

PREOCUPĂRI ACTUALE PRIVIND REDEFINIREA UNITĂȚII DE MĂSURĂ AMPER

Mirella BUZOIANU, Ionel URDEA MARCUS

INSTITUTUL NAȚIONAL DE METROLOGIE

Rezumat. Misiunea de bază a metrologiei este aceea de a pune la dispoziția societății etaloanele de măsurare – referințe stabile pe o anumită perioadă de timp, comparabile internațional și având o exactitate capabilă să disemineze unitățile de măsurare cu o incertitudine adecvată scopului măsurării. Urmând progresul științific și tehnic, la nivelul celor mai înalte foruri internaționale de metrologie s-au agreat o serie de măsuri, care ar putea să conducă, în anul 2011, la noi definiții pentru patru unități de măsură fundamentale – kilogram, amper, kelvin și mol. Continuând inițiativa de a prezenta principiile fizice și rezultatele experimentale care ar putea fundamenta aceste noi definiții, articolul prezintă preocupările privind re-definirea unității de măsură pentru curent electric – amper. Este trecută în revistă evoluția definiției acestei unități de măsură și a metodelor de realizare a sa în practică, este prezentat principiul fizic care fundamentează noua definiție propusă și sunt descrise succint principalele realizări practice obținute până în prezent de laboratoare de metrologie de prestigiu în această direcție.

Cuvinte cheie: mărimi și unități de măsură fundamentală, Sistemul Internațional de Unități, amper.

Abstract. The main mission of metrology is to make available to the society the measurement standards – reference points, stable over a certain period of time, internationally comparable and having an accuracy that is fit for measurement purpose. As a result of the scientific and technical progress, several measures have been agreed upon at the highest level international metrology fora that is likely to lead, in 2011, to new definitions for four basic measurement units – kilogram, ampere, kelvin and mole. As a follow up of the initiative to present the physical principles and the experimental realisations that might support these new definitions, the paper presents the present concerns regarding the re-definition of the basic measurement unit for electric current – ampere. The historical evolution of the definition and of the practical realisations of this unit is reviewed. The physical principles supporting the new proposed definition are also presented. Some main practical realisations developed so far by well known metrology laboratories worldwide are briefly described.

Key words: basic measurement units and quantities, International System, ampere.

1. INTRODUCERE

Fenomenele fizice, substanțele sau corpurile se caracterizează prin atribute susceptibile a fi diferențiate calitativ și determinate cantitativ, adică prin mărimi măsurabile. Acestea pot fi grupate în categorii conținând, fiecare, mărimi care se pot compara reciproc. Dacă într-o asemenea categorie de mărimi se alege o anumită mărime drept mărime de referință – denumită unitate – oricare altă mărime aparținând acestei categorii poate fi exprimată în funcție de această unitate.

Mărimile și unitățile de măsură au fost definite din cele mai vechi timpuri, iar progresul științific și tehnic a determinat alinierea acestor definiții în concordanță cu evoluțiile înregistrate. Actualul Sistem Internațional de unități de măsură (SI), adoptat în anul 1954 și denumit ca atare în anul 1960, se bazează pe șapte unități de măsură fundamentale (metru, kilogram, amper, secundă, kelvin, candelă, mol), definite pe baza unor constante universale, fenomene fizice și artefact-uri. Dintre cele șapte unități fundamentale, doar kilogramul este, încă,

definit în termeni de artefact material – prototipul internațional al kilogramului (așa cum s-a convenit prin rezoluțiile celei de-a doua CGPM din 1889 și a treia CGPM din 1901). La rândul lor, definițiile amperului, molului și candelă depind de kilogram.

Comportarea în timp a prototipurilor naționale ale kilogramului, exactitatea punerii în practică a unor fenomene fizice, rezultatele experimentale în urma aplicării unor noi principii fizice pentru realizarea unităților de măsură (în special, de la ultima modificare în definiția unei unități de măsură fundamentale din 1983, care a stabilit viteza luminii în vid) precum și nevoia practică de a armoniza actualul SI cu nevoile practice ale utilizatorilor, concomitent cu asigurarea faptului că acest sistem de referință reflectă, pentru toate măsurările efectuate pe glob, cele mai avansate progrese ale științei și înțelegerii structurii fizicii, au determinat, în ultimul deceniu și jumătate, lansarea unor ample dezbateri în forumurile și organizațiile internaționale de specialitate privind oportunitatea și posibilitatea re-definirii unui grup de unități de măsură fundamentale, așa cum este ilustrat în figura 1



Fig. 1. Unitățile de măsură fundamentale SI și incertitudini asociate punerii lor în practică.

Concluziile acestor dezbateri s-au reflectat în Rezoluții ale Conferinței Generale pentru Măsurii și Greutăți (CGPM), Recomandări ale Comitetului Internațional pentru Măsurii și Greutăți (CIPM), Recomandări ale Comitetelor Consultative (CC) ale CIPM sau ale Grupelor de Lucru asociate acestora. Astfel [1], Rezoluția a cincea a celei de-a 20-a CGPM, desfășurată în octombrie 1995, recomandă laboratoarelor naționale de metrologie să-și finanțeze experimente privind verificarea stabilității prototipurilor naționale și, astfel, la momentul potrivit, să deschidă calea pentru o nouă definiție a unității de masă bazată pe constante atomice sau fundamentale. În vederea re-definirii kilogramului, au fost inițiate două direcții de cercetare, una legată de constanta lui Plank, h , și a doua legată de constanta lui Avogadro, N_A . Legat de prima direcție de cercetare, Comitetul Consultativ pentru Electricitate și Magnetism (CCEM) a analizat și a recomandat desfășurarea experimentelor atât pentru stabilirea valorii constantei lui Plank cât și pentru cea a sarcinii electrice elementare, e , deschizându-se astfel și calea pentru redefinirea unității de măsură pentru curentul electric, amper.

În 1995, Comitetul Consultativ pentru Unități de măsură (CCU) [2] a formulat Recomandarea CCU-U1 privind posibilele modificări în definirea kilogramului, amperului, kelvinului și molului,

având în vedere o serie de criterii care ar trebui să
fie considerate în tot acest proces, și anume:

- definițiile noi adoptate trebuie alese astfel încât să fie simple, dar nu simpliste, conceptual clare și ușor de înțeles, folosind mijloace de măsurare care să nu fie nici extrem scumpe și nici prea complexe;
- noile definiții trebuie să asigure consistența și coerența cu celelalte unități ale SI;
- punerea în practică a noilor definiții ar trebui să se bazeze pe etaloane de referință stabile în spațiu și timp și legate de constante universale;
- realizarea practică a noilor definiții trebuie să asigure continuitatea cu cea a vechilor definiții, precum și cel mai înalt nivel tehnic posibil privind stabilitatea și exactitatea (acesta trebuind să fie cel puțin egal dacă nu mai ridicat decât cel asigurat de definițiile anterioare);
- noile definiții ar trebui, cel puțin la nivel de principiu, să poată fi realizate experimental de oricine, oricând și în orice moment.

La Conferința Generală din anul 1999, prin Rezoluția a 7-a s-a recomandat acelorși laboratoare naționale de metrologie să-și continue eforturile pentru a îmbunătăți experimentele care leagă unitatea de măsură de masă de constante atomice sau universale în perspectiva unei viitoare redefiniri a kilogramului. Anul trecut, cea de-a 21-a Rezoluție

a CGPM a extins recomandarea asupra continuării procesului de re-definire a celor patru unități de măsură fundamentale – kilogram, amper, kelvin și mol, având în vedere progresele efectuate în ultimii ani în experimentele care leagă masa prototipului internațional de constanta Plank, h , sau de constanta lui Avogadro, N_A , precum și inițiativele de a re-determina constanta lui Boltzman k_B .

Printre avantajele adoptării noilor definiții, identificate de comunitatea internațională de metrologie [3], se pot aminti:

- SI ar putea avea, într-o etapă ulterioară, abilitatea garantată de a servi ca limbaj comun al măsurării pentru toate domeniile de interes;

- principal, unitatea fundamentală de masă ar putea fi realizată în orice moment, în orice loc și de către oricine;

- efectul Josephson și efectul Hall cuantic ar putea fi utilizate pentru a realiza direct unitățile SI electrice, iar actualul sistem convențional de unități electrice ar putea fi abandonat;

- un număr mare de constante fundamentale ar putea fi mai exact cunoscute;

- mulți factori de conversie ai energiei ar putea fi determinați cu o mai mare exactitate; de exemplu, masa unei particule ar avea aceeași incertitudine standard relativă, indiferent dacă valoarea sa numerică ar fi exprimată în kg, J, m^{-1} , Hz sau eV;

- incertitudinile asociate multor constante ar putea fi reduse semnificativ;

- variația valorilor recomandate pentru constante fizice incluse în edițiile succesive ale bazei de date CODATA ar fi semnificativ redusă.

În numărul trecut al revistei [4] au fost prezentate succint aspecte ale principiilor teoretice care stau la baza re-definirii unității de măsură a temperaturii termodinamice, kelvin, pe baza constantei lui Boltzman. Continuând inițiativa colectivului editorial al revistei legată de prezentarea stadiului preocupărilor internaționale pentru îmbunătățirea SI, pe parcursul acestui articol se vor trece în revistă aspecte semnificative teoretice și practice legate de posibila re-definire a unității de curent electric – *amperul*.

2. UNITATEA DE MĂSURĂ FUNDAMENTALĂ PENTRU CURENT ELECTRIC

Unitățile de măsură ale mărimilor electrice pentru curent electric și pentru rezistență electrică au fost introduse cu ocazia Congresului Internațional de Electricitate, care s-a ținut la Chicago în anul 1893, fiind denumite, la acea dată, *unități electrice internaționale*. Definițiile a ceea ce s-a

numit „amperul internațional” și „ohmul internațional” au fost confirmate de Conferința Internațională desfășurată la Londra în anul 1908. Deși, cu ocazia celei de-a 8-a Conferințe Generale (1933), era deja evident că exista o dorință unanimă de a înlocui acele „unități internaționale” cu așa-numitele „unități absolute”, decizia oficială de a renunța la ele a fost luată abia la cea de-a 9-a CGPM, desfășurată în anul 1948, când s-a adoptat amperul ca unitatea de măsură pentru curent electric, definită conform celei de-a doua Rezoluții adoptate de CIPM în anul 1946. Tot prin Rezoluția 2, CIPM admitea și propunerile de definire a valorilor teoretice ale altor unități electrice: *Volt* – unitate pentru potențial și forță electromotoare, *Ohm* – unitate pentru rezistența electrică, *Coulomb* – unitate pentru cantitatea de electricitate, *Farad* – unitate pentru capacitatea electrică, *Henry* – unitate pentru inductanța electrică și *Weber* – unitate pentru fluxul magnetic [5].

Definiția amperului, ca unitate de măsură pentru intensitatea curentului electric, adoptată de CIPM în anul 1946 era:

„Amperul este intensitatea unui curent electric constant care, menținut în două conductoare paralele, rectilinii, de lungime infinită, de secțiune circulară neglijabilă, și așezate în vid, la distanță de 1 metru unul de celălalt, ar produce între aceste conductoare, pe o lungime de 1 metru, o forță de 2×10^{-7} din unitatea MKS de forță (newton).”

În prezent, în locul denumirii mărimii „intensitate a curentului electric”, se folosește denumirea de „curent electric” [6]. De asemenea, expresia „unitate MKS de forță”, care figurează în textul original, a fost înlocuită prin „newton”, denumire adoptată de cea de-a 9-a CGPM din 1948 (Rezoluția 7).

Din definiție, rezultă că μ_0 , constanta magnetică, cunoscută, de asemenea, drept permeabilitatea vidului, este egală cu $4\pi \times 10^{-7}$ henry pe metru ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m).

2.1. Metode de realizare practică a unității de măsură pentru curentul electric

Așa cum este definit, amperul se leagă de constanta magnetică, extrem de importantă, deoarece aceasta, împreună cu constanta electrică ϵ_0 (permitivitatea vidului), definită drept $\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c_0^2}$,

unde c_0 este viteza luminii în vid, asigură egalitatea unităților de măsură SI pentru forță mecanică și forță electromagnetică, pentru energie mecanică și energie electrică, pentru putere mecanică și putere electrică.

Realizarea în practică a amperului, pornind de la definiția adoptată este dificilă și consumatoare de timp. Aceeași situație se manifestă și în cazul unităților de măsură SI derivate ohm și volt.

Primele realizări absolute ale amperului, publicate în 1934 [7], foloseau balanța de curent Rayleigh, în care forța electromagnetică dintre bobine concentrice se echilibra cu forța gravitațională a unei mase. Pentru realizarea ohmului se folosea o balanță de curent cu bobină mobilă. Până în anul 1944 au fost concepute și finalizate trei astfel de experimente complete pentru determinarea absolută a amperului și, respectiv, a ohmului, în cadrul laboratorului NPL din Marea Britanie și NBS din SUA. Deoarece îmbunătățirea măsurărilor de curent efectuate era mult mai dificil de realizat decât cea a măsurărilor de rezistență electrică, s-a trecut la o nouă modalitate de realizare a amperului, bazată pe balanța Pellat, în care se măsoara mecanic momentul forței exercitate de câmpul magnetic a unui solenoid orizontal mare asupra unei bobine mici, poziționată cu axa perpendiculară pe câmpul magnetic al aceluși solenoid. Când se inversa sensul curentului electric în bobina mică, se genera o forță care putea fi echilibrată cu o masă plasată pe brațul balanței. Construcția balanței asigura frecarea minimă. Atât experimentele bazate pe balanța de curent, cât și cele bazate pe balanța Pellat, au condus la rezultate comparabile, iar în anul 1958 se publicau primele estimații ale incertitudinii de măsurare atribuite [8].

În prezent, cea mai bună realizare a amperului se obține prin intermediul unei combinații de realizări a watt-ului, ohm-ului și voltului. În primul caz, se compară unitatea de măsură watt realizată prin experimente electrice cu cea pusă în practică prin experimente mecanice. Aceste experimente utilizează o bobină plasată într-un flux magnetic și sunt efectuate astfel încât să nu fie necesar să se cunoască nici dimensiunea bobinei și nici mărimea densității fluxului magnetic. În cel de-al doilea caz, legătura dintre definițiile amperului, ohm-ului și voltului se bazează pe sarcina elementară, așa cum se arată în figura 2.

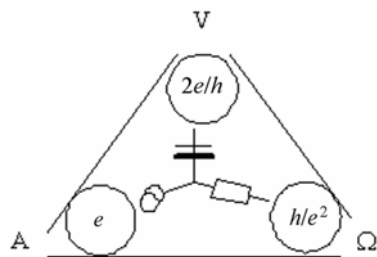


Fig. 2. Triunghiul metrologiei mărimilor electrice bazate pe proprietățile cuantice.

Ohm-ul se realizează folosind un condensator Thompson-Lampard a cărui capacitate poate fi modificată cu o valoare care depinde doar de mărimea deplasării lineare a unui electrod. Voltul se realizează prin intermediul unei balanțe în care se măsoară o forță electrostatică în termenii unei forțe mecanice. Astfel, amperul poate fi dedus din combinarea oricăror din cele două unități de măsură. Incertitudinea relativă asociată realizării unității de măsură pentru curent electric a fost estimată la câteva părți în 10^7 .

Amperul, ohmul și voltul pot fi determinate și prin măsurarea variatelor combinații de constante fizice.

2.2. Premisele teoretice și practice ale redefinirii amperului

Așa cum s-a amintit anterior, cele mai recente Rezoluții ale Conferinței Generale au încurajat conjugarea eforturilor internaționale privind posibila redefinire a unității de masă, kilogramul. În acest direcție, sunt abordate două experimente practice: unul care leagă kilogramul de valoarea exactă a constantei lui Plank, h , și, celălalt, de constanta lui Avogadro, N_A .

Deși o definiție a unității de masă pe baza constantei lui Avogadro are avantajul unei simplități conceptuale (kilogramul ar putea fi definit ca masa unui număr specificat de atomi de ^{12}C), majoritatea autorilor [9, 10] scot în evidență avantajele utilizării constantei lui Planck pentru noua definiție a kilogramului, având în vedere:

- poziția centrală pe care o ocupă constanta lui Planck în mecanica cuantică, din punctul de vedere al fizicii fundamentale;
- simplificarea și creșterea exactității tuturor măsurărilor electrice care se bazează pe efectul Josephson și pe efectul Hall cuantic, deoarece constanta h și sarcina elementară, e , aflată la baza propunerii noii definiții a amperului, ar avea valori exacte cunoscute și, prin aceasta, atât constanta Josephson ($K_J = 2e/h$) și constanta Klitzing ($R_K = h/e^2$) ar avea valori definite exact;
- posibilitatea definirii molului pe baza constantei lui Avogadro.

În situația în care kilogramul se definește pornind de la constanta lui Avogadro, punerea sa în practică s-ar baza pe experimentele legate de determinarea valorii acestei constante și pe cele legate de acumularea de ioni. Ar putea fi utilizate și experimentele legate de balanța Watt, caz în care h ar juca rolul unei mărimi de intrare. De asemenea, o astfel de definiție s-ar referi la un atom nelegat, ceea ce ar conduce la introducerea unei

corecții legate de valoarea energiei legăturilor interatomice.

Tot în acest caz, amperul ar putea fi înlocuit cu voltul, prin care s-ar fixa constanta Josephson, K_J și punerea sa în practică pe baza efectului Josephson. Prin aceasta, permeabilitatea vidului nu ar mai avea statutul de constantă și ar deveni o mărime măsurabilă.

După cum se cunoaște, în anul 1962, Brian D. Josephson, un student de numai 22 de ani, prevedea două efecte, care au fost verificate experimental la scurt timp după aceea. Unul din aceste efecte a condus la dezvoltarea actualului etalon modern de tensiune electrică bazat pe efectul Josephson.

Efectul Josephson se produce dacă două supraconductoare sunt slab cuplate, de exemplu prin separarea lor cu un strat izolator având grosimea de câțiva nanometri. Aplicând joncțiunii Josephson o undă electromagnetică, între supraconductori se creează tensiuni discrete a căror valori depind doar de raportul a două constante fundamentale și de frecvență:

$$V_u = u' \cdot \frac{h}{2e} \cdot f \quad (1)$$

unde: $u' = 1, 2, 3, \dots$ reprezintă numărul de pași (număr adimensional);

h – constanta lui Planck;

e – sarcina elementară;

f – frecvența microundelor.

Raportul

$$K_J = \frac{2e}{h} \quad (2)$$

reprezintă constanta lui Josephson.

În anul 1980, fizicianul german Klaus von Klitzing a descoperit efectul Hall cuantic, care ulterior, a stat la baza punerii în practică a unității de rezistență electrică – *ohm*, fiind unul din puținele manifestări macroscopice a efectelor cuantice care pot fi studiate cu dispozitive electronice. Efectul Hall cuantic constă în apariția unor platouri ale tensiunii Hall în funcție de inducția câmpului magnetic pentru un gaz electronic bidimensional, atunci când proba este răcită la temperaturi foarte joase.

După cum se cunoaște, tensiunea V_H depinde liniar de inducția câmpului magnetic B :

$$V_H = \frac{BI}{nez} \quad (3)$$

unde: V_H este tensiunea Hall;

B – inducția câmpului magnetic;

I – câmpul electric;

n – densitatea de purtători de sarcină

e – sarcina electronului;

z – grosimea plăcii.

Folosind această dependență, se poate defini o rezistență Hall prin relația

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{B}{nez} \quad (4)$$

Dacă se consideră un gaz electronic bidimensional, rezistența rămâne constantă pe anumite domenii de valori ale inducției magnetice. Mai mult, rezistența nu mai depinde de natura și forma materialului folosit putând fi exprimată prin relația:

$$R_H = \frac{R_K}{i} \quad (5)$$

unde: $R_K = h/e^2$ este constanta von Klitzing;

i – factor de umplere (un număr întreg).

Cele două fenomene au fost utilizate la dezvoltarea etaloanelor de măsurare care realizează unitățile derivate de tensiune și rezistență electrică. Aceste etaloane, sunt semnificativ mai reproductibile și stabile decât câteva părți în 10^7 . Pentru a beneficia de această stabilitate a etaloanelor de referință, păstrând în același timp ne-schimbate definițiile SI adoptate, cea de-a 18-a CGPM, din 1987, a adoptat Rezoluția 6, prin care se recomanda ca reprezentările voltului și ohmului să se bazeze pe valorile convenționale ale constantelor Josephson K_J și von Klitzing R_K . Un an mai târziu, CIPM a adoptat Recomandările 1 (CI-1988) și 2 (CI-1988), care stabileau valorile exacte ale constantelor Josephson și von Klitzing și recomandau laboratoarelor să-și bazeze etaloanele lor de măsurare pe aceste valori, începând din 01.01.1990. La întâlnirea sa din același an, CCE a analizat cu atenție modul în care ar trebui folosite valorile convenționale recomandate pentru K_{J-90} și R_{K-90} și a clarificat implicațiile acestor Recomandări adoptate în două declarații sintetizate astfel:

1. Recomandările 1 (CI-1988) și 2 (CI-1988) nu constituie o re-definire a unităților SI. Valorile convenționale K_{J-90} și R_{K-90} nu pot fi folosite ca bază pentru definirea voltului și ohmului (adică unitățile actuale de măsură SI a forței electromotoare și a rezistenței electrice). A proceda în acest fel înseamnă a accepta schimbarea statutului pentru μ_0 , anume acela de constantă cu valoare definită exact, ceea ce ar invalida definiția acceptată pentru amper. De asemenea, ar conduce la unități de măsură electrice care ar fi incompatibile cu definiția kilogramului și cu unitățile derivate de la acesta.

2. În ceea ce privește utilizarea indicilor simbolurilor mărimilor sau unităților de măsură, CCE

considera că simbolurile pentru forța electromotoare (potențial electric, diferență de potențial electric), rezistența electrică, volt și ohm nu trebuie modificate prin adăugarea de indici care să menționeze anumite laboratoare sau date.

Pe baza analizei datelor relevante pentru R_K existente în acel moment (în anul 2000), CCEM a decis ca incertitudinile standard relative atribuite unei reprezentări perfecte a ohmului bazată pe efectul Hall cuantic și R_{K-90} să fie reduse cu un factor de doi la o parte în 10^7 . Această decizie a fost aprobată de CIPM în octombrie 2000.

În situația în care kilogramul se definește pe baza constantei lui Planck, noua sa definiție ar face trimitere la masa unei particule elementare, care ar produce o energie egală cu a unui foton de o anumită frecvență.

În acest caz, amperul ar fi definit drept curentul electric în direcția unui flux de exact $6,241\,509\,48 \times 10^{18}$ sarcini elementare per secundă.

Identificarea valorii e rezultă din relația:

$$I \cdot t = N \cdot e \quad (6)$$

unde: I este curentul electric;

t – intervalul de timp;

N – numărul de sarcini elementare

e – sarcina elementară.

Considerând:

$$I = 1 \text{ A},$$

$$t = 1 \text{ s},$$

$$N = 1/(1,602\,176\,487 \times 10^{-19}),$$

asa cum este prezentat în definiție, se obține:

$$e = (1/N) \cdot A \cdot s = 1,602\,176\,487 \times 10^{-19} \text{ C}.$$

Această definiție specifică faptul că direcția curentului electric este direcția fluxului de sarcini pozitive, deoarece sarcina elementară este definită de o mărime pozitivă – valoarea absolută a sarcinii electronului sau sarcina protonului.

O altă definiție posibilă a amperului, discutată în cercurile științifice internaționale, ar lega amperul de sarcina protonului e care este $1,602\,176\,487 \times 10^{-19}$, ceea ce ar constitui mai degrabă definiția explicită a constantei e .

Trebuie observat faptul că sarcina elementară, e , și μ_0 sunt legate prin constanta structurii fine, α , o mărime adimensională, care reprezintă constanta de cuplare a forței electromagnetice:

$$\alpha = c \cdot e^2 \cdot \mu_0 / 2h \quad (7)$$

unde: c este viteza luminii în vid;

e – sarcina elementară;

μ_0 – permeabilitatea vidului;

h – constanta lui Planck.

Deoarece incertitudinea relativă asociată constantei α este în prezent de doar de 7×10^{-10} , viteza luminii în vid este deja fixată (pentru a defini metrul) și se discută utilizarea constantei Planck, h pentru a defini kilogramul, rezultă că incertitudinea asociată lui μ_0 este de 7×10^{-10} . Stabilind μ_0 , incertitudinea asociată lui e rezultă a fi 3.5×10^{-10} . Prin urmare, diferența dintre definiția care se bazează pe e și cea care stabilește μ_0 este mică.

2.3. Consecințele adoptării noilor definiții ale amperului

Este evident faptul că eventuala aprobare a noii definiții a unității fundamentale de curent electric va avea un impact deosebit asupra metrologiei mărimilor electrice și nu numai. De asemenea, s-a demonstrat faptul că redefinirea unităților fundamentale, kilogram și amper, trebuie abordată în pereche, deoarece ambele constante fizice universale pe care se bazează sunt absolut necesare în definiția constantelor Josephson și von Klitzing. Considerând și constanta lui Avogadro, care urmează să stea explicit la baza noii definiții a molului, este evident și faptul că Sistemul Internațional va armoniza mai bine comunicarea dintre metrologia practică și fizica cuantică.

În principiu, se pot exemplifica două direcții principale în care se va manifesta impactul noii definiri a amperului: cel al metrologiei practice și cel al metrologiei fundamentale.

Așa cum s-a arătat deja, prin legarea kilogramului de constanta lui Planck și a amperului de sarcina elementară, sarcina elementară, constanta Josephson și constanta von Klitzing devin exact determinate și efectele Josephson și Hall cuantic pot fi folosite pentru a realiza direct majoritatea unităților electrice. Prin aceasta, actualul sistem practic de unități convenționale de măsură electrice bazate pe aceste două efecte precum și cele două valori convenționale K_{J-90} și R_{K-90} ar putea fi înlocuite cu unități de măsură SI. Pe cale de consecință, constanta magnetică, μ_0 , constanta electrică, ϵ_0 și caracteristica de impedență a vidului, Z_0 , care în actualul cadru al SI sunt toate constante exact cunoscute, devin mărimi necesare a fi măsurate în noile condiții de definire a celor patru unități fundamentale. Având în vedere ecuația de definiție a constantei von Klitzing ($R_K = h/e^2 = \mu_0 \cdot c_0 / 2\alpha$), constanta structurii fine, α , ar deveni de asemenea doar un simplu număr determinat de natură. Tot aici, trebuie subliniat faptul că, în prezent, în comunitatea științifică constanta magnetică este

considerată extrem de importantă pentru caracterizarea vidului.

În ceea ce privește practica metrologică, principalele consecințe se regăsesc în punerea în practică a amperului, care ar fi util să includă și:

- informații privind modul în care a fost obținută valoarea exactă a constantei h , și la fel pentru valoarea exactă a lui e ;
- modul de calcul și de prezentare a valorilor exacte pentru K_J și R_K ;
- o succintă analiză a relațiilor de definire teoretică a efectelor Josephson și Hall cuantic;
- o revizie a ecuației ($I = e, f$) și a instalațiilor bazate pe efectul tunel al electronului singular (SET), folosite pentru a realiza amperul la valori foarte mici de curent;
- o recomandare cu privire la de folosirea etaloanelor de măsurare a tensiunii ariilor de joncțiuni Josephson;
- reactualizarea valorilor actuale și incertitudinilor asociate pentru μ_0 , ε_0 și Z_0 ;
- propuneri pentru realizarea unităților farad și henry pe baza $R(i)$.

Cea mai relevantă problemă pe care trebuie să o rezolve comunitatea metrologiei mărimilor electrice o constituie modificarea valorilor incertitudinilor la diseminarea unității în cadrul INM-urilor având în vedere diferențele dintre K_J și R_K și, respectiv, K_{J-90} și R_{K-90} . Considerând relațiile de definire (2), (5) și valorile CODATA din 2002:

$$K_J = K_{J-90} [1 - 4,3(8,5) \times 10^{-8}]$$

$$R_K = R_{K-90} [1 + 1,74(33) \times 10^{-8}].$$

3. BALANȚA WATT

În contextul actualei pregătiri pentru îmbunătățirea Sistemului Internațional de Unități, prin racordarea tuturor unităților de măsură fundamentale la constante universale, care ar putea fi aprobate de CGPM în 2011, balanțele Watt dețin trei roluri diferite:

1. Înainte de a se adopta noile definiții, valoarea constantei lui Plank, h , trebuie să fie măsurată în condițiile descrise de SI cu o incertitudine suficient de mică pentru a evita orice discontinuitate între actuala definiție a kilogramului și cea care ar urma să o înlocuiască;

2. După adoptarea noilor definiții, vor fi necesare un număr de balanțe Watt pentru a realiza punerea în practică a definiției ulterioare a kilogramului;

3. Împreună cu condensatorul calculabil, care poate determina o valoare pentru constanta von Klitzing, R_K , balanța Watt permite determinarea

constantei Josephson, K_J și furnizează mijloacele de verificare a ecuației Josephson (2).

Principiul balanței Watt a fost propus în anul 1975 de B.P. Kibble, de la NPL, Marea Britanie. În prezent, diferite variante de astfel de echipamente se găsesc la BIPM, NIST – SUA, NPL – Marea Britanie, LNE – Franța, METAS - Elveția. Balanța Watt reprezintă o versiune mai exactă a balanței de curent în care se măsoară forța generată de câmpul electromagnetic care ia naștere între două bobine străbătute de curent electric. Mărimea curentului electric se calculează apoi pe baza relației (10). Metoda balanței de curent avea dezavantajul dependenței rezultatului de exactitatea cu care sunt măsurate dimensiunile bobinelor. În cazul metodei care utilizează balanța Watt este inclusă o etapă suplimentară de etalonare, prin care efectul geometriei bobinelor este eliminat. Etapa suplimentară de etalonare implică mișcarea bobinei de forță printr-un flux magnetic cunoscut cu o anumită viteză de asemenea cunoscută.

Prin urmare, experimentele bazate pe principiul balanței Watt se realizează în două etape: etapa de măsurare a masei (de cântărire) și etapa de deplasare în flux magnetic cunoscut.

În partea întâi a experimentului, ilustrată în figura 3, o masă și o bobină sunt suspendate de o balanță. Bobina (având o spirală de lungime L) este plasată într-un câmp magnetic având densitatea fluxului B . Forța gravitațională exercitată asupra masei m se echilibrează cu forța electromagnetică egală și de sens opus exercitată asupra bobinei prin trecerea unui curent electric I prin ea, conform relației:

$$m \cdot g = I \cdot L \cdot B \quad (8)$$

unde: m este masa greutății etalon;

g – accelerația gravitațională;

I – curentul electric care străbate bobina;

L – lungimea spirei bobinei;

B – densitatea fluxului câmpului magnetic.

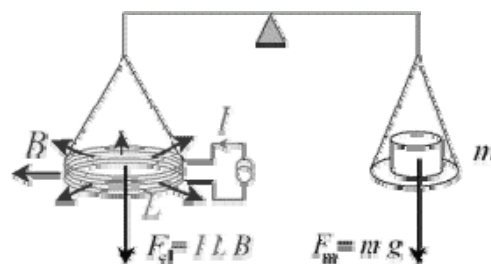


Fig. 3. Etapa de cântărire.

În etapa de deplasare, ilustrată în figura 4, bobina este deplasată cu o viteză constantă, v , prin

câmpul magnetic, astfel încât este indusă o tensiune U , conform relației:

$$U = B L v \quad (9)$$

unde: U este tensiunea la capetele spirei;
 B – densitatea fluxului;
 L – lungimea spirei bobinei;
 v – viteza de deplasare.

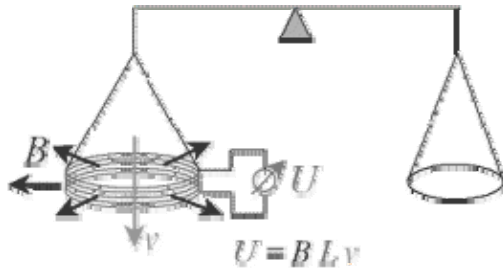


Fig. 4. Etapa de deplasare.

Conform legii inducției, este generată o diferență de potențial V între capetele spirei, care este egală cu produsul dintre densitatea fluxului magnetic, B , lungimea spirei, L și viteza de deplasare constantă prin câmpul magnetic, v . În situația în care proprietățile bobinei și ale câmpului magnetic, L și B , și, respectiv, alinierea nu se modifică între cele două experimente, mărimile care le caracterizează pot fi eliminate din ambele ecuații (8) și (9), ceea ce conduce la relația:

$$UI = m g v \quad (10)$$

După cum se observă, partea stângă a relației (10) indică o putere electrică și partea dreaptă a aceleiași relații indică o putere mecanică. Prin aceasta, se explică denumirea metodei. De asemenea, este important să se înțeleagă faptul că ambele tipuri de putere sunt virtuale, în sensul că ele nu apar într-una din fazele experimentului. În cazul puterii electrice, tensiunea se măsoară în etapa de mișcare și curentul electric se măsoară în etapa de cântărire.

După cum s-a arătat mai înainte, pe baza efectului Josephson se poate determina o tensiune necunoscută, V în conformitate cu relația (1). Pe baza efectului Hall cuantic, se poate determina o rezistență necunoscută, R , ca un multiplu, r' , adimensional de combinații ale constantei lui Planck și sarcinii elementare. Aplicarea ambelor efecte asupra măsurării tensiunii și curentului în balanța watt conduce la relația:

$$m = u_1' u_2' \cdot \frac{f_{J,1} \cdot f_{J,2}}{r'} \cdot \frac{1}{g \cdot v} \cdot \frac{h}{4} \quad (11)$$

unde: u_1' și u_2' sunt numere adimensionale;
 $f_{J,1}$ și $f_{J,2}$ – frecvențe;

r' – multiplu adimensional;
 g – accelerația gravitațională;
 v – viteza de deplasare;
 h – constanta lui Planck.

Relația (11) stabilește legătura dintre masa macroscopică și constanta lui Planck. Prima parte din dreapta relației indică mărimi măsurate pornind de la efecte cuantice macroscopice, iar cea de-a doua parte, măsuranți mecanici.

Constructiv, au fost realizate diferite variante ale balanței watt, așa cum este ilustrat în figurile 5 și 6.

În cadrul NIST, SUA, balanța watt a fost proiectată să măsoare raportul dintre puterea mecanică și cea electrică, legând astfel prototipul kilogramului, metrul și secunda de realizarea practică a ohmului și voltului pe baza efectelor Josephson și Hall cuantic. Primele rezultate, publicate în 1989, raportau o incertitudine relativă de determinare a constantei Josephson de $6,7 \times 10^{-7}$. În deceniul următor, prin îmbunătățiri succesive și aplicând condensatorul calculabil, incertitudinea raportată a fost de $4,4 \times 10^{-8}$ [13].

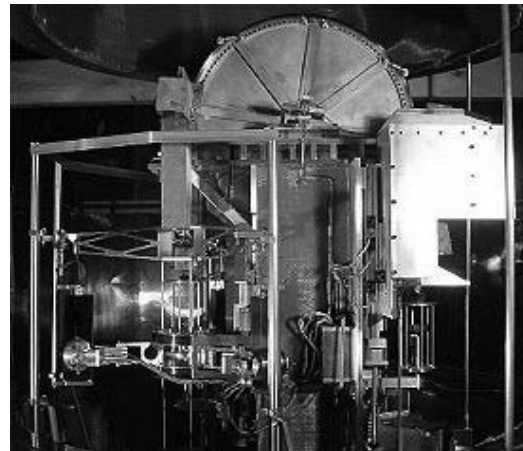


Fig. 5. Modelul constructiv realizat la NIST.

În cadrul NPL, Anglia, balanța watt a început să fie dezvoltată din anii 80. METAS, Elveția a demarat aceste experimente în 1997 și LNE Franța în 2002. BIPM a lansat proiectul Watt doar din anul 2002, dezvoltându-l continuu de la acea dată. Celelalte institute naționale de metrologie reprezentative au aplicat diferite alte principii de măsurare. De exemplu, NMIJ/AIST Japonia au experimentat levitația magnetică, VNIIM Rusia și MIKES Finlanda intenționând să proiecteze experimente îmbunătățite pe același principiu. PTB, Germania a început în anul 1990 proiectul bazat pe acumularea de ioni.

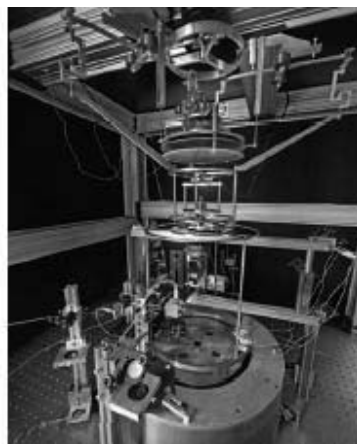


Fig. 6. Modelul constructiv realizat la BIPM.

4. CONCLUZII

Articolul a prezentat succint aspecte ale elementelor teoretice și practice care fundamentează dezbaterile actuale privind redefinirea unității fundamentale de curent electric, amper.

În contextul unui progres incontestabil al științei și tehnicii, noile definiții propuse a fi adoptate urmează să armonizeze mai bine comunicarea dintre metrologia practică și fizica teoretică și, chiar, să revoluționeze metrologia fundamentală.

Adoptarea noilor definiții este de așteptat să conducă la modificări semnificative și pe alt plan, anume cel legat de rolul și poziția diferitelor institute naționale de metrologie, ca urmare a concentrării unor capacități de realizare a unor unități fundamentale ale SI. Este astfel de așteptat ca acele INM-uri care vor deține realizări experimentale ale noilor definiții (balanțe Watt) vor dobândi o poziție de centre globale de excelență, la care se vor racorda cu ușurință acele INM-uri care dispun de realizări bazate pe efectul Josephson și pe efectul Hall cuantic. Acele INM-uri care vor continua să își bazeze etaloanele naționale pe alte tipuri de realizări, care nu se bazează pe constante fizice fundamentale ci pe mijloace de măsurare mai mult sau mai puțin comerciale este de așteptat ca, într-un viitor apropiat, să nu reprezinte în metrologia globală mai mult decât niște centre zonale de etalonare.

REFERINȚE

- [1] www.bipm.fr.
- [2] Report of the CCU to the 23rd CGPM, November 2007.
- [3] M.Stock, Th.J.Witt, CPEM 2006 round table discussion 'Proposed changes to the SI', *Metrologia* **43** (2006) 583–587.
- [4] M.Neagu, Redefinirea unității de temperatură prin determinarea constantei lui Boltzman, *Metrologie*, vol LV, nr.2-3, 2008, 30 – 34.
- [5] SR ISO 31-5:1995 „Mărimi și unități Partea 5. Electricitate și magnetism”.
- [6] SI Brochure.
- [7] R. E. Elmquist, M. E. Cage, Y-H. Tang, A-M. Jeffery, J. R. Kinard, R. F. Dziuba, N. M. Oldham, and E. R. Williams, The Ampere and Electrical Units, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, January-February (2001).
- [8] R. L. Driscoll and R. D. Cutkosky, Measurement of current with the National Bureau of Standards current balance, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* **60**, 297-305 (1958).
- [9] Ian M Mills, P.J.Mohr, T.J.Quinn, B.N.Taylor, E.R.Williams, Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005), *Metrologia* **43** (2006) 227–246.
- [10] P Becker, P De Bièvre, K Fujii, M Glaeser, B Inglis, H Luebbig, G Mana, Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units, *Metrologia* **44** (2007) 1–14.
- [11] Martin J T Milton, Jonathan M Williams, Seton J Bennett, Modernizing the SI: towards an improved, accessible and enduring system, *Metrologia* **44** (2007) 356–364.
- [12] Peter J Mohr, Defining units in the quantum based SI, *Metrologia* **45** (2008) 129–133.
- [13] Gérard Genevès, The French Watt balance project, *Simposio de Metrologia 2006* 25 -27 Octombrie.
- [14] Thomas J. Witt, Present and Future Scientific Work of the BIPM Electricity Section, CIPM 11 October 2006.

Revizia științifică a articolului:

Ion M.POPESCU, profesor universitar doctor, Universitatea Politehnica din București

Despre autori:

Mirella BUZOIANU, doctor inginer, cercetător științific I, Director științific al Institutului Național de Metrologie, e-mail: mirella.buzoianu@inm.ro.

Ionel Urdea Marcus, cercetător științific principal II, e-mail: ionel.urdea@inm.ro.