

# CARACTERIZAREA METROLOGICĂ A GRUPULUI DE REFERINȚĂ DE TENSIUNE ELECTRICĂ ÎN CURENT CONTINUU, UTILIZÂND ETALONUL PRIMAR BAZAT PE EFECT JOSEPHSON

## *METROLOGICAL CHARACTERIZATION OF DC REFERENCE VOLTAGE GROUP BY COMPARISON WITH PRIMARY VOLTAGE STANDARD BASED ON THE JOSEPHSON EFFECT*

*Marciana SIMIONESCU, Liliana CÎRNEANU*

INSTITUTUL NAȚIONAL DE METROLOGIE  
NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY

**Rezumat:** *Articolul prezintă aspecte privind realizarea, dezvoltarea, menținerea etalonului național de tensiune electrică în curent continuu, precum și modul în care este asigurată corectitudinea măsurărilor din acest domeniu în cadrul Institutului Național de Metrologie.*

**Cuvinte cheie:** *metrologie, efect Josephson, etalon național de tensiune electrică în curent continuu*

**Abstract:** *The paper presents relevant aspects concerning the realization, development and maintaining the national electrical DC voltage standard within the National Institute of Metrology (INM). The way is ensured the correctness of measurements throughout Romania is also depicted.*

**Keywords:** *metrology, Josephson effect, national DC voltage standard*

### 1. INTRODUCERE

Efectul Josephson este folosit în cele mai importante institute naționale de metrologie din lume pentru realizarea etalonului primar de tensiune electrică. Împreună cu efectul Hall cuantic (un alt important fenomen cuantic din fizica solidului) efectul Josephson a condus la o îmbunătățire substanțială a măsurărilor electrice la nivel mondial.

În acest context, articolul prezintă situația etalonului național de tensiune electrică în curent continuu, dezvoltat în Institutul Național de Metrologie din România.

### 2. DEZVOLTAREA ETALONULUI NAȚIONAL DE TENSIUNE ELECTRICĂ ÎN CURENT CONTINUU

Din anul 2006, vechiul etalon național de tensiune electrică în cc format din elemente Weston construite în 1964, a fost înlocuit cu un grup de etaloane de tensiune cu diodă Zener, fabricație Fluke tip 732 B [1] prezentat în figura 1.

### 1. INTRODUCTION

The Josephson effect is worldwide used within the most important National Metrology Institutes as primary voltage reference. Together with the quantum Hall effect (another important quantum phenomenon in solid state physics) the Josephson effect substantially improved the global electrical measurement uncertainty.

In this frame, recent progress in the field of DC voltage measurements in the National Institutes of Metrology Romania is described in respect with the national DC voltage standard.

### 2. DEVELOPING THE NATIONAL DC VOLTAGE STANDARD

Starting 2006, the former national DC voltage standard consisting of Weston cells built in 1964, was replaced by a group of Fluke type 732 B Zener voltage standards [1], as shown in Figure 1.



**Fig. 1** Etaloane de tensiune tip Fluke 732B cu diodă Zener  
*Fig.1 Fluke type of 732B Zener voltage standards*

La sfârșitul anului 2011, a fost achiziționat etalonul primar de tensiune electrică (etalonul cu cele mai înalte calități metrologice, a cărui valoare este atribuită fără raportare la alte etaloane ale aceleiași mărimi [2]) bazat pe efect Josephson.

Acest etalon se bazează pe efectul teoretic descoperit în anul 1962 de Brian Josephson, care constă în expunerea unei joncțiuni de tipul SIS (Nb/AlOx/Nb) la o radiație electromagnetică de frecvență  $f$ . S-a observat că apar trepte cuantificate de tensiune, descrise de relația:

$$V_n = nf/K_J$$

unde:

$n$  - este numărul de trepte

$K_J$  - este constanta Josephson

$K_J = 2e/h$ , unde  $e$  este sarcina elementară și  $h$  este constanta Planck

S-a atribuit prin consens internațional, valoarea acestei constante:

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

cu o incertitudine standard relativă de  $4 \times 10^{-7}$ .

Graficele din figurile de mai jos, reprezintă caracteristicile curent-tensiune ale unei joncțiuni tip SIS înainte și după ce a fost expusă unei radiații electromagnetice cu frecvența de 75 GHz și treptele cuantificate de tensiune la 10 V.

Caracteristica tensiune-curent a joncțiunii tip SIS după ce a fost expusă unei radiații electromagnetice cu frecvența  $f$  reprezintă înfășurătoarea a aproximativ 130000 de trepte cuantificate de tensiune [3].

At the end of 2011, it was acquired a primary voltage standard based on Josephson effect (standard having the highest metrological qualities, and the value assigned without reference to other standards of the same quantity [2]).

This standard is based on the theoretical effect discovered by Brian Josephson in 1962. When exposed to electromagnetic radiation of frequency  $f$  a SIS junction (a thin insulating barrier between two superconductors: (Nb/AlOx/Nb)), the DC voltage across the junction can only take discrete values given by:

$$V_n = nf/K_J$$

where :

$n$  - an integer which identifies a constant voltage step

$K_J$  - Josephson constant

$K_J = 2e/h$ ,  $e$  - elementary charge and  $h$  - Planck constant

The value of  $K_{J90}$  has been defined since 1990 to be equal to

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

within a one standard-deviation-uncertainty of  $4 \times 10^{-7}$ .

The charts below represents the current – voltage characteristic of a SIS junction before and after exposure to electromagnetic radiation of frequency of 75 GHz and the formation of stable Josephson voltage steps at 10 V.

The current – voltage characteristic of a SIS junction after exposed to electromagnetic radiation of frequency  $f$  represents the envelope of nearly 130000 quantized voltage steps [3].

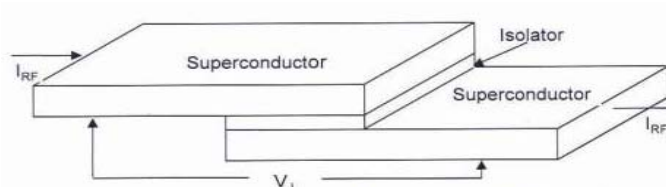
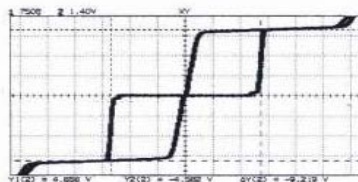


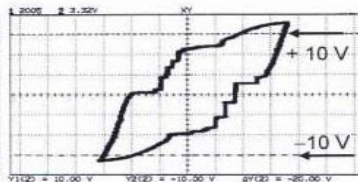
Fig. 2a: Superconductor-Isolator-Superconductor (SIS) Josephson junction (JJ).



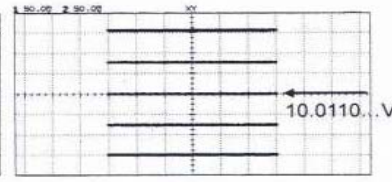
Fig. 2b: JJ integrated in a CPS transmission line.



x = 75  $\mu$ A / div y = 14 V / div  
Fig. 2c:  
Current-voltage characteristic of a 19700 SIS Josephson junction array without microwave irradiation.



x = 20  $\mu$ A / div y = 3.32 V / div  
Fig. 2d:  
Current-voltage characteristic of a 19700 SIS Josephson junction array with microwave irradiation



x = 5  $\mu$ A / div y = 100  $\mu$ V / div  
Fig. 2e:  
Formation of stable Josephson voltage steps at 10 V.

**Fig.2** Caracteristicile curent-tensiune ale unei jonctiuni tip SIS înainte și după ce a fost expusă unei radiații electromagnetice cu frecvența de 75 GHz și treptele cuantificate de tensiune la 10 V

**Fig. 2** The current – voltage characteristic of a SIS junction before and after exposed to electromagnetic radiation of frequency at 75 GHz and the formation of stable Josephson voltage steps at 10 V

Instalația cu efect Josephson achiziționată de INM, este prezentată în figura 3.

Instalația este compusă din: jonctiune Josephson tip SIS, cryocooler și unitate de control cu microprocesor (1); unitate electronică (2); sursă pentru blocarea frecvențmetrului (3); detector de nul (nanovoltmetru) (4); comutator cu 3 canale pentru schimbarea polarității (5); senzor pentru temperatură, umiditate, presiune atmosferică (6); computer cu interfață IEEE cu soft dedicat pentru controlul întregului sistem (7); compresor (8).

The complete Josephson voltage system developed within the INM is presented in Figure 3.

The system consists of the following components: Cryoprobe with 10 V SIS JJ Array Chip in the pulse tube cooler and the Microwave Electronics (1); JVS Electronics Unit (2); EIP Source Locking Microwave Counter (3); Nanovoltmeter as Null Detector (4); 3 –channel Polarity Reversal Switch (5); Sensors for Temperature, Pressure and Humidity (6); Laptop (7); Compressure Unit (8).



**Fig. 3** Instalația cu efect Josephson  
**Fig. 3** The Josephson voltage system

Asigurarea trasabilității valorilor etalonului național la SI s-a realizat până în 2011 (anul achiziționării etalonului primar) prin etalonarea periodică a unuia dintre cele cinci etaloane de tensiune cu diodă Zener, la BIPM sau la alt institut național cu capacitate recunoscută CIPM-MRA.

Începând din 2012, unitatea de măsură se transmite prin comparare directă față de etalonul primar bazat pe efect Josephson al INM care va fi atestat ca etalon național, urmând să participe la o comparație cheie din cadrul EURAMET, existând un acord de principiu cu BIPM pentru participarea la o comparație bilaterală anul acesta. Grupul compus din cinci etaloane de tensiune cu diodă Zener va deveni grup de referință și va face parte din etalonul național.

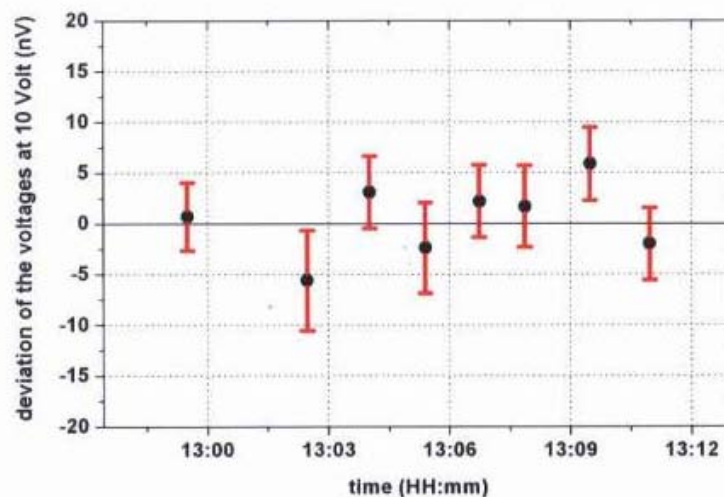
Până la confirmarea capacității INM în domeniul transmiterii unității de la etalonul primar de tensiune electrică în cc, rezultatul obținut la compararea etalonului primar al INM cu un etalon similar aflat în posesia Institute of Photonic Technology Germania (fabricantul joan tip SIS pe care se bazează întreg sistemul) dovedește buna funcționare a sistemului.

Before 2011 (the year when the primary standard was purchased), the trasability of national DC voltage standard to the SI was assured through periodic calibration of one of the five Zener voltage standards at the BIPM or another National Institute having recognized calibration and measurement capability in CIPM-MRA.

Since 2012, the measurement unit is transmitted by direct comparison to the INM Josephson standard to be certified as national standard. For this purpose, there is a preliminary agreement with the BIPM for a bilateral comparison within the EURAMET for this year. The group consisting of the five Fluke type 732 B Zener standards will become the reference group and will be part of the national standard.

Pending confirmation on INM capability in DC voltage area, Figure 4 shows the results obtained in the direct comparison of the INM primary standard with the similar standard of the German Institute of Photonic Technology (the manufacturer of SIS junction on which the whole system is based upon). This result proves the proper functioning of the system.

**Direct comparison of the SupraVOLT control system no. 09 to the IPHT Josephson voltage standard system**



**Fig. 4** Rezultatele obținute la compararea etalonului primar al INM cu un etalon similar aflat în posesia Institute of Photonic Technology Germania

**Fig. 4** The results obtained in direct comparison of INM primary standard to the similar standard of German Institute of Photonic Technology

### 3. ASPECTE PRIVIND DESFĂȘURAREA ETAPELOR CARACTERIZĂRII METROLOGICE

Acest articol se referă la caracterizarea metrologică a grupului etalon de referință de tensiune electrică în curent continuu, pentru tensiunile de 1,018 V și 10 V, prin etalonare față de etalonul primar de tensiune electrică bazat pe efect Josephson [4].

#### 3.1 Modul de lucru și instalații utilizate

Operarea instalației bazate pe efect Josephson, necesită multe precauții datorită complexității sale și a condițiilor de funcționare: temperatura de 4,2 K la care trebuie să ajungă joncțiunea aflată în cryocooler, temperatura heliului lichid la presiune normală.

Înainte de a începe procesul de răcire, sunt necesare conexiuni speciale între componentele cryocooler și celelalte componente ale instalației [5]. Este necesară o monitorizare permanentă a temperaturii și presiunii din cryocooler și sunt necesare aproximativ 3 ore pentru a ajunge la presiunea de operare:  $\leq 1 \times 10^{-3}$  mbar.

După pornirea compresorului se așteaptă încă aproximativ 5 ore pentru a se ajunge la temperatura de operare de cca 4,2 K, se măsoară curentul critic (cca 105  $\mu$ A) și se poate începe procesul de măsurare.

În timpul măsurărilor am avut următorii parametri în sistem: temperatura de 3,58 K, presiunea de  $8,4 \times 10^{-5}$  mbar și curentul critic 102  $\mu$ A  $\div$  106  $\mu$ A. Acești trei parametri trebuie măsurați în mod repetat, deoarece indică buna funcționare a sistemului.

Etalonul de referință de tensiune electrică în cc, compus din cinci etaloane cu diodă Zener tip Fluke 732 B, trebuie permanent alimentat de la rețeaua de energie electrică. Nealimentarea pe termen lung (peste 24 h) cu energie a celor cinci etaloane, conduce la modificarea valorilor tensiunilor generate. În timpul măsurărilor a fost necesară deconectarea lor de la rețea, deoarece zgomotul era prea mare și măsurarea nu se putea realiza.

#### 3.2 Determinări experimentale și prelucrarea rezultatelor

În cadrul măsurărilor, etalonul tip Fluke 732 B a fost conectat așa cum este indicat în figura 5.

### 3. ASPECTS OF DEVELOPMENT STAGES OF METROLOGICAL CHARACTERIZATION

This paper discusses the metrological characterization of the DC reference voltage group (the two output voltages: 1,018 V and 10 V respectively), by comparison with the primary voltage standard based on the Josephson effect [4].

#### 3.1 Measurement procedure and equipment

Operating a system based on the Josephson effect requires more caution due to its complexity and operating conditions: 4,2 K temperature of liquid helium at normal pressure.

Before starting the cooling process, special connections between cryocooler components and other system components are required [5]. Continuous monitoring of temperature and pressure in cryocooler is necessary and approximately 3 hours to reach the operating pressure:  $\leq 1 \times 10^{-3}$  mbar.

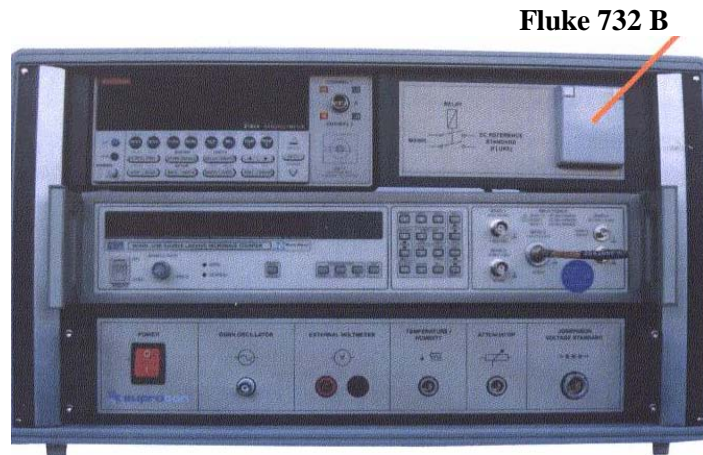
After starting the compressor still need to expect about 5 hours to reach operating temperature (about 4,2 K), the critical current (about 105  $\mu$ A) is measured and the process of measurement can start.

During measurements the following parameters were maintained in the system: temperature of 3,58 K, pressure of  $8,4 \times 10^{-5}$  mbar and critical current of 102  $\mu$ A  $\div$  106  $\mu$ A. These three parameters must be repeatedly measured, as they indicate proper functioning of the system.

Reference DC standard voltage group consisting of the five Fluke type 732 B Zener standards must be permanently powered by the electricity grid. The long-term lack of electricity supply (over 24 h) of the five standards leads to modifying the generated voltage. During the measurements it was necessary to remove them from the network, because the noise was too high and the measurement could not be done.

#### 3.2 Experimental works and results processing

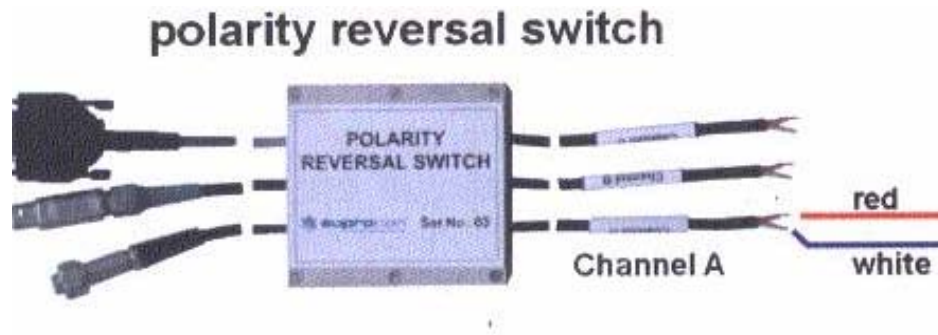
Fluke type 732 B standard has been connected as shown in Figure 5.



**Fig.5** Realizarea conexiunii etalonului tip Fluke 732 B  
**Fig.5** Connection of Fluke 732 B standard

Se pot conecta ambele ieșiri (de 1,018 V și de 10 V) ale etalonului fabricație Fluke, simultan, prin intermediul comutatorului inversor prezentat în figura 6.

The polarity reversal switch of the Fluke type standard shown in Figure 6, allows a simultaneous calibration at two voltage values (1,018 V and 10 V).



**Fig.6** Comutatori inversor  
**Fig. 6** Reversal switch

După ce au fost efectuate toate conexiunile necesare, s-a accesat funcția "Calibration" din programul instalat pe laptopul conectat în sistem și a fost setată etalonarea uneia sau a ambelor ieșiri ale etalonului de referință tip Fluke 732 B și a numărului de citiri (între 1 și 8). Au fost indicate în timpul fiecărei măsurări: tensiunea etalonului supus măsurării, deviația standard și tensiunea termoelectrică. Fiecare citire este rezultatul a 40 de măsurări: 20 pe polaritate pozitivă, 20 pe polaritate negativă.

La sfârșitul măsurărilor este indicată media valorilor măsurate și deviația standard corespunzătoare acestora, conform figurii 7 de mai jos:

After all necessary connections was carried out, the Calibration soft key is started (Figure 7 appears on the display) and the operator enter the desired number of data points from a minimum 1 to a maximum 8. In a table, the calculated data points of the voltage of the device under test, their standard deviations and the thermal voltages are displayed. Each measured data points and its standard deviation is calculated from forty measurements, twenty in the positive and twenty in the negative polarity. At the bottom of the table the average value of the voltage of the Fluke type 732B standard is given. The corresponding standard deviation is calculated from the data points.

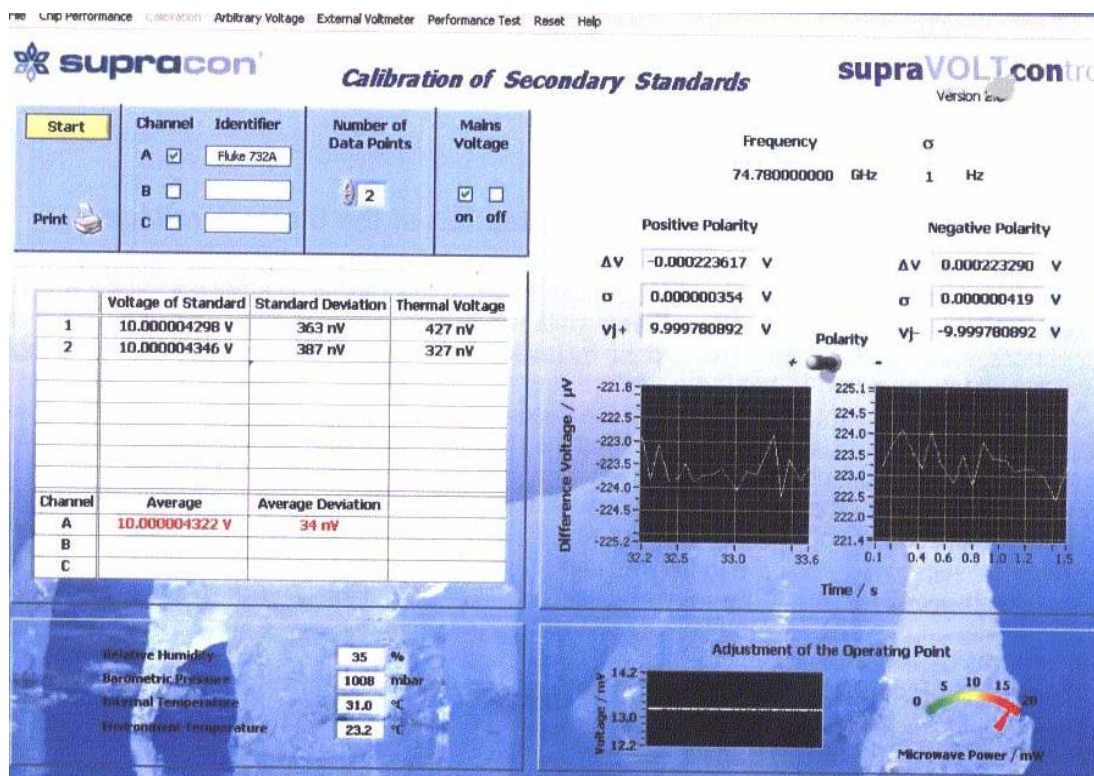


Fig. 7 Afişarea rezultatelor obținute în timpul măsurărilor  
 Fig. 7 User interface in measurement process

### 3. 3 Rezultate experimentale

Ecuția de bază folosită pentru obținerea măsurandului este:

$$V_X = \frac{n}{K_{J-90}} f + V_{DVM} - \delta V_{leak} - \delta V_{gain} - \delta V_{offset}$$

unde:

$f$  - frecvența aplicată

$n$  - treapta la care este setată joncțiunea Josephson (distanța între două trepte învecinate este de aproximativ 155 μV)

$K_{J-90}$  - constanta Josephson, egală cu 483597,9 GHz/V

$V_{DVM}$  - diferența dintre tensiunea joncțiunii Josephson și tensiunea etalonului necunoscut, măsurată cu voltmetrul digital

$\delta V_{leak}$  - tensiunea de scurgere datorată rezistenței cablurilor și a rezistenței de scurgere între cabluri

$\delta V_{gain}$  - deviația de tensiune datorată erorii de pantă a voltmetrului digital

$\delta V_{offset}$  - corecție datorată tensiunilor termoelectromotoare EMF în cabluri

Fiecare dintre cele cinci etaloane de tensiune cu diodă Zener din grupul de referință a fost etalonat față de etalonul primar [6], iar rezultatele obținute s-au încadrat foarte bine în istoricul acestora, așa cum a fost prezentat și în

### 3. 3 Experimental Results

The equation used to calculate the measurement result is:

$$V_X = \frac{n}{K_{J-90}} f + V_{DVM} - \delta V_{leak} - \delta V_{gain} - \delta V_{offset}$$

where:

$f$  - The frequency of the applied microwave power.

$n$  - Step number to which the Josephson array is set (the distance between neighbouring steps is about 155 μV).

$K_{J-90}$  - The Josephson constant, equal to 483597,9 GHz/V.

$V_{DVM}$  - The voltage difference between the Josephson array and the device under test as measured with the digital voltmeter.

$\delta V_{leak}$  - Leakage voltage drop due to the finite resistance of the leads and the leakage resistance between the leads.

$\delta V_{gain}$  - The voltage deviation due to gain error of the digital voltmeter

$\delta V_{offset}$  - Residual offset voltages due to thermal EMF's in the leads

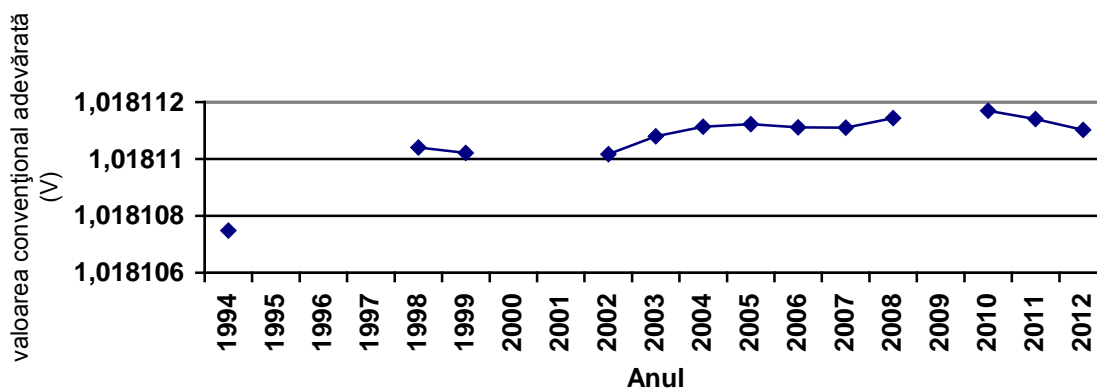
Each of the five voltage reference standards group was calibrated by comparison to the primary voltage standard [6], and the results were well placed in its history, as it was

“Raportul privind etalonul național al unității de măsură volt a tensiunii electrice în curent continuu” de la sfârșitul anului 2012.

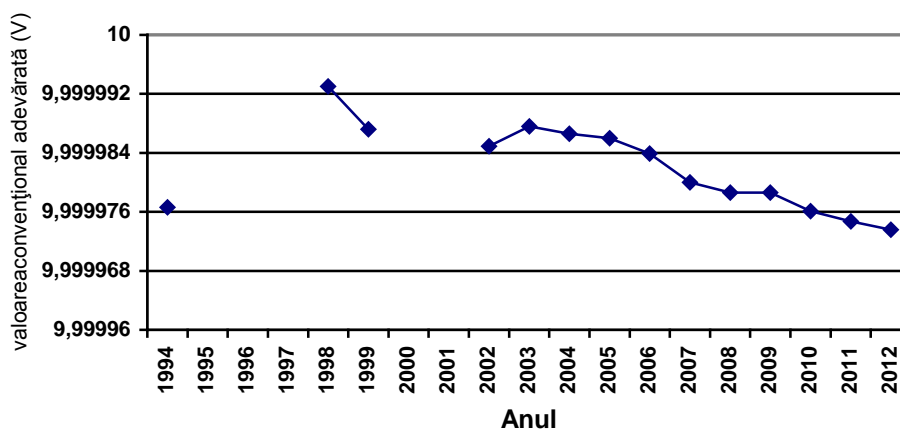
În figurile 8 – 9 este prezentată comportarea în timp a celui mai vechi dintre cele 5 etaloane de referință:

presented at the end of 2012 in the "Report on the national standard of the DC electrical voltage".

In figure 8 – 9 is presented the long time behavior of the previous five reference voltage standard:



**Fig. 8** Comportarea în timp a etalonului tip Fluke 732 B nr.5940003, pentru tensiunea de 1,018 V  
**Fig. 8** The long time behavior of Fluke 732 B standard nr.5940003, for 1,018 V output



**Fig. 9** Comportarea în timp a etalonului Fluke 732 B nr.5940003, pentru tensiunea de 10 V  
**Fig. 9** The long time behavior of Fluke 732 B standard nr.5940003, for 10 V output

#### 4. CONCLUZII

Achiziționarea etalonului primar de tensiune electrică în cc în decembrie 2011, a însemnat un important salt calitativ pentru etalonul național de tensiune electrică în cc și alinierea INM în rândul marilor institute naționale de metrologie.

Pe termen scurt, Laboratorul Mărimi Electromagnetice din INM intenționează să

#### 4. CONCLUSIONS

Purchasing the primary DC voltage standard in December 2011, represented a qualitative leap for the national DC voltage standard and the alignment of INM among the important national Institutes of Metrology.

On short term the Electromagnetic Measurements Laboratory within INM intends



participe la o comparație cheie din cadrul EURAMET care să demonstreze capacitatea noastră de a transmite unitatea și calitatea etalonului primar bazat pe efect Josephson de a fi atestat ca etalon național.

Până la realizarea acestei comparații, rezultatele obținute confirmă preliminar buna funcționare a etalonului primar, faptul că valorile obținute pentru grupul etalon de referință se încadrează bine în istoricul grupului și că este asigurată corectitudinea măsurărilor din acest domeniu.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Documentația etalonului național al unității de măsură *volt* (*V*) a tensiunii electrice în curent continuu
- [2] ISO/CEI Guide 99-12:2007 International Vocabulary of Metrology
- [3] JVS supraVoltcontrol Training Documentation, Supracon
- [4] PS – 15 - 3.1 – INM Etalonarea etalonului de transfer cu diodă Zener față de etalonul primar de tensiune electrică în curent continuu
- [5] JVS supraVoltcontrol Manual, Supracon
- [6] ISO/CEI Guide 98-3 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement

### *Revizia științifică:*

*Dragoș BOICIUC*, doctor, cercetător științific gradul I, e-mail: [dragos.boiciuc@inm.ro](mailto:dragos.boiciuc@inm.ro)

### *Despre autori:*

*Marciana Simionescu*, cercetător științific III la INM, e-mail: [marciana.simionescu@inm.ro](mailto:marciana.simionescu@inm.ro)

*Liliana Cîrneanu*, cercetător științific III, Șef al Laboratorului Mărimi Electrice al INM, e-mail: [liliana.cirneanu@inm.ro](mailto:liliana.cirneanu@inm.ro)

to participate in an EURAMET key comparison to demonstrate our capability to transmit the unit and the quality of the primary DC voltage standard to be attested as national standard.

Pending this comparison, the obtained preliminary results demonstrate a proper functioning of primary DC voltage standard, the values obtained for standard reference group fitted well in the history of the group and the measurement accuracy is good ensured in this metrological area.

## REFERENCES

- [1] The National DC voltage standard. Documentation
- [2] ISO/CEI Guide 99-12:2007 International Vocabulary of Metrology
- [3] JVS supraVoltcontrol Training Documentation, Supracon
- [4] PS – 15 - 3.1 – INM The calibration of the transfer solid state voltage standard against the primary Josephson voltage standard
- [5] JVS supraVoltcontrol Manual, Supracon
- [6] ISO/CEI Guide 98-3 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement

### *Scientific revue:*

*Dragoș BOICIUC*, doctor, scientific researcher I<sup>st</sup> degree, e-mail: [dragos.boiciuc@inm.ro](mailto:dragos.boiciuc@inm.ro)

### *About the authors:*

*Marciana Simionescu*, scientific researcher III<sup>rd</sup> degree, e-mail: [marciana.simionescu@inm.ro](mailto:marciana.simionescu@inm.ro)

*Liliana CÎRNEANU*, scientific researcher 3<sup>rd</sup> degree, Head of INM Electrical Measurements Laboratory, e-mail: [liliana.cirneanu@inm.ro](mailto:liliana.cirneanu@inm.ro)