

CALIBRATOARE DE TENSIUNE ELECTRICĂ ÎN CURENT CONTINUU

Livia DRAGOMIR*

Rezumat: Sursele etalon de tensiunea electrică în curent continuu care pot genera tensiuni de valoare fixă sau variabilă, de înaltă exactitate sunt: instalația cu efect Josephson, etaloanele electronice cu diodă Zener, elementele Weston, calibratoarele etalon.

Abstract: DC voltage standards that can generate DC voltage at fixed or variable value, with high accuracy, are: Josephson array, DC standards with Zener diode, Weston elements, DC calibrators.

Cuvinte cheie: etalon primar - instalația cu efect Josephson, element Weston, etalon electronic cu diodă Zener, calibrator, incertitudine de măsurare.

Key words: primary standard – Josephson array, Weston element, DC standard with Zener diode, DC calibrator, measurement's uncertainty.

I INTRODUCERE

Amperul este unitate de măsură fundamentală de curent electric în Sistemul Internațional de Unități (SI). Deoarece amperul SI este foarte dificil de realizat, incertitudinea pentru obținerea sa este mai mare de aproximativ 15×10^{-6} și, de asemenea, este foarte dificilă menținerea acestui curent pentru mai mult de câteva minute. Din acest motiv nu există etaloane reprezentative pentru amper, dar el este obținut din raportul dintre volt și ohm, în acord cu legea lui Ohm.

Unitatea de măsură volt nu face parte din unitățile SI fundamentale, dar poate fi determinată și reprodusă cu o înaltă exactitate ($10^{-8} \dots 10^{-9}$)V cu ajutorul instalației cu efect Josephson.

Generarea unei tensiuni continue de valoare cunoscută, care poate fi fixă, variabilă în trepte sau variabilă continuu, este necesară în împrejurări ca realizarea unor ansambluri de măsurare complexe, măsurări prin compensare, etalonarea și testarea aparatelor de măsurat tensiunea continuă.

II CLASIFICARE

În funcție de modul de generare și de exactitatea valorilor de tensiune continuă generate, sursele de tensiune continuă de înaltă exactitate pot fi clasificate astfel:

- instalație cu efect Josephson, utilizată ca etalon primar pentru tensiunea continuă;
- elemente Weston;
- etaloane electronice cu diode Zener;
- calibratoare etalon.

III INSTALAȚIA CU EFECT JOSEPHSON

Etaloanele de tensiune Josephson, care au în componență peste 20 000 de joncțiuni în serie, pot genera tensiuni de referință stabile, cu valori cuprinse între -15 V și 15 V.

Aceste etaloane, care acum există în multe laboratoare naționale, sunt utilizate pentru etalonarea elementelor Weston sau a etaloanelor electronice cu diode Zener, pentru a măsura liniaritatea multimetrelor digitale sau a calibratoarelor de înaltă exactitate [1].



Fig.1 Instalația cu efect Josephson

Instalația cu efect Josephson, fig.1, utilizând un circuit integrat conținând un număr de joncțiuni

*) Institutul Național de Metrologie, Șos. Vitan Bârzești nr. 11, cod 042122, sector 4, București, Tel: (+4021) 334 50 60; 334 48 30; 334 55 20, e-mail: livia.dragomir@inm.ro

Josephson, este un etalon primar [2] cu care se poate realiza voltul SI.

Tensiunea generată de o joncțiune Josephson este definită prin relația:

$$V_J = \frac{n \times f}{K_{J-90}} \quad (1)$$

unde: V_J – tensiunea joncțiunii (V)

f – frecvența (GHz)

$K_{J-90} = 483\,597,9$ GHz/V

n – număr întreg pozitiv sau negativ

În ecuația care descrie efectul Josephson, constanta lui Josephson K_J este dată de raportul dintre constantele fundamentale:

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

unde: e – sarcina electronului

h – constanta lui Planck

În octombrie 1988, Comitetul Internațional de Măsură și Greutăți (CIPM) a recomandat tuturor laboratoarelor naționale de metrologie să utilizeze valoarea de 483 597,9 GHz/V pentru constanta Josephson. Începând de la 01.01.1990, aceasta a fost notată cu K_{J-90} [3].

Joncțiunea Josephson reprezintă un strat subțire de material izolator închis între două straturi de material supraconductor. Astfel, electronii „tunează” prin această regiune non-supraconductoare, efectul fiind cunoscut sub numele de efect Josephson, după numele fizicianului Brian Josephson. Curentul supraconductor circulă prin joncțiune chiar și în absența unei tensiuni externe de polarizare.

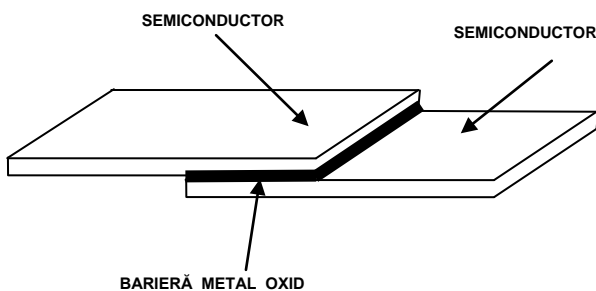


Fig.2 Structura de principiu a unei joncțiuni Josephson

Structura unei joncțiuni Josephson este prezentată în fig.2. Trecerea prin joncțiune fără a produce o cădere de tensiune a unui supracurent continuu a cărui densitate de curent este apropiată

de o valoare maximă, denumită densitate critică de curent, formează efectul Josephson și a fost observat pentru prima oară de Brian Josephson în 1962.

O explicație simplă a instalației cu efect Josephson este următoarea: o sursă de microunde iradiază joncțiunile Josephson polarizate în curent continuu din instalația Josephson, prezentată în fig.3.

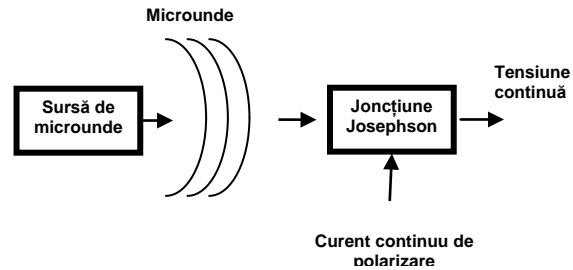


Fig.3 Schema de principiu a instalației cu efect Josephson

Fiecare joncțiune din instalație produce o tensiune continuă proporțională cu frecvența sursei de microunde. Datorită efectului cuantic de tunelare a curentului alternativ din joncțiune, în joncțiune apar o serie de trepte de tensiune continuă constantă, așa cum se prezintă în fig.4.

Fiecare treaptă de tensiune continuă constantă depinde de frecvența f a curentului alternativ, de constanta lui Planck h , de sarcina electronului e și de numărul de trepte n :

$$V = \frac{f \times n \times h}{2e} \quad (3)$$

Joncțiunea se află într-o incintă cu heliu lichid, răcită la o temperatură mai mică de 4,2 K.

Primul etalon de tensiune Josephson, construit în 1968, era compus din mai multe joncțiuni Josephson capabile să genereze fiecare tensiuni continue mai mari de 5 mV [4].

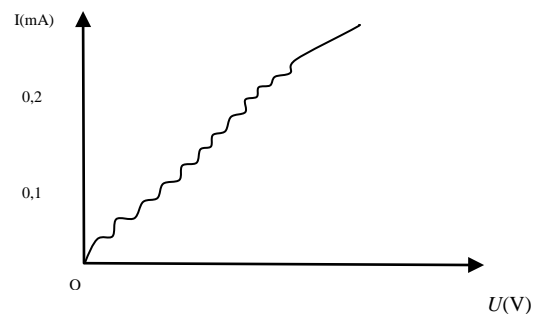


Fig.4 Dependența tensiunii continue de curentul de polarizare, pentru o joncțiune Josephson

Pentru a compara aceste tensiuni cu cele ale elementelor Weston era necesară utilizarea unui divizor de tensiune care creștea mult incertitudinea de măsurare și complica procesul de etalonare.

Înainte de a se fi descoperit efectul Josephson, laboratoarele naționale de metrologie utilizau grupuri de elemente Weston pentru realizarea și menținerea unității de măsură volt, elemente care erau foarte sensibile cu temperatura ambiantă și cu alte influențe externe (vibrații, zdruncinări, lumină). Media valorii acestor grupuri era considerată ca suficient de stabilă în timp, dar comparațiile internaționale au relevat faptul că variația acestora în timp este mai mare de 1 $\mu\text{V}/\text{an}$ și diferențele maxime dintre valorile determinate ale grupurilor participante la aceste comparații erau de aproximativ 10 μV . Utilizându-se instalația cu efect Josephson, a fost posibilă determinarea evoluției în timp a valorii tensiunilor generate de elementele Weston. Acest drift a fost determinat ca fiind de aproximativ 150 nV/an, cu o incertitudine de măsurare de 4×10^{-8} V. Etalonul de tensiune Josephson a fost perfecționat prin îmbunătățirea materialelor din componența joncțiunilor cât și prin conectarea joncțiunilor în serie și/sau paralel pentru a se obține diverse valori de tensiune continuă. De exemplu, o instalație care poate genera 150 000 de tensiuni fixe, cu valori cuprinse între -10V și 10V, este compusă din 16 grupuri de joncțiuni legate în paralel, fiecare grup fiind compus din 1187 joncțiuni conectate în serie.

Înainte de anul 1970, multe laboratoare naționale de metrologie foloseau instalația cu efect Josephson ca etalon de tensiune continuă. Pentru aceste aplicații se folosea relația:

$$V_J = \frac{n \times f}{K_J} \quad (4)$$

unde K_J

$$K_J = \frac{2e}{h} \quad (5)$$

Fiecare laborator național stabilea o anumită valoare a constantei K_J , obținând o anumită valoare de tensiune continuă pe care o folosea pentru reprezentarea și menținerea unității de măsură volt. Deoarece valoarea constantei K_J era

diferită de la un laborator la altul, uniformitatea în reprezentarea unității de măsură volt, obținută cu ajutorul joncțiunilor Josephson, s-a realizat în 01.01.1990 când, ca urmare a unei convenții internaționale, s-a atribuit constantei K_{J-90} valoarea de 483 597,9 GHz/V.

Practic, tensiunea continuă generată de instalația cu efect Josephson depinde doar de frecvența microundelor f , care poate fi determinată cu o eroare de ordinul 10^{-13} , și de numărul de trepte n , care poate fi determinat cu ajutorul unui voltmetru digital cu $8\frac{1}{2}$ digiți.

Deriva mică în timp a tensiunii de zero a instalației cu efect Josephson face ca aceasta să fie cea mai bună alegere pentru etalonul de tensiune continuă.

IV ELEMENTE WESTON

Elementele Weston sunt pile electrice construite în formă de H. Electrocul pozitiv este un amestec mercur-sulfat mercurios. Electrocul negativ este un amalgam de cadmiu. Electrocul este o soluție de sulfat de cadmiu $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$ saturată la 20 °C.

La fabricarea elementelor se folosesc substanțe chimice de înaltă puritate. Vasul este confecționat din sticlă dură, insolubilă, neutră, rezistentă la temperatură.

Bornele sunt realizate din sârmă de platină.



Fig.5 Elemente Weston

Pentru utilizarea corectă a etalonului, trebuie avute în vedere următoarele:

- elementele sunt fragile, deci trebuie manipulate cu o grijă deosebită, în sensul că

trebuie ferite de zdruncinări, vibrații, loviri sau șocuri mecanice;

- trebuie să fie ferite de expunerea la lumină ;
- nu trebuie să fie răsturnate sau înclinate, deoarece se pot combina substanțele din interior, ducând la distrugerea pilei electrice;
- rezistența de sarcină din exteriorul elementului trebuie astfel aleasă încât curentul debitat la borne să fie mai mic de 10^{-8} A ;
- valoarea tensiunii electromotoare (t.e.m.) a elementelor este dependentă de temperatură. Coeficientul de temperatură, α , la 20 °C este de $(-39... - 41) \mu V/^{\circ}C$ iar la 23 °C este de $(-44... - 46) \mu V/^{\circ}C$;
- valoarea tensiunii electromotoare a elementelor este puternic afectată de fenomenul de histerezis termic. Timpul de revenire la valoarea inițială, după modificarea valorii t.e.m., ca urmare a variației temperaturii, este 10 – 30 zile.

Elementele Weston sunt utilizate de obicei pentru etalonarea altor elemente normale, de exactitate mai scăzută, dar și pentru diseminarea unității de măsură la compensatoarele de curent continuu.

Elementele Weston pot fi de tip :

- saturat,
- nesaturat.

V ETALONUL ELECTRONIC CU DIODĂ ZENER

Etalonul electronic cu diodă Zener este un etalon de tensiune continuă care poate genera două valori fixe de tensiune: 1,018 V și 10 V. Acest etalon a apărut ca o necesitate de înlocuire a elementelor Weston cu aparate mai robuste și mai puțin dependente de condițiile ambientale. Este, în general, utilizat ca etalon de transfer de la etalonul cu efect Josephson la alte etaloane de tensiune continuă.



Fig.6 Etaloane electronice cu diode Zener

Etalonul electronic cu diodă Zener are următoarele avantaje:

- nu este influențat decât în mică măsură de temperatura ambiantă, având termostatare încorporată ;
- suportă bine șocurile mecanice și zdruncinările din timpul transportului;
- are acumulator, fapt ce îi conferă o independență a alimentării timp de 72 ore;
- are două tensiuni nominale: 1,018 V (corespunzător tensiunii elementelor Weston) și 10 V (tensiune de referință pentru multe din calibratoarele etalon).

Dezavantajele utilizării etalonului electronic cu diodă Zener sunt:

- stabilitatea valorii tensiunii de ieșire de 1,018 V, dată în cartea tehnică a aparatului, este $0,8 \mu V/lună$. Peste această interval de timp stabilitatea nu mai este precizată de producător, ceea ce presupune ca acest etalon să fie utilizat în 30 de zile de la etalonare sau să existe un istoric al aparatului, din care să se deducă evoluția sa ;
- deriva în timp a valorilor tensiunilor furnizate la borne este aleatoare pe

termen scurt, dar pentru o perioadă mai lungă, de câțiva ani, evoluția valorii poate avea un caracter clar de creștere sau descreștere, de aceea este necesară studierea comportării etalonului pe termen lung.

VI CALIBRATOARE ETALON

Există calibratoare foarte exacte, pentru care producătorul specifică în documentația tehnică incertitudinea de măsurare maximă la un an de ordinul (2-4) ppm. Aceste etaloane sunt etalonate față de instalația cu efect Josephson.

Toate calibratoarele de ultimă generație au posibilitatea de ajustare a valorilor generate cu ajutorul unor programe software încorporate în acestea. Acestea necesită doar trei etaloane externe: 10 V, 1 Ω și 10 kΩ.



Fig.5.7 Calibrator de tensiune continuă

La calibratoarele mai puțin performante calibrarea se face, pentru fiecare domeniu în parte, cu ajutorul potențioanelor de reglaj.

Multe dintre calibratoarele moderne au următoarele facilități:

- pot să-și facă ajustarea tensiunii de offset periodic sau la cerere,
- pot afișa eroarea sau incertitudinea față de o tensiune de referință,
- pot afișa incertitudinea datorată derivei în timp (de la ultima calibrare),

- se pot stabili limite minime și maxime pentru tensiunile generate,
- permit automatizarea procesului de etalonare al multimetrelor digitale.

VI CONCLUZII

Tensiunea continuă este una din mărimile electrice care se poate măsura cu înaltă exactitate.

Unitatea de măsură volt poate fi reprodusă de etalonul primar (instalația cu efect Josephson) cu o incertitudine de ordinul 1×10^{-8} V.

Tensiunea continuă este necesară atât în sisteme de transmitere a energiei electrice cât și în cele de transmitere a informației pe suport electric.

În această lucrare am prezentat cele mai importante etaloane, care generează tensiune electrică în curent continuu, cu care se asigură diseminarea unității de măsură volt.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Pöpel, R., "The Josephson Effect and Voltage Standards"
- [2] Delahaye, F., "Utilisation de l'effect Josephson pour la conservation du volt au LCIE", *Bulletin BNM*, nr.36, 1979
- [3] FLUKE, "Philosophy in Practice Calibration", 1994
- [4] Petley, B.W., "Quantum Metrology and Fundamental Constants", New York, *Plenum*, 1983

Prezentat în data de 25 septembrie 2006;

acceptat în data de 18 noiembrie 2006

Revizia științifică: *dr.ing.Mirella BUZOIANU*

- Absolventă a Universității "Politehnica" din București, Facultatea de Energetică, 1983
- Cercetător științific principal III la INM din 1999



- Doctorand la Universitatea "Politehnica" din București, Facultatea de Inginerie

Electrică, 2006

Livia DRAGOMIR • Șef colectiv current continuu
INM