

Revizija međunarodnoga sustava jedinica – nove definicije osnovnih mjernih jedinica

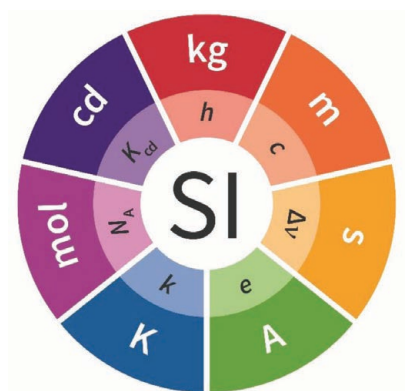
Mirko VUKOVIĆ, dipl. ing. el.

Opća konferencija za utege i mjere (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) donijela je na svojem 26. sastanku 16. studenoga 2018. godine odluku o najvažnijoj reviziji međunarodnoga sustava jedinica (Système international d'unités, SI) od njegova uspostavljanja 1960. godine.

Glavni je razlog najnovije revizije međunarodnoga sustava jedinica bila želja da se redefinira postojeći međunarodni sustav jedinica (kilogram, amper, kelvin i mol) kako bi se sve mjerne jedinice temeljile na nepromjenjivim prirodnim stalnicama, što omogućuje današnje stanje znanosti i tehnike. Tako je kilogram definiran s pomoću Planckove stalnice (h), amper s pomoću elementarnoga električnog naboja (e), kelvin s pomoću Boltzmannove stalnice (k) i mol s pomoću Avogadrove stalnice (N_A).

Premda se iznos tih jedinica ne mijenja, s tako preinačenim sustavom koji je u potpunosti definiran s pomoću temeljnih prirodnih stalnica osigurana je potpuna stabilnost cijeloga SI-ja. Ideja povezivanja mjernih jedinica s nepromjenjivim svojstvima prirodnih objekata i pojava stara je nekoliko stoljeća, a prvi su je pokušali ostvariti tvoreci metričkoga sustava (što je bio prvi korak u razvoju suvremenoga međunarodnog sustava jedinica) već prije 230 godina u doba Francuske revolucije u skladu sa znanstvenim i tehničkim mogućnostima toga doba.

Neku fizičku veličinu možemo definirati ili mjeriti samo usporedbom s drugom veličinom iste vrste i pokazivanjem njihova odnosa. Stoga je za određivanje ili mjerenje veličina bilo koje vrste¹ potrebno najprije na prikladan način odabrati neku poznatu veličinu te iste vrste koja se naziva jedinicom i način za njezino fizičko ostvarenje koje se naziva etalonom. Potom se određuje u kojemu je odnosu dana veličina s tom jedinicom, što se uvijek izražava brojem jer broj nije ništa drugo nego iskazivanje odnosa jedne veličine s drugom veličinom koja je odabrana za jedinicu. Dakle, mjerenje fizičkih veličina moguće je samo u tome slučaju ako su za svaku od njih definirane odgovaraju-



¹ Pod **vrstom veličine** razumijeva se „aspekt zajednički za međusobno usporedive veličine“ (JCGM 200, 1.2). Na primjer, veličine, kao što su promjer, opseg i valna duljina, općenito se smatraju veličinama iste vrste, tj. vrstom veličine koja se naziva duljinom, dok se veličine, kao što su toplina, kinetička energija i potencijalna energija, općenito smatraju veličinama iste vrste, tj. vrstom veličine koja se naziva energija. Veličine iste vrste u danome sustavu veličina imaju istu dimenziju. Međutim veličine iste dimenzije nisu nužno iste vrste. Na primjer veličine moment sile i energija dogovorno se ne smatraju veličinama iste vrste premda imaju istu dimenziju. Slično vrijedi i za toplinski kapacitet i entropiju, broj entiteta te relativnu permeabilnost i udio mase.

će jedinice i načini njihova ostvarenja. Ta je načela već formulirao veliki matematičar i fizičar Leonhard Euler² u svojem djelu *Vollständige Anleitung zur Algebra (Potpuno upute iz algebre)*³. Tako Euler ističe da „...nijednu veličinu nije moguće mjeriti ili odrediti na drugi način nego tako da se uzme neka druga veličina iste vrste i pokaže njihov međusobni odnos.“ Na primjer „... ako moramo odrediti težinu, trebamo uzeti određenu poznatu težinu te pokazati koliko je puta ta težina sadržana u onoj koju nastojimo utvrditi. Ako želimo mjeriti neku duljinu ili širinu, trebamo uzeti neku poznatu duljinu, na primjer stopu. Mjerenje ili određivanje bilo koje veličine nije, dakle, moguće provoditi na drugi način nego tako da se uzme neka druga veličina iste vrste te da se pokaže njihov međusobni odnos. „Tako se određivanje ili mjerenje veličine iste vrste svodi na ovo: fiksiramo po želji bilo koju poznatu veličinu iste vrste kao ona koju trebamo određivati te je smatramo mjerom ili jedinicom; tada odredimo omjer promatrane veličine i njezine poznate mjere. Taj se omjer uvijek izražava brojevima; tako da broj nije ništa drugo nego omjer dviju veličina od kojih je jedna uzeta kao jedinica.“

Slično je u svojem čuvenom djelu *A treatise on electricity and magnetism (Rasprava o elektricitetu i magnetizmu)*⁴ u uvodnome poglavlju *O mjerenju veličina* napisao i James Clerk Maxwell⁵ da se „svaki izraz za neku veličinu sastoji od dvaju faktora ili sastavnica. Jedna od njih je naziv neke poznate veličine istoga tipa kao i veličina koju izražavamo. Ona se odabire kao etalon ili referencija. Kao druga sastavnica služi broj koji pokazuje koliko puta treba uzeti etalon da bi se dobila tražena veličina. Etalonska veličina (veličina koju predstavlja etalon) naziva se u tehničarstvu jedinicom, a odgovarajući broj brojčanom vrijednošću dane veličine“.

Navedene definicije Eulera i Maxwella u biti odgovaraju definicijama mjernih jedinica iz suvremenih normativnih dokumenata. Tako se u najnovijemu 3. izdanju *Međunarodnoga mjeriteljskog rječnika* (VIM) mjerna jedinica definira kao „realna skalarna veličina, definirana i prihvaćena dogovorom, s kojom se uspoređuju druge veličine iste vrste kako bi se izrazio omjer tih dviju veličina kao broj“ (JCGM 200, 1.9).

Slijedom rečenoga kažemo da smo odredili (izmjerili) vrijednost veličine Q ako nam je poznato koliko je puta u vrijed-

nosti te veličine sadržana odgovarajuća mjerna jedinica. To je zapravo brojčana vrijednost⁶ veličine Q , koja se dogovorno označuje s $\{Q\}$. Jedinica veličine Q simbolički se označuje s $[Q]$. Primjenom tih oznaka možemo pisati:

$$[Q] = Q/\{Q\}.$$

Brojčana je vrijednost jednostavno broj koji ne daje nikakve druge informacije. Prethodni se odnos može također napisati u obliku:

$$Q = \{Q\}[Q].$$

Pri navođenju vrijednosti veličine Q potrebno je navesti njezinu odgovarajuću jedinicu.

Vrijednost veličine Q (koja je jednaka brojčanoj vrijednosti pomnoženoj s jedinicom) ne mijenja se s promjenom jedinice. Dakle, ako se neka veličina Q mjeri jedinicom $[Q_1]$, tada je njezina brojčana vrijednost jednaka $\{Q_1\}$, a ako se mjeri jedinicom $[Q_2]$, tada je njezina brojčana vrijednost jednaka $\{Q_2\}$.

Kako je vrijednost veličine Q (koja je jednaka umnošku brojčane vrijednosti i jedinice) nepromjenjiva, može se pisati:

$$Q = \{Q_1\}[Q_1] = \{Q_2\}[Q_2] = \dots$$

Taj se izraz može drukčije napisati u obliku:

$$\{Q_1\}/\{Q_2\} = [Q_2]/[Q_1] = \dots$$

Ako se za mjerenje neke veličine Q upotrijebi jedinica $[Q_2]$ koja je određeni broj puta veća od jedinice $[Q_1]$, tada je odgovarajuća brojčana vrijednost $\{Q\}$ toliko puta manja od brojčane vrijednosti $\{Q_2\}$.

Veličine iste vrste koje imaju istu dimenziju možemo zbrajati i oduzimati, što omogućuje njihovo uspoređivanje. *Zbroj* ili *razlika* dviju veličina iste vrste pripadaju istoj vrsti veličina.

Pod vrijednošću veličine razumijeva se „broj i referencija (temelj za usporedbu) koji zajedno izražavaju vrijednost veličine“ (JCGM 200, 1.19). U skladu s tipom referencije vrijednost veličine iskazuje se umnoškom broja (koji može biti i kompleksan broj, na primjer u iskazivanju vrijednosti električnih veličina) i mjerne jedinice (pri čemu se za veličine dimenzije jedan mjerna jedinica *jedan* općenito ne prikazuje) ili brojem i uputnicom na mjerni postupak ili brojem i referentnom tvari. Kad je riječ o vektorskim ili tenzorskim veličinama svaka sastavnica ima vrijednost veličine. Primjer su sastavnice F_x, F_y, F_z sile \mathbf{F} u kartezijjskome koordinatnom sustavu.

Odgovarajući broj koji ulazi u vrijednost fizičke veličine naziva se brojčanom vrijednošću. Za veličine koje imaju mjernu jedinicu (tj. one koje su različite od rednih veličina⁷) brojčana

² Leonhard Euler (1707. – 1783.), švicarski, njemački i ruski matematičar, fizičar i astronom koji je dao iznimni doprinos razvoju tih znanosti. Autor je više od 850 radova iz matematičke analize, diferencijalne geometrije, teorije brojeva, teorije aproksimacija, nebeske mehanike, matematičke fizike, hidrodinamike, optike, astronomije i drugih područja. Bio je član peterburške, berlinske, torinske, pariške, bazelske i lisabonske akademije znanosti. Uveo je velik dio suvremenoga matematičkog nazivlja, posebno u matematičku analizu, kao što je pojam funkcije i oznaku $f(x)$ za uobičajeni zapis funkcije, uveo je oznaku za drugi korijen iz -1 , slovo e za zapis poznatoga Eulerova broja, oznaku Σ za zbroj, oznake Δ (za razliku), \sin , \cos i mnoge druge. Bio je najistaknutiji matematičar 18. stoljeća. Veći dio života proveo je u Rusiji i Berlinu. Njegovo ime nose mnogi matematički pojmovi.

³ Citirano prema engleskome prijevodu Eulerova djela *Vollständige Anleitung zur Algebra*, koje je pod naslovom *Elements of Algebra*, izdao L., Longman, Hurst, Rees, Orme and Co., London 1822.

⁴ Citirano prema izdanju Clarendon Press iz 1873. godine.

⁵ James Clerk Maxwell (1831. – 1879.), škotski fizičar i matematičar, jedan od najvećih znanstvenika u povijesti čovječanstva. Njegovo je najpoznatije otkriće formulacija klasične teorije elektromagnetskoga polja, čime je povezo elektricitet, magnetizam i svjetlost kao različite manifestacije iste pojave. Maxwellove jednadžbe elektromagnetizma nazvane su „drugom velikom unifikacijom u fizici“ nakon prve, koju je ostvario I. Newton. Jedan je od utemeljitelja kinetičke teorije plinova. Bavio se i teorijom stabilnosti kretanja.

⁶ Pod brojčanom vrijednošću (veličine) razumijeva se „broj u izrazu vrijednosti veličine različit od broja koji služi kao referencija“ (JCGM 200, 1.20). Za veličine dimenzije jedan referencija je mjerna jedinica koja je broj i ne smatra se dijelom brojčane vrijednosti veličine. Za veličine koje imaju mjernu jedinicu (tj. one koje su različite od rednih veličina) brojčana se vrijednost $\{Q\}$ veličine Q često označuje kao $\{Q\} = Q/[Q]$, pri čemu $[Q]$ označuje mjernu jedinicu.

⁷ Redna se veličina definira kao „veličina definirana dogovorenim mjernim postupkom za koju se može uspostaviti potpun redni odnos prema veličnosti s drugim veličinama iste vrste, ali za koju ne postoje algebarske operacije među tim veličinama“ (JCGM, 1.26). Primjeri su rednih veličina Rockwellova tvrdoća C , oktanski broj za naftna goriva, jakost potresa na Richterovoj ljestvici. Redne veličine mogu ulaziti samo u empirijske odnose i nemaju mjerne jedinice ni dimenziju veličine. Razlike i omjeri rednih veličina nemaju fizički smisao.

se vrijednost $\{Q\}$ veličine Q često označuje kao $\{Q\} = Q/[Q]$, pri čemu $[Q]$ označuje mjernu jedinicu.

Pod sustavom veličina razumijeva se „skup veličina zajedno sa skupom neproturječnih jednačaba koje povezuju te veličine“ (JCGM 200, 1.3). Redne veličine kao što su Rockwelova tvrdoća C obično se ne smatraju dijelom sustava veličina jer su povezane s drugim veličinama samo empirijskim odnosima.

Sustav jedinica razvija se tako da se prvo za manji skup odgovarajućih osnovnih veličina definira tzv. skup osnovnih jedinica te se potom izvedene jedinice definiraju kao umnošci potencija osnovnih jedinica koje odgovaraju odnosima kojima se definiraju izvedene veličine s pomoću osnovnih veličina. U SI-ju postoji sedam osnovnih veličina i sedam osnovnih jedinica. Osnovne su veličine duljina, masa, vrijeme, električna struja, termodinamička temperatura, količina tvari i svjetlosna jakost. Odgovarajuće osnovne jedinice redom su metar, kilogram, sekunda, amper, kelvin, mol i kandela. Definicije tih osnovnih jedinica i njihovo praktično ostvarenje ključni su element SI-ja, a za njih su odgovorni savjetodavni odbori Međunarodnoga odbora za utege i mjere, o čemu će biti riječi u nastavku.

Kako se osnovne jedinice mogu odabrati navoljno, za jedan te isti sustav veličina moguće je odabrati nekoliko sustava jedinica. Tako su, na primjer, na temelju sustava koji se temelji na duljini, masi i vremenu, konstruirana četiri sustava jedinica: MKS (s osnovnim jedinicama metar, kilogram, sekunda), CGS (s osnovnim jedinicama: centimetar, gram, sekunda), MTS (s osnovnim jedinicama: metar, tona, sekunda) i britanski sustav (s osnovnim jedinicama: stopa, funta, sekunda).

Dimenzije izvedenih fizičkih veličina

Izvedene veličine, kao što je prethodno rečeno, možemo izraziti s pomoću osnovnih veličina. Za to je nužno uvesti dva pojma: dimenziju izvedene veličine i definicijsku jednadžbu.

Pod dimenzijom veličine razumijeva se „izraz ovisnosti koje veličine o osnovnim veličinama kojega sustava veličina“ (JCGM 200, 1.7). On se izražava kao umnožak potencija faktora koji odgovaraju osnovnim veličinama, pri čemu se izostavlja bilo koji brojčani faktor. Dimenzija osnovne veličine dogovorno se simbolički prikazuje jednim velikim uspravnim slovom neserifnoga tipa. Dogovorni simbolički prikaz dimenzije izvedene veličine u skladu s definicijom izvedene veličine jednak je umnošku potencija dimenzija osnovnih veličina. Dimenzija veličine Q označuje se s $\dim Q$. Pri izvođenju dimenzije veličine ne uzimaju se u obzir brojčani faktor ni njezin skalarni, vektorski ili tenzorski karakter. Tako se, na primjer, u međunarodnome sustavu veličina⁸ dimenzija sile označuje kao $\dim F = \text{LMT}^{-2}$, dimenzija masene gustoće (obujamske mase) ρ označuje se $\dim \rho = \text{ML}^{-3}$ itd.

U danome sustavu veličina veličine iste vrste imaju istu di-

menziju, a veličine različitih dimenzija uvijek su različite vrste. Međutim, veličine koje imaju istu dimenziju nisu nužno veličine iste vrste.

Definicijskom jednadžbom izvedene veličine naziva se formula s pomoću koje se mjerena (fizička) veličina može eksplicitno izraziti s pomoću drugih veličina sustava. Pri tome brojčani faktor u danoj formuli mora biti jednak jedinici. U međunarodnome sustavu veličina dimenzije osnovnih veličina prikazuju se sljedećim znakovima (slovima neserifnoga tipa): duljina (L), masa (M), vrijeme (T), električna struja (I), termodinamička temperatura (Θ), količina tvari (N), svjetlosna jakost (J). Tako je dimenzija neke veličine Q označuje se s $\dim Q = \text{L}^{\alpha}\text{M}^{\beta}\text{T}^{\gamma}\text{I}^{\delta}\Theta^{\epsilon}\text{N}^{\zeta}\text{J}^{\eta}$, pri čemu su eksponenti koji se nazivaju dimenzijskim eksponentima⁹ (mali) cijeli brojevi¹⁰.

Razumije se da dimenzije jedne te iste veličine u različitim sustavima mogu biti različite. Posebno nedimenzijska veličina u jednome sustavu može biti dimenzijska, a u drugome ne. Na primjer, apsolutna dielektrična permitivnost u elektrostatičkome sustavu LMT nedimenzijska je veličina, a u elektromagnetskome sustavu LMT njezina je dimenzija jednaka L^{-2}T^2 , a u sustavu veličina LMTI ima dimenziju $\text{L}^{-3}\text{M}^{-1}\text{T}^4\text{I}^2$.

Ti primjeri pokazuju da dimenzija nije nešto apsolutno. Pojam dimenzije relativan je pojam vezan uz koji sustav veličina te zbog toga o određenim dimenzijama fizičkih veličina možemo govoriti samo u okviru toga sustava.

Treba napomenuti da su već od prvih početaka mjerenja u drevnim civilizacijama vlasti koje su vodile brigu o mjerama i utezima nastojale osigurati što veću postojanost ostvarenja tih jedinica i njihovu neosjetljivost na djelovanje uvjeta okoliša. Tako su stari Egipćani svoju jedinicu duljine, tzv. *kraljevski lakat*, koji je bio definiran kao duljina podlaktice od lakta do vrha ispruženoga srednjaka vladajućega faraona uvećana za širinu njegove šake, za praktičnu uporabu prenosili na etalon od crnoga granita koji je bio jedan od dimenzijski najstabilnijih prirodnih materijala, čime se osiguravala zadovoljavajuća nepromjenjivost te jedinice¹¹. Taj je primarni etalon čuvao posebni *nadzornik kraljevskoga lakta*. Na faraonskim gradilištima odgovorni graditelji morali su redovito umjeravati svoja radna mjerila, koja su bila izrađena kao drveni štapovi, u odnosu na granitni etalon koji je prikazivao tu jedinicu. Takvim su strogim nadzorom nad mjerilima stari Egipćani postizali

⁹ Neki dimenzijski eksponenti mogu biti jednaki nuli. Takav zapis dimenzije brzine i momenta inercije u sustavu LMT ima oblik: $\dim v = \text{LT}^{-1} = \text{LM}^0\text{T}^{-1}$, $\dim J = \text{L}^2\text{T}^{-1} = \text{L}^2\text{MT}^0$, dobivamo da je eksponent dimenzije β u izrazu za dimenziju brzine jednak nuli, a u izrazu za dimenziju momenta inercije eksponent γ .

Može se dogoditi da su svi eksponenti dimenzije jednaki nuli. Takva se veličina naziva veličinom dimenzije jedan (ili nedimenzijskom veličinom). Za veličinu se kaže da je dimenzijska (ima dimenziju) ako u njezinoj dimenziji barem jedna od osnovnih veličina ima potenciju različitu od nule.

Pod veličinom dimenzije jedan (ili nedimenzijskom veličinom) razumijeva se „veličina za koju su svi eksponenti faktora koji odgovaraju osnovnim veličinama u njezinoj dimenziji jednaki nuli“ (JCGM 200, 1.8). Neke veličine dimenzije jedan definiraju se kao omjeri dviju veličina iste vrste. Primjeri su ravninski kut, prostorni kut, indeks loma, relativna permeabilnost, maseni udio, faktor trenja ili Machov broj.

¹⁰ U napuštenome starom elektrostatičkom i elektromagnetskom sustavu dimenzijski su eksponenti mogli biti i razlomci.

¹¹ Slično je i *dubrovački lakat*, etalon duljine Dubrovačke Republike, koji je bio definiran kao duljina lakta na kipu viteza Orlanda i bio urezan u kameno postolje Orlandova stupa.

⁸ Pod međunarodnim sustavom veličina (engl.: International System of Quantities, ISQ) razumijeva se sustav veličina koji se temelji na sedam osnovnih veličina: duljini, masi, vremenu, električnoj struji, termodinamičkoj temperaturi, količini tvari i svjetlosnoj jakosti. (JCGM 200, 1.6)

veoma visoku točnost pri mjerenju duljina i kutova, bez čega ne bi mogli izvoditi svoje impresivne građevine.

S napretkom gospodarstva, trgovine, znanosti i tehnike povećavala se i potreba za sve većom točnošću mjerenja. Razvoj međunarodne trgovinske i gospodarske suradnje prirodno je doveo do potrebe za stvaranjem jedinstvenoga stabilnog sustava mjernih jedinica na međunarodnoj razini.

Kako bi se osigurala stabilnost, obnovljivost i jednostavnost fizičkoga ostvarenja sustava jedinica, mjerne bi jedinice trebalo biti moguće lako ostvariti jednostavnim fizičkim pokusima, odnosno uzeti iz prirodnoga okoliša te tako lako obnoviti svugdje u svijetu. Takve se definicije i ostvarenja mjernih jedinica s pomoću prirodnih pojava nazivaju *prirodnim etalonima*. Naravno, u svakodnevnoj bi se praksi kao radni etaloni upotrebljavale odgovarajuće ruketvorine na koje su bile prenesene vrijednosti s takvih prirodnih stalnica s odgovarajućom točnošću. Treba napomenuti da su se već od prvih početaka mjerenja vremena jedinice dan, mjesec i godina temeljile na stabilnim prirodnim pojavama kao što je vrtnja Zemlje oko vlastite osi i oko Sunca.

Tako su već u 17. stoljeću neki znanstvenici (Gabriel Mouton¹², Christiaan Huygens¹³, John Wilkins¹⁴) predlagali stvaranje sustava jedinica u kojemu bi se definicije jedinica temeljile na određenome univerzalnom prirodnom svojstvu kao što je na primjer duljina sekundnoga njihala za jedinicu duljine.

Prvi ozbiljan korak u stvaranju takvoga sustava učinjen je u Francuskoj u doba Francuske revolucije (vidi [7]) kad su postavljeni temelji za *metrički sustav jedinica*. Tvorci metričkoga sustava shvatili su da bi se poželjna definicija jedinica dviju osnovnih mehaničkih veličina duljine i mase (težine) trebala temeljiti na univerzalnome prirodnom svojstvu kao što je neka veoma stabilna prirodna veličina koja je u to vrijeme bila poznata i dostupna mjerenju. Takva bi definicija bila neovisna o vremenu i mjestu te bi načelno bila dostupna svugdje u svijetu. Naravno, zbog ograničenih mogućnosti znanosti i tehnike toga doba to ipak nisu mogle biti univerzalne fizičke stalnice u današnjemu smislu te riječi nego je za jedinicu duljine odabran dio Zemljina meridijana, a za jedinicu mase (težine) masa jednoga kubičnoga decimetra vode pri tempera-

turi na kojoj ona ima najveću gustoću (4 °C), dok je jedinica vremena sekunda bila vezana uz brzinu vrtnje Zemlje. Nakon provedenih mjerenja duljine meridijanskoga luka i gustoće vode za definiranje tih jedinica iz praktičnih su razloga izrađene jednostavnije, ruketvorinske (tvarne) definicije za metar i kilogram, a sekunda je ostala povezana s vrtnjom Zemlje.

Iako se njegovo prihvaćanje odvijalo sporo, čak i u Francuskoj, u kojoj je nastao, taj su sustav između 1840. i 1870. godine prihvatile mnoge razvijene države. Vrhunac toga razvoja bilo je potpisivanje međunarodnoga ugovora, tzv. *Konvencije o metru* 20. svibnja 1875. godine. Tom je konvencijom uspostavljena odgovarajuća organizacija za provedbu međunarodnih djelatnosti koje se odnose na ujednačivanje sustava jedinica. Njezino je vrhovno tijelo Opća konferencija za utege i mjere (Conférence générale des poids et mesures, CGPM), međuvladina konferencija koju čine delegati svih država potpisnica *Konvencije o metru* koja se trenutačno sastaje svake četiri godine. CGPM donosi sve najvažnije odluke koje se odnose na međunarodni sustav jedinica (SI) te sve ključne odluke koje se odnose na financije, organizaciju i razvoj BIPM-a.

Za pripremu i provedbu odluka CGPM-a osnovan je Međunarodni odbor za utege i mjere (Comité international des poids et mesures, CIPM), koji je sastavljen od osamnaest izabranih znanstvenika od kojih je svaki iz druge države potpisnice *Konvencije*, a pomažu mu odgovarajući savjetodavni odbori¹⁵, među kojima je i Savjetodavni odbor za jedinice (Comité consultatif des unités, CCU)¹⁶.

Pod nadzorom CIPM-a djeluje i Međunarodni ured za utege i mjere (Bureau international des poids et mesures, BIPM) kao trajni laboratorij i svjetsko središte znanstvenoga mjeriteljstva čije djelatnosti uključuju uspostavljanje osnovnih etalona i ljestvica glavnih fizičkih veličina te održavanje međunarodnih pramjera.

Ostvarenja mjernih jedinica imaju ključnu važnost za funkcioniranje svjetskoga mjeriteljskog sustava. Stoga u okviru *Konvencije o metru* na međunarodnoj razini BIPM, CIPM i CCU trajno vode brigu o njegovu poboljšavanju. Službene definicije svih jedinica SI-ja odobrava Opća konferencija za utege i mjere. Stalno poboljšavanje SI-ja nužno je kako bi se pratio razvoj znanosti te omogućilo uvođenje naprednijih mjernih metoda.

Tako se nakon potpisivanja *Konvencije o metru* metrički sustav neprekidno razvijao i poboljšavalo, a s razvojem novih znanstvenih i tehničkih područja uvodile su se i nove jedinice za opis novih pojava iz područja fizike (elektriciteta, magnetizma, termodinamike i kemije).

Nove se definicije jedinica u pravilu uvode kad je na temelju znanstvenoga napretka moguće postići veće točnosti definiranja jedinica i njihova prenošenja na etalone i mjerila. Poseb-

¹² **Gabriel Mouton** (1618. – 1694.), francuski opat i znanstvenik. Bio je doktor teologije iz Lyona, ali se bavio i matematikom i astronomijom. U svojoj knjizi *Observationes diametrorum solis et lunae apparentium*, koja je objavljena 1670. godine, predložio je prirodni etalon duljine koji bi se temeljio na opsegu Zemlje te imao decimalne višekratnike i nižekratnike. To je imalo utjecaj na prihvaćanje metričkoga sustava 1799. godine.

¹³ **Christiaan Huygens** (1629. – 1695.), nizozemski fizičar, matematičar, astronom i izumitelj. Smatra se jednim od najvećih znanstvenika svih vremena koji je dao izniman doprinos znanstvenoj revoluciji. U fizici je Huygens dao ključne doprinose u optici (Huygensovo načelo) i mehanici, dok je kao astronom poznat po otkriću Saturnovih prstenova i njegova mjeseca Titana. Kao izumitelj poboljšao je konstrukciju teleskopa. Njegov je najslavniji izum, međutim, bio sat s njihalom iz 1656. godine, što je bio preokret u mjerenju vremena. Sat takve konstrukcije gotovo je 300 godina bio najtočnije mjerilo vremena. Budući da je prvi u fizici upotrebljavao matematičke formule, smatra se prvim teorijskim fizičarom i osnivačem teorijske fizike.

¹⁴ **John Wilkins** (1614. – 1672.), anglikanski svećenik i polihistor te jedan od osnivača Kraljevskoga društva. Njegovo je najpoznatije djelo *An Essay towards a Real Character, and a Philosophical Language* (London, 1668) (*Esej o istinskoj simbolici i filozofskom jeziku*), u kojem je predložio decimalni sustav mjera. On je također prvi predložio da se iz jedinice obujma preko gustoće vode (koja je pod određenim fizičkim uvjetima prirodna stalnica) izvede jedinica mase.

¹⁵ Savjetodavni odbori imaju opća pravila (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1963, 31, 97). Oni se ne sastaju u pravilnim vremenskim razmacima. Predsjednika svakoga savjetodavnog odbora, koji je obično član CIPM-a, imenuje CIPM. Članovi su savjetodavnih odbora mjeriteljski laboratoriji i specijalizirani instituti, čiji je popis ustanovio CIPM, koji šalju izaslanike po svojem izboru. Osim toga, oni obuhvaćaju pojedinačne članove koje imenuje CIPM i jednoga predstavnika BIPM-a (Kriteriji za članstvo u savjetodavnim odborima, *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1996, 64, 124). Trenutačno postoji deset takvih odbora.

¹⁶ CCU je osnovan 1964. godine, a zamijenio je Povjerenstvo za sustav jedinica koje je CIPM osnovao 1954. godine.

no je napredak kvantne fizike omogućio definiranje sekunde, metra i praktičnih ostvarenja električnih jedinica korištenjem kvantnih pojava čime su se za ostvarenje tih jedinica postigle razine točnosti koje nisu ograničene samim definicijama nego samo našom tehničkom sposobnošću ostvarenja tih definicija. Tako je je 1960. godine za metar prihvaćena prva nematerijalna definicija, tj. valna duljina specifičanog optičkog zračenja¹⁷.

Danas je znanstveni i tehnološki razvoj omogućio redefiniranje osnovnih jedinica SI-ja i njihovo ostvarenje s pomoću nepromjenjivih temeljnih prirodnih stalnica te je na temelju toga 26. CGPM 16. studenoga 2018. godine donio rezoluciju o preradbi SI-ja koja stupa na snagu 20. svibnja 2019. godine. Datum stupanja na snagu odabran je simbolički jer je na taj dan 1875. godine potpisana *Konvencija o metru*, a od 2005. godine on se obilježava kao Svjetski dan mjeriteljstva.

Tom je rezolucijom CGPM-a uveden novi pristup definiranju jedinica općenito, a posebno sedam osnovnih jedinica fiksiranjem bročanih vrijednosti sedam *definijskih stalnica*¹⁸, tako da se te definicije temelje na našem sadašnjem razumijevanju fizičkih zakona. Time je prvi put formuliran potpun skup definicija kojima se ne upućuje ni na jedan rukotvorinski etalon, materijalna svojstva ili opise mjernih postupaka, čime je omogućeno ostvarenje svih jedinica s točnošću koja je u konačnici ograničena samo kvantnom strukturom prirode i našim tehničkim mogućnostima, ali ne i samim definicijama. Za ostvarenje svake jedinice može se upotrijebiti bilo koja valjana fizička jednadžba koja povezuje definijske stalnice s tom jedinicom, čime se s napretkom tehnike stvaraju mogućnosti za ostvarenja s većanom točnošću. Pritom se posebno vodila briga o tome da se osigura da te definicije budu sukladne s definicijama koje su bile na snazi u vrijeme kad je ta promjena provedena.

Glavni je razlog za provedenu promjenu sustava bila želja da se definicija kilograma, koji je definiran kao masa jednoga predmeta (međunarodne pramjere kilograma) koji se čuva u BIPM-u, zamijeni novom definicijom koja bi se temeljila na nepromjenjivim prirodnim invarijantama. Premda ta pramjera služi svijetu od definiranja kilograma 1889. godine, njezino održavanje i uporaba čine velike poteškoće jer je ona zbog svoje jedinstvenosti postala neizmerno vrijedna te se ne može često upotrebljavati zbog rizika od oštećenja i utjecaja atmosferskih onečišćenja na promjenu njezine mase, a osim toga dostupna je samo u BIPM-u. Nadalje, na temelju rezultata usporedbe velikoga broja nacionalnih etalona mase od platinoiridija, koje su provedene u BIPM-u, ne može se sa sigurnošću tvrditi da je masa međunarodne pramjere vremenski stalna, kako se pretpostavlja u definiciji kilograma¹⁹. Stoga bi bilo bolje imati etalone koji se temelje na temeljnim fizičkim invarijantama koje omogućuju stvaranje većega bro-

ja istovrijednih etalona veće točnosti koje može razviti svaki dostatno mjerodavan laboratorij.

Premda nove definicije mjernih jedinica neće utjecati na svakodnevna mjerenja u trgovini i društvu, prednost novih definicija posebno je važna za istraživanje i primjenu znanosti. Druge su koristi u tome što bi načelno kilogram mogao ostvariti veći broj laboratorija u svijetu. Nadalje, iz njihove bi se definicije mogle izravno ostvariti mnoge druge jedinice SI-ja, čime bi se mogla postići veća točnost. Na primjer, osim stalnih vrijednosti Planckove stalnice, Boltzmannove stalnice i naboja elektrona, nova definicija mola s pomoću točno poznate vrijednosti Avogadrove stalnice znači da druge stalnice kao Faradayeva stalnica, plinska molarna stalnica, Stefan-Boltzmannova stalnica i molarni obujam idealnoga plina postaju točno poznate, što je važno u mnogim područjima fizike i kemije.

Već smo spomenuli da se ostvarenja etalona određenih mjernih jedinica (npr. sekunde, metra, kelvina, ampera i nekih drugih etalona u području elektriciteta) već odavno temelje na uporabi prirodnih stalnica, a ne tvornih rukotvorina. Premda su te definicije zadovoljavale mnoge zahtjeve koji se odnose na univerzalnost i dostupnost, a često su bila moguća i njihova različita ostvarenja, njihova su se praktična ostvarenja povezivala s pokusima koji su izravno ili neizravno povezani s posebnim uvjetima ili stanjima koja su specifičirana u definicijama. To je imalo za posljedicu da točnost ostvarenja takvih definicija nikad nije mogla biti bolja od točnosti ostvarenja posebnih uvjeta ili stanja specifičiranih u tim definicijama²⁰.

Tek je definicijom metra iz 1983. godine otvoren put stvarnoj univerzalnosti. Ta je definicija podrazumijevala, premda to nije bilo eksplicitno riječima iskazano, fiksnu bročanu vrijednost brzine svjetlosti. Međutim, ta je definicija bila iskazana riječima u tradicionalnome obliku i njome se utvrđivalo u biti da je metar udaljenost koju svjetlost prevali u specifičanome vremenu. Na taj je način ona bila odraz drugih definicija osnovnih jedinica SI-ja od kojih je svaka imala isti oblik kao na primjer „amper je struja koja ...“, „kelvin je dio specifičirane temperature“ itd. Takve se definicije nazivaju *eksplicitnim definicijama jedinice*.

U novoj definiciji SI-ja (koju je dao 26. CPGM) koja se temelji na skupu definijskih stalnica, umjesto da se svakom definicijom specifičira uvjet ili stanje kojima se utvrđuje temeljna granica točnosti ostvarenja, može se upotrebljavati svaka prikladna fizička jednadžba koja povezuje koju posebnu stalnicu ili stalnice s veličinom koju želimo mjeriti. To je mnogo općenitiji način definiranja osnovnih mjernih jedinica. On nije ograničen na današnju znanost i tehnologiju jer budući razvoj može dovesti do dosad nepoznatih jednačaba koje mogu imati za posljedicu različite načine ostvarenja jedinica s mnogo većom točnošću. Za tako definiranu jedinicu načelno ne postoji granica točnosti s kojom se jedinica mo-

¹⁷ Već je J. C. Maxwell sredinom 19. stoljeća predlagao da se kao prirodni etalon duljine odabere valna duljina odgovarajućega stabilnog elektromagnetskog zračenja (u to vrijeme natrijeve žute spektralne linije), što je u praksi provedeno tek stoljeće kasnije.

¹⁸ O vrijednostima temeljnih stalnica i faktora pretvorbe na međunarodnoj razini vodi brigu Odbor za podatke za znanost i tehniku (Committee on Data for Science and Technology, CODATA). CODATA izračunava vrijednosti svih temeljnih fizičkih stalnica na temelju najtočnijih dostupnih mjernih rezultata i dosljedno provjerava njihovu konzistentnost.

¹⁹ Prema današnjim procjenama klizenje mase prakilograma odvija se brzinom od 5×10^{-8} u razdoblju od 50 do 100 godina.

²⁰ To je posebno problem kad je riječ o postojećoj definiciji sekunde koja se temelji na mikrovalnome prijelazu cezijeva atoma. Frekvencije optičkih prijelaza različitih atoma ili iona sada su dokazljivo obnovljivije, za određeni red veličine, nego što je definirana frekvencija cezija. Sada je dokazano da su frekvencije optičkih prijelaza različitih atoma ili iona obnovljivije za određeni red veličine nego što je definirana frekvencija cezija.

že ostvariti. Iznimka ostaje definicija sekunde u kojoj izvorni mikrovalni prijelaz cezija zasad ostaje temelj definicije.

Razlika između eksplicitne definicije jedinice i eksplicitne definicije stalnice može se jasno ilustrirati uporabom dviju definicija metra koje se temelje na fiksnoj brojčanoj vrijednosti brzine svjetlosti i dviju definicija kelvina. Definicijom metra iz 1983. godine utvrđeno je u stvari da je „metar udaljenost koju svjetlost prevari u $1/c$ sekunda“. Novom se definicijom jednostavno utvrđuje da se metar definira tako da se uzme da je brojčana vrijednost brzine svjetlosti u vakuumu c fiksirana tako da bude jednaka 299 792 458 kad se ona izražava jedinicom SI-ja za brzinu m/s (metar u sekundi), pri čemu se sekunda definira tako da se uzme stalnica koja definira sekundu, tj. specificirana brojčana vrijednost cezijeve frekvencije $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ neperturbiranoga temeljnog stanja hiperfinoga frekvencijskog prijelaza atoma cezija 133 i fiksirana brojčana vrijednost brzine svjetlosti koja se izražava jedinicom $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Možemo dakle upotrijebiti neku fizičku jednadžbu, uključujući naravno onu koja je prikazana s pomoću prijašnje definicije, ali također i jednostavnu jednadžbu koja povezuje frekvenciju i valnu duljinu s brzinom svjetlosti. Prijašnja definicija kelvina koja se temeljila na fiksnoj brojčanoj vrijednosti za temperaturu trojne točke vode, zahtijevala je u konačnici mjerenje u trojnoj točki vode. Nova definicija koja se temelji na fiksnoj brojčanoj vrijednosti Boltzmannove stalnice mnogo je općenitija stoga što se svaka termodinamička jednadžba u kojoj se pojavljuje stalnica k načelno može upotrebljavati za određivanje termodinamičke temperature u svakoj točki temperaturne ljestvice. Na primjer, termodinamičku temperaturu T možemo izravno odrediti određivanjem ukupne radijacijske egzitancije (odražanosti) crnoga tijela na temperaturi T koja je jednaka $(2\pi^5 k^4 / 15c^2 h^3) T^4$ (u Wm^{-2}).

Kilogram, čija je definicija podvrgnuta najtemeljitoj promjeni, može se ostvariti s pomoću fizičke jednadžbe koja povezuje masu, Planckovu stalnicu, brzinu svjetlosti i cezijevu frekvenciju. Jedna je takva jednadžba ona koja opisuje rad elektromehaničke vage, koja se naziva vatnom vagom, a u novije vrijeme i Kibbleovom²¹ vagom. Tim se uređajem mehanička snaga, koja se mjeri s pomoću mase m , lokalnoga ubrzanja sile teže g i brzine v , može mjeriti s pomoću električne snage koja se mjeri s pomoću električne struje i napona koji se redom mjere s pomoću kvantnoga Hallova i Josephsonova učinka. Tako se dobiva jednadžba $mgv = Ch$, pri čemu je C stalnica umjeravanja koja uključuje mjerene frekvencije, a h je Planckova stalnica.

Za primarno ostvarenje kilograma može se upotrebljavati druga metoda s pomoću određivanja broja atoma u silicij-skoj kugli te s pomoću jednadžbe:

$$m = \frac{8V}{a_0^3} \frac{2R_\infty h m_{\text{Si}}}{c\alpha^2 m_e},$$

pri čemu je m masa, V obujam sfere (s masom od približno 1 kg), a_0 parametar rešetke, R_∞ Rydbergova stalnica, α stalnica fine strukture, m_{Si} masa silicijeva atoma (srednja vrijednost mase triju izotopa koji se upotrebljavaju za kuglu), a m_e masa

elektrona. Prethodna je formula napisana u obliku faktora od triju razlomaka, pri čemu prvi odgovara broju atoma u sferi, drugi masi elektrona, a treći je jednak omjeru mase silicijeva atoma i mase elektrona.

Sve to osigurava izvanrednu ilustraciju općenitosti novoga načina definiranja jedinica. Podrobnije informacije o preporučanim praktičnim ostvarenjima tih novih definicija osnovnih jedinica na najvišoj primarnoj razini mogu se naći na mrežnim BIPM-a u nacrtima tzv. *mise en pratique* (uputama za praktičnu primjenu)²² za definiciju ampera (i drugih električnih jedinica), kilograma, mola i kelvina. *Mise en pratique* priređuju odgovarajući savjetodavni odbori te nakon što ih odobri CIPM objavljuju se u elektroničkome obliku (u dodatku 2 SI brošure) na mrežnim stranicama BIPM-a jer se tako mogu češće jednostavnije posuvremenjivati nego kad bi se objavili u cjelovitome tiskanom izdanju SI brošure (vidi www.bipm.org).

Nove definicije jedinica SI-ja prema 1. rezoluciji 26. CGPM-a

U nastavku ćemo dati prikaz međunarodnoga sustava jedinica s pomoću definicijskih stalnica te nove definicije osnovnih jedinica toga sustava u skladu s 1. rezolucijom 26. CGPM-a od 16. studenoga 2018. godine.

Jedinice SI-ja definirane su skupom formulacija kojima se specificiraju točne brojčane vrijednosti za svaku od sedam referentnih (prirodnih) stalnica kad se te stalnice izražavaju jedinicama SI-ja. Te su *definiციjske stalnice* frekvencija hiperfinoga cijepanja osnovnoga stanja atoma cezija 133 $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$, brzina svjetlosti u vakuumu c , Planckova stalnica h , elementarni naboj e , Boltzmannova stalnica k , Avogadrova stalnica N_A i svjetlosna djelotvornost jednobojnoga zračenja frekvencije 540×10^{12} herca, K_{cd} .

Uporabom navedenih sedam definicijskih stalnica definiranje jedinica stvarno se odvaja od njihova ostvarenja jedinica tako da se za istu definiciju praktična ostvarenja jedinica mogu uspostavljati različitim eksperimentalnim metodama.

Nadalje, tom je promjenom kao i svim prethodnim promjenama međunarodnoga sustava jedinica bilo bitno osigurati njegovu neprekinutost odabirom brojčanih vrijednosti stalnica koje se pojavljuju u definicijama tako da one budu sukladne s prijašnjim definicijama u mjeri u kojoj to omogućuje napredak znanosti.

Tako se u 1. rezoluciji 26. CGPM-a (kojom je definiran novi sustav jedinica) ističe da je ključni zahtjev za međunarodni sustav jedinica (Système international d'unités, SI) da on bude ujednačen i dostupan svugdje u svijetu za potrebe svih oblika ljudske djelatnosti (trgovine, industrije, znanosti te zaštite zdravlja i okoliša). Stoga jedinice SI-ja moraju biti dugoročno

²¹ Bryan Peter Kibble (1938. – 2016.), britanski fizičar i mjeritelj. Razvio je tzv. vatnu vagu, poboljšanu inačice strujne vage, za ostvarenje jedinice mase SI-ja, kilograma, koja je po njemu nazvana Kibbleovom vagom.

²² BIPM definira *mise en pratique* kao skup uputa koje omogućuju ostvarenje koje jedinice u praksi primarnim metodama na najvišoj razini na temelju njezine definicije. Naziv *mise en pratique* za tu vrstu uputa upotrebljava se i u dokumentima BIPM-a na engleskome jeziku.

stabilne, unutrašnje suvisle i praktično ostvarive na temelju postojećega teorijskog opisa prirode na najvišoj razini. Kako bi se zadovoljili ti zahtjevi 24. CGPM (2011.) predložio je reviziju SI-a prema kojoj bi se SI definirao na nov način na temelju skupa od sedam definicijskih stalnica (temeljnih fizičkih stalnica) iz kojih bi se izvele definicije sedam osnovnih jedinica, a 25. CGPM je (2014.) potvrdio da su za takvu reviziju stvoreni uvjeti koje je utvrdio 24. CGPM.

Na temelju toga 26. CGPM donio je rezoluciju na temelju koje 20. svibnja 2019. godine stupa na snagu međunarodni sustav jedinica (SI) u kojemu je:

- neperturbirano temeljno stanje frekvencije hiperfinoga prijelaza cezijeva atoma $133 \Delta\nu_{\text{Cs}}$ jednako $9\,192\,631\,770$ Hz
- brzina svjetlosti u vakuumu c jednaka $299\,792\,458$ m/s
- Planckova stalnica h jednaka $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ Js
- elementarni naboj e jednak $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C
- Boltzmannova stalnica k jednaka $1,380\,649 \times 10^{-23}$ J/K
- Avogadrova stalnica N_A jednaka $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- svjetlosna djelotvornost K_{cd} jednobojnoga zračenja frekvencije 540×10^{12} Hz jednaka 683 lm/W,

pri čemu su herc, džul, kulon, lumen i vat sa znakovima jedinica Hz, J, C, lm i W povezani redom s jedinicama sekundom, metrom, kilogramom, amperom, kelvinom, molom i kandelom sa znakovima jedinica s, m, kg, A, K, mol i cd u skladu s izrazima $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ i $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$. Novi međunarodni sustav jedinica (SI) stupa na snagu 20. svibnja 2019. godine.

Ostvarenja definicija jedinica SI-ja

Vrijednosti tih sedam definicijskih stalnica smatraju se vremenski i prostorno nepromjenjivima. Vrijednost svake od tih sedam stalnica piše se kao umnožak brojčanoga koeficijenta i jedinice u obliku²³:

$$Q = \{Q\}[Q],$$

pri čemu Q označuje vrijednost stalnice, a $\{Q\}$ njezinu brojčanu vrijednost kad se ona izražava jedinicom $[Q]$. Ista vrijednost Q može se izraziti s pomoću različitih brojčanih vrijednosti $\{Q\}$ koje ovise o jedinici $[Q]$ te je katkad za brojčanu vrijednost prikladno upotrebljavati zapis $\{Q\}_{[Q]}$ kako bi se istaknula njezina ovisnost o odabiru jedinice $[Q]$.

Iz toga izraza proizlazi da je odgovarajuća jedinica jednaka $[Q] = Q/\{Q\}$. U nastavku ćemo za svaku od sedam osnovnih jedinica [sekundu (znak s), metar (znak m), kilogram (znak kg), amper (znak A), kelvin (znak K), mol (znak mol) i kandelu (znak cd)] pokazati kako se ta jedinica izvodi iz odgovarajućih definicijskih stalnica.

Pritom se postupa tako da se najprije definira jedinica za koju se neka definicijska stalnica izražava samo s pomoću te

jedinice. To je jedinica sekunda jer je definicijska stalnica $\Delta\nu^{(133\text{Cs})}_{\text{hfs}}$ povezana samo sa sekundom. Potom se definira druga jedinica, u našem slučaju metar, s pomoću prethodno definirane sekunde i druge prirodne stalnice brzine svjetlosti u vakuumu, koja se izražava s pomoću jedinica metar i sekunda.

U slučaju kad se koja stalnica iskazuje s pomoću više jedinica, tj. ako vrijedi $Q = \{Q\}[Q_1][Q_2]\dots[Q_n]$, pri čemu se svaka od $n - 1$ jedinica $[Q_1], [Q_2], \dots, [Q_{n-1}]$ izvodi iz izraza $[Q_1] = Q_1/\{Q_1\}, [Q_2] = Q_2/\{Q_2\}, \dots, [Q_{n-1}] = Q_{n-1}/\{Q_{n-1}\}$, tada za jedinicu $[Q_n]$ dobivamo izraz $[Q_n] = Q/(\{Q\}[Q_1][Q_2]\dots[Q_{n-1}])$, pri čemu su jedinice $[Q_1], [Q_2], \dots, [Q_{n-1}]$ prethodno definirane s pomoću odgovarajućih drugih definicijskih stalnica.

Prethodno danom definicijom međunarodnoga sustava jedinica specificiraju se točne brojčane vrijednosti svake od stalnica kad se njihove vrijednosti izražavaju odgovarajućim jedinicama SI-ja. Fiksiranjem takve točne brojčane vrijednosti definira se jedinica jer umnožak te brojčane vrijednosti i jedinice mora biti jednak nepromjenjivoj vrijednosti stalnice. Tih je sedam stalnica odabrano tako da se svaka druga jedinica međunarodnoga sustava uvijek može napisati kao umnožak tih sedam stalnica. Prema tome, brojčanim vrijednostima specificiranim u definiciji međunarodnoga sustava definirane su jedinice kojima se iskazuju vrijednosti tih sedam definicijskih stalnica te neizravno i sve ostale jedinice SI-ja.

U nastavku dajemo prikaz definicija sedam osnovnih jedinica SI-ja prema 1. rezoluciji 26. CGPM-a.

Jedinica vremena SI-ja, sekunda

Jedinica vremena sekunda (znak s) definira se tako da se uzme da je brojčana vrijednost cezijeve frekvencije $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ neperturbiranoga temeljnog stanja hiperfinoga frekvencijskog prijelaza atoma cezija 133 fiksirana tako da bude jednaka $9\,192\,631\,770$ kad se ona izražava jedinicom Hz, koja je jednaka s^{-1} . Iz te se definicije dobiva jednadžba koja daje točan odnos između definicijske stalnice i jedinice sekunda: $\Delta\nu^{(133\text{Cs})}_{\text{hfs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$. Rješavanjem te jednadžbe po jedinici s dobivamo točan izraz za jedinicu sekunda s pomoću definicijske stalnice $\Delta\nu^{(133\text{Cs})}_{\text{hfs}}^{(24)}$:

$$1 \text{ s}^{-1} = \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \text{ ili } s = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}.$$

Iz te definicije proizlazi da je sekunda jednaka trajanju od $9\,192\,631\,770$ perioda zračenja, koje odgovara prijelazu između dviju hiperfinskih razina neperturbiranoga temeljnog stanja atoma cezija 133.

Svrha je referencije na neperturbirani atom kako bi bilo jasno da se definicija sekunde SI-ja temelji na cezijevu atomu koji nije perturbiran nikakvim vanjskim poljem kao zračenje crnoga tijela u okolišu. Frekvencije svih primarnih frekvencijskih etalona trebaju se prema tome ispraviti za pomak zbog zračenja u okolišu kako je utvrđeno na sastanku Savjetodav-

²³ Na primjer brzina svjetlosti u vakuumu prirodna je stalnica koja se označuje s c , čija je vrijednost u jedinicama SI-ja dana jednadžbom $c = 299\,792\,458 \text{ m/s} = \{c\}[c]$, pri čemu je brojčana vrijednost $\{c\} = 299\,792\,458$, a jedinica $[c] = \text{m/s}$.

²⁴ Znak $\Delta\nu^{(133\text{Cs})}_{\text{hfs}}$ upotrebljava se za označavanje vrijednosti frekvencije hiperfinoga prijelaza u neperturbiranome temeljnom stanju atoma cezija 133.

noga odbora za vrijeme i frekvenciju (CCTF) 1999. godine. Tako definirana sekunda pravo je vrijeme u smislu opće teorije relativnosti.

CIPM je prihvatio različite sekundarne prikaze sekunde, koji se temelje na odabiru niza spektralnih linija atoma, iona ili molekula. Neperturbirane frekvencije tih linija mogu se odrediti s relativnom nesigurnošću jednakom definiciji sekunde na temelju hiperfinoga cijepanja atoma ^{133}Cs , ali se neke mogu obnoviti sa znatno manjom nesigurnošću.

Jedinica duljine SI-ja, metar

Jedinica duljine metar (znak m) definira se tako da se uzme da je brojčana vrijednost brzine svjetlosti u vakuumu c fiksirana tako da bude jednaka 299 792 458 kad se ona izražava jedinicom SI-ja za brzinu m/s, pri čemu se sekunda definira s pomoću $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. Iz te se definicije dobiva jednadžba koja daje točan odnos između definicijske stalnice te metra i jedinice sekunda, koja je već definirana s pomoću definicijske stalnice $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$: $c = 299\,792\,458$ m/s. Rješavanjem tako dobivene algebarske jednadžbe po jedinici m dobivamo točan izraz za jedinicu metar s pomoću definicijskih stalnica c i $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$:

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

Iz te definicije proizlazi da je metar jednak duljini puta što ga svjetlost prevali u vakuumu tijekom vremenskoga odsječka od 1/299 792 458 sekunda.

Jedinica mase SI-ja, kilogram

Jedinica mase kilogram (znak kg) definira se tako da se uzme da je brojčana vrijednost Planckove stalnice h fiksirana tako da bude jednaka $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ kad se ona izražava jedinicom SI-ja J s (džulsekunda) koja je jednaka $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, pri čemu se metar i sekunda definiraju s pomoću c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. Iz te se definicije dobiva jednadžba koja daje točan odnos između definicijske stalnice h i jedinica kg, m i s, pri čemu su jedinice m i s već definirane s pomoću stalnica c i $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$: $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s = $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$. Rješavanjem te jednadžbe po jedinici kg dobivamo točan izraz za tu jedinicu s pomoću triju definicijskih stalnica h , $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ i c :

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1,475\,5214 \times 10^{40} \frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$

Planckova stalnica prirodna je stalnica čija se vrijednost može izražavati kao umnožak broja i jedinice džulsekunda, pri čemu je J s = $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$. Iz tako definirane jedinice $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ (što je jedinica fizičkih veličina djelovanja i kutnoga momen-

ta) zajedno s prethodno danim definicijama sekunde i metra dobiva se definicija jedinice mase izražena s pomoću vrijednosti Planckove stalnice h .

Napominjemo da se s pomoću stalnice h mogu mjeriti i makroskopske mase uporabom Josephsonova i kvantnoga Hallova učinka zajedno s vatnom vagom ili s pomoću mase siličijeva atoma koja je točno poznata s pomoću h uporabom pristupa mjerenja gustoće kristala x-zrakama.

Brojčana vrijednost Planckove stalnice u definiciji odabrana je tako da je u trenutku prihvaćanja te definicije kilogram bio jednak masi međunarodne pramjere, $m(K) = 1$ kg, u granicama od nekoliko dijelova u 10^8 , što je u to vrijeme bila nesigurnost sastavljenih najboljih procjena vrijednosti Planckove stalnice. Slijedom toga, sada je masa međunarodne pramjere veličina koju treba određivati pokusom.

Jedinica električne struje SI-ja, amper

Jedinica električne struje amper (znak A) definira se tako da se uzme da je brojčana vrijednost elementarnoga naboja e fiksirana tako da bude jednaka $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ kad se ona izražava jedinicom C (kulon), koja je jednaka As (ampersekunda), pri čemu se sekunda definira s pomoću $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. Iz te se definicije dobiva jednadžba koja daje točan odnos između definicijske stalnice e i jedinica amper (A) i sekunda (s): $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C = $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ A s. Rješavanjem te jednadžbe po jedinici A dobivamo točan izraz za jedinicu amper s pomoću definicijskih stalnica e (²⁵) i $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$:

$$1 \text{ A} = \left(\frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1} = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{\text{Cs}} e \approx 6,789\,687 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} e$$

Iz te definicije proizlazi da je amper jednak električnoj struji koja odgovara tijeku od 1/(1,602 176 634 × 10⁻¹⁹) elementarnih naboja u sekundi. Prijašnja definicija ampera koja se temeljila na sili između dvaju vodiča kroz koje je protjecala struja imala je za posljedicu fiksiranje vrijednosti magnetske stalnice μ_0 na točnu vrijednost od $4\pi \times 10^{-7}$ H m⁻¹ = $4\pi \times 10^{-7}$ N A⁻², pri čemu H i N označuju suvisle izvedene jedinice redom henri i njutn. Novom se definicijom ampera umjesto vrijednosti magnetske stalnice μ_0 utvrđuje vrijednost elementarnoga naboja e te, kao posljedica toga, μ_0 više nije točno poznat nego se mora odrediti pokusom. Iz toga također proizlazi da su otada električna stalnica ϵ_0 (koja se također naziva permitivnošću vakuuma), karakteristična impedancija vakuuma Z_0 i admitancija vakuuma Y_0 redom jednake $1/\mu_0 c^2$, $\mu_0 c$ i $1/\mu_0 c$. Vrijednosti permitivnosti ϵ_0 , Z_0 i Y_0 moraju se također odrediti pokusom te će imati istu relativnu nesigurnost kao i μ_0 jer brzina svjetlosti c ima po definiciji točno utvrđenu vrijednost. Točno su poznati umnožak $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$ i količnik $Z_0/\mu_0 = c$. Istodobno s prihvaćanjem nove definicije

²⁵ Znak e upotrebljava se za označivanje vrijednosti elementarnoga naboja koja je jednaka naboju protona.

ampera, magnetska stalnica μ_0 postala je jednaka vrijednosti od $4\pi \times 10^{-7}$ H/m s relativnom standardnom nesigurnošću koja je manja od 1×10^{-9} .

Jedinica SI-ja termodinamičke temperature, kelvin

Jedinica termodinamičke temperature kelvin (znak K) definira se tako da se uzme da je brojčana vrijednost Boltzmannove stalnice k fiksirana tako da bude jednaka $1,380\,649 \times 10^{-23}$ kad se ona izražava jedinicom J K^{-1} , koja je jednaka $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, pri čemu su kilogram, metar i sekunda definirani s pomoću stalnica h , c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. Iz te se definicije dobiva jednadžba koja daje točan odnos između definicijske stalnice k i jedinice džul (koji je, pak, jednak $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$, pri čemu su kg , m i s već definirani s pomoću odgovarajućih definicijskih stalnica) i kelvin K. Iz te definicije proizlazi da imamo točan odnos $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$. Rješavanjem te jednadžbe po jedinici K dobivamo točan izraz za jedinicu kelvin s pomoću definicijskih stalnica k , h i $\Delta\nu^{(133\text{Cs})}_{\text{hfs}}$:

$$\begin{aligned} 1 \text{ K} &= \left(\frac{1,380\,649}{k} \right) \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2} = \\ &= \frac{1,380\,649 \times 10^{-23}}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx \\ &\approx 2,266\,6653 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}. \end{aligned}$$

Iz te definicije proizlazi da je kelvin jednak promjeni termodinamičke temperature koja nastaje promjenom toplinske energije kT za $1,380\,648\,8 \times 10^{-23} \text{ J}$ ($k \text{ K} = 1,380\,648\,8 \times 10^{-23} \text{ J}$).

Prijašnja se definicija kelvina temeljila na točnoj vrijednosti pripisanoj trojnoj točki vode T_{TPW} , tj. 273,16 K. Budući da se novom definicijom kelvina fiksira vrijednost stalnice k umjesto stalnice T_{TPW} , T_{TPW} se mora odrediti pokusom, ali je u vrijeme prihvaćanja nove definicije T_{TPW} bio jednak 273,16 K s relativnom standardnom nesigurnošću manjom od 1×10^{-6} , koja se temeljila na mjerenjima stalnice k prije promjene definicije.

Zbog načina na koji su se obično definirale temperaturne ljestvice ostala je opća praksa da se termodinamička temperatura (znak T) izražava s pomoću njezine razlike u odnosu prema referentnoj temperaturi $T_0 = 273,15 \text{ K}$ (ledište vode). Ta se temperaturna razlika naziva Celzijevom temperaturom (znak t) i definira veličinskom jednadžbom: $t = T - T_0$.

Jedinica je Celzijeve temperature Celzijev stupanj (znak $^{\circ}\text{C}$), koji je po definiciji po veličini jednak jedinici kelvin. Temperaturna razlika ili interval može se izražavati u kelvinima ili Celzijevim stupnjevima, brojčana vrijednost razlike ostaje ista. Međutim, brojčana je vrijednost Celzijeve temperature koja se izražava Celzijevim stupnjevima povezana s brojčanom vrijednošću termodinamičke temperature izražene u kelvinima izrazom: $t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$.

Kelvin i Celzijev stupanj također su jedinice međunarodne temperaturne ljestvice iz 1990. godine (ITS-90). ITS-90 definira dvije veličine T_{90} i t_{90} koje su bliske aproksimacije odgovarajuće termodinamičke i Celzijeve temperature. No-

vom definicijom postaje mnogo jasnije da se termodinamička temperatura može izravno mjeriti u svakoj točki na ljestvici.

Jedinica SI-ja za količinu tvari, mol

Jedinica za količinu tvari mol (znak mol) definira se tako da se uzme da je mol količina tvari koja sadržava točno $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ elementarnih entiteta; taj je broj fiksirana brojčana vrijednost Avogadrove stalnice N_A kad se ona izražava jedinicom mol^{-1} i naziva se Avogadrovim brojem. Na taj se način za jedinicu mol dobiva točan izraz s pomoću definicijske stalnice N_A :

$$1 \text{ mol} = \left(\frac{6,022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right).$$

Količina tvari, znak n , kojega sustava mjera je broja specificiranih elementarnih entiteta. Elementarni entitet može biti atom, molekula, ion, elektron, neka druga čestica ili specificirana skupina čestica.

Iz te definicije proizlazi da je mol jednak količini tvari sustava koji sadržava $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ specificiranih elementarnih entiteta.

Prethodnom definicijom mola također je bila fiksirana vrijednost molarne mase ugljika 12, $M(^{12}\text{C})$ na točnu vrijednost od 0,012 kg/mol, ali sada $M(^{12}\text{C})$ više nije točno poznat te se mora odrediti pokusom. Međutim, za stalnicu N_A odabrana je takva vrijednost za koju je u vrijeme prihvaćanja nove definicije mola molarna masa ugljika $M(^{12}\text{C})$ bila jednaka 0,012 kg/mol s relativnom standardnom nesigurnošću manjom od 1×10^{-9} .

Molarna masa nekoga atoma ili molekule X može se još uvijek dobiti iz relativne atomske mase iz jednadžbe $M(X) = A_r(X)[M(^{12}\text{C})/12] = A_r(X)M_u$, a molarna je masa nekoga atoma ili molekule X također povezana s masom elementarnoga entiteta $m(X)$ relacijom $M(X) = N_A m(X) = N_A A_r(X) m_u$. U tim je jednadžbama M_u molarna masena stalnica koja je jednaka $M(^{12}\text{C})/12$, a m_u je ujednačena atomska masena stalnica koja je jednaka $m(^{12}\text{C})/12$. One su povezane Avogadrovom stalnicom relacijom $M_u = N_A m_u$.

Treba napomenuti da se u nazivu *količina tvari* riječ *tvari* može zbog jednostavnosti zamijeniti riječima kojima se specificira odgovarajuća tvar u nekoj posebnoj primjeni.

Jedinica svjetlosne jakosti, kandela

Jedinica svjetlosne jakosti u danome smjeru kandela (znak cd) definira se tako da se uzme da je brojčana vrijednost svjetlosne djelotvornosti jednobojnoga zračenja frekvencije $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$, K_{cd} , fiksirana tako da bude jednaka 683 kad se ona izražava s pomoću jedinice lm W^{-1} , koja je jednaka cd sr W^{-1} ili $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$, pri čemu su kilogram, metar i sekunda definirani s pomoću stalnica h , c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. Iz te se definicije dobiva jednadžba koja daje točan odnos između definicijske stalnice K_{cd} i kande le te kilograma, metra, sekunde i steradijana (pri čemu su kilogram, metar i sekunda već definirani s pomoću odgovarajućih definicijskih stalnica $\Delta\nu^{(133\text{Cs})}_{\text{hfs}}$, c i h): $K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm/W} = 683 \text{ cd sr W}^{-1} = 683 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3 \text{ cd sr}$ za jednobojno zračenje frekvencije $\nu = 540 \times 10^{12} \text{ Hz}$. Rješavanjem

te jednadžbe po jedinici cd dobivamo točan izraz za kandelu s pomoću definicijskih stalnica K_{cd} , h i $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$:

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} = \frac{1}{(6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34})(9\ 192\ 631\ 770)^2\ 683} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{cd} \approx 2,614\ 830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{cd}$$

Iz te definicije proizlazi da je kandela jednaka svjetlosnoj jakosti u danome smjeru izvora koji emitira jednobojno zračenje frekvencije 540×10^{12} Hz i koji ima jakost zračenja u tome smjeru od $(1/683)$ W/sr.

Odnosi između definicija osnovnih jedinica

Od prikazanih definicija samo su definicija sekunde i definicija mola neovisne o drugim definicijama. U definiciji metra fiksiranjem brojčane vrijednosti brzine svjetlosti u vakuumu stvarno se definira jedinica brzine, m/s, tako da je za definiciju metra potrebna definicija sekunde. U definiciji jedinice mase fiksiranjem brojčane vrijednosti Planckove stalnice stvarno se definira jedinica djelovanja, $J \text{ s} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, tako da su za definiciju kilograma potrebne definicije metra i sekunde. U definiciji ampera fiksiranjem brojčane vrijednosti elementarnoga naboja stvarno se definira jedinica naboja kulon, $C = A \text{ s}$, tako da je za definiciju ampera potrebna definicija sekunde. U definiciji kelvina fiksiranjem brojčane vrijednosti Boltzmannove stalnice stvarno se fiksira vrijednost jedinice energije po odsječku termodinamičke temperature, $J \text{ K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$, tako da su za definiciju kelvina potrebne definicije metra, kilograma i sekunde. I konačno, u definiciji kandeले fiksiranjem brojčane vrijednosti svjetlosne djelotvornosti jednobojnoga zračenja frekvencije od 540×10^{12} Hz stvarno se definira jedinica svjetlosne djelotvornosti lumen po vatu, $\text{lm W}^{-1} = \text{cd sr W}^{-1} = \text{kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3 \text{ cd sr}$, tako da su za definiciju kandeले potrebne definicije metra, kilograma i sekunde.

Otuda proizlazi da se definicije sekunde, metra, kilograma, ampera, kelvina, mola i kandele moraju uzimati zajedno kao suvisla skupina formulacija za definicije osnovnih jedinica SI-ja i ne smiju se smatrati neovisnim definicijama pojedinačnih osnovnih jedinica. Svaka od sedam definicija osnovnih jedinica praćena je izrazom koji proizlazi iz definicije kad se ta jedinica izražava s pomoću određenih kombinacija prirodnih stalnica uzetih iz skupa od sedam definicijskih stalnica.

Definicije suvislih izvedenih jedinica SI-ja s pomoću definicijskih stalnica

Suvisle izvedene jedinice SI-ja definiraju se kao odgovarajući umnošci osnovnih jedinica SI-ja s brojčanim faktorima jednakinim jedan. Prema tome se i definicija svake suvisle izvedene jedinice može prikazati brojem pomnoženim s odgovarajućom kombinacijom sedam definicijskih stalnica na temelju izraza za odgovarajuću izvedenu jedinicu s pomoću odgovarajućih osnovnih jedinica umjesto kojih se uvrste odgovarajući izrazi za te jedinice izraženi s pomoću odgovarajućih definicijskih stalnica (vidi [9]).

Narav sedam definicijskih stalnica

Sedam definicijskih stalnica odabrano je iz praktičnih razloga. Vjeruje se da su te stalnice vremenski i prostorno nepromjenjive te one omogućuju izravna praktična ostvarenja.

Planckova stalnica h i brzina svjetlosti u vakuumu c ispravno se opisuju kao temeljne. One određuju redom kvantna djelovanja i svojstva prostora-vremena te jednako utječu na sve čestice i polja na svim ljestvicama i u svakome okolišu.

Nasuprot tome, elementarni naboj e odgovara jakosti veze elektromagnetske sile preko stalnice fine strukture α . Stalnica fine strukture α samo je nedimenzijska stalnica za koju se može dobiti eksperimentalni dokaz njezine vremenske stabilnosti. Međutim, eksperimentalne granice najveće promjene stalnice α tako su male da se može isključiti bilo kakav njezin učinak na predvidljiva mjerenja.

Temeljno stanje hiperfinoga cijepanja atoma cezija ^{133}Cs ima karakter atomskoga parametra na koji može utjecati okoliš kao što su elektromagnetska polja. Međutim, taj je parametar dobro poznat i stabilan u okviru zakona kvantne mehanike. On je također dobar izbor kao referentni prijelaz za praktična ostvarenja.

Boltzmannova stalnica k i Avogadrov broj N_A imaju karakter faktora pretvorbe za pretvorbu jedinice džula u kelvin za praktičnu termometriju i mola u jedinicu brojenja 1 za mjerenje količine tvari.

Svjetlosna djelotvornost K_{cd} tehnička je stalnica povezana s običnim spektralnim odzivom ljudskoga oka.

Literatura

- [1] Brošura: *Le Système international d'unités (SI)*, BIPM (2006.), hrvatski prijevod *Međunarodni sustav jedinica (SI)*, DZM (2008.)
- [2] Nacr 9. izdanja brošure: *Le Système international d'unités (SI)*, BIPM (2018.) (mrežne stranice BIPM-a www.bipm.org)
- [3] JCGM 200, *Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM)*, 3. izdanje, BIPM 2008, hrvatski prijevod DZM, 2009.

- [4] 26. CGPM, Rezolucija 1 o reviziji međunarodnoga sustava jedinica (SI), mrežna stranica BIPM-a, prijevod rezolucije objavljen je u *Svijetu po mjeri* br. 4, prosinac 2018.
- [5] *Novosti iz međunarodnoga sustava jedinica*, Vuković, M., Jakovčić, M., *Svijet po mjeri* br. 4, travanj 2014.
- [6] *Predložena promjena definicije kilograma: Posljedice za zakonsko mjeriteljstvo* (prijevod odgovarajućega članka objavljena u OIML Bulletine), Richard Davis, *Svijet po mjeri* br. 1, studeni 2012.
- [7] *Povijest metričkog sustava of Francuske revolucije do potpisivanja Konvencije o metru*, Vuković, M., *Svijet po mjeri* br. 4, prosinac 2018.
- [8] *Razvoj definicija osnovnih jedinica SI*, Jakobović, Z., *Svijet po mjeri* br. 4, prosinac 2018.
- [9] *Nove definicije Međunarodnoga sustava SI i njihova veza s prirodnim konstantama*, Lopac, V., *Svijet po mjeri* br. 4; prosinac 2018.
- [10] *Mjerene veličine i jedinice, dimenzije i algebarska struktura sustava veličina*, Vuković, M. *Svijet po mjeri* br. 2, srpanj 2016.
- [11] *Elements of Algebra* (engleski prijevod izvornog izdanja na njemačkome jeziku pod naslovom *Vollständige Anleitung zur Algebra*), Leonhard Euler, Longman, Hurst, Rees, Orme and Co., London 1822.
- [12] *A Treatise on Electricity and Magnetism*, J. C. Maxwell, McMillan and Co., London 1881.
- [13] *Mjerenje i računanje u tehnici i znanosti*, M. Brezinišćak, Tehnička knjiga Zagreb, 1971.
- [14] *Fizikalne veličine i mjerne jedinice*, K. Ražnjević, Nakladni zavod Znanje, Zagreb, 1985.
- [15] *From Artefacts to Atoms*, Quinn, T., Oxford University Press, Inc., 2012, ISBN 978-0-19-530786-3
- [16] *Nacrti mise en pratique* za amper (i druge električne jedinice), kilogram, kelvin i mol (mrežne stranice BIPM-a www.bipm.org)



Novosti iz Svijeta kvalitete

Autor: Darko BOŠNJAK, dipl. ing. univ. spec.

www.svijet-kvalitete.com



► Učiniti svijet pristupačnim s međunarodnim normama

Više od milijardu ljudi u svijetu ima neki oblik invalidnosti. Osnaživanje i uključivanje ovoga velikog dijela populacije bitni su za održivo društvo i čine temu ovogodišnjega Međunarodnog dana osoba s invaliditetom.

Obilježavanje tog dana svake godine 3. prosinca pridonosi ciljevima istaknutim u UN-ovu Programu 2030 (The 2030 Agenda) za održivi razvoj, kojim se obvezuje da se „nikoga ne ostavlja otraga“. To je ambiciozan plan akcija međunarodne zajednice prema mirnome, sretnome i prosperitetnome svijetu u kojemu je dostojanstvo osobe i jednakost i ravnopravnost primijenjeno kao temeljno načelo, uključeno u tri glavna stupa djelovanja Ujedinjenih naroda: razvoj, ljudska prava i mir i sigurnost. U tome pogledu kri-

tično je osigurati puno i ravnopravno sudjelovanje osoba s invalidnošću u svim sferama društva i stvoriti okolinu za sve, uključujući osobe s invalidnošću.

Mnoge međunarodne norme ključni su alati za dostizanje tih ciljeva, a mnogi od njih su još u postupku izrade. U HZN-u se tijekom ovoga tjedna (od 3. do 6. prosinca 2018. godine) održavaju sastanci radnih skupina WG 2, 4, 5, i 6 europskoga tehničkog odbora CEN/TC 452, Assistance Dogs (Psi pomagači)

CEN/TC 452/WG 2, Lifetime welfare
 CEN/TC 452/WG 4, Training and assessment
 CEN/TC 452/WG 5, Client Services
 CEN/TC 452/WG 6, Accessibility
 Opširnije na www.hzn.hr.

Izvor: HZN