

Redefinicija enot mednarodnega sistema SI

dr. Rado Lapuh, mag. Matej Grum,
dr. Samo Kopač

Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo,
Urad RS za meroslovje, Celje



Izvelek

Mednarodni sistem enot doživlja redefinicijo štirih osnovnih enot. Osnova za nove definicije so izbrane naravne konstante, ki so jim z redefinicijo pripisane tudi fiksne numerične vrednosti. S tem je v mednarodnem merskem sistemu odpravljen tudi zadnji artefakt – prakilogram. Pot do sprejetja redefinicije je zahtevala skoraj desetletje raziskav, ki so na koncu dale dovolj točne realizacije enot neposredno in zgolj glede na vrednosti naravnih konstant. Točnost realizacij enot po novi definiciji je enaka ali boljša od do sedaj veljavnih realizacij. Nove definicije enot so sicer abstraktnije, omogočajo pa realizacijo enot kjerkoli in kadarkoli v nam znanem vesolju.

Ključne besede: merske enote, redefinicija, sistem enot SI, naravne konstante

Redefining the International System of Units (SI)

Abstract

Four base units of the International System of Units are being redefined. The basis of the new definitions are selected physical constants which have been given fixed numerical values. With the redefinition, the definition of a kilogram will change, removing the last artefact – the International Prototype Kilogram – from the International System of Units. The path to the redefinition took almost a decade of research which in the end yielded sufficiently accurate realizations of the units directly and merely based on the values of universal constants in nature. The accuracy of unit realizations according to the new definition is equal or better than the currently accepted ones. Although the new definitions are more abstract, they provide stable values that remain unchanged everywhere and everywhen in the universe as-we-know-it.

Keywords: units of measurement, redefinition, System of Units (SI), universal constants in nature

Uvod

16. novembra 2018 so v odmevni odločitvi članice Meterske konvencije glasovale za revizijo mednarodnega sistema enot (SI) in s tem spremenile svetovno definicijo kilograma, ampera, kelvina in mola. Redefinicija velja od 20. maja 2019.

Odločitev, ki je bila sprejeta na 26. zasedanju Generalne konference za uteži in mere (CGPM) v Versaillesu v Franciji in na kateri je redefinicijo podprla tudi Slovenija, od sedaj vse enote opredeljuje in določa na osnovi naravnih konstant, ki opredeljujejo naravo in njene zakone. Tako definirane enote bodo zagotovile stabilnost SI v prihodnosti in odprle možnosti za nove tehnologije, neposredno predvsem s kvantnimi tehnologijami, s katerimi bo mogoče merske enote neodvisno realizirati kjerkoli in kadarkoli.

Zgodovina

Mere za čas, dolžino, volumen in maso so ljudje uporabljali že od začetkov razvoja civilizacij. Z razvojem se je njihova vloga le še povečevala, vendar je število mer za iste stvari do 18. stoletja tako naraslo, da vsem ni bilo mogoče več slediti. Med francosko revolucijo je francoska akademija za znanost predlagala uporabo enot za maso in dolžino, izbranih po načelih logike in naravnih pojavov, s ciljem, da določi mere, dostopne vsem in vsakomur, kjerkoli in kadarkoli. S to ambicijo so mero za dolžino iztrgali iz velikosti Zemlje. Izmerili so dolžino poldnevnikarja, ki teče skozi Pariz. Méritev sta s triangulacijo med mestom Dunquerque in Barcelono v letih od 1792 do 1799 izvedla Jean-Baptiste Joseph Delambre in Pierre-François-André Méchain. Ena desetmilijoninka te razdalje je definirala dolžino metra. To dolžino so prenesli v meter dolgo palico iz platine, ki je potem postala arhivski meter. Tisočinka kubičnega metra vode pri 4 °C je bila določena za osnovno enoto mase kilogram in je bila zaradi težavnosti določanja mase z volumnom vode prav tako izvedena iz platine v obliki valja, ta pa je postal arhivski kilogram. Kot zanimivost: Méchain in Delambre sta kasneje s podrobnejšimi izračuni ugotovila, da je bil njun meter za 0,2 milimetra prekratek (posledično je prelahek tudi kilogram ...), vendar je bil prameter že določen in izdelan. Tako imamo še zdaj osnovno enoto za dolžino prekratko glede na takratno definicijo in to bo ostalo nespremenjeno tudi po redefiniciji.

Tako določeni enoti za dolžino in maso sta bili kasneje tudi mednarodno sprejeti s podpisom Meterske konvencije leta 1875 v Parizu, kjer je med sedemnajstimi podpisnicami sodelovala tudi Avstro-Ogrska. Zaradi težav z arhivskim metrom in arhivskim kilogramom so obe meri izdelali iz zlitine 90 % platine in 10 % iridija, izraženo v masnih odstotkih, kar je bistveno izboljšalo njuno stabilnost, enake kopije pa so dobile države članice Meterske konvencije. Leta 1921 je bila Meterska konvencija dopolnjena, tako da je vključevala tudi osnovne enote za druge veličine poleg dolžine in mase. Leta 1960 se je sistem enot preimenoval v mednarodni sistem SI (Système international d'unités). Sledile so prve redefinicije osnovnih enot za čas in dolžino, ki sta bili opredeljeni neposredno prek osnovnih naravnih pojavov.

Ideja

Tako sta sekunda in meter uživala položaj, ki so jima ga lahko druge enote zgolj zavidale: temeljila sta na nespremenljivih fizikalnih lastnostih. Sekunda na primer temelji na določeni frekvenci elektromagnetnih nihanj, ki ustrezajo prehodu med dvema nivojema hiperfinega razcepa osnovnega stanja atoma cezija 133, medtem ko meter izkorišča konstantno hitrost svetlobe kot fundamentalno lastnost narave. Odločilna prednost uporabe temeljnih naravnih konstant kot podlage za definicijo enot je, da so točno to, kar njihovo ime nakazuje – konstante.

Nasprotno, če bi bil meter še vedno definiran kot prvotni prototip prametra (v obliki palice iz platine in iridija s presekom v obliki črke X), bi bilo danes v bistvu nemogoče doseči skladnost merjenj. Že najmanjše razlike v temperaturi bi povzročile spremembo dolžine tega merila in stvari bi postale še hujše, če bi se prameter poškodoval. Pri vsakem materializiranem merilu dolžine so spremembe reda mikrometrov neizogibne, tudi če se z njimi ravna z največjo skrbnostjo. Ob današnjih tehnoloških izzivih, ko je nanometer že nekaj vsakdanjega, so takšne napake prevelike in jih je treba odpraviti.

Rešitev za vse druge osnovne enote so našli v umiku materializiranih pramer in v uporabi temeljnih naravnih konstant pri definiciji osnovnih enot. Seveda pa je bilo to lažje reči kot storiti, saj je bil nujni pogoj, da vse enote tudi po redefiniciji ostanejo enako velike.

Koraki pred redefinicijo

V sistemu enot, kot jih poznamo pred uveljavitvijo redefinicije, lahko ugotavljamo vrednosti temeljnih naravnih konstant z meritvami. Kilogram smo namreč določili s prakilogramom in na njegovi osnovi določamo maso protonu, elektronu in drugim osnovnim delcem. To pa pomeni, da se vrednosti teh naravnih konstant neprenehoma spreminjajo, odvisno pač od

Leta 1960 se je sistem enot preimenoval v mednarodni sistem SI (Système international d'unités).

Sekunda in meter sta uživala položaj, ki so jima ga lahko druge enote zgolj zavidale: temeljila sta na nespremenljivih fizikalnih lastnostih.

Rešitev za vse druge osnovne enote so našli v umiku materializiranih pramer in v uporabi temeljnih naravnih konstant pri definiciji osnovnih enot.

točnosti trenutnih meritev. Skupina strokovnjakov v okviru CODATA, delovne skupine za temeljne konstante, je tako primerjala in ocenjevala rezultate izmerjenih vrednosti fundamentalnih konstant v laboratorijih po svetu. Vsake štiri leta so potem na primer določili novo numerično vrednost za naboj elektrona, čeprav se – v resnici – seveda sploh ni spremenil. Kar se je spremenilo, je bila naša zmožnost točnega merjenja in s tem poznavanja narave.

Leta 2007 je CGPM zadolžila Mednarodni odbor za uteži in mere (CIPM), da preuči možnost uporabe naravnih konstant kot osnove za definicijo enot SI namesto artefaktov, ki so bili takrat v uporabi (edini artefakt v tem času je bil prakilogram kot definicija enega kilograma). Eden od najpomembnejših pogojev je seveda bil, da redefinicija ne bo povzročila nobenih sprememb za uporabnike, kar pomeni, da se velikosti enot ne bodo spremenile. Prav tako je bilo pred redefinicijo treba za vsako redefinirano enoto izvesti vsaj dve neodvisni realizaciji, katerih rezultati meritev se bodo ujemali v okviru najmanjše danes dosegljive negotovosti. Na osnovi tega bi bile določene numerične vrednosti naravnih konstant, ki bi zagotavljale enako velikost osnovnih enot tudi po redefiniciji. Znanstveniki so ta problem reševali celo desetletje, CODATA pa je zbirala in primerjala rezultate. Osnovo za rešitev sta predstavljala takrat že dobro poznana in uporabljana kvantna pojava: Josephsonov efekt za določitev električne napetosti in von Klitzingov efekt za določitev električne upornosti, ki sta ti dve veličini neposredno povezovala zgolj z električnim nabojem elektrona e in s Planckovo konstanto h . Dodatno sta ključno vlogo v raziskavah odigrala Kibblova tehtnica in Avogadrov projekt s silicijevo kroglo (slika 1), ki sta obljubljala posredno meritev mase z izjemno točnostjo z navezavo na Planckovo konstanto h in Avogadrovo konstanto N_A . Na področju temperature obstoječa

Eden od najpomembnejših pogojev je seveda bil, da redefinicija ne bo povzročila nobenih sprememb za uporabnike, kar pomeni, da se velikosti enot ne bodo spremenile.



Slika 1: Krogla iz čistega silicija, ki je ta hip najbolj okrogel predmet na Zemlji. Težka je en kilogram, iz njene sestave in mer pa je mogoče določiti njeno težo s podobno negotovostjo, kot to lahko dosežemo s Kibblovo tehtnico. (Vir: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)

definicija enote kelvin pri eni sami temperaturi trojne točke vode ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$) ni več omogočala dovolj točnih meritev pri temperaturah pod 20 K in nad 1300 K , pri čemer so vrhunski strokovnjaki, zbrani v Posvetovalnem odboru za temperaturo (CCT) pri CIPM, predlagali možnost uporabe Boltzmannove konstante k_B kot osnove za definicijo enote kelvin.

Kljub napovedim in znatnemu napredku leta 2014 ti rezultati še niso bili dovolj zanesljivi in odločanje o redefiniciji je bilo preloženo za štiri leta. Leta 2017 pa so bili dovolj točni rezultati vendarle na razpolago in na 26. Generalni konferenci za uteži in mere novembra 2018 so države članice Metrske konvencije soglasno potrdile in sprejele nove definicije. Mednarodni urad za uteži in mere (BIPM) je ob tem izdal več publikacij z opredelitvami dogovorjenih sprememb tudi za splošno javnost [1], [2].

Nove definicije

Nove definicije enot sistema SI so bile zaradi potrebne spremembe zakonodaj uveljavljene 20. maja 2019. Temeljijo na določitvi naslednjih fiksnih vrednosti naravnih konstant:

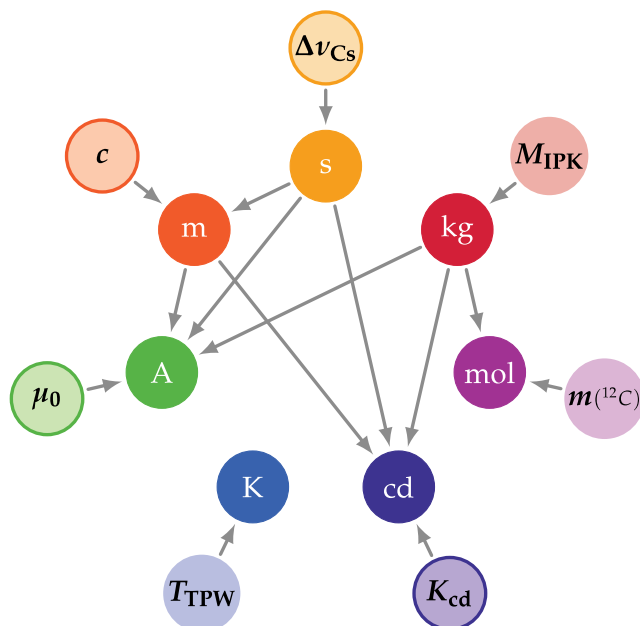
- frekvenca prehoda cezijevega atoma 133 v nemotenem osnovnem stanju
 $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$,
- hitrost svetlobe v vakuumu $c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$,
- Planckova konstanta $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\text{ kg m}^2\text{s}^{-1}$,
- osnovni naboj $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\text{ As}$,
- Boltzmannova konstanta $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}\text{ kg m}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}$,
- Avogadrova konstanta $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$,
- svetlobna učinkovitost monokromatskega sevanja s frekvenco $540 \cdot 10^{12}\text{ Hz}$,
 $K_{\text{cd}} = 683\text{ cd sr kg}^{-1}\text{ m}^{-2}\text{ s}^3$.

Sprejete nove definicije štirih enot SI so:

- Enota SI za maso je kilogram s simbolom kg. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo Planckove konstante h , enako $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ in izraženo z enoto Js, kar je enako $\text{kg m}^2\text{s}^{-1}$, kjer sta meter in sekunda definirana s c in $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- Enota SI za električni tok je amper s simbolom A. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo osnovnega naboja e , enako $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ in izraženo z enoto C, kar je enako As, kjer je sekunda definirana z $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- Enota SI za termodinamično temperaturo je kelvin s simbolom K. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo Boltzmannove konstante k_B , enako $1,380\,649 \cdot 10^{-23}\text{ JK}^{-1}$, kar je enako $\text{kg m}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}$, kjer so kilogram, meter in sekunda definirani s h , c in $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- Enota SI za množino snovi je mol s simbolom mol. En mol vsebuje natančno $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ elementarnih enot. Ta vrednost je fiksna numerična vrednost Avogadrove konstante N_A , izražena z enoto mol^{-1} , in se imenuje Avogadrovo število. Množina snovi sistema s simbolom n je mera števila opredeljenih elementarnih enot. Elementarna enota je lahko atom, molekula, ion, elektron ali katerikoli drug osnovni delec ali opredeljena skupina delcev.

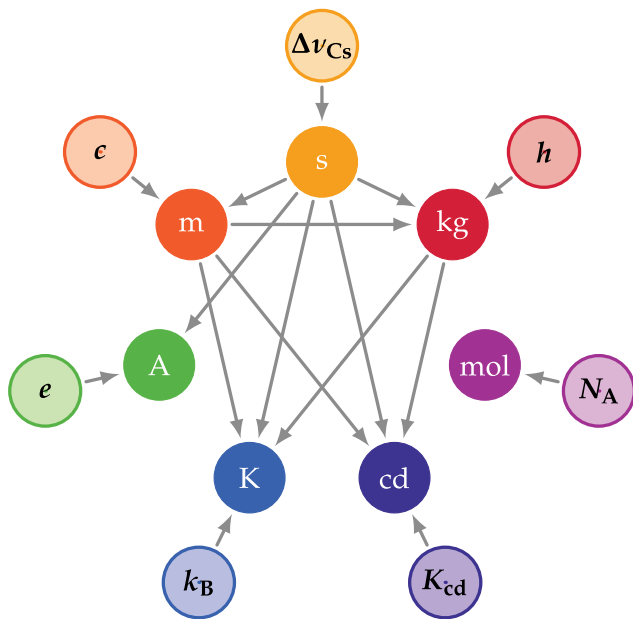
Sprejete preoblikovane definicije preostalih treh enot SI so:

- Enota SI za čas je sekunda s simbolom s. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo frekvence hiperfinega prehoda cezijevega atoma 133 v nemotenem osnovnem stanju $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, enako $9\,192\,631\,770$ in izraženo z enoto Hz, kar je enako s^{-1} .
- Enota SI za dolžino je meter s simbolom m. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo hitrosti svetlobe v vakuumu c , enako $299\,792\,458$ in izraženo z enoto m s^{-1} , kjer je sekunda definirana z $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- Enota SI za svetilnost v dani smeri je kandela s simbolom cd. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo svetilne učinkovitosti monokromatskega sevanja s frekvenco $540 \cdot 10^{12}\text{ Hz}$, K_{cd} , enako 683 in izraženo z enoto lm W^{-1} , kar je enako cd sr W^{-1} ali $\text{cd sr kg}^{-1}\text{ m}^{-2}\text{ s}^3$, kjer so kilogram, meter in sekunda definirani s h , c in $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



Slika 2: Pred redefinicijo sistema SI. Odnosi med osnovnimi enotami, nekaterimi fiksnimi naravnimi konstantami ($\Delta\nu_{\text{Cs}}$, c , μ_0 in K_{cd}) in maso prakilograma M_{IPK} , molskim številom $m(^{12}\text{C})$ ter temperaturo trojne točke vode T_{TPW} . Samo sekunda in meter sta dejansko definirana zgolj prek naravnih konstant.

Odnosi med osnovnimi enotami in naravnimi konstantami pred redefinicijo sistema SI so prikazani na sliki 2, na sliki 3 pa so prikazani odnosi med sedmimi fiksnimi naravnimi konstantami in osnovnimi enotami po redefiniciji.



Slika 3: Po redefiniciji sistema SI. Odnosi med osnovnimi enotami in sedmimi fiksnimi naravnimi konstantami. Vsako enoto je mogoče izraziti zgolj s fiksnimi naravnimi konstantami.

Fizikalna ozadja redefinicije so bila lepo predstavljena v šesti številki lanskega Obzornika za matematiko in fiziko v prispevku dr. Aleša Mohoriča [3].

Pomen redefinicije

Čeprav je bila redefinicija enot SI namenoma zasnovana in izvedena tako, da se velikosti enot ne spremenijo in da uporabniki te spremembe ne bomo čutili, pa bo redefinicija vendarle pustila pečat neposredno po svoji uveljavitvi, seveda pa še toliko bolj v prihodnosti.

Zanimiv in pomemben vidik se na primer skriva že v izobraževalnem procesu [4]. Učitelj je do zdaj lahko postavil vprašanje »Kaj je kilogram« in odgovor, sestavljen iz »prototip kilograma«, »zelo star« in »Pariz«, je pravzaprav povedal skoraj vse. Glede na novo definicijo pa bo isto vprašanje, če ga bo učitelj sploh postavil, k dvigu roke izzvalo zgolj mlade nadobudne fizike, kajti nova definicija je bistveno abstraktnejša in intelektualno zahtevnejša kot dosedanji sistem. Učenci bodo morali najprej razumeti, kaj so naravne konstante, od kod so prišle in zakaj so takšne, kot so. Nato pa morajo biti izbrane naravne konstante razumljene še podrobneje. S svetlobno hitrostjo bo to razumevanje gotovo lažje kot na primer s Planckovo ali Boltzmannovo konstanto. Nove definicije SI namreč ne opisujejo več eksperimenta za določitev posamezne osnovne enote, za celotno sliko in razumevanje posamezne enote pa bo treba razumeti tudi možne realizacije posameznih enot. To bo izziv že za učitelje na vseh ravneh učnega procesa.

Vsekakor bo redefinicija pustila takojšen pečat v znanosti in kmalu zatem tudi v tehnologiji. Meritve, povezane s sekundo in metrom, so po njuni navezavi na naravne konstante leta 1983 dosegle zmanjšanje negotovosti za več velikostnih razredov in vsi ti dosežki so bili kmalu uporabljeni tudi v tehnologiji. Lep primer je na primer GPS, ki ga brez atomskih ur tako na Zemlji kot v satelitih ne bi bilo mogoče izdelati. Nadalje znamo zdaj izmeriti jakost gravitacijskega polja g z relativno negotovostjo blizu $1 \cdot 10^{-9}$ prav prek definicij sekunde in metra [5], torej prek konstant frekvence cezijevega atoma in hitrosti svetlobe. Pri tem uporabljamo znano zgodbo o padcu jabolka na Newtonovo glavo, na osnovi katere naj bi ta genij zapisal svoj gravitacijski zakon. Namesto jabolka uporabimo posebno ogledalo, ki ga v vakuumu v

Nove definicije SI namreč ne opisujejo več eksperimenta za določitev posamezne osnovne enote, za celotno sliko in razumevanje posamezne enote pa bo treba razumeti tudi možne realizacije posameznih enot.

prostem padu spuščamo na razdalji nekaj decimetrov, pri tem pa z laserskim interferometrom in s števcem časovnih intervalov natančno merimo pot in hitrost ogledala pri padcu (slika 4). Laserski interferometer pri padanju ogledala ustvarja signal z naraščajočo frekvenco, ki pri razdalji padca 20 cm zaniha kar 640-tisočkrat, njegova frekvenca pa na koncu doseže 6 MHz. S hitrim ponavljanjem (tudi do tri meritve na sekundo!) zberemo toliko meritev, da lahko ustrezno zmanjšamo vpliv naključnih napak. Meritve so tako točne, da lahko izmerimo tudi lokalne spremembe gravitacijskega polja zaradi plime in oseke, zračnega tlaka, premikanja osi vrtenja Zemlje in gravitacijskega polja bližnjih težkih objektov. Zdaj je pot za takšen razvoj odprta tudi na vseh drugih področjih merjenj in z njimi povezanih tehnologij.



Slika 4: Instrument FG5-X podjetja Micro *g* LaCoste, ki z merjenjem padca ogledala meri težnostni pospešek g na izbrani lokaciji. (Vir: spletna stran Micro *g* LaCoste)

Definicije enot so opravile pot od regionalnih mer, ki so jih določali tamkaj živeči trenutni vladarji, do mer, iztrganih iz našega planeta in univerzalnega merskega sistema, uporabljanega po vsem svetu. Zdaj pa smo prestopili meje našega malega planeta. Nove merske enote bodo namreč univerzalno uporabne po celotnem nam znanem vesolju. To je gotovo nov mejnik naše civilizacije.

V Sloveniji je za uporabo enot sistema SI in za sledljivost meritev do teh enot pristojen in odgovoren Urad RS za meroslovje. Več informacij o sistemu enot SI in prihajajočih spremembah lahko dobite na Uradu RS za meroslovje, z delom Urada in njegovimi laboratoriji pa se lahko seznanite na dnevih odprtih vrat, ki jih vsako leto odpremo v mesecu maju in oktobru tako na Grudnovem nabrežju 17 v Ljubljani kot na Tkalski ulici 15 v Celju.

Nove merske enote bodo namreč univerzalno uporabne po celotnem nam znanem vesolju.

Viri

- [1] BIPM, Forthcoming Revision of the SI, SI Campaign Launch – Press Pack, maj 2018.
- [2] BIPM, Future Revision of the SI, Brand Book, april 2017.
- [3] Mohorič, Redefinicije enot SI, Obzornik za matematiko in fiziko, št. 6, letnik 65, 2018.
- [4] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, The new International System of Units (SI), PTB Info Sheet, november 2017.
- [5] D. B. Newell in drugi, A determination of the local acceleration of gravity for the NIST-4 watt balance, IEEE Trans. Instrum. Meas, izv. 64, št. 4, januar 2015.