

# Redefinicija mednarodnega sistema enot SI

Gregor Geršak, Janko Drnovšek

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: gg@fe.uni-lj.si

## Redifinition of the SI system of units

*In 2019, after some 200 years from its beginning the International system of units SI will be finally entirely defined on physical constants. Thus the SI will evolve from physical-artefacts-based system into a system of units based on fundamental physical constants and properties of the atoms. Definitions of the units have to be independent from technological progress and should not change with new scientific evidences and technological possibilities. New definitions should be such, that general public would not notice any change, that all measurements, performed using old definitions, stay valid within their uncertainties and that values of the kilogram, ampere, kelvin and mol do not change.*

**Key words:** SI sistem enot, redefinicija, osnovne enote, kilogram, amper, kandela, sekunda

## 1 Uvod

### 1.1 Mednarodni sistem enot SI

Prvi korak v izgradnji in razvoju današnjega Mednarodnega sistema enot – SI (Systemè International d'Unités) sta bila decimalni metrični sistem, uveden v času Francoske revolucije, in posledična izdelava dveh platinastih etalonov, ki sta predstavljala meter in kilogram leta 1799 [1]. Leta 1832 je Gauss močno propagiral uporabo svojega fizikalnega koherentnega metričnega sistema enot, ki je poleg dolžine in mase vseboval tudi fizikalno veličino čas, ki je bila sicer v uporabi v astronomiji. Gauss je kot prvi izmeril absolutno vrednost zemeljskega magnetnega polja v obliki decimalnega sistema enot, ki je baziral na treh mehanskih enotah – milimetru, gramu in sekundi. Kasneje sta skupaj z Webrom z vključitvijo električne veličine razširila te meritve.

V 60. letih devetnajstega stoletja so potekale številne raziskave na področju elektrike in magnetizma pod vodstvom Maxwella in Thompsona. Skupaj sta sestavila potrebne lastnosti koherentnega sistema enot z osnovnimi in izpeljanimi enotami. Koherentni sistem je sistem, v katerem je mogoče vsako izpeljano enoto izraziti kot linearno kombinacijo osnovnih enot, pri čimer so vsi številski faktorji enaki 1.

Leta 1884 je bil predstavljen CGS sistem enot, koherentni sistem, ki je baziral na treh mehanskih enotah centimetru, gramu in sekundi in za decimalne večkratnike enot uporabljal predpone od mikro do mega.

Na področju elektrike in magnetizma so se velikosti enot CGS pokazale kot neprimerne, zato je bil v 80. letih devetnajstega stoletja predlagan koherentni sistem praktičnih enot. Ta je vseboval tudi enote ohm za

električno upornost, amper za električni tok in volt za napetost.

Po podpisu Meterske konvencije se je v okviru CIPM začela izdelava novih prototipov za dolžino in maso. 20. maja 1875 so se pooblaščen predstavniki 18 držav sestali v Parizu na diplomatski konferenci o metru in podpisali Metersko konvencijo. Države podpisnice so bile Francija, Avstrija, Nemčija, Belgija, Brazilija, Argentina, Danska, Španija, Združene države Amerike, Italija, Peru, Portugalska, Rusija, Švedska, Norveška, Švica, Otomansko cesarstvo in Venezuela.

Konvencija je definirala enoto dolžine meter in enoto mase kilogram v obliki pramer. Ustanovila je Mednarodni urad za mere in uteži (BIPM) kot stalni znanstveni zavod in Mednarodni komite za mere in uteži (CIPM). S podpisom konvencije o metru leta 1875 se je začelo obširno znanstveno in eksperimentalno delo pri izdelavi pramer metra in kilograma. Trajalo je polnih 14 let, vse do leta 1889. Rezultata sta bila pramer s karakterističnim presekom črke H in prakilogram (mednarodni prototip kilograma – IPK) v obliki valja (slika ). Obe enoti sta skupaj z astronomsko sekundo tvorili sistem enot, podoben CGS sistemu, le da so bile osnovne enote meter, kilogram in sekunda. Definiran je bil MKS sistem.

Leta 1901 je Giorgi pokazal, da je mogoče kombinirati mehanske enote MKS sistema s praktičnimi električnimi enotami v obliko koherentnega sistema štirih osnovnih enot – treh mehanskih in ene električne.

Leta 1939 je bil predlagan štiri-dimenzionalni MKSA sistem z enotami meter, kilogram, sekunda in amper. V letu 1954 je CGPM sprejel amper, kelvin in kandelo kot osnovne enote električnega toka, termodinamične temperature in svetilnosti. Leta 1960 je bilo sprejeto tudi ime novega sistema enot Systemè International d'Unités – SI. Mol, kot osnovna enota za množino snovi, je bil v SI sistem dodan leta 1971.

Danes vsebuje SI sistem enot sedem osnovnih enot, in sicer kilogram, meter, sekundo, amper, kelvin, kandelo in mol (slika 2).

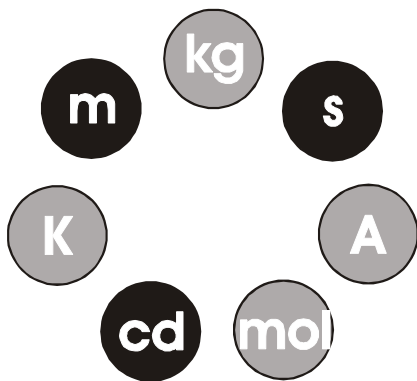


Slika 1. Prakilogram in pramer.

## 1.2 Definicije enot SI

Za definicije enot SI sistema skrbi Generalna konferenca za mere in uteži - CGPM (Comité International Généralé des Poids et Mesures), ki je organ Mednarodnega urada za mere in uteži - BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) s sedežem v Parizu. Pri tem upošteva spodnje zahteve.

Mednarodni sistem enot mora biti dostopen in enak za mednarodno trgovino, visoko-tehnološko proizvodnjo, človekovo zdravje in varnost, zaščito okolja, globalne študije podnebja in temeljne znanost, ki je temelj vsega naštetega. SI enote morajo biti dolgoročno stabilne, interno konsistentne in jih je možno realizirati v praksi, temelječ na trenutnih teoretičnih opisih narave na najvišjem nivoju [2].



Slika 2. Sedem osnovnih enot SI sistema. Štiri enote bodo v 2019 na novo definirane (sivi krogi).

## 1.3 Zakaj so nove definicije enot SI potrebne?

V splošnem sta izraza enota in fizikalna veličina abstraktna pojma. Da bi se lahko enota uporabljala kot mera, mora biti na razpolago realizacija enot, to je fizikalni etalon. Etalon je lahko otipljiv predstavnik fizikalne veličine, na primer kilogram kot etalonska mera za maso [1]. Lahko pa je definiran tudi s standardiziranim postopkom merjenja in uporabo standardiziranih merilnih metod ter opreme. Takšen primer predstavlja merjenje električnega toka s pomočjo tokovne tehtnice. Tretja možnost je uporaba naravnih pojavov kot fizikalnih etalonov. Etaloni za dolžino, čas in električni potencial so na primer definirani na osnovi atomskih procesov.

Meriti pomeni s poskusom primerjati neznano veličino s primerno enoto, ki je definirana z dogovorom. Naloga nacionalnih metroloških institucij (NMI) je, da preskrbijo etalone, s katerimi je enota uvedena v meritev. Danes etalone, za katere je dogovorjena mednarodno sprejeta definicija (običajno abstrakten opis fizikalne veličine z navedbo vseh njenih bistvenih lastnosti), pridobimo s serijo treh operacij – realizacijo (izvedba mednarodno dogovorjene abstraktne definicije enote), vzdrževanjem (proces vzdrževanja rezultatov

realizacije enote s primarnimi etaloni) in diseminacijo etalona (postopek podajanja enote s sledljivostno verigo od primarne realizacije do uporabnika) (slika 2).

*Definicije enot SI sistema morajo biti neodvisne od tehnološkega napredka in se ne smejo spreminjati zaradi novih znanstvenih spoznanj.*

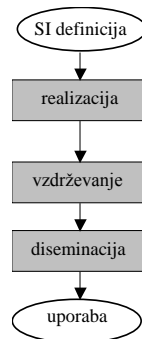
## 1.4 Nove definicije enot SI

Nove definicije enot so postavljene tako, da omogočajo sledeče:

- nobene opazne spremembe v vsakdanjem življenju ljudi,
- vse meritve, narejene s prejšnjimi definicijami, ostanejo veljavne znotraj svojih merilnih negotovosti,
- velikosti kilograma, ampera, kelvina in mola se ne spremenijo.

Pravzaprav bodo nove definicije vplivale na redkokateri del družbe, večinoma le na aktivnosti nacionalnih meroslovnih laboratorijev [3].

SI sistem je bil po 1960, ko je bil sprejet, dopolnjen nekajkrat. Prvič pa se bo zgodilo, da bodo na novo definirani kar štiri od sedmih osnovnih enot. Prvič po letu 1971, ko je bila med osnovne enote SI sistema vključena enota za množino snovi mol, bodo na Mednarodni dan meroslovja 20. maja 2019 začele veljati nove definicije osnovnih enot.



Slika 3. Osnovne operacije metrologije.

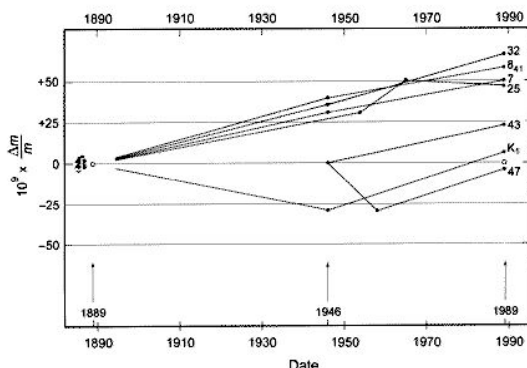
## 1.5 CODATA 2017

CODATA (The Committee on Data for Science and Technology) je mednarodna organizacija, ki bdi nad dostopnostjo in uporabnostjo znanstvenih podatkov. CODATA oz njeno delovno telo Fundamental Constants periodično objavlja mednarodna priporočila za vrednosti osnovnih konstant in faktorjev v fiziki in kemiji.

CGPM je povabila CODATA, da določi Planckovo konstanto  $h$ , osnovni naboj elektrona  $e$ , Boltzmannovo konstanto  $k$  in Avogardovo število  $N_A$ , in to vsako s tolikšnim številom decimalk, ki bi zagotovilo konsistentnost med trenutnim in revidiranim sistemom SI [4]

## 1.6 Nova definicija kilograma

6 delovnih kopij mednarodnega prototipa kilograma (IPK) je bilo do sedaj le trikrat primerjano z IPK (leta 1889, 1946 in 1989). Pri tem je bilo ugotovljeno, da masa IPK v stotih letih povprečno raste za okoli 0.5  $\mu\text{g}/\text{leto}$  [6].



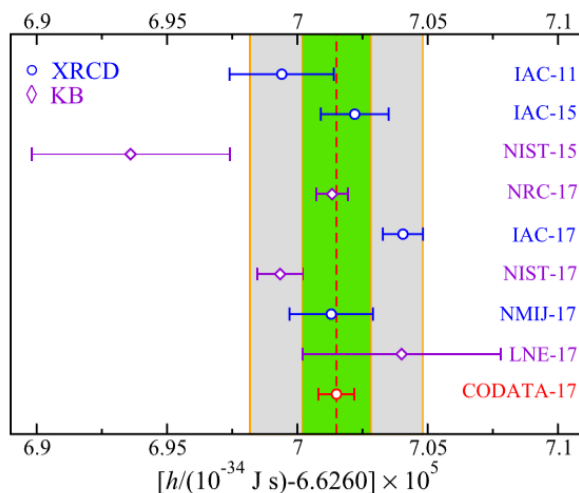
Slika 4. Šest delovnih kopij prakilograma je bilo do sedaj le trikrat primerjano z IPK (leta 1889, 1946 in 1989). Pri tem je bilo ugotovljeno, da masa IPK v stotih letih povprečno raste za okoli 0.5  $\mu\text{g}/\text{leto}$  [6].

Da je nova enota vključena v sistem enot, potrebuje vrsto dokazov. Pri zamenjavi enote za maso so se v CGPM dogovorili, da so potrebni vsaj trije neodvisni poskusi z različnimi metodami, ki bodo dosegali relativno negotovost realizacija pod  $5 \cdot 10^{-8}$ , pri čemer bo vsaj en poskus dosegel negotovosti pod  $2 \cdot 10^{-8}$  [2]. Dva osnovna principa realizacije kilograma sta Kibblova tehtnica (pred 2016 imenovana tudi vatna tehtnica), ki vključuje povezavo elektromagnetnega in mehanskega vata, in Avogadrov projekt, ki s pomočjo silicijeve krogle in Avogadrovega števila določa maso. Definirane točnosti realizacij so dosegli do leta 2011, ko je skupina International Avogadro Coordination (IAC) dosegla negotovost Avogadrovega števila  $3 \cdot 10^{-8}$ , hkrati pa je ameriški inštitut NIST objavil svoj dosežek  $3,6 \cdot 10^{-8}$ . Leta 2012 je EURAMET projekt omogočil navezavo projektov Kibblove tehtnice in silikonske krogle na vrednosti pod  $2 \cdot 10^{-8}$ .



Slika 5. Osnova Avogardovega projekta je krogle, ki jo izrežejo iz silicijevega monokristala (na sliki levo).

S pomočjo izsledkov teh poskusov bo opravljena kalibracija prakilograma in določitev njegove negotovosti. V praksi se ne bo nič spremenilo, iz definicije pa bo odstranjen fizični artefakt (prakilogram), kar bo omogočilo dolgoročno stabilnost definicije enote za maso (Tabela 1).



Slika 6. Določanje Planckove konstante v različnih študijah – zeleni pas predstavlja  $\pm 20$  delov v  $10^9$  in sivi interval  $\pm 50$  delov v  $10^9$ . KB = Kibblova tehtnica (vatna tehtnica), XRCO: x-ray-crystal-density projekt (silikonska krogle). Z rdečo je označena končna CODATA 2017 vrednost Planckove konstante [4].

Tabela 1. CODATA 2017 prilagojene vrednosti fizikalnih konstant [4].

konstanta	vrednost	Relativna standardna negotovost
$h$	$6,626070150(69) \times 10^{-34} \text{ Js}$	$1,0 \times 10^{-8}$
$e$	$1,6021766341(83) \times 10^{-19} \text{ C}$	$5,2 \times 10^{-9}$
$k$	$1,38064903(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	$3,7 \times 10^{-7}$
$N_A$	$6,022140758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$1,0 \times 10^{-8}$

Tabela 2. CODATA 2017 vrednosti fizikalnih konstant za revidirani SI sistem enot [4].

konstanta	vrednost	Relativna standardna negotovost
$h$	$6,62607015 \times 10^{-34} \text{ Js}$	0
$e$	$1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$	0
$k$	$1,380649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	0
$N_A$	$6,02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	0

Za zagotavljanje kontinuitete novega kilograma, so se odločili, da morajo različni novi postopki pripeljati do istih vrednosti prakilograma IPK.

$$Q = \frac{h}{m(\text{IPK})} = \frac{m(^{28}\text{Si})}{m(\text{IPK})} \quad (1)$$

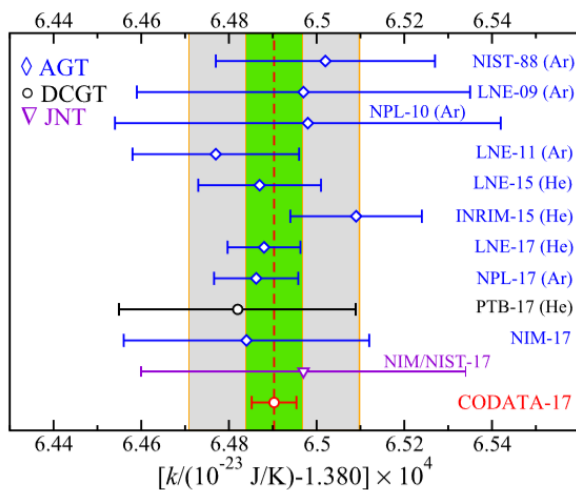
Veličina  $Q$  je razmerje, ki je odvisno od mase IPK in od konstante, ki jo dobimo z novim postopkom. V enačbi (1) tako nastopata Planckova konstanta  $h$ , ki je osnova Kibblovega poskusa, in Avogadrovo število  $N_A$  oziroma masa silicijevih atomov  $m(^{28}\text{Si})$ . Relativna negotovost, s katero je razmerje  $Q$  določeno, je  $u(Q)$

Tabela 3. Razmere pred in po redefiniciji kilograma [5]

Tik pred redefinicijo	Takoj po redefiniciji
Masa prakilograma $m(\text{IPK}) = 1 \text{ kg}$	Masa prakilograma $m(\text{IPK}) = 1 \text{ kg}$
Relativna negotovost $u(\text{IPK}) = 0$	Relativna negotovost $u(\text{IPK}) = u(Q)$
Relativna negotovost Planckove konstante $u(h) = u(Q)$	Relativna negotovost Planckove konstante $u(h) = 0$

### 1.7 Nova definicija kelvina

V primeru redefinicije kelvina je bilo določeno, da sta potrebna vsaj dva fundamentalno različna pristopa k merjenju Boltzmannove konstante (npr. akustična plinska termometrija ali plinska termometrija z dielektrično konstanto, termometrija z Johnsonovim šumom, Dopplerjeva termometrija, itd), ki dasta enake rezultate in sta točnejša od  $10^{-6}$ . V praksi se bo nova definicija poznala samo v merjenjih pod 20 K in nad 1300 K) [5].



Slika 7. Določanje Boltzmannove konstante v različnih študijah – zeleni pas predstavlja  $\pm 5$  delov v 107 in sivi interval  $\pm 15$  delov v 107. AGT = akustična plinska termometrija, DCGT = plinska termometrija z dielektrično konstanto, JNT = termometrija z Johnsonovim šumom. Z rdečo je označena končna CODATA 2017 vrednost Boltzmannove konstante [4].

## 2 Zaključek

Mednarodni sistem enot SI se počasi razvija iz sistema, ki je baziral na fizičnih artefaktih, v sistem, ki temelji na vrednostih osnovnih fizikalnih konstant in nespremenljivih lastnostih atomov. Stari SI sistem je po tretjem ovrednotenju nacionalnih kilogramov (slika 4) pokazal svoje omejitve, saj je masa definirana na podlagi artefakta. Zato je v zadnjih 30 letih znanost iskala možnosti za nadomeščanje mednarodnega prototipa kilograma (IPK).

Pred redefinicijo SI sistema enot so bile sledeče veličine eksaktno definirane: mednarodni prototip kilograma  $m(\text{IPK}) = 1 \text{ kg}$ , magnetna permeabilnost vakuumu  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ , trojna točka vode  $T_{\text{TPW}} = 273,16 \text{ K}$  in molska masa ogljika C 12  $M(^{12}\text{C}) = 0,012 \text{ kg/mol}$ . V redefiniranem sistemu enot so te veličine določene eksperimentalno in so opremljene z negotovostmi. Pri tem je število decimalk za eksaktno numerično vrednost  $h$ ,  $e$ ,  $k$  in  $N_A$  določeno tako, da so numerične vrednosti ostanejo konsistentne s prejšnjimi eksaktnimi vrednostmi  $m(\text{IPK})$ ,  $\mu_0$  in  $M(^{12}\text{C})$  znotraj negotovosti določene s CODATA 2017. V skladu s tem, je bilo število decimalk za  $k$  izbrano tako, da je  $T_{\text{TPW}}$  enaka 273,16 K znotraj standardne negotovosti, s katero  $T_{\text{TPW}}$  lahko v praksi tudi realiziramo.

Določitev  $h$  v novem SI sistemu bo nadgradila tudi električno metrologijo, saj bo električni tok, trenutno definiran kot  $I = e f$ , odslej definiran preko Ohmovega zakona kot razmerje napetosti Josephsonove napetosti in upornosti kvantnega Hall efekta.

## Literatura

- [1] J. Drnovšek, J. Bojkovski, G. Geršak, I. Pušnik, D. Hudoklin, Metrologija, Fakulteta za elektrotehniko, 2012
- [2] Draft Resolution A – 26th meeting of the CGPM (13-16 November 2018), <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CGPM/Draft-Resolution-A-EN.pdf>
- [3] Information for users on the proposed redefinition of the SI, [https://www.bipm.org/cc/CCTF/Allowed/Revised\\_SI/CommonStatement\\_FinalVersion\\_June2017.pdf](https://www.bipm.org/cc/CCTF/Allowed/Revised_SI/CommonStatement_FinalVersion_June2017.pdf)
- [4] D B Newell et al, The CODATA 2017 values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$  for the revision of the SI, Metrologia 55, L13–L16, 2018
- [5] M. Kühne, Redefinition of the SI, ITS 9, Los Angeles, 2012
- [6] B. Jeckelmann, W. Beer, Hat das Urkilogramm ausgedient?, <ftp://www.metas.ch/pdf/Labors/research/wattwage.pdf>