

REDEFINICE SOUSTAVY JEDNOTEK SI

Ing. Martin Hudlička, Ph.D.

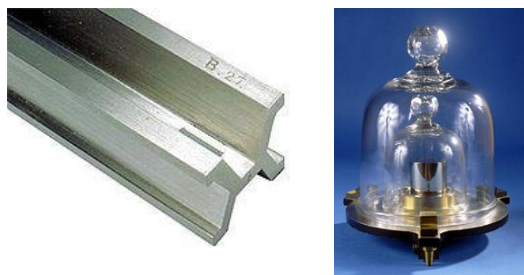
Český metrologický institut, Odd. primární metrologie v elektrických veličin, Praha
mhudlicka@cmi.cz

ÚVOD

Pro účely měření se už tisíce let používají různé jednotky a měřicí systémy. Některé z měřicích systémů během času zanikly, některé naopak přetrvaly několik století a navázaly na ně další systémy. Nejstarší měřicí systémy byly většinou odvozeny z rozměrů lidského těla (palec, stopa, loket – často to byly rozměry těla aktuálního vládce a tedy se časově i místně lišily) nebo na rozměrech vyskytujících se v přírodě. Jmenujme např. měřicí systémy velkých civilizací, jako starověký Babylon, Egypt (Obr. 1), Řecko, římská říše apod. V novodobé evropské historii byl až do roku 1826 nejrozšířenější anglický systém s velkým množstvím jednotek pro různé fyzikální veličiny (objem: pinta, galon; hmotnost: kámen, libra; délka: prst, stopa, palec apod.), který později nahradil imperiální systém používaný zejména ve Velké Británii a jejích koloniích. V USA se po získání samostatnosti začal používat tzv. angloamerický měrný systém (customary units) s mnoha jednotkami, které mají stejný název, ale odlišnou velikost než v imperiálním systému.



Obr. 1 Měření délky, hmotnosti, času a objemu ve starověkém Egyptě.



Obr. 2 První prototypy metru a kilogramu (rok 1889)

Metrický systém se začal rodit od roku 1791 v komisi francouzské akademie věd. Podstatou bylo použití desítkového systému a soustavy předpon pro vyjádření násobků, na rozdíl od např. imperiálního systému, kde je přepočítání mezi jednotkami velmi nepřehledné (1 galon = 8 pint = 16 šálků = 768 čajových lžiček apod.). K iniciativě se přidalo mnoho zemí. V roce 1875 byla podepsána tzv. metrická konvence (17 zemí) a byla definována jednotka 1 kilogram a 1 metr. Bylo vyrobeno 30 prototypů metru a 40 prototypů kilogramu ze slitiny platiny (90 %) a iridia (10 %), viz Obr. 2. Jeden kilogram byla hmotnost 1 litru vody při atmosférickém tlaku a teplotě 3,98 °C a jeden metr tvořila vzdálenost mezi dvěma značkami na platino-iridiové tyči. Jeden metr byl původně kolem roku 1670 definován pomocí kyvadla, ovšem později se zjistilo, že rozkmit kyvadla závisí na nadmořské

výšce (gravitace) a tak byl definován jako 1/10 000 000 délky pomyslné spojnice mezi severním pólem a rovníkem procházející Paříží (i tato definice se později ukázala jako nepřesná, protože Země nemá pravidelný tvar). Systémy jednotek se pomalu rodily i pro jiné veličiny (zejména elektrické), kolem roku 1900 se používal systém CGS (centimetr-gram-sekunda) a objevily se snahy přidat elektrické veličiny k metrické konvenci.

Na konci 2. světové války bylo používáno množství systémů se složitým přepočtem mezi velikostmi jednotek (angloamerický systém, imperiální systém, různé variace metrického systému) a nutnost změny byla evidentní. V roce 1960 bylo na 11. zasedání komise pro míry a váhy přijato 11 rezolucí a byly definovány jednotky metr, kilogram, ampér, sekunda, kelvin a kandela. Tato soustava byla nazvána „mezinárodní soustava jednotek“ (Le Système International d'Unités, SI). V roce 1971 byla k těmto jednotkám přidána ještě jednotka látkového množství mol. Základní jednotky byly odvozeny z neměnných vlastností přírody (rychlost světla ve vakuu), trojného bodu vody a jednoho fyzického artefaktu (kilogram). Odvozené jednotky jsou definovány pomocí základních jednotek nebo jiných odvozených jednotek (např. $1 \text{ Pa} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, $1 \Omega = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$ apod.). Systém jednotek SI v této podobě byl s drobnými změnami platný od roku 1960, na jaře 2019 dochází k jeho významné redefinici, jak bude ukázáno dále.

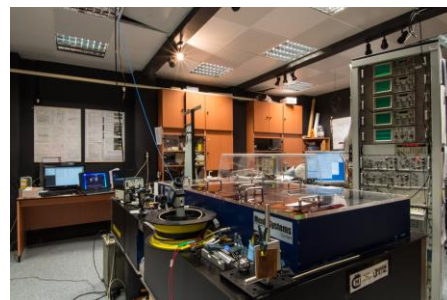
SOUSTAVA JEDNOTEK SI PŘED ROKEM 2019

V následujícím textu je uvedena poslední platná definice jednotek soustavy SI (před 20. 5. 2019). Definice jednotlivých jednotek, jejich doporučené způsoby realizace, odvozené jednotky a další informace lze nalézt např. v 8. vydání SI Brochure [1] vydávané BIPM (Bureau International des Poids et Mesures). Nová definice soustavy jednotek SI po 20. 5. 2019 bude obsažena v 9. vydání SI Brochure, které bude k dispozici ke stažení na stejném místě [1].

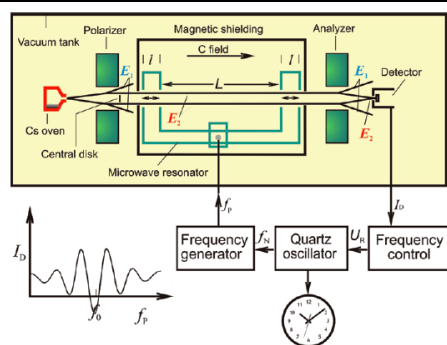
Kilogram (hmotnost) – Kilogram je jednotkou hmotnosti; je ekvivalentní hmotnosti mezinárodního prototypu kilogramu. Existuje 1 mezinárodní prototyp uložený v Paříži, 6 sesterských kopií (Paříž), 10 pracovních kopií (Saint-Cloud, Francie), a přibližně 69 národních prototypů v různých zemích světa (včetně České republiky, která vlastní prototyp s označením 67). Porovnání hmotnosti mezinárodního prototypu s jeho sesterskými kopiemi je provedeno každých cca 40 let.



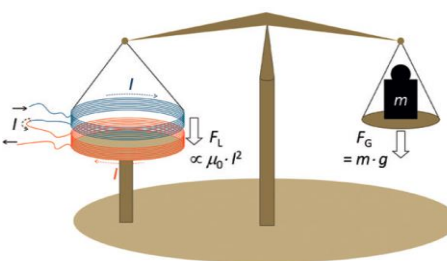
Metr (délka) – Metr je dráha, kterou světlo ve vakuu urazí za časový interval $1/299792458$ sekundy. Jednotku metr lze realizovat třemi způsoby: a). měřením času, který světlo potřebuje na překonání určité vzdálenosti, b). použití vlnové délky záření, jehož kmitočet je změřen, c). použitím vlnové délky primárního standardu – laseru stabilizovaného k jednomu z přechodů vybraných prvků. V České republice se používá kvantový standard délky založený na helium-neonovém laseru s různými vlnovými délkami ($\lambda = 633$ nm, $\lambda = 612$ nm and $\lambda = 543.5$ nm), který je stabilizovaný k přechodům atomů jódu a měření délky je provedeno interferometricky.



Sekunda (čas) – Sekunda je doba trvání 9192631770 period záření odpovídajícímu přechodu mezi dvěma hyperjemnými hladinami atomu céсія ^{133}Cs v základním stavu při teplotě 0 K. V České republice je realizace jednotky sekunda provedena pomocí dvou komerčních césiových hodin HP 5071A umístěných v Ústavu fotoniky a elektroniky AVČR (excitace atomů provedena mikrovlnným zářením o kmitočtu cca 9 GHz). Relativní stabilita hodin vůči ideální realizaci je cca 5×10^{-13} . Tato definice je platná již od roku 1960, ačkoliv již dnes existují atomové hodiny s lepší relativní stabilitou v řádu 5×10^{-18} používající k excitaci atomů laserové záření s kmitočty v THz oblasti.



Ampér (elektrický proud) – Ampér je stálý elektrický proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 metr vyvolá mezi nimi stálou sílu o velikosti 2×10^{-7} newtonu na 1 metr délky vodiče. Pomocí této idealizované definice lze realizovat ampér přímo např. proudovými váhami, ve kterých je Lorentzova síla působící mezi pohyblivou a pevnou cívkou kompenzována gravitační silou. Přesnost realizace je závislá na přesnosti realizace kilogramu. Existují i nepřímé realizace, kdy proud je určen z Ohmova zákona ze známého napětí U a elektrického odporu R jako $I = U/R$.



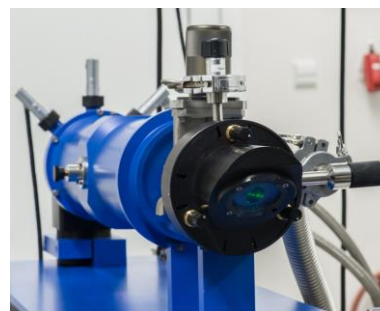
Kelvin (termodynamická teplota) – Kelvin je definován jako $1/273,16$ termodynamické teploty trojného bodu vody. V roce 2005 byla k definici přidána ještě podmínka na poměrně striktní chemické složení vody, viz [1]. Teplotu ve $^{\circ}\text{C}$ lze z teploty v K přepočítat jako $t [^{\circ}\text{C}] = T - 273,15$. Návaznost na vyšší nebo nižší teploty je provedena pomocí trojných bodů nebo bodů tání dalších prvků jako N_2 , Hg , Zn , Al , Ag , Cu (v ČR v současné době rozsah -196 $^{\circ}\text{C}$ až $+1048,6$ $^{\circ}\text{C}$), jelikož teplota není aditivní veličinou (smícháním dvou sklenic vody o teplotě 30 $^{\circ}\text{C}$ nevznikne voda o teplotě 60 $^{\circ}\text{C}$).



Mol (látkové množství) – Jeden mol libovolné látky obsahuje tolik elementárních částic jako $0,012$ kg atomu uhlíku ^{12}C . Těmito částicemi mohou být atomy, molekuly, ionty a další částice, nebo skupiny takových částic. Již od svého zavedení v roce 1971 je tato jednotka předmětem kritiky, protože je spíše parametrickou jednotkou, je úzce spjata s Avogadrovou konstantou N_A . Některé doporučené způsoby realizace jednotky mol lze nalézt v [2].



Kandela (svítivost) – Kandela je svítivost světelného zdroje, který v daném směru emituje (vyzařuje) monochromatické záření o kmitočtu 540×10^{12} hertzů a jehož zářivost (zářivá intenzita) v tomto směru činí $1/683$ wattů na jeden steradián. Dříve byla intenzita svítivosti zdroje porovnáвана s referenčním zdrojem (svíčka, později speciální lampy) a detektorem bylo lidské oko. V ČR je v dnešní době používána uzavřená dutina v tepelné rovnováze (černé těleso) a absolutní kryogenní radiometr pro různé vlnové délky v oboru viditelného, ultrafialového a infračerveného spektra.



V současnosti má metrická konvence 60 členských zemí a 42 přidružených zemí, nicméně tento měřicí systém byl přijat prakticky na celém světě (z historických důvodů nebo ze zvyku se nicméně používají paralelně i starší jednotky, např. Velká Británie). Jediné 3 země na světě, které oficiálně metrickou soustavu zatím nepoužívají, jsou Spojené státy americké, Myanmar a Libérie. Nutno podotknout, že Spojené státy byly jedním z prvních signatářů metrické konvence v roce 1875 a používání starých jednotek působí dodnes problémy např. v mezinárodním obchodu a lze najít i množství příkladů, kdy záměna jednotek způsobila velké ekonomické škody. V měření se používá systému návaznosti veličin na přesnější standardy. Např. údaj váhy v obchodě je porovnán s hmotností referenčního závaží, které je přes sérii porovnání návazné až k mezinárodnímu prototypu kilogramu uloženému v Paříži.

MOTIVACE PRO REDEFINICI SOUSTAVY SI

Motivací pro úvahy nad změnou definice některých jednotek SI byl zejména fakt, že mezinárodní prototyp kilogramu během času nepatrně mění svojí hmotnost, přičemž není zcela jasné, zda svojí hmotnost mění mezinárodní prototyp, nebo jeho sesterské kopie, se kterými je jednou za několik let provedeno porovnání. Předpokládá se, že k záporné odchylce hmotnosti může docházet např. vlivem čištění (páry lihu) a manipulace (otěr materiálu), ke kladné odchylce potom dochází vlivem usazování nečistot na prototypoch (i přesto, že jsou uchovávány v ochranné atmosféře a pečlivě čistěny). Změna hmotnosti od roku 1889 dosahuje řádově několik desítek μg . Další motivací pro změnu byla poněkud abstraktní definice jednotky ampér, kterou lze obtížně realizovat s malou nejistotou měření. A konečně jednotka kelvin, jejíž přesná realizace je závislá na čistotě vody použité pro vytvoření trojného bodu. V soustavě jednotek SI před její redefinicí byly hodnoty přírodních konstant specifikovány a jejich hodnoty odrážely nejlepší přesnost měření některých veličin. V nové soustavě SI je sedm základních jednotek určeno zafixováním sedmi „definujících“ konstant, které tyto jednotky obsahují. Konstanty, jejichž hodnota je v nové soustavě SI fixována na určitý počet desetinných míst, bylo možné měřit s vysokou přesností již ve „staré“ soustavě SI. Definice sekundy byla ponechána i přesto, že lze dnes nalézt i přesnější atomové hodiny s relativní přesností kolem 5×10^{-18} , nicméně žádný ze současných principů se nezdá být výrazně lepší než ostatní. Tab. 1 uvádí seznam přírodních konstant, na kterých je založena nová „kvantová“ soustava jednotek SI.

Stávající soustava SI		Nová „kvantová“ soustava SI	
Základní veličina	Jednotka	Základní veličina	Definující konstanta
čas	sekunda (s)	kmitočet	$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$
délka	metr (m)	rychlost	$c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
hmotnost	kilogram (kg)	akce (účinek)	$h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
elektrický proud	ampér (A)	elektrický náboj	$e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
termodynam. teplota	kelvin (K)	tepelná kapacita	$k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
látkové množství	mol (mol)	látkové množství	$N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
svítivost	kandela (cd)	svítivost	$K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$

Tab. 1 Porovnání stávající a nové „kvantové“ soustavy základních jednotek SI

Soustava jednotek SI podle nové definice si neklade za cíl být použitelná pro měření v denní praxi a běžný uživatel žádnou změnu ani nepostřehne. Pouze národní metrologické instituty na nejvyšší úrovni přesnosti budou některá svá měření realizovat jiným způsobem. Hodnoty definujících konstant, které budou nově fixovány na pevný počet desetinných míst, se v budoucnu mohou ještě měnit, pokud to bude opodstatněné novými, přesnějšími, experimentálními výsledky. Protože se předpokládá univerzální platnost fyzikálních zákonů v celém vesmíru, bude možno hypoteticky realizovat jednotku 1 kilogram i na vzdálené planetě sestavením složitějšího experimentálního zařízení namísto zaslání fyzického prototypu kilogramu.

V Tab. 2 je uvedena definice sedmi základních jednotek SI vyjádřených na základě sedmi přírodních konstant, jejichž velikost je fixována na pevný počet desetinných míst. Tato definice byla přijata na 26. zasedání CGPM (Generální konference pro míry a váhy), které se konalo 13. – 16. 11. 2018 na zámku ve Versailles u Paříže [3]. Množství materiálů a přednášek s tematikou redefinice SI lze nalézt také na YouTube kanálu BIPM [4].

sekunda	Sekunda, symbol s, je SI jednotkou času. Je definována fixní číselnou hodnotou kmitočtu $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ přechodu mezi hladinami velmi jemného rozštěpení základního stavu atomu cézia ^{133}Cs jako 9 192 631 770, pokud je vyjádřena v jednotce Hz, což je ekvivalentem zápisu s^{-1} .
metr	Metr, symbol m, je jednotkou SI délky. Je definován fixní číselnou hodnotou rychlosti světla c ve vakuu, která je rovna 299 792 458, pokud je vyjádřena v jednotkách m/s, přičemž sekunda je definována pomocí $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
kilogram	Kilogram, symbol kg, je SI jednotkou hmotnosti. Je definován fixní číselnou hodnotou Planckovy konstanty h jako $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$, pokud je vyjádřena v jednotkách J·s, což je ekvivalentem zápisu $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, kde metr je definován pomocí c a sekunda je definována pomocí $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
ampér	Ampér, symbol A, je SI jednotkou elektrického proudu. Je definován fixní číselnou hodnotou elementárního elektrického náboje e jako $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$, pokud je vyjádřen v jednotce C, což je ekvivalentem zápisu A·s, kde sekunda je definována pomocí $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
kelvin	Kelvin, symbol K, je SI jednotkou termodynamické teploty. Je definován pomocí fixní číselné hodnoty Boltzmannovy konstanty k jako $1,380\,649 \times 10^{-23}$, pokud je vyjádřena v jednotkách $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$, což je ekvivalentem zápisu $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, kde kilogram je definován pomocí h , metr je definován pomocí c , a sekunda je definována pomocí $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
mol	Mol, symbol mol, je SI jednotkou látkového množství. Jeden mol obsahuje přesně $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ elementárních částic. Toto číslo je fixní číselnou hodnotou Avogadrovy konstanty N_A , pokud je vyjádřena v jednotce mol^{-1} . Látkové množství systému, symbol n , je mírou počtu specifikovaných elementárních částic. Elementární částicí může být atom, molekula, iont, elektron nebo libovolná jiná částice nebo skupina částic.
kandela	Kandela, symbol cd, je SI jednotkou svítivosti v daném směru. Je definována pomocí fixní číselné hodnoty světelné účinnosti K_{cd} monochromatického záření o kmitočtu 540×10^{12} Hz, která je rovna 683, pokud je vyjádřena v jednotkách $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, což je ekvivalentem zápisu $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ nebo $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, kde kilogram je definován pomocí h , metr je definován pomocí c a sekunda je definována pomocí $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Tab. 2 Nová „kvantová“ soustava základních jednotek SI platná od 20. 5. 2019

PŘÍPRAVY NA REDEFINICI

Redefinici soustavy základních jednotek SI předcházely dlouhé přípravy a obrovské množství pečlivě experimentální práce v posledních několika desetiletích. Hodnoty základních fyzikálních konstant jsou každé čtyři roky zpřesňovány komisí CODATA (Committee on Data for Science and Technology) a jejich číselné hodnoty jsou založeny na nejlepších teoretických a experimentálních odhadech platných pro danou dobu [5]. Cílem je, aby relativní nejistota měření z různých experimentálních realizací byla co nejmenší (alespoň 10^{-8} nebo menší) a vzájemně konzistentní a teprve poté lze novou hodnotu mezinárodně akceptovat [6].

Pro jednotky sekunda a metr (a odvozené jednotky ohm a volt) již dlouho existují extrémně přesné experimentální realizace (césiové atomové hodiny, měření rychlosti světla ve vakuu pomocí femtosekundového hřebenu a kvantový Hallův/Josephsonův jev), které jsou návazné přímo na $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, c , h a e . Pro jednotky kilogram, mol, ampér a kelvin bylo nutné vytvořit měřicí postupy se srovnatelnou přesností.

Jednotka mol

Snahy určit přesně Avogadrovu konstantu pomocí 3 různých izotopů křemíku se datují do roku 2003, kdy začal mezinárodní projekt Avogadro (viz např. [7]). Vysoce obohacený křemík ^{28}Si obsahuje navíc ještě izotopy ^{29}Si a ^{30}Si , které lze považovat za nečistoty a jejich hmotnost lze určit hmotnostní spektroskopií. Pro experimenty byl použit krystal vysoce čistého křemíku o hmotnosti cca 5 kg vyrobený v Ruské federaci, ze kterého bylo potom vyrobeno několik křemíkových koulí s hmotností 1 kg (Obr. 3). V roce 2011 bylo s vynaložením extrémního experimentálního úsilí dosaženo relativní nejistoty měření z různých experimentů cca 2×10^{-8} při měření počtu atomů v jednotlivých křemíkových koulích. Při experimentech byla zároveň určena velikost Planckovy konstanty. Počet atomů v kouli byl určen přesným měřením jejich geometrických rozměrů, hmotnosti a ze znalosti teplotního rozpínání krystalové mřížky křemíku. Problémem byl např. „obal“ koule tvořený nečistotami a oxidací; jeho hmotnost se určila složitými spektroskopickými měřeními. Objem koule byl určen interferometricky s pomocí kulové (PTB Německo) nebo rovinné (NMIJ Japonsko) vlny a hmotnost byla určena porovnáním s artefaktem kilogramu ve vzduchu a ve vakuu. Pro přijetí hodnoty byla nutná shoda ještě s dalšími experimenty, jedním z nich je např. měření tzv. molární Planckovy konstanty $N_A h = 3,9903127110(18) \times 10^{-10}$ Js/mol (rel. nejistota měření $4,5 \times 10^{-10}$). Zde se využilo faktu, že molární Planckova konstanta je úzce spjata s dalšími atomovými konstantami, které lze



Obr. 3 Křemíkové koule pro určení Avogadrovy konstanty

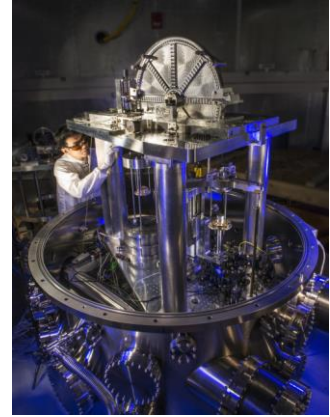
v současnosti změřit s mnohem větší přesností, než Planckovu konstantu. Platí $N_A h = \frac{M_u c \alpha^2}{2 R_\infty} A_r^e$, kde M_u je molární

hmotnostní konstanta, α je konstanta jemné struktury, R_∞ je Rydbergova konstanta a A_r^e je relativní atomová hmotnost elektronu.

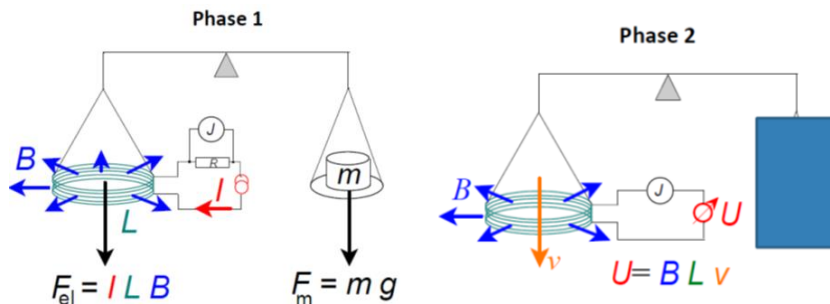
Jednotka kilogram

Pro realizaci kilogramu byly použity dvě odlišné metody. První metodou je měření hmotnosti křemíkové koule při znalosti Avogadrovy konstanty (první experimenty PTB Německo), druhým zásadním experimentem jsou tzv. wattové váhy (první experimenty v NPL Velká Británie, a NIST USA, viz Obr. 4). Wattové váhy dávají do vzájemné souvislosti elektrické veličiny, hmotnost, délku a čas. Oba hlavní experimenty dosáhly relativní nejistoty měření cca 2×10^{-8} a jejich výsledky lze tedy považovat za konzistentní.

Princip wattových vah je následující: v prvním kroku je síla, která působí na vodič protékající proudem v magnetickém poli porovnává se silou, která působí na závaží o známé hmotnosti. Ve druhém kroku se pohybuje cívka v magnetickém poli a lze tak měřit napětí indukované mezi konci cívky. Pokud se porovnájí rovnice z těchto dvou kroků, eliminuje se magnetická indukce a získá se vztah mezi elektrickým proudem, napětím, tíhovým zrychlením a rychlostí, což jsou veličiny, které lze měřit s mnohem větší přesností, než magnetickou indukci, viz Obr. 5. První experimenty ve Velké Británii a USA byly brzy následovány dalšími zeměmi (Švýcarsko, Kanada, Francie), přičemž stejný princip je realizován pomocí různé složitých experimentálních zařízení. Někdy lze v literatuře nalézt označení Kibblovy váhy na počest B. Kibbla (1938-2016, NPL Velká Británie), který se zásadní měrou zasloužil o teoretický a experimentální rozvoj této metody. Lze ukázat, že pomocí wattových vah lze změřit i číselnou hodnotu Planckovy konstanty [8].



Obr. 4 Wattové váhy (NIST, USA)



Obr. 5 Princip realizace jednotky kilogram pomocí wattových vah

$$m g = I B L$$

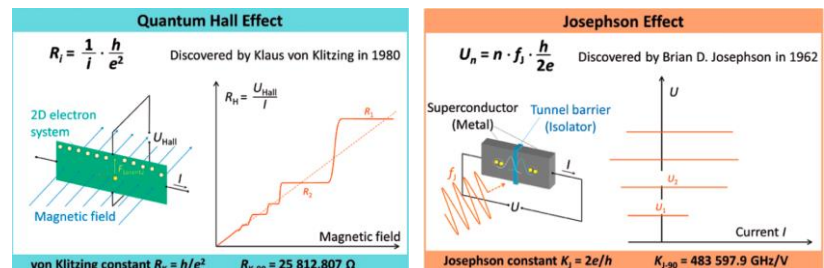
$$U = v B L$$

$$U I = m g v$$

Jednotka ampér

Jednotku ampér lze podle nové definice realizovat dvěma různými způsoby, které dávají totožné výsledky. První metoda využívá Ohmova zákona $I = U/R$. Tato metoda je vhodná pro generování „velkých“ proudů v řádu pA – μ A. Druhou metodou lze určit elektrický proud jako počet elektronů, které projdou elektrickým obvodem za určitý čas. Tato metoda je návazná na velikost elementárního náboje e a kmitočet přechodu césia $\Delta \nu_{Cs}$. Metoda je vhodnější pro „malé“ proudy v řádu fA – pA.

Realizace ampéru pomocí Ohmova zákona využívá dvou důležitých kvantových jevů. Prvním z nich je kvantový Hallův jev, který lze pozorovat u speciálních polovodičových struktur zchlazených na teplotu typicky pod 1 K (hélium) a vystavených silnému magnetickému poli (~ 1 T až 18 T). Elektrický odpor takových struktur se potom mění s velikostí magnetického pole skokově, přičemž každý takový skok odpovídá Hallovu odporu $R_H = h/i e^2$, $i = 1, 2, 3, \dots$. Pro $i = 1$ (magn. indukce cca 18 T) se definuje von Klitzingova konstanta $R_k = h/e^2 = 25\,812,807 \, \Omega$. V praxi se nejčastěji používá $i = 2$ (magn. indukce cca 10 T a $R_H = 12\,906,40 \, \Omega$, což je blízko hodnotě 10 k Ω používané v laboratorních odporových dekádách). Druhým z důležitých kvantových jevů je Josephsonův efekt, při kterém dochází u slabě vázaných polovodičů (přechod polovodič-kov-polovodič) zchlazených

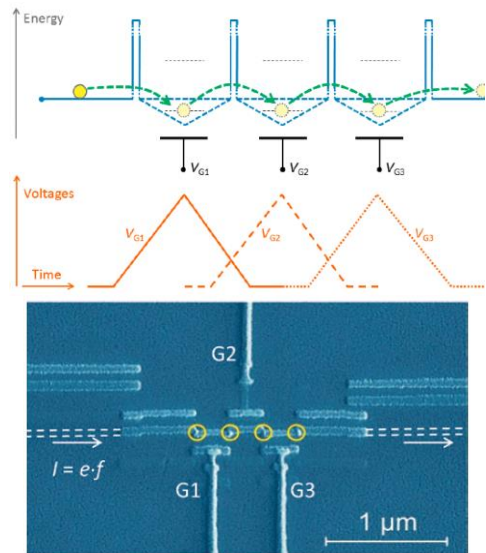


Obr. 6 Kvantový Hallův jev (vlevo) a Josephsonův jev (vpravo).

odpovídá Hallovu odporu $R_H = h/i e^2$, $i = 1, 2, 3, \dots$. Pro $i = 1$ (magn. indukce cca 18 T) se definuje von Klitzingova konstanta $R_k = h/e^2 = 25\,812,807 \, \Omega$. V praxi se nejčastěji používá $i = 2$ (magn. indukce cca 10 T a $R_H = 12\,906,40 \, \Omega$, což je blízko hodnotě 10 k Ω používané v laboratorních odporových dekádách). Druhým z důležitých kvantových jevů je Josephsonův efekt, při kterém dochází u slabě vázaných polovodičů (přechod polovodič-kov-polovodič) zchlazených

na nízké teploty ($\sim 3,6$ K) k tunelovému jevu a aplikací vnějšího střídavého magnetického pole lze na svorkách struktury měřit napětí s přesně definovanými diskrétními úrovněmi (ve skutečnosti se napětí určuje nepřímo měřením kmitočtu mikrovlnného záření). Důležitá je zde převodní konstanta $K_J = 2e/h = 483\,597,9$ GHz/V (Josephsonova konstanta). Realizace ampéru touto metodou se prakticky používala ještě před redefinicí soustavy SI, byla však považována jen za *reprodukcí* jednotky, nikoliv její *realizaci*, protože zde chyběla návaznost na základní jednotky SI pro konstanty R_K a K_J .

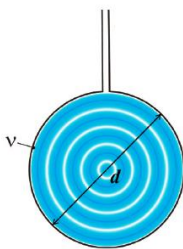
Druhou možnou realizací ampéru je kontrolovaný pohyb jednotlivých elektronů $I = n e f$. Využívá se faktu, že pro přidání elektronu do vodiče musí být dodána energie. Čím menší je takový vodič („nábojový ostrůvek“), tím větší energie je zapotřebí. Při nízkých teplotách (0,1 K pro 1 μm strukturu) dochází k tzv. Coulombově blokadě, kdy strukturou nemůže procházet žádný proud, elektrony jsou „uvězněny“ v potenciálových bariérách s pomocí speciálních polovodičů a nanotechnologií. Potenciálové bariéry mohou být vytvořeny ve směru kolmém k protékajícímu proudu a to buď jako bariéry konstantní velikosti (tunelové přechody, tenká vrstva izolantu mezi dvěma vodiči) nebo jako potenciálové bariéry s kontrolovatelnou velikostí (kvantové tečky). Pro pohyb elektronů ve struktuře se periodicky mění velikost potenciálových bariér v tzv. elektronových pumpách (single-electron pump). Dosažitelné proudy jsou typicky < 100 pA. Při kmitočtech > 100 MHz je nutno použít sofistikovanější řešení, protože statisticky dochází k tunelování elektronů přes potenciálové bariéry a velikost proudu je tak měřena s chybou [9].



Obr. 7 Princip elektronové pumpy (nahore) a její praktická realizace (dole). PTB Německo.

Jednotka kelvin

Veličina teplota je úzce spjata s rychlostí pohybu částic v látkách. V idealizovaných plynech bylo pozorováno při různých teplotách charakteristické rozložení rychlostí částic (mikroskopické tepelné energie kT), které je popsáno tzv. Maxwell-Boltzmannovo pravděpodobnostním rozdělením. Pokud se zařazuje Boltzmannova konstanta k , potom je teplota T svázána s energií vyjádřenou v joulech. Bohužel veličina mikroskopické tepelné energie kT není přímo měřitelná a proto se musí měřit některá z makroskopických veličin, která je s ní svázána. Existuje několik „primárních“ principů teploměru (nevyžadujících kalibraci), v tomto textu budou popsány dva z nich. Akustický plynový teploměr (dosažitelná rel. standardní nejistota 2×10^{-6}) je založen na principu měření teplotně závislé rychlosti zvuku v plynech; rychlost je úměrná $(kTB)^{1/2}$. K měření se používá akustický rezonátor naplněný některým ze vzácných plynů. Problémem je čistota měřícího plynu, extrapolace tlaku plynu do nuly a volba umístění akustických vysílačů a přijímačů uvnitř rezonátoru, viz [10]. Druhým hlavním principem realizace kelviny je dielektrický plynový teploměr (dielectric constant gas thermometer), ve kterém se při konstantní teplotě určuje tlakově závislá hustota hélia, která je svázána s jeho dielektrickou konstantou (permitivitou). Polarizabilita hélia byla v posledních letech určena s relativní nejistotou 10^{-6} . Vzhledem k její malé velikosti je místo ní měřena permitivita (přímo svázána s polarizovatelností) z relativní změny kapacity kapacitoru, který je nejdřív naplněn héliem (tlak 7 MPa) a potom evakuován. Jedním z praktických problémů je např. deformace kapacitoru vlivem vysokého tlaku hélia, více detailů viz [11]. Ukázka experimentální sestavy obou teploměrů je uvedena na Obr. 8.



Obr. 8 Akustický plynový teploměr (vlevo) a dielektrický plynový teploměr (vpravo), obojí PTB Německo.

Jak bylo uvedeno dříve, před schválením nových hodnot fyzikálních konstant musí dojít k velmi dobré shodě výsledků z mnoha různých experimentů a relativní nejistota měření musí být typicky menší než 10^{-8} .

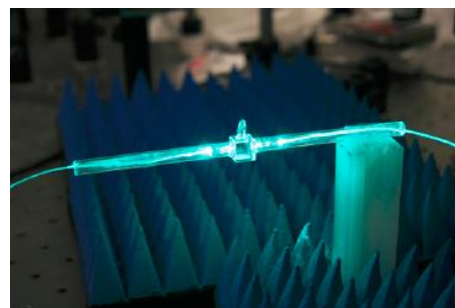
MĚŘENÍ VF ELEKTRICKÝCH VELIČIN A REDEFINICE SI

U veličin používaných ve vysokofrekvenčních a mikrovlnných měřeních je někdy návaznost odvozených veličin (anténní faktor, zisk zesilovače, s-parametry) na základní jednotky SI složitější. Např. s-parametry jsou návazné na

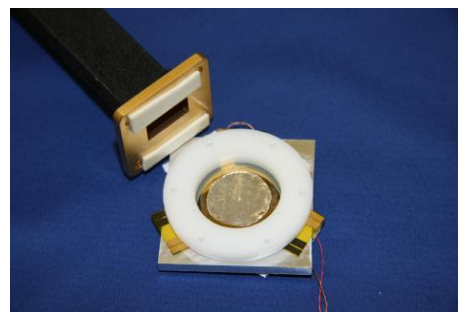
jednotky SI metr a sekunda pomocí přesné charakterizace kalibračních standardů (vzduchové linky, otevřený konec, zkrat), validovaného kalibračního algoritmu a přenosu nejistot měření z kalibračních standardů do výsledků měření. V posledních letech se ale objevuje i snaha o měření některých vf elektrických veličin na základě kvantových principů a tedy přímé návaznosti měření na základní fyzikální konstanty.

Měření intenzity elektrického pole na primární úrovni je v současné době realizováno pomocí vypočitatelných realizací jednotky $V \cdot m^{-1}$, vyjádřeno pomocí základních jednotek SI jako $kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$. Obvykle jde o ohraničený prostor, ve kterém se budí pomocí vhodného zdroje elektromagnetická vlna. Jedná se např. o dvě rozlehlé rovnoběžné vodivé desky nebo obdélníkový vlnovod, ve kterém se budí transverzálně elektromagnetická vlna (TEM cela). Pro vyšší kmitočty se používá bezodrazová komora, ve které je vypočitatelná intenzita elektrického pole dosažena v určité vzdálenosti od antény se známými parametry při buzení známým výkonem. Přenosovým standardem je zde sonda elektrického pole. Jedná se často o kruhový problém, tzn. ke kalibraci sondy elektrického pole je potřeba ji vložit do „známého“ pole a k ověření intenzity elektrického pole v nějakém prostoru potřebujeme kalibrovanou sondu. Nejlepší nejistota realizace intenzity elektrického pole bývá kolem 5 %. Jedním ze slibných přístupů pro eliminaci výše uvedených nedostatků je použití sondy elektrického pole založené na optické excitaci par atomů v uzavřené skleněné komoře a vytvoření tzv. Rydbergova plynu [12]. Praktický měřicí systém měřicí komorou obsahující páry rubidia byl ukázán v [13] pro kmitočtové pásmo 1 GHz až 500 GHz s dosažitelnou citlivostí metody až 0,01 mV/m pro široké rozmezí intenzit elektrického pole, viz Obr. 9. Systém používá laser na jedné vlnové délce pro zjištění odezvy plynu na elektrické pole a druhý laser na jiné vlnové délce pro vybudování energetických stavů v plynu.

Současná realizace návaznosti vf výkonu je založena na nepřímém měření tepelných účinků stejnosměrného proudu a vysokofrekvenčního střídavého proudu v kalorimetru. Ten se typicky skládá z tepelně izolovaného úseku vlnovodu, zátěže a teplotního senzoru (např. termočlánku). Jde o jednu z nejpřesnějších metod měření výkonu používanou v mnoha národních metrologických institutech, nicméně má svá omezení. Velký pokrok v částicové fyzice v posledních desetiletích vedl i k myšlence absolutního měření vf výkonu s návazností na jednotku SI pomocí jiného principu, než je tepelná substituce. V práci [14] je popsán experiment s laserově chlazenými atomy rubidia, které jsou vystaveny působení elektromagnetického záření o určité intenzitě. V důsledku vystavení elektromagnetickému poli dojde k populaci stavů až do Rabiho oscilace (protony a neutrony mají určitý vlastní moment, spin, a jádro atomů tak má určitý magnetický moment, který lze měnit z jednoho stavu do druhého; jádra atomů mají určitý vlastní kmitočty oscilací). Jinou metodou slibující návaznost na SI je měření tlaku laserového záření (radiation pressure) [15], [16], viz Obr. 10. Tento princip měření by umožnil návaznost na SI přes jednotku kilogram, tedy Planckovu konstantu.



Obr. 9 Komora pro měření intenzity el. pole [13], optická vlákna pro budící a monitorovací laser.



Obr. 10 Detail senzoru tlaku elektromagnetického záření ve vlnovodu [16].

ZÁVĚR

Hlavním důsledkem redefinice soustavy základních jednotek SI bude nahrazení fyzického prototypu kilogramu jeho navázáním na neměnné konstanty přírody. Odpadne tak riziko ztráty nebo poškození hlavního prototypu, na který jsou navázána další závaží ve světě a od něhož byla dříve odvozena i přesnost mnoha jiných veličin. Nyní si může každá ekonomicky vyspělá země postavit svoji vlastní realizaci kilogramu. Elektrická měření budou nově plně pokryta SI (nicméně přesný vztah mezi soustavami SI a CGS bude porušen). Hodnota trojného bodu vody bude nově zjišťována experimentálně a jednotka mol nebude v budoucnu svázána s hmotností (role uhlíku ^{12}C končí). Předpokládá se, že soustava SI po redefinici založená na několika přírodních konstantách by měla být platná alespoň pro následujících 100 let, pokud nedojde k velmi výraznému zpřesnění atomových hodin, nebudou objeveny nové kvantové jevy nebo nebudou nalezeny nové fyzikální teorie, které budou redukovat počet nezávislých fyzikálních konstant (číselné hodnoty jednotlivých konstant se mohou dále zpřesňovat s rostoucí přesností experimentálních metod). Dopad na běžné uživatele měřicí techniky bude prakticky nulový vzhledem k nejistotám měření komerčních systémů, které jsou o několik řádů vyšší, než experimentální sestavy popsané výše. Možným nepříjemným důsledkem pro studenty může být přepsání některých partií fyzikálních učebnic (pro studenty středních škol bez znalostí kvantové fyziky budou definice zřejmě velmi abstraktní). Ve starší teoretické literatuře z oblasti elektromagnetismu se používala (pedagogicky názornější) soustava CGS, která zjednodušuje zápis vztahů normováním absolutní permitivity ϵ_0 a permeability μ_0 vakua k jedné, ovšem byla úzce svázána s definicí některých fyzikálních konstant a proto v budoucnu přestane ve své původní podobě platit. Některé konstanty a převodní faktory původně zatížené nejistotami měření budou v novém systému jednotek známy zcela přesně (např. molární plynová konstanta, Stefan-Boltzmannova konstanta apod.). U jiných konstant je situace opačná, původně byly stanoveny přesně a nově budou zatíženy nejistotou (např. permeabilita vakua bude měřitelná a vztah mezi intenzitou magnetického pole H a magnetickou indukcí B se tak změní).

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl v rámci řešení projektu č. 201810131 „Příprava na redefinici jednotek SI v oboru vysokofrekvenčních elektrických veličin“ Českého metrologického institutu.

LITERATURA

- [1] *SI Brochure*, 8th Edition (2014). [online]. Dostupné: <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
- [2] Doporučené postupy realizace jednotky mol. [online]. Dostupné: https://www.bipm.org/utis/en/pdf/SIApp2_mol_en.pdf
- [3] Rozhodnutí přijatá na 26. zasedání Generální konference pro míry a váhy (CGPM), [online]. Dostupné: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM-2018/26th-CGPM-Resolutions.pdf>
- [4] YouTube kanál BIPM (mnoho prezentací s tematikou redefinice SI). [online]. Dostupné: <https://www.youtube.com/thebipm>
- [5] Mezinárodně doporučené hodnoty fyzikálních konstant, komise CODATA. [online]. Dostupné: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>
- [6] D. Newell *et al.*, “The CODATA 2017 Values of h , e , k , and N_A for the Revision of the SI,” *Metrologia*, roč. 55, č. 1, str. L13-L16, 2018.
- [7] A. Picard, *et al.*, “State-of-the-art mass determination of ^{28}Si spheres for the Avogadro project,” *Metrologia*, roč. 48, str. 112–119, 2011.
- [8] M. Gläser, M. Borys, “Precise mass measurements,” *Reports on Progress in Physics*, roč. 72, č. 12, str. 126101, 2009.
- [9] H. Scherer, H. W. Schumacher, “Single-Electron Pumps and Quantum Current Metrology in the Revised SI,” *Annalen der Physik*, str. 1800371, 2019.
- [10] M. Moldover, *et al.*, “Acoustic gas thermometry,” *Metrologia*, roč. 51, str. R1–R19, 2014.
- [11] C. Gaiser, *et al.*, “Dielectric-constant gas thermometry,” *Metrologia*, roč. 52, str. 217–226, 2015.
- [12] C. L. Holloway *et al.*, “Broadband Rydberg Atom-Based Electric-Field Probe for SI-Traceable, Self-Calibrated Measurements,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, roč. 62, č. 12, str. 6169–6182, 2014.
- [13] C. L. Holloway *et al.*, “Atom-Based RF Electric Field Metrology: From Self-Calibrated Measurements to Subwavelength and Near-Field Imaging,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, roč. 59, č. 2, str. 717–728, 2017.
- [14] D. Paulusse, N. Rowell, A. Michaud, “Realization of an atomic microwave power standard,” *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2002)*, Ottawa, Ontario, Canada, 2002, str. 194–195.
- [15] P. A. Williams, J. A. Hadler, R. Lee, F. C. Maring, and John H. Lehman, “Use of radiation pressure for measurement of high-power laser emission,” *Optics Letters*, roč. 38, č. 20, str. 4248–4251, 2013.
- [16] A. Artusio-Glimpse, M. T. Simons, I. Ruyter, M. Kautz, J. Lehman and C. L. Holloway, “Measurement of Radio-Frequency Radiation Pressure,” *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, Paris, France, 2018, str. 1–2.