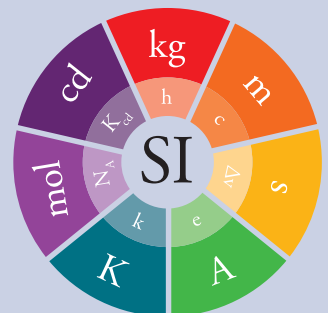


Međunarodni sustav jedinica (SI)

9. izdanje

Le Système international d'unités



Međunarodni sustav jedinica

Hrvatsko izdanje

Međunarodni sustav jedinica

Međunarodni ured za utege i mjere

Međunarodni sustav jedinica

SI brošura se distribuira prema uvjetima Creative Commons Attribution 4.0 International Licence (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), koja dopušta neograničenu uporabu, raspačavanje i reproduciranje na bilo kojem sredstvu, pod uvjetom da se dadne prikladna potvrda o autoru (autorima) izvornika i izvoru, osigura veza s licencijom Creative Commons i naznači ako su provedene promjene.

NAKLADNIK: Hrvatsko mjeriteljsko društvo • ZA IZDAVAČA: Mladen Jakovčić • PREVEO S ENGLESKOGA JEZIKA: Mirko Vuković • LEKTORIRALA: Milica Mihaljević • KORIGIRAO: Mirko Vuković • PRIPREMA SLOGA: LASERplus d.o.o. Zagreb, Igor Vresk • Zagreb, srpnja 2021

NAZIV IZVORNIKA: Le Système In ter na tio nal d'Unités

Izdavanje knjige je podržalo Ministarstvo znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske i Državni zavod za mjeriteljstvo.

9. izdanje, 2021.

ISBN 978-953-7623-21-0

BIPM i Konvencija o metru

Međunarodni ured za utege i mjere (BIPM) osnovan je *Konvencijom o metru* koju je tijekom završne sjedinice diplomatske Konferencije o metru 20. svibnja 1875. godine u Parizu potpisalo sedamnaest država. Ta je Konvencija izmijenjena i dopunjena 1921. godine.

BIPM ima sjedište u blizini Pariza na terenu (43 520 m²) Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) koji mu je stavila na raspolaganje francuska vlada; njegov rad zajednički financiraju države potpisnice *Konvencije o metru*.

Zadaća je BIPM-a osigurati svjetsko ujednačenje mjerenja; njegovi su ciljevi:

- predstavljati svjetsku mjeriteljsku zajednicu u cilju njezina što boljeg prihvaćanja i utjecaja
- da bude središte znanstvene i tehničke suradnje među državama članicama čime se osiguravaju mogućnosti međunarodnih usporedba na temelju podjele troškova;
- da bude koordinator svjetskoga mjernog sustava osiguravajući da on daje usporedive i međunarodno prihvaćene mjerne rezultate.

BIPM djeluje pod isključivim nadzorom Međunarodnoga odbora za utege i mjere (Comité international des poids et mesures, CIPM) koji je sam odgovoran Općoj konferenciji za utege i mjere (Conférence générale des poids et mesures, CGPM) te izvješćuje CGPM o radu koji je obavio BIPM.

Općoj konferenciji, koja se trenutačno sastaje svake četiri godine, prisustvuju delegati svih država članica. Na tim se sastancima:

- raspravlja o dogovorima i potiču dogovori koji su potrebni kako bi se osiguralo širenje i poboljšavanje međunarodnoga sustava jedinica (SI) koji je suvremeni oblik metričkoga sustava;
- potvrđuju rezultati novih temeljnih mjeriteljskih određivanja i različitih znanstvenih rezolucija međunarodnoga područja primjene;
- donose sve glavne odluke koje se odnose na financije, organizaciju i razvoj BIPM-a.

CIPM ima osamaest članova od kojih je svaki iz druge države: trenutačno se sastaje svake godine. Službenici toga odbora podnose godišnje izvješće o administrativnome i financijskome položaju BIPM-a vladama država članica. Glavna je zadaća CIPM-a osigurati svjetsku ujednačenost mjernih jedinica. On to radi izravno ili podnošenjem prijedloga CGPM-u.

Djelatnosti BIPM-a koje su u početku bile ograničene na mjerenja duljine i mase te mjeriteljska istraživanja koja su se odnosila na te veličine, proširena su na mjerne etalone u području elektriciteta (1927.), fotometriju i radiometriju (1937.), ionizacijsko zračenje (1960.), vremenske ljestvice (1988.) i kemiju (2000.). U tu su svrhu 1929. godine prošireni izvorni laboratoriji, koji su izgrađeni od 1876. – 1878. godine; izgrađene su nove zgrade za laboratorije za ionizacijsko zračenje od 1963. – 1964. godine, za rad na laserima 1984. godine te za knjižnicu i urede 1988. godine. Godine 2001. otvorena je nova zgrada s radionicom, uredima i prostorijama za sastanke.

Do 20. svibnja 2019. godine bilo je pedeset devet država članica: Argentina, Australija, Austrija, Belgija, Brazil, Bugarska, Crna Gora, Češka, Čile, Danska, Egipat, Finska, Francuska, Grčka, Hrvatska, Indija, Indonezija, Irak, (Islamska Republika) Iran, Irska, Izrael, Italija, Japan, Južna Afrika, Kanada, Kazahstan, Kenija, Kina, Kolumbija, (Republika) Koreja, Litva, Mađarska, Malezija, Meksiko, Nizozemska, Norveška, Novi Zeland, Njemačka, Pakistan, Poljska, Portugal, Rumunjska, Ruska Federacija, Saudijska Arabija, Singapur, Sjedinjene Američke Države, Slovačka, Slovenija, Srbija, Španjolska, Švedska, Švicarska, Tajland, Tunis, Turska, Ujedinjena Kraljevina, Ujedinjeni Arapski Emirati, Ukrajina, Urugvaj.

Četrdeset i dvije države i gospodarstva bili su pridruženi članovi Opće konferencije za utege i mjere. Albanija, Azerbajdžan, Bangladeš, Bjelorusija, Bocvana, Bolivija, Bosna i Hercegovina, CARICOM, Ekvator, Estonija, Etiopija, Filipini, Gana, Gruzija, Hong Kong (Kina), Jamajka, Katar, Kostarika, Kuba, Kuvajt, Letonija, Luksemburg, Malta, Mauricijus, Moldavija, Mongolija, Namibija, Oman, Panama, Peru, Sirija, Sjeverna Makedonija, Sejšeli, Šri Lanka, Tajvan, Tanzanija, Uzbekistan, Vijetnam, Zambija, Zimbabve.

U laboratorijima BIPM-a radi četrdeset i pet fizičara i tehničara. Oni uglavnom obavljaju mjeriteljsko istraživanje, međunarodne usporedbe ostvarenja jedinica i umjeravanja etalona. U godišnjem izvještaju ravnatelja daju se podatci o radu koji je u tijeku.

S obzirom na proširenje posla koji je povjeren BIPM-u 1927. godine, CIPM je osnovao tijela, koja se nazivaju savjetodavnim odborima, čija je funkcija osigurati informacije o pitanjima koje im on upućuje na proučavanje i mišljenje. Ti savjetodavni odbori, koji za proučavanje posebnih pitanja mogu osnivati privremene ili trajne radne skupine, odgovorni su za usklađivanje međunarodnoga rada koji se provodi u njihovim odgovarajućim područjima i predlažu preporuke CIPM-u koje se odnose na jedinice.

Savjetodavni odbori imaju opća pravila (Dokument CIPM-D-01, *Pravila postupanja za savjetodavne odbore (CC) koje je osnovao CIPM, radne skupine CC-a i radionice CC-a*). 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, koje je odobrio CIPM, koji šalju izaslanike po svojem izboru. Osim toga postoje pojedinačni članovi koje imenuje CIPM te predstavnik BIPM-a (Dokument CIPM-D-01, *Pravila postupanja za savjetodavne odbore (CC) koje je osnovao CIPM, radne skupine CC-a i radionice CC-a*). Trenutačno postoji deset takvih odbora:

1. Savjetodavni odbor za elektricitet i magnetizam (CEM), novo je ime dano 1997. godine Savjetodavnomu odboru za elektricitet (CCE), koji je osnovan 1927. godine;
2. Savjetodavni odbor za fotometriju i radiometriju (CCPR), novo je ime dano 1971. godine Savjetodavnomu odboru za fotometriju (CCP) koji je osnovan 1933. godine (između 1930. i 1933. godine pitanjima koja se odnose na fotometriju bavio se odbor CCE)
3. Savjetodavni odbor za termometriju (CCT), koji je osnovan 1937. godine
4. Savjetodavni odbor za duljinu (CCL), novo je ime dano 1997. godine Savjetodavnomu odboru za definiciju metra (CCDM) koji je osnovan 1952. godine
5. Savjetodavni odbor za vrijeme i frekvenciju (CCTF), novo je ime dano 1997. godine Savjetodavnomu odboru za definiciju sekunde (CCDS) koji je osnovan 1956. godine
6. Savjetodavni odbor za ionizacijsko zračenje (CCRI), novo je ime dano 1997. godine Savjetodavnomu odboru za etalone ionizacijskog zračenja (CCEMRI), koji je osnovan 1958. godine (1959. godine taj je odbor uspostavio četiri odsjeka: Odsjek I (mjerenje x-zraka i γ -zraka, elektrone), Odsjek II (mjerenje radionuklida), Odsjek III (mjerenja neutrona), Odsjek IV (etaloni α -energije); 1975. godine posljednji je odsjek raspušten, a za njegovo područje djelovanja postao je odgovoran Odsjek II
7. Savjetodavni odbor za jedinice (CCU), koji je osnovan 1964. godine (taj je odbor zamijenio Povjerenstvo za sustav jedinica, koje je CIPM osnovao 1954. godine)
8. Savjetodavni odbor za masu i srodne veličine (CCM), koji je osnovan 1980. godine
9. Savjetodavni odbor za količinu tvari: mjeriteljstvo u kemiji i biologiji (CCQM), koji je osnovan 1993. godine
10. Savjetodavni odbor za akustiku, ultrazvuk i vibracije (CCAUV), koji je osnovan 1999. godine.

Rasprave Opće konferencije i CIPM-a objavljuje BIPM u ovim periodičnim izdanjima:

- *Izveštaji sa sastanaka Opće konferencije za utege i mjere (Comptes rendus des Séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures (CR))*

- *Izveštaji sa sastanaka Međunarodnoga odbora za utege i mjere (Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures (PV))*

CIPM je 2003. godine odlučio da se izvještaji sa sastanaka savjetodavnih odbora više ne tiskaju nego da se na njihovu izvornome jeziku stavljaju na mrežnu stranicu BIPM-a.

BIPM također objavljuje monografije o posebnim mjeriteljskim predmetima i brošuru pod naslovom *Međunarodni sustav jedinica (SI)*, koja se periodično posuvremenjuje, a u kojoj su sabrane sve odluke i preporuke koje se odnose na jedinice.

Zbirka *Travaux et Memoires du Bureau International des Poids et Mesures* (između 1881. i 1966. objavljena su 22 sveska) i *Recueil de Travaux et Memoires du Bureau International des Poids et Mesures* (između 1966. i 1998. objavljeno je 11 svezaka) prekinuta je odlukom CIPM-a.

Znanstveni radovi BIPM-a objavljuju se u znanstvenoj literaturi.

Od 1965. godine međunarodni časopis *Metrologia*, koji se izdaje pod pokroviteljstvom CIPM-a, objavljuje članke o važnijim radovima iz znanstvenoga mjeriteljstva, o poboljšanju mjernih metoda, radu na etalonima i jedinicama te izvještaje koji se odnose na djelatnosti, odluke i preporuke različitih tijela koja su osnovana u okviru *Konvencije o metru*.

Predgovor prvom izdanju

1	Uvod	12
1.1	SI i definicijske stalnice	12
1.2	Motivacija za uporabu definicijskih stalnica za definiranje SI-ja	12
1.3	Primjena SI-ja	13
2	Međunarodni sustav jedinica	14
2.1	Definiranje jedinice koje veličine	14
2.2	Definicija SI-ja	14
2.2.1	Narav sedam definicijskih stalnica	15
2.3	Definicije jedinica SI-ja	16
2.3.1	Osnovne jedinice	16
2.3.2	Praktično ostvarenje jedinica SI-ja	21
2.3.3	Dimenzije veličina	22
2.3.4	Izvedene jedinice	23
2.3.5	Jedinice za veličine koje opisuju biološka i fiziološka djelovanja	26
2.3.6	Jedinice SI-ja u okviru opće teorije relativnosti	27
3	Decimalni višekratnici i nižekratnici jedinica SI-ja	28
4	Jedinice izvan SI-ja koje su prihvaćene za uporabu sa SI-jem	29
5	Pisanje znakova i naziva jedinica i izražavanje vrijednosti veličina	31
5.1	Uporaba znakova i naziva jedinica	31
5.2	Znakovi jedinica	31
5.3	Nazivi jedinica	32
5.4	Pravila i dogovori o načinu izražavanja vrijednosti veličina	32
5.4.1	Vrijednost i brojučana vrijednost veličine i uporaba algebre veličina	32
5.4.2	Znakovi veličina i jedinica	33
5.4.3	Pisanje vrijednosti veličine	33

5.4.4	Pisanje brojeva i decimalnoga znaka	34
5.4.5	Izražavanje mjerne nesigurnosti vrijednosti veličine	34
5.4.6	Množenje ili dijeljenje znakova veličina, vrijednosti veličina ili brojeva	35
5.4.7	Iskazivanje vrijednosti čistih brojeva	35
5.4.8	Ravninski, prostorni i fazni kutovi	35
Dodatak 1.	Odluke CGPM-a i CIPM-a	37
Dodatak 2.	Praktično ostvarenje definicija nekih važnih jedinica	84
Dodatak 3.	Jedinice za fotokemijske i fotobiološke veličine	85
Dodatak 4.	Povijesne napomene o razvoju međunarodnoga sustava jedinica	86
	1. dio: Povijesni razvoj ostvarenja jedinica SI-ja	86
	2. dio: Povijesni razvoj međunarodnoga sustava	88
	3. dio: Povijesna perspektiva osnovnih jedinica SI-ja	90
	Popis pokrata	94
	Kazalo	96

Predgovor

9. izdanju

Međunarodni sustav jedinica (SI) upotrebljava se u cijelome svijetu kao preporučeni sustav jedinica, temeljni jezik znanosti, tehnike, industrije i trgovine otkad je uspostavljen 1960. godine rezolucijom na 11. sastanku Opće konferencije za utege i mjere (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM).

Ovu brošuru objavljuje Međunarodni ured za utege i mjere (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) za promicanje i objašnjenje SI-ja. U njoj su dane najvažnije rezolucije CGPM-a te odluke Međunarodnoga odbora za utege i mjere (Comité International des Poids et Mesures, CIPM), koji vodi brigu o metričkome sustavu od 1. sastanka CGPM-a 1889. godine.

SI je uvijek bio praktičan i dinamičan sustav koji se razvijao korištenjem najnovijim dostignućima znanosti i tehnike. Posebno je ogroman napredak koji je tijekom posljednjih 50 godina ostvaren u području atomske fizike i kvantnoga mjeriteljstva omogućio preinaku definicija sekunde i metra te praktično ostvarenje električnih jedinica korištenjem atomskim i kvantnim pojavama kako bi se postigle razine točnosti za ostvarenje tih jedinica koje su ograničene samo našom tehničkom sposobnošću, a ne samim definicijama. Taj je znanstveni napredak zajedno s razvojem mjerne tehnologije omogućio promjene SI-ja koje su se promicale i objašnjavale u prethodnim izdanjima ove brošure.

Ovo 9. izdanje SI brošure priređeno je nakon što je na 26. sastanku CGPM-a prihvaćen skup dalekosežnih promjena. Na tome je sastanku uveden novi pristup formuliranju definicija jedinica općenito te posebno sedam osnovnih jedinica fiksiranjem brojčanih vrijednosti sedam *definijskih stalnica*. Među njima su temeljne prirodne stalnice kao što su Planckova stalnica i brzina svjetlosti, tako da se te definicije temelje na našem sadašnjem razumijevanju fizičkih zakona i predstavljaju to sadašnje razumijevanje. Prvi je put na raspolaganju potpun skup definicija kojima se ne upućuje ni na kakve rukotvorinske etalone, materijalna svojstva ili opise mjerenja. Te promjene omogućuju ostvarenje svih jedinica s točnošću koja je u konačnici ograničena samo kvantnom strukturom prirode i našim tehničkim mogućnostima, ali ne samim definicijama. Za ostvarenje koje jedinice može se upotrijebiti svaka valjana fizička jednadžba koja povezuje definijske stalnice s tom jedinicom čime se stvaraju mogućnosti za inovacije, ostvarenje bilo gdje s većom točnošću s napretkom tehnologije. Dakle, takva revizija označuje povijesno važan korak naprijed.

Te je promjene prihvatio CGPM u studenome 2018. godine, s primjenom od 20. svibnja 2019. godine. Taj je datum odabran jer je to Svjetski dan mjeriteljstva, dan kad je 1875. godine potpisana *Konvencija o metru*. Premda će budući utjecaj promjena biti dalekosežan, posebna je pozornost posvećena osiguravanju da te definicije budu sukladne s definicijama koje su bile na snazi u vrijeme kad je ta promjena provedena.

Skrećemo pozornost na činjenicu da se međunarodni sustav jedinica od njegova uspostavljanja 1960. godine uvijek nazivao u svojem kraćem obliku SI. To je načelo zadržano u osam prethodnih izdanja ove brošure te je potvrđeno 1. rezolucijom na 26. sastanku CGPM-a, koji

je također potvrdio da je naslov brošure jednostavno *Međunarodni sustav jedinica*. Ta dosljednost upućivanja na SI odražava nastojanja CGPM-a i CIPM-a da pri svakoj provedenoj promjeni osiguraju neprekinutost vrijednosti mjerenja koje su izražene u jedinicama SI-ja.

Tekst ove brošure priređen je kako bi se osigurao potpun opis SI-ja i dao određeni povijesni kontekst. Ona također ima četiri priloga:

U prilogu 1 kronološkim su redom reproducirane sve odluke (rezolucije, preporuke, izjave) koje su od 1889. godine objavili CGPM i CIPM o mjernim jedinicama i međunarodnome sustavu jedinica.

Prilog 2 dostupan je samo u elektroničkoj inačici (www.bipm.org). U njemu su u općim crtama dana praktična ostvarenja sedam osnovnih jedinica i drugih važnih jedinica u svakome području. Taj će se prilog redovito posuvremenjivati kako bi odražavao poboljšanja u eksperimentalnim metodama koje budu dostupne za ostvarivanje jedinica.

Prilog 3 dostupan je samo u elektroničkoj inačici (www.bipm.org). U njemu se raspravlja o jedinicama za fotokemijske i fotobiološke veličine.

U prilogu 4 dane su neke napomene iz povijesti razvoja SI-ja.

Zaključujemo izražavanjem zahvalnosti članovima Savjetodavnoga odbora za jedinice (Comité Consultatif des Unités) CIPM-a koji je odgovoran za sastavljanje ove brošure. CCU i CIPM odobrili su končani tekst.

ožujka 2019.



B. Inglis,
predsjednik CIPM-a



J. Ullrich,
predsjednik CCU-a



M.J.T. Milton,
direktor BIPM-a

Napomena

Na temelju odluke CIPM-a iz 1997. godine 22. CGPM odlučio je 2003. godine da “decimalni znak mora biti točka ili zarez na crti pisanja”. Na temelju te odluke i običaja u ta dva jezika u ovome se izdanju kao decimalni znak u engleskome tekstu upotrebljava točka, a u francusko-me zarez. To nema nikakve posljedice za prijevod decimalnoga znaka na druge jezike. U zemljama engleskoga govornog područja u pisanju se pojavljuju male jezične varijacije¹ (na primjer *metre* i *meter*, *litre* i *liter*). U takvim slučajevima u ovdje danome engleskom tekstu slijedi se praksa iz niz norma ISO/IEC 80000, *Veličine i jedinice*. Međutim znakovi SI-ja za jedinice u ovoj brošuri isti su na svim jezicima.

Čitateljima treba napomenuti da je tekst službenih zapisnika sa sastanaka CGPM-a i sjedini-ca CIPM-a uvijek francuski tekst. U ovoj je brošuri dan tekst na engleskome jeziku, ali kad se zahtijevaju mjerodavne uputnice ili kad postoji sumnja u tumačenju teksta, potrebno je upotrijebiti francuski tekst.

¹ U ovom prijevodu na hrvatski jezik, kao decimalni znak upotrebljava se zarez u skladu s hrvatskom normom HRN EN ISO 80000-1. (napomena prevoditelja)

1 Uvod

1.1 SI i definicijske stalnice

Ova brošura prikazuje informacije o definiciji i uporabi međunarodnoga sustava jedinica, koji je općenito poznat kao SI (prema francuskome nazivu *Système international d'unités*), za koji je odgovorna Opća konferencija za utege i mjere (*Conférence Générale des Poids et Mesures*, CGPM). Na 11. CGPM-u 1960. godine formalno je definiran i uspostavljen SI te je nakon toga s vremena na vrijeme preinačivan kao odgovor na zahtjeve korisnika i napredak u znanosti i tehnici. Najnoviju i možda najvažniju reviziju SI-ja od njegova uspostavljanja proveo je 26. CGPM (2018.), a dokumentirana je u ovome 9. izdanju SI brošure. Konvencija o metru i njezina tijela, CGPM, Međunarodni odbor za utege i mjere (*Comité International des Poids et Mesures*, CIPM), Međunarodni ured za utege i mjere (*Bureau International des Poids et Mesures*; BIPM) i savjetodavni odbori opisani su u tekstu *BIPM i Konvencija o metru* na stranici 3.

SI je konzistentan sustav jedinica za uporabu u svim aspektima života, uključujući međunarodnu trgovinu, proizvodnju, sigurnost i zaštitu zdravlja, zaštitu okoliša i u temeljnim znanostima te se sva ta područja na njega oslanjaju. Sustav veličina koji se temelji na SI-ju i jednadžbe koje ih povezuju temelje se na postojećem opisu prirode te su dobro poznate svim znanstvenicima, tehnologima i inženjerima.

Definicije jedinica SI-ja utvrđene su s pomoću skupa od sedam definicijskih stalnica. Iz fiksnih vrijednosti tih definicijskih stalnica, koje se izražavaju s pomoću jedinica SI-ja, može se izvesti cijeli sustav jedinica. Tih sedam definicijskih stalnica temeljno je svojstvo definicije cijeloga sustava jedinica. Te su posebne stalnice odabrane nakon što su utvrđene kao najbolji izbor uzimajući u obzir da se prethodna definicija SI-ja temeljila na sedam osnovnih jedinica i znanstvenome napretku.

Za ostvarenje tih definicija mogu se upotrebljavati različite eksperimentalne metode koje su općenito opisali savjetodavni odbori Međunarodnoga odbora za utege i mjere (CIPM). Opisi ostvarenja također se nazivaju *mises en pratique*. Ostvarenja se mogu preinačivati kadgod se razvijaju novi pokusi; iz toga razloga u ovu brošuru nisu uključeni savjeti za ostvarenje definicija, ali se oni mogu dobiti na mrežnim stranicama BIPM-a.

1.2 Motivacija za uporabu definicijskih stalnica za definiranje SI-ja

Povijesno se jedinice SI-ja prikazuju s pomoću skupa koji danas čini sedam *osnovnih jedinica*. Sve se druge jedinice, koje se nazivaju *izvedenim jedinicama*, tvore kao umnošci potencija osnovnih jedinica.

Za osnovne jedinice upotrebljavali su se različiti tipovi definicija: posebna svojstva rukotvorina kao što je masa međunarodne pramjere za jedinicu kilogram, koje posebno fizičko stanje kao što je trojna točka vode za jedinicu kelvin, idealizirana eksperimentalna pravila kao u slučaju ampera i kandele ili prirodne stalnice kao što je brzina svjetlosti za definiciju metra.

Za bilo kakvu praktičnu uporabu te je jedinice potrebno ne samo definirati nego također i fizički ostvarivati kako bi se mogle diseminirati. U slučaju rukotvorina definicija je istovrijedna ostvarenju. Tako su postupale napredne drevne civilizacije. Premda je ta metoda jednostavna i jasna, za rukotvorine postoji rizik od gubitka, oštećenja ili njihove promjene. Druge vrste definicija sve su apstraktnije ili idealiziranije. U tome su slučaju ostvarenja pojmovno odvojena od definicija tako da se jedinice, načelno, mogu ostvariti neovisno na bilo kojemu mjestu i u bilo koje vrijeme. Osim toga s razvojem znanosti i tehnike načelno se mogu uvoditi nova bolja ostvarenja bez potrebe redefiniranja jedinice. Te se prednosti najjasnije vide u povijesti definicije metra od rukotvorine preko atomskoga referentnog prijelaza do fiksne bročane vrijednosti brzine svjetlosti, što je dovelo do definiranja svih jedinica s pomoću definicijskih stalnica.

Odabir osnovnih jedinica nikad nije bio jedinstven, nego se povijesno razvijao i postao blizak korisnicima SI-ja. Taj je opis s pomoću osnovnih i izvedenih jedinica zadržan i u postojećoj definiciji SI-ja, ali je preformuliran kao posljedica prihvatanja definicijskih stalnica.

1.3 Primjena SI-ja

Definicije jedinica SI-ja, kako je odlučio CGPM, predstavljaju najvišu referentnu razinu za mjernu sljedivost prema SI-ju.

Mjeriteljski instituti širom svijeta uspostavljaju praktična ostvarenja tih definicija kako bi se omogućila sljedivost mjerenja prema SI-ju. Savjetodavni odbori osiguravaju okvir za uspostavljanje istovrijednosti ostvarenja kako bi se uskladila svjetska sljedivost.

Normizacijska tijela mogu, kad je to potrebno, zainteresiranim stranama specificirati dodatne pojedinosti o veličinama i jedinicama te pravila za njihovu primjenu. Kad je riječ o jedinicama SI-ja, u tim se normama mora upućivati na definicije koje je dao CGPM. Mnoge su takve specifikacije dane na primjer u normama koje su izradile Međunarodna organizacija za normizaciju i Međunarodno elektrotehničko povjerenstvo (nizu međunarodnih norma ISO/IEC 80000).

Pojedine su države na temelju nacionalnoga zakonodavstva uspostavile pravila koja se odnose na uporabu jedinica za opću uporabu ili za posebna područja kao što su trgovina, zaštita zdravlja, javna sigurnost i izobrazba. U gotovo svim državama to se zakonodavstvo temelji na SI-ju. Međunarodna organizacija za zakonsko mjeriteljstvo (OIML) zadužena je za međunarodno usklađivanje tehničkih specifikacija toga zakonodavstva.

2 Međunarodni sustav jedinica

2.1 Definiranje jedinice koje veličine

Vrijednost veličine izražava se s pomoću umnoška broja i jedinice. Jedinica je jednostavno primjerak odgovarajuće veličine, definirane dogovorom koji se upotrebljava kao referencija, a broj je omjer vrijednosti veličine i jedinice.

Za posebnu veličinu mogu se upotrebljavati različite jedinice. Na primjer, vrijednost brzine v čestice može se izraziti kao $v = 25 \text{ m/s}$ ili $v = 90 \text{ km/h}$, pri čemu su metar u sekundi i kilometar na sat alternativne jedinice za istu vrijednost veličine brzine.

Prije iskazivanja mjernoga rezultata bitno je da se veličina koja se prikazuje prikladno opiše. Taj opis može biti jednostavan, kao u slučaju duljine kojega posebnog čeličnog štapa, ali može postati složeniji kad se zahtijeva veća točnost i kad je potrebno specificirati dodatne parametre kao što je temperatura.

Kad se navodi mjerni rezultat koje veličine, potrebno je navesti *procijenjenu vrijednost* mjerne veličine (veličine koju treba mjeriti) i *nesigurnost* pridruženu toj vrijednosti. Obje se izražavaju istom jedinicom.

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

2.2 Definicija SI-ja

Vrijednost temeljne stalnice kao i svake veličine može se izraziti kao umnožak broja i jedinice.

Definicijama u nastavku specificira se točna brojčana vrijednost svake stalnice kad se njezina vrijednost izražava odgovarajućom jedinicom SI-ja. Jedinica se definira fiksiranjem točne brojčane vrijednosti stalnice jer umnožak *brojčane vrijednosti* i *jedinice* treba biti jednak *vrijednosti* stalnice za koju je postulirano da je invarijanta.

Na takav je način odabrano sedam stalnica kako bi se svaka jedinica SI-ja mogla napisati s pomoću same definicijske stalnice ili umnožaka ili omjera definicijskih stalnica.

Međunarodni sustav jedinica (SI) sustav je jedinica u kojemu je:

- perturbirano temeljno stanje frekvencije hiperfinoga prijelaza cezijeva atoma $133 \Delta\nu_{\text{Cs}}$ jednako $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$
- brzina svjetlosti u vakuumu c jednaka $299\,792\,458 \text{ m/s}$
- Planckova stalnica h jednaka $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
- elementarni naboj e jednak $1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Boltzmannova stalnica k jednaka $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
- Avogadrova stalnica N_{A} jednaka $6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- svjetlosna djelotvornost K_{cd} jednobojnoga zračenja frekvencije $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 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 $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$.

Količnici jedinica SI-ja mogu se izražavati s pomoću kose crte (/) ili negativnoga eksponenta.

Na primjer, $\text{m/s} = \text{m s}^{-1}$,
 $\text{mol/mol} = \text{mol mol}^{-1}$

Brojčane vrijednosti sedam definicijskih stalnica nemaju nesigurnosti.

Tablica 1: Sedam definicijskih stalnica SI-ja i sedam odgovarajućih jedinica koje definiraju

Definicijska stalnica	Znak	Brojčana vrijednost	Jedinica
frekvencija hiperfinoga prijelaza stanja atoma Cs	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
brzina svjetlosti u vakuumu	c	299 792 458	m s^{-1}
Planckova stalnica	h	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
elementarni naboj	e	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
Boltzmannova stalnica	k	$1,389\,649 \times 10^{-23}$	J K^{-1}
Avogadrova stalnica	N_{A}	$6,022\,140\,76 \times 10^{23}$	mol^{-1}
svjetlosna djelotvornost	K_{cd}	683	lm W^{-1}

Pri svakoj promjeni međunarodnoga sustava jedinica uvijek je bilo bitno što je više moguće sačuvati njegov kontinuitet. Brojčane vrijednosti definicijskih stalnica odabrane su tako da budu sukladne s prijašnjim definicijama onoliko koliko to dopušta napredak znanosti.

2.2.1 Narav sedam definicijskih stalnica

Definicijske stalnice po svojoj naravi mogu biti temeljne prirodne stalnice i tehničke stalnice.

Uporabom stalnica za definiranje koje jedinice definicija se odvaja od ostvarenja. To pruža mogućnost da se s razvojem tehnike mogu razviti potpuno drukčija ili novija i bolja praktična ostvarenja bez potrebe za promjenom definicije.

Tehnička stalnica kao što je K_{cd} , svjetlosna djelotvornost jednobojnoga zračenja frekvencije 540×10^{12} Hz, odnosi se na koju posebnu primjenu. Ona se načelno može slobodno odabrati jer uključuje uobičajene fiziološke ili druge težinske faktore. Nasuprot tome temeljna prirodna stalnica općenito ne daje mogućnost takvoga izbora nego je povezana s drugim stalnicama preko fizičkih jednadžba.

Skup od sedam definicijskih stalnica odabran je tako da one osiguravaju temeljnu, stabilnu i univerzalnu referenciju te istodobno omogućuju praktična ostvarenja s najmanjim nesigurnostima. Tim se tehničkim dogovorima i specifikacijama također uzima u obzir povijesni razvoj.

Planckova stalnica h i brzina svjetlosti u vakuumu c prikladno su opisane kao temeljne. One određuju redom kvantna djelovanja i svojstva prostorvremena te jednako utječu na sve čestice i polja na svim razinama i u svakome okolišu.

Elementarni naboj e odgovara jakosti veze elektromagnetske sile preko stalnice fine strukture $\alpha = e^2/(2c\epsilon_0 h)$, pri čemu je ϵ_0 permitivnost ili električna stalnica. Neke teorije predviđaju promjenu stalnice α s vremenom. Međutim, eksperimentalne su granice najveće promjene stalnice α tako male da se može isključiti bilo kakav njezin učinak na predvidljiva praktična mjerenja.

Boltzmannova stalnica k stalnica je razmjernosti između veličina temperature (s jedinicom kelvin) i energije (s jedinicom džul), pri čemu se njezina brojčana vrijednost dobiva iz povijesnih specifikacija temperaturne ljestvice. Temperatura sustava razmjerna je toplinskoj energiji, ali ne nužno unutrašnjoj energiji sustava. U statističkoj fizici Boltzmannova stalnica povezuje entropiju S s brojem Ω dostupnih kvantnomehaničkih stanja, $S = k \ln \Omega$.

Cezijeva frekvencija $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, neperturbirano hiperfino cijepanje frekvencije temeljnoga stanja cezijeva atoma 133, ima karakter atomskoga parametra na koji može utjecati okoliš kao što su elektromagnetska polja. Međutim, dobro je poznato da je taj temeljni prijelaz stabilan te je dobar izbor kao referentni prijelaz na temelju praktičnih razmatranja. Odabirom atomskoga parametra kao što je $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ne odvajaju se definicija i ostvarenje kao što su h , c , e ili k , ali se specificira referencija.

Avogadrova stalnica N_{A} stalnica je razmjernosti između veličine količine tvari (s jedinicom mol) i veličine broja entiteta (s jedinicom jedan, znak 1). Prema tome, ona ima karakter stalnice razmjernosti sličan Boltzmannovoj stalnici k .

Svjetlosna djelotvornost jednobojnoga zračenja frekvencije 540×10^{12} Hz, K_{cd} , tehnička je stalnica koja daje točan brojčani odnos između čisto fizičkih značajka izračene snage koja podražava ljudsko oko (W) i njegova fotobiološkoga odziva, koji je definiran svjetlosnim tijekom koji je izazvan sposobnošću spektralnoga odziva prosječnog opažača (lm) na frekvenciji od 540×10^{12} herca.

2.3 Definicije jedinica SI-ja

Prije prihvaćanja definicija iz 2018. godine SI je bio definiran s pomoću sedam *osnovnih jedinica* iz kojih su se tvorile *izvedene jedinice* kao umnošci potencija *osnovnih jedinica*. Definiranje SI-ja fiksiranjem brojčanih vrijednosti sedam definicijskih stalnica ima za posljedicu da to razlikovanje načelno nije potrebno jer se sve jedinice, *osnovne* i *izvedene*, mogu tvoriti izravno iz definicijskih stalnica. Ipak je zadržan pojam osnovnih i izvedenih jedinica, ne samo zbog toga što je koristan i povijesno dobro uspostavljen, nego i stoga što se u nizu norma ISO/IEC 80000 specificiraju osnovne i izvedene veličine koje nužno odgovaraju ovdje definiranim osnovnim i izvedenim jedinicama.

2.3.1 Osnovne jedinice

Osnovne jedinice SI-ja dane su u tablici 2.

Tablica 2: Osnovne jedinice SI-ja

Osnovna veličina		Osnovna jedinica	
Naziv	Tipični znak	Naziv	Znak
vrijeme	t	sekunda	s
duljina	l, x, r itd.	metar	m
masa	m	kilogram	kg
vrijeme	t	sekunda	s
električna struja	I, i	amper	A
termodinamička temperatura	T	kelvin	K
količina tvari	n	mol	mol
svjetlosna jakost	I_{v}	kandela	cd

Znakovi veličina, koji su *preporuke*, općenito su pojedinačna slova latinice ili grčkoga alfabeta i pišu se kurzivom. Znakovi su jedinica *obvezatni* i pišu se uspravno, vidi poglavlje 5.

Polazeći od definicije SI-ja s pomoću fiksnih brojevanih vrijednosti definicijskih stalnica izvedene su definicije svih sedam osnovnih jedinica uporabom jedne ili, po potrebi, više definicijskih stalnica, što daje sljedeći skup definicija:

Sekunda

Sekunda, znak s, jedinica je vremena SI-ja. Ona se definira tako da se uzme da je brojčana vrijednost cezijeve frekvencije $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ neperturbiranoga temeljnog stanja hiperfino-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} .

Ta definicija podrazumijeva točan odnos $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$. Invertiranjem te relacije dobiva se izraz za jedinicu sekundu s pomoću vrijednosti definicijske stalnice $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

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

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 ^{133}Cs .

Referencija na naperturbirani atom namijenjena je da bude jasno da se definicija sekunde SI-ja temelji na izoliranome cezijevu atomu koji nije perturbiran nikakvim vanjskim poljem kao što je zračenje crnoga tijela u okolišu.

Tako definirana sekunda jedinica je pravoga vremena u smislu opće teorije relativnosti. Za osiguranje usklađene vremenske ljestvice kombiniraju se signali različitih primarnih satova na različitim mjestima koje treba korigirati zbog relativističkih pomaka cezijeve frekvencije (vidi točku 2.3.6).

CIPM je prihvatio različite sekundarne prikaze sekunde, koji se temelje na odabranome broju spektralnih linija atoma, iona ili molekula. Neperturbirane frekvencije tih linija mogu se odrediti s relativnom nesigurnošću koja nije manja od ostvarenja sekunde na temelju hiperfinoga frekvencijskog prijelaza atoma ^{133}Cs , ali se neke mogu obnoviti sa znatno većom stabilnošću.

Metar

Metar, znak m, jedinica je duljine SI-ja. On se 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^{-1} , pri čemu je sekunda definirana s pomoću stalnice $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Ta definicija podrazumijeva točan odnos $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$. Invertiranjem te relacije dobivamo točan izraz za jedinicu metar s pomoću definicijskih stalnica c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

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

Iz te definicije proizlazi da je jedan metar jednak duljini puta što ga svjetlost prevari u vakuumu tijekom vremenskoga odsječka s trajanjem od $1/299\,792\,458$ sekunda.

Kilogram

Kilogram, znak kg, jedinica je SI-ja za masu. On se definira 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 koja je jednaka $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, pri čemu su metar i sekunda definirani s pomoću stalnica c i Δv_{Cs} .

Ta definicija podrazumijeva točan odnos $h = 6,626\,070\,040 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-1}$. Invertiranjem te relacije dobiva se točan izraz za kilogram s pomoću triju definicijskih stalnica h , Δv_{Cs} i c :

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^2 \text{ s}^{-1},$$

što je jednako

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

Iz te definicije proizlazi da treba definirati jedinicu $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ (jedinicu fizičkih veličina djelovanja i kutnoga momenta). To zajedno s definicijama sekunde i metra dovodi do definicije jedinice mase koja se izražava s pomoću vrijednosti Planckove stalnice h .

Prijašnjom se definicijom kilograma fiksirala vrijednost mase međunarodne pramjere kilograma, $m(\mathcal{K})$, tako da bude jednaka točno jednomu kilogramu, a vrijednost Planckove stalnice h trebala je biti određena pokusom. Sadašnjom se definicijom fiksira točna vrijednost stalnice h , a masa pramjere sada treba biti određena pokusom.

Za brojčanu vrijednost Planckove stalnice u toj je definiciji odabran broj takav da je u trenutku njezina prihvaćanja kilogram bio jednak masi međunarodne pramjere, $m(\mathcal{K}) = 1 \text{ kg}$, s relativnom standardnom nesigurnošću od 1×10^{-8} , što je u to vrijeme bila standardna nesigurnost sastavljenih najboljih procjena vrijednosti Planckove stalnice.

Napominjemo također da se s postojećom definicijom primarna ostvarenja mogu načelno uspostaviti u svakoj točki na masenoj ljestvici.

Amper

Amper, znak A, jedinica je električne struje SI-ja. On se definira 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, koja je jednaka A s, pri čemu je sekunda definirana s pomoću stalnice Δv_{Cs} .

Ta definicija podrazumijeva točan odnos $e = 1,602\,176\,620\,8 \times 10^{-19} \text{ A s}$. Invertiranjem te relacije dobiva se točan izraz za jedinicu amper s pomoću definicijskih stalnica e i Δv_{Cs} :

$$1 \text{ A} = \left(\frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1},$$

što je jednako

$$1 \text{ A} = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})} \Delta v_{\text{Cs}} e \approx 6,789\,6868 \times 10^8 \Delta v_{\text{Cs}} e.$$

Iz te definicije proizlazi da je amper jednak električnoj struji koja odgovara tijeku od $1/(1,602\,176\,636\,8 \times 10^{-19})$ elementarnih naboja u sekundi.