

mjerenje u riječi i slici

Uređuje: Mirko Klaić, dipl. ing.

MJERITELJSTVO ELEKTRIČNIH VELIČINA

Općenito o mjerenju

Prema »Međunarodnom rječniku temeljnih i općih mjeriteljskih pojmova« (u daljnjem tekstu samo *Rječnik*) *mjerenje* je »skup djelovanja radi određivanja vrijednosti veličine«. To se postiže usporedbom mjerene veličine s nekim odabranim jediničnim iznosom, tj. jedinicom. Njihov omjer iskazujemo brojačno, što predstavlja mjeriteljsku informaciju koju nazivamo mjernim rezultatom. Npr., pri mjerenju duljine možemo napisati jednadžbu: duljina = brojačni iznos \times jedinica, odnosno simbolički $l = \{l\} \times [l]$.

Jedinica, u načelu, može biti bilo koja. Da bismo rezultate više mjerenja iste veličine mogli uspoređivati, valja uvijek upotrebljavati istu jedinicu koja treba biti definirana s najmanjom mogućom nesigurnošću.

S napretkom znanosti, industrije i trgovine rasla je potreba da se iste veličine posvuda mjere istim mjernim jedinicama, dok je s druge strane proširivanje naših spoznaja o fizikalnim zakonitostima pokazalo, i nadalje to potvrđuje, da između fizikalnih veličina vrijede postojani odnosi. To nas upućuje na međusobno usklađivanje mjernih jedinica različitih veličina u jedan koherentan sustav.

U današnje doba gotovo u cijelom svijetu u znanosti, tehnici, trgovini i ostalim granama ljudskog djelovanja rabe se mjerne jedinice koje čine *Međunarodni sustav jedinica* (SI). Njegovo uvođenje i primjena određeni su rezolucijom Opće konferencije za mjere i utege (CGPM) na 11. zasjedanju 1960. godine, dok je većina jedinica sustava SI postojala i prije, ali ne i međunarodna suglasnost za njihovu primjenu. No, neke anglosaksonske zemlje i dalje u svakodnevnom životu (tisak, televizija pa i neke stručne publikacije) rabe svoje jedinice (pound, yard, itd.). Razlog tomu je svakako povijesno naslijeđe, ali i njihovo prihvatanje već u djetinjstvu, kad se stvaraju predodžbe o njima te postaju sastavni dio života, pa je prilagodba na nove jedinice teška i dugotrajna.

Međunarodni sustav jedinica (SI)

Temelj tog sustava čini sedam osnovnih (polaznih) jedinica za isti broj veličina. *Osnovne* veličine i pripadne jedinice SI s normiranim znakovima prikazane su na slici 1. Znakovi jedinica pišu se uspravnim slovima (neka od njih su mala, a neka velika), dok se znakovi veličina pišu *kosim* (kurziv) slovima (npr. $m = 1,5$ kg). Tog se pravila treba strogo pridržavati kako ne bi došlo do pomutnje i nerazumijevanja, npr. da se zamijeni masa m sa m (znakom metra). Od osnovnih jedinica stvaraju se *izvedene* jedinice, koje mogu biti *imenovane* (tj. s posebnim nazivom) poput *farada*, *paskala* ili *volta*, te *neimenovane*, tj. bez posebnog naziva, kao što je npr. m^2 (četvorni metar), rad/s (jedinica kutne brzine), itd. Upotrebljavaju se i iznimno dopuštene jedinice izvan SI, kao npr. *litra* (l ili L), *vatsat* (Wh) i dr., te mješovite jedinice, kao što je *kilometar na sat* (km/h).

Relativne mjerne nesigurnosti (nesigurnost se općenito označava sa u) s kojima poznajemo pojedine osnovne jedinice vrlo su neujednačene. Trenutačno je vrlo mala nesigurnost pridijeljena jedinici vremena ($3 \cdot 10^{-15}$), dok su nesigurnosti ostalih jedinica daleko veće, npr. jedinice duljine $1 \cdot 10^{-12}$, jedinice

električne struje $4 \cdot 10^{-8}$ ili jedinice termodinamičke temperature $3 \cdot 10^{-7}$.

Jedinice elektromagnetizma i njihovo ostvarivanje

U području elektromagnetizma jedina osnovna jedinica jest *amper*, jedinica jakosti električne struje. Prema definiciji *ampera* iz 1948. godine, to je »ona stalna struja koja prolazeći dvama ravnim, paralelnim, neizmjerljivo dugačkim vodičima, zanemarivo malenog poprečnog presjeka, razmaknutim jedan metar u vakuumu, prouzrokuje između njih silu jednaku $2 \cdot 10^{-7}$ N po metru duljine«. Ovakvom definicijom ampera zapravo je propisana (uzeta kao apsolutno točna, tj. »per definitionem«) vrijednost *prirodne stalnice* μ_0 (permeabilnost vakuuma) jednaka $4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A². S druge strane, posljednja definicija jedinice duljine iz 1983. godine definira *metar* kao duljinu puta koju svjetlost prijeđe u vakuumu za vrijeme 299 792 458-og dijela sekunde. Time je ujedno definirana vrijednost *brzine svjetlosti u vakuumu* $c \equiv 299 792 458$ m/s i uzeta kao apsolutno točna, bespogrešna, jednako kao i μ_0 . Nadalje, Maxwellovom jednadžbom $c^2 \mu_0 \epsilon_0 = 1$ određen je odnos pomoću kojega i *dielektričku stalnicu vakuuma* ϵ_0 možemo smatrati jednakom $8,854 187 817 \dots \cdot 10^{-12}$ F/m i točno poznatom, tj. bespogrešnom.

S obzirom da se npr. *farad* ostvaruje Thompson-Lampardovim računskim etalonom kapaciteta (nesigurnost približno $2 \cdot 10^{-8}$), time se oslanja na osnovnu jedinicu iz mehanike, duljinu, i bespogrešnu stalnicu ϵ_0 . Na taj način izvedena jedinica *farad* ne ovisi o osnovnoj jedinici *amper*, a navedene brojke jasno ukazuju da se može i točnije odrediti. To je vrlo značajno zbog njegovog ostvarivanja, kao što je mjeriteljski pogodno bilo koju mjernu veličinu povezati s frekvencijom (tj. uporabiti onu mjernu metodu koja se oslanja na mjerenje frekvencije), jer je u usporedbi s ostalim veličinama nesigurnost njezina poznavanja iščezavajuće mala. Trenutačno stanje povezivanja i ostvarivanja jedinica elektromagnetizma prikazano je slikom 2.

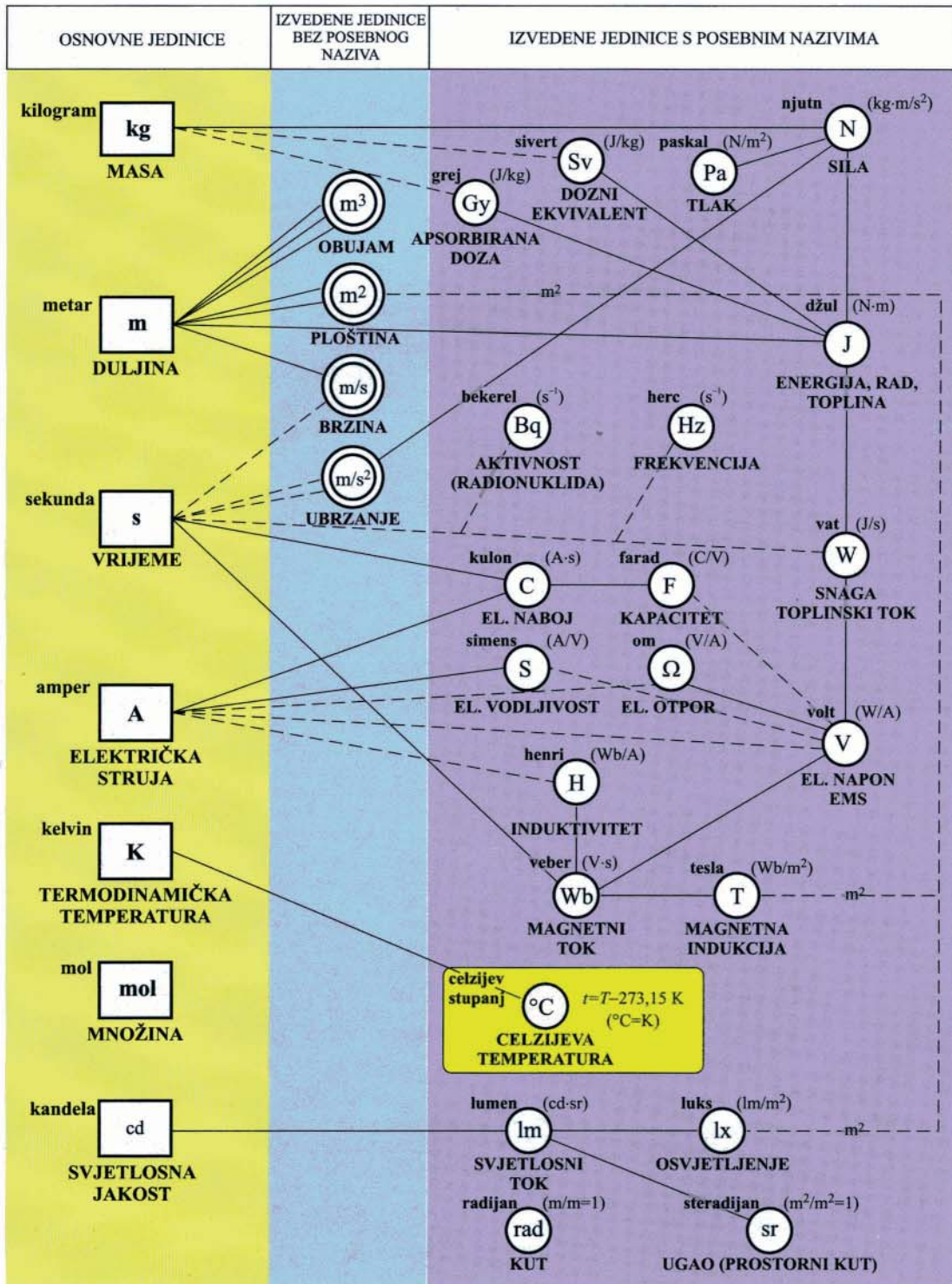
U pravilu, teško je ostvariti jedinicu doslovno prema njezinoj definiciji, što je sasvim jasno i razumljivo na primjeru *ampera*, jer su neizmjerljivo dugački vodiči zanemarivo malenog kružnog presjeka apsolutno neostvarivi. Stoga se za ostvarivanje jedinice jakosti električne struje upotrebljavala *strujna vaga*. Klasične izvedbe strujnih vaga, koje su razvijane do kraja šezdesetih godina prošlog stoljeća, unatoč najpreciznijoj izradi i pažljivoj mjernom postupku, dosegnule su razinu nesigurnosti ostvarenog *ampera* od $\approx 3 \cdot 10^{-6}$.

Posljednjih tridesetak godina, u više svjetskih mjeriteljskih institucija nastoji se *amper* ostvariti na drukčiji način, oslanjajući se na Ohmov zakon te ostvarivanje jedinice napona i otpora. *Volt* se može ostvariti *naponskom vagom*, kod koje se na jednom kraku nalazi uteg mase m , dok se na drugom kraku nalazi ovješena jedna elektroda koja s drugom pomičnom elektrodom čini linearno promjenjivi kondenzator. Zato se naponskom vagom uspoređuje elektrostatička sila između elektroda, na koje je priključen stalan napon U , s težinom utega $F = mg$. Konačna relacija koja predstavlja načelo rada naponske vage glasi:

$$U = \sqrt{\frac{2mg}{\partial C / \partial s}}$$

SI SUSTAV: VEZE OSNOVNIH I IZVEDENIH JEDINICA

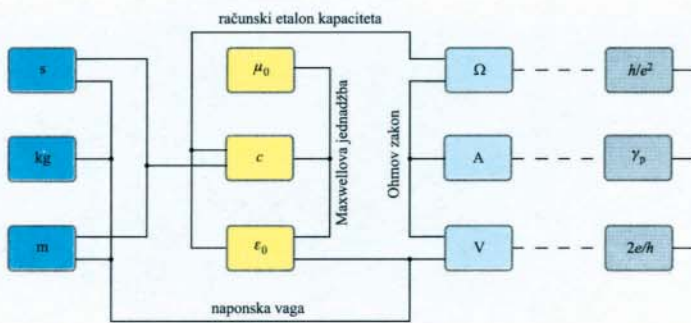
PUNE LINIJE OZNAČAVAJU MNOŽENJE, A ISPREKIDANE DIJELJENJE



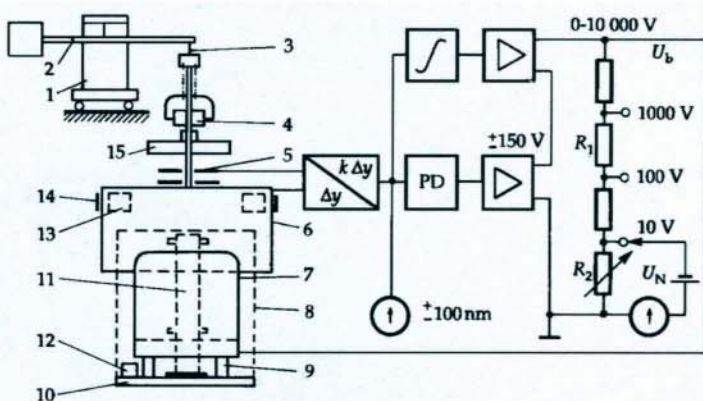
Sl. 1. Veza između osnovnih i izvedenih jedinica SI sustava

Iz ovog izraza očito je da se volt određuje na temelju metra, sekunde i kilograma te propisane vrijednosti stalnice ϵ_0 . Na taj način se izvedena jedinica elektromagnetizma, volt, dobiva izravno iz jedinica mehanike, što pruža mogućnost da se, osim farada i oma, i ona ustanovi nezavisno od ampera, pa samim time niti ne ovisi o točnosti njezina poznavanja (slika 3). U usporednim pokusima s naponskim vagama u svega nekoliko vodećih svjetskih mjeriteljskih instituta sudjelovao je sa svojom naponskom vagom (tzv. Beginom vagom) i Zavod za osnove elektrotehnike i električna mjerenja FER-a u Zagrebu, a postignute relativne mjerne nesigurnosti su za red veličine manje negoli sa strujnim vagama (oko $3 \cdot 10^{-7}$). Mjerenja ovim vagama tijekom osamdesetih godina potvrdila su nesuglasje između SI volta i volta za kojeg se vjerovalo da je u skladu sa SI sustavom pa je s 1. siječnja 1990. ispravljen za približno osam milijuntinki ($\approx 8 \cdot 10^{-6}$).

U posljednjih petnaestak godina razvijen je novi tip vage, koja se može promatrati i kao strujna i kao naponska vaga istodobno, jer zapravo proizvodi SI jedinicu električne snage, vat. Tom vagom s pomičnim svitkom (engl. Moving-Coil Balance), ili

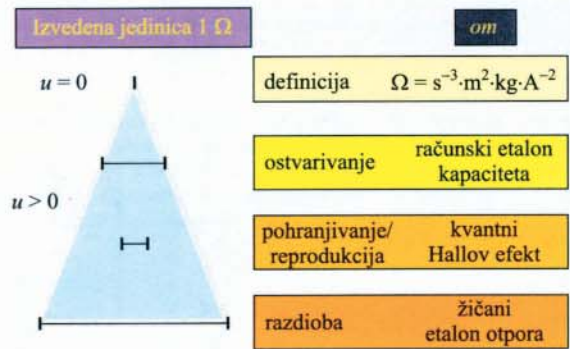


Sl. 2. Povezivanje jedinica i njihova realizacija



Sl. 3. Shematski prikaz Naponske vage ETF-84: 1 – nosač vage; 2 – krak vage s protuutegom; 3 – elastične vrpce; 4 – uteg; 5, 13 i 14 – kapacitivni pretvornici redom vertikalnog pomaka, horizontalnog pomaka i zakreta; 6 – zavješena elektroda; 7 – VN elektroda; 8 – okrilje; 9 – izolatori; 10 – pomično postolje za (višepločastu) VN elektrodu; 11 – vodeća osovina; 12 – elektronička libela; 15 – podizač utega

skraćeno **vatna vaga**, mjerenje se obavlja u dva koraka. U prvom koraku kroz svitak teče stalna struja I , a vaga se uravnotežuje gravitacijskom silom utega mase m , dok se u drugom koraku, kada svitkom ne teče struja, njegovim pomicanjem stalnom brzinom v u magnetskom polju permanentna magneta inducira napon U . Odavde se dobiva da je $UI = mgv$ pa se, uz mjerenje pada napona na poznatom otporu R kojim teče struja I , ovom



Sl. 4. Točnosna piramida ostvarivanja i pohranjivanja jedinice otpora

vagom umjesto snage u konačnici određuje napon. Tako je u engleskom NPL-u, tzv. Kibbeovom vagom, volt ostvaren uz relativnu mjernu nesigurnost od samo $5 \cdot 10^{-8}$.

Pohranjivanje jedinica

Ostvarivanje jedinica ovakvim ili sličnim napravama ili uređajima (tzv. pramjerilima) vrlo je složeno i relativno dugotrajno. Stoga se njima ostvarene vrijednosti za svakodnevnu uporabu pohranjuju primarnim, sekundarnim te radnim etalonima.

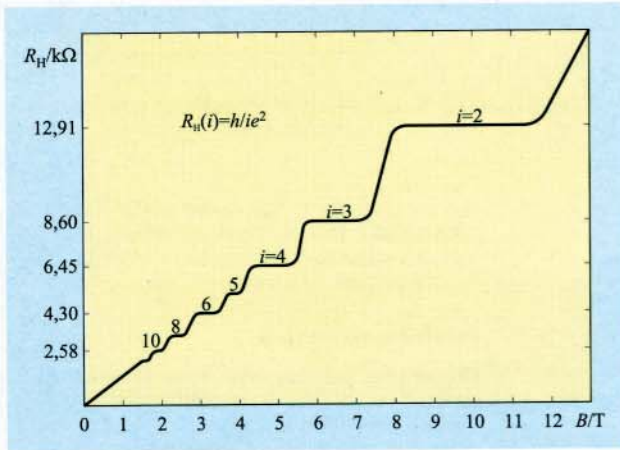
Na slici 4 je kao primjer uzeta jedinica električnog otpora, *om*. Definicija te jedinice u SI sustavu je bespogrešna (tj. njezina je nesigurnost jednaka ničiti). Ona se najvećom dostiživom točnošću ostvaruje pramjerilom (računskim etalomom kapaciteta) kojim se jedinica otpora može povezati preko $C \rightarrow R$ veze pomoću niza usporedbenih mjernih metoda. Nakon toga slijedi njezino pohranjivanje, odnosno reprodukcija, pomoću primarnog etalona (u ovom slučaju temeljenog na kvantnom Hallovom efektu, čija je nesigurnost čak manja od nesigurnosti ostvarivanja *oma*), te daljnja razdioba preko sekundarnih etalona (npr. klasičnih žičanih etalona otpora). Sličan prikaz dobili bismo kod razmatranja jedinice električnog napona; tako bismo kod ostvarivanja te jedinice naveli naponsku (ili vatnu) vagu te kvantni etalon napona kao primarni etalon. Upravo su se kvantni etaloni, temeljeni na prirodnim pojavama koje se odlikuju stalnošću i ponovljivošću, a definirane su temeljnim fizikalnim stalnicama (konstantama), nametnuli u novije vrijeme kao primarni etaloni za pohranjivanje jedinica (posebice napona i otpora).

Kvantni mjeriteljski trokut $U - I - f$

Kvantni mjeriteljski trokut čine temeljna otkrića makroskopskih manifestacija kvantnih zakoničnosti, koja su uvelike promijenila vrhunsko mjeriteljstvo električnih veličina.

Pojavu kvantizacije dvodimenzionalnog elektronskog plina u polju visoke indukcije ($B > 5$ T) pri niskim temperaturama ($T < 1,5$ K) otkrio je Klaus von Klitzing (Nobelova nagrada 1985.

godine). **Kvantni Hallov efekt (QHE)** ostvaruje se uglavnom GaAs/AlGaAs heterostrukturama. Hallov otpor jednak je $R_H(i) = h/ie^2 = R_K/i$, gdje cijeli broj i određuje plato u U_H - B karakteristici na kojem je Hallov napon U_H stalan (slika 5), dok je von Klitzingova stalnica $R_K = h/e^2$ (e je elementarni naboj, a h Planckova stalnica). Od 1. siječnja 1990. godine jednoznačno se širom svijeta za praktično pohranjivanje SI *oma* rabi vrijednost von Klitzingove stalnice $R_{K-90} = 25\,812,807\ \Omega$, a vjeruje se da je time pohranjena jedinica otpora u skladu sa SI *omom* uz relativnu nesigurnost od $2 \cdot 10^{-7}$, premda je nesigurnost kojom se reproducira Hallov otpor čak bolja od $1 \cdot 10^{-9}$.

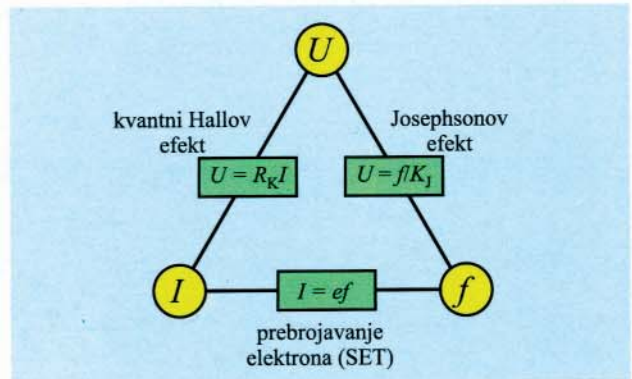


Sl. 5. Kvantiziranje Hallovog otpora u ovisnosti o magnetskoj indukciji pri $T < 0,5\ K$

Kvantni etalon napona temelji se na izmjeničnom Josephsonovom efektu, za čije otkriće je Brian D. Josephson dobio Nobelovu nagradu 1973. god. Spoj dvaju supravodiča, odijeljenih izolacijom nanometarskog reda veličine, ozračuje se VF poljem i dobiva stepeničasta ovisnost generiranog istosmjernog napona o struji koja prolazi kroz spoj. Razlika između dviju stepenica u U - I karakteristici Josephsonova spoja jednaka je $U = hf/(2e)$, gdje je f frekvencija VF zračenja kojom se ozračuje spoj, dok je Josephsonova stalnica $K_J = 2e/h$. Kad kroz spoj propustimo struju koja odgovara n -toj stepenici, generirani napon bit će jednak $U_n = nU = nf/K_J$. Za pohranjivanje *volta* u skladu sa SI sustavom primjenjuje se (jednoznačno) od 1. siječnja 1990. godine preporučena vrijednost Josephso-

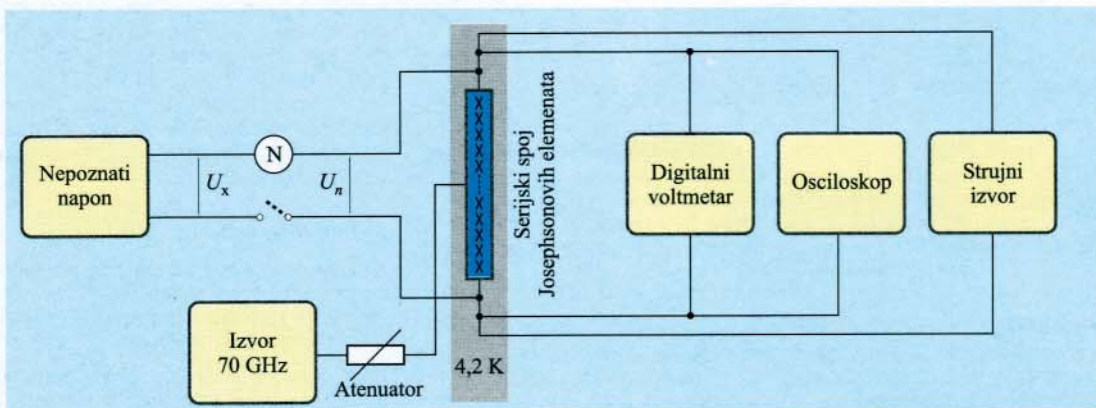
nove stalnice $K_{J-90} = 483\,597,9\ \text{GHz/V}$, za koju se vjeruje da osigurava skladnost sa SI *voltom* uz relativnu nesigurnost od $4 \cdot 10^{-7}$. No, pri definiranju stalnice K_{J-90} nije prejudicirana jednakost $K_{J-90} = 2e/h$, kao što nije mijenjana definicija SI jedinice napona. Napon generiran po jednom spoju je maksimalnog iznosa od oko $500\ \mu\text{V}$, pa se za dobivanje viših napona rabi polje serijski povezanih Josephsonovih spojeva (npr. njih 20 000 za napone do 10 V) ostvarenih na jednom čipu (integriranom sklopu), a blok-shema kvantnog etalona napona prikazana je na slici 6.

Metodom **prebrojavanja elektrona (SET)**, koja izrazom $I = ef$ dovodi u vezu jakost struje i frekvenciju, zatvoren je kvantni mjeriteljski trokut U - I - f (slika 7). Elektronska pumpa, kao osnovni dio SET-a, sastoji se od tri ili više u niz povezanih tunelirajućih spojeva izvedenih u supravodljivoj nanometarskoj tehnologiji, a na svako spojno mjesto (otočić) preko pripadnih



Sl. 7. Kvantni mjeriteljski trokut U - I - f

kapacitivnih vratiju spojen je upravljački napon. Ako se u statičkoj radnoj točki, kad elektroni iz odašiljačkog elementa ne mogu prolaziti, na vratima pojave izmjenični i fazno pomaknuti RF upravljački naponi frekvencije f , tada će započeti transport po jednog elektrona za svaki period RF signala, odnosno krugom će upravo teći struja $I = ef$. Npr., s $f = 10\ \text{MHz}$ ostvarila bi se $I = 1,6\ \text{pA}$, što je vrlo malo te iziskuje pojačanje od najmanje 10^4 da bi se dobila struja koja se može mjeriti zadovoljavajućom točnošću. Vjeruje se da bi, osim u računarstvu (logički sklopovi i memorije), SET sklopovi mogli poslužiti i za ostvarivanje etalona kapaciteta ($C = Ne/\Delta U$, gdje je N broj elektrona doveden u kondenzator, a ΔU time prouzročena promjena napona), u termometriji te drugdje.



Sl. 6. Blok-shema kvantnog etalona napona

Ostvarivanje jedinice mase

U današnjem SI sustavu masa je posljednja jedinica koja se oslanja na jednu fizičku pramjeru (pažljivo izrađen Pt-Ir valjkasti uteg), koja se već više od stotinu godina čuva u BIPM-u (slika 8.). Procjenjuje se da dugotrajna stalnost pramjere i njezinih kopija nije lošija od $5 \mu\text{g}/\text{god}$ (relativno $5 \cdot 10^{-9}/\text{god}$), iako nije poznat pravi uzrok te promjene. Da bi se sadašnja definicija **kilograma** zamijenila novom, temeljenom na prirodnim stalnicama, potrebno je da masa stabilne elementarne čestice ili atoma bude ostvariva s relativnom nesigurnošću reda $1 \cdot 10^{-8}$ na razini 1 kg. Tada bi nova definicija mogla glasniti: *kilogram je jednak masi od n_X slobodnog X u stanju mirovanja*, gdje je X čestica poput elektrona ili protona, ili pak atom. Ovdje je $n_X = \{1/m_X\} = \{N_A/M_X\}$, gdje je m_X masa od X u (današnjim) kilogramima, N_A je Avogadrova stalnica, a M_X je molarna masa od X. Kako se molarna masa čestice (npr. elektrona) ili atoma određuje s nesigurnošću reda veličine 10^{-9} , kilogram bi mogao biti definiran brojem n_e elektrona mase m_e , ako bi se N_A odredilo s nesigurnošću $1 \cdot 10^{-8}$ (prema posljednjem usklađivanju prirodnih stalnica iz 1998. godine njezina je nesigurnost $7,9 \cdot 10^{-8}$).



Sl. 8. Pt-Ir uteg kojim je definiran kilogram

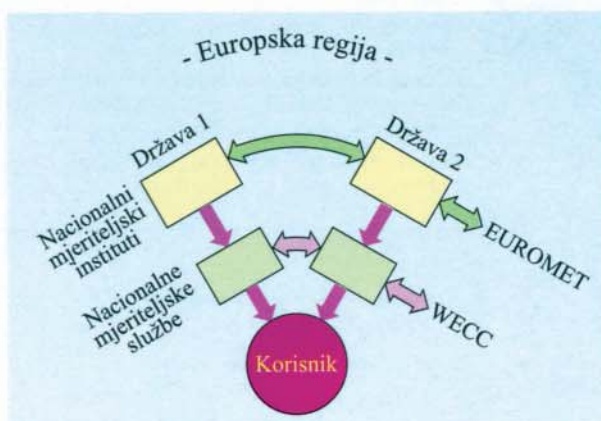
Posljednjih 12 godina više svjetskih vrhunskih mjeriteljskih laboratorija (NIST, PTB, IMGIC te drugi), uz primjenu vrlo složenih postupaka, surađuje na *izravnom* određivanju Avogadrove stalnice. Ti se pokusi temelje na posve čistim i gotovo savršenim kristalima silicija; mjerenjima se određuje stalnica atomske rešetke i gustoća silicija što je, uz njegovu molarnu masu, potrebno poznavati da bi se odredilo N_A . Do sada je ostvarena relativna mjerna nesigurnost na razini 10^{-7} .

Neizravnim putem Avogadrova stalnica može se odrediti usporedbom mehaničke i električne energije, tj. realizacijom (SI) *vata*, *volta* ili *ampera*, odnosno preko Planckove stalnice h . U tu svrhu mogu se rabiti neke od spomenutih vaga (npr. vatne), s kojima se trenutačno eksperimentira. Očito je da u ovom trenutku niti jedna od navedenih metoda nije dovoljno dobra da bi se na njoj temeljila redefinicija *kilograma*, ali bi njihovo usavršavanje moglo pomoći u praćenju promjena pramjere i njezinih kopija.

Mjeriteljska sljedivost

Međunarodna trgovina, industrijska proizvodnja, medicina, zaštita okoliša, znanost te ostale ljudske djelatnosti općenito su nezamislivi bez točnih mjerenja, ali isto tako mjerni rezultati imaju svoju težinu tek onda kad su iskazani na svima razumljiv i jednoznačan način. Ishodište današnjeg, međunarodno prihvaćenog, metričkog sustava seže do 20. svibnja 1875., kada

su ovlaštene predstavnici 17 zemalja potpisali u Parizu *Konvenciju o metru*. Njome je ustanovljeno vrhovno međunarodno tijelo za područje mjeriteljstva, CGPM, te BIPM i izvršno tijelo CIPM (koje djeluje kroz deset savjetodavnih odbora te prema *preporuke* Općoj konferenciji što će ih ona, u slučaju prihvaćanja, objaviti kao svoje zaključke). Uloga je BIPM-a pohranjivanje međunarodnih pramjera, mjeriteljski razvoj te međunarodno uspoređivanje etalona različitih veličina za potrebe zemalja članica. Do danas se broj zemalja potpisnica Konvencije povećao na 50 (Hrvatska nije među njima), a njihovi predstavnici mahom dolaze iz nacionalnih mjeriteljskih instituta (NMI-a), u kojima se obavljaju mjerenja i istraživanja u području vrhunskog mjeriteljstva; nije slučajno da vodeći svjetski instituti (PTB, NIST, NPL, ETL, IEN, i dr.) pripadaju industrijski najrazvijenijim zemljama. Sljedivost (prema *Rječniku* »svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti etalona da se sljedivom neprekidnog lanca usporedbi, od kojih svaka ima određenu nesigurnost, oslanja na odgovarajući etalon, obično na međunarodni ili nacionalni«) se na ovoj razini osigurava kroz međulaboratorijske usporedbe u pojedinoj regiji (npr. u EUROMET-u su mahom članice Europske unije; slika 9), a dakako da postoji i međuregionalna suradnja. Jedna od zadaća NMI-a je pohranjivanje nacionalnih etalona (prihvaćenih službenom državnom odlukom kao ishodišne točke različitih fizikalnih veličina u državi) pa se takvim usporedbama osigurava sljedivost prema međunarodnim etalonima T_0 , dakako, nije prikladno za provedbu velikog broja umjeravanja za potrebe korisnika koji posjeduju mjernu opremu koju valja umjeriti (tj. provjeriti i/ili uskladiti mjeriteljska svojstva sa zahtijevanim), a čija je točnostna razina za više redova veličina niža od npr. primarnog etalona. U tu svrhu svaka država zasebno organizira svoju (nacionalnu) mjeriteljsku službu kroz sustav akreditiranih mjeriteljskih laboratorija koji pak, u regionalnom okviru, provode međusobne usporedbe. Na slici 9 prikazan je primjer za zapadnoeuropsko okružje, gdje se usporedbe provode unutar WECC-a.



Sl. 9. Regionalno (kao primjer zapadnoeuropsko) osiguranje sljedivosti na dvije razine primjenom međulaboratorijskih usporedbi

Zadaća je nacionalne mjeriteljske službe da osigura sljedivost svakog mjernog rezultata do nacionalnog etalona, pa tako mjeriteljski laboratoriji ostvaruju svoje sljedivne sustave kroz tzv. točnostne piramide (slika 10). U tom prelijevanju sljedivosti s jedne na drugu točnostnu razinu nesigurnost prethodne razine treba biti višestruko manja (barem 4 do 5 puta) u odnosu na sljedeću, što se osigurava primjenom odgovarajućih mjernih uređaja i mjernih metoda.

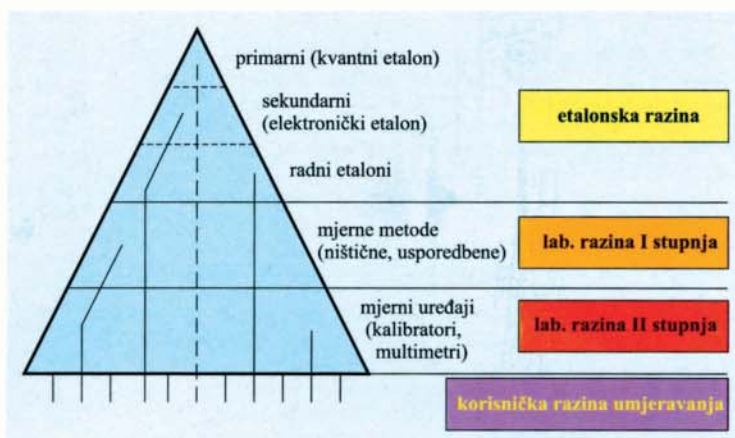
U Hrvatskoj ne postoji NMI u obliku kao što je to slučaj kod većeg broja razvijenih zemalja (kompleks zgrada s većim brojem znanstvenih laboratorija u kojem radi i više stotina osoba),

već samo mali broj zasebnih laboratorija u okviru drugih institucija (npr. PEL na FER-u, Laboratorij za precizna mjerenja dužina i Laboratorij za procesna mjerenja na FSB-u ili neki drugi) koji su k tomu dislocirani. Zbog toga je, u ovom trenutku, jedini mogući put uspostave našeg NMI-a kroz sustav (prostorno odvojenih) mjeriteljskih laboratorija u kojima bi se čuvali nacionalni etaloni za pojedine veličine (neki od njih tek trebaju biti proglašeni), ali koordinirani preko DZNM-a.

Popis uporabljenih kratica

- BIPM – Bureau International des Poids et Mesures (Međunarodni ured za mjere i utege), Sèvres, France
- CGPM – Conférence Générale des Poids et Mesures (Opća konferencija za mjere i utege)
- CIPM – Comité International des Poids et Mesures (Međunarodni odbor za mjere i utege)
- DZNM – Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb
- ETL – Electrotechnical Laboratory, Tsukuba, Japan
- EUROMET – European Collaboration in Measurement Standards
- FER – Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu (stari naziv Elektrotehnički fakultet – ETF)
- FSB – Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu
- IEN – Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Torino, Italia
- IMGC – Istituto di Metrologia »Gustavo Colonnetti«, Torino, Italia
- NIST – National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA
- NMI – nacionalni mjeriteljski institut (općenito)
- NPL – National Physical Laboratory, Teddington, England

- PEL – Primarni elektromagnetski laboratorij, FER, Zagreb
- PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Deutschland
- QHE – Quantized Hall Effect (kvantni Hallov efekt)
- RF – radiofrekvencijski
- SET – Single Electron Tunneling (prebrojavanja elektrona)
- SI – Système International d'Unités, SI (Međunarodni sustav jedinica)
- VF – visokofrekvencijski
- WECC – Western European Calibration Cooperation



Sl. 10. Općeniti slijedni sustav etalona i mjernih uređaja nekog NMI-a složen u točnosnu piramidu; u zagradama su navedeni pojmovi za područje napona (što je uzeto kao primjer); strelice upućuju da je moguća izravna veza različitih razina, a ne samo slijedni prijelaz s prethodne na sljedeću

Dr. sc. Dušan VUJEVIĆ
Dr. sc. Damir ILIĆ