav Spolkové republiky Německo
Soustava SI – SI systém	Le Système International d'Unités The international system of units	
TAI	Temps atomique international	Mezinárodní atomový čas
ÚFE AVČR	Institute of Photonics and Electronics ASCR	Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR
ÚNMZ	Czech Office for Standards, Metrology and Testing	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
UTC	Coordinated Universal Time	Kordinovaný světový čas
VIM	Vocabulaire International des termes fondamentaux et généraux de Metrologie	Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii

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, Ing. 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 2011. 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. 4/2011 časopisu Metrologie. © ÚNMZ

K obrázku na obálce:

Soustava základních jednotek SI a fundamentální konstanty, které budou navrhovanými definicemi pevně stanoveny. TPW označuje artefakt- realizaci teploty trojného bodu vody. Tenké šipky označují symbolicky dosavadní definiční vztahy.

Front page:

System of base units and fundamental constants fixed by the proposed definitions of units.

TPW – triple point of water. Thin arrows indicate symbolically the current definition relationships.

