

Etaloniranje DC napona i struje u konceptu Industrije 4.0

Zdravko Gotovac, Marjan Urekar, *Member, IEEE*

Apstrakt—Rad predstavlja kratak istorijski i tehnički pregled etaloniranja u oblasti jednosmjernog napona i struje, kao i diskusiju potencijalnih iskoraka koje je moguće napraviti u svjetlu novih naučnih otkrića, kao i tehnoloških napredaka. Objasnjava razvoj različitih etalonskih tehnologija, njihovih međusobnih razlika, kao i njihovih usvajanja i upotrebe od strane internacionalnih organizacija odgovornih za postavljanje i održavanje etalona.

Ključne reči—Etalon, jednosmjerni napon, jednosmjerna struja, etaloniranje, Industrija 4.0

I. ISTORIJSKI UVOD

1. Saturisane i Nesaturisane Vestonove ćelije

Saturisane i Nesaturisane Vestonove ćelije su praktično identične. Jedina razlika između njih je ta što nesaturisane ćelije ne sadrže kadmijum-sulfatne kristale, pa je njihova temperatura smanjena na 4°C. U poređenju sa saturiranim ćelijama, napon nesaturiranih je veći i mnogo nestabilniji, ali ima bolji temperaturni koeficijent.

2. Istorija ćelijskih etalona

Elektrohemijske ćelije, sa hemijski proizvedenim temperaturnim naponskim driftom, bile su najpraktičnija prvobitna rješenja. Danjelova ćelija, koja se sastoji od elektroda bakra i cinka u kombinaciji sa elektrolitima bakar-sulfata i cink-sulfata je napravljena, ali se pokazala nestabilnim rješenjem. Latimer Klark napravio je 1872. godine ćeliju koja se sastojala od žive, cink-mangana, elektroda saturisanih cink-sulfatom koja je smještena u stakleno kućište da spriječi isparavanje elektrolita. 1892. godine Veston je napravio kadmijumske ćelije sa dodatnim poboljšanjima u ponovljivosti i stabilnosti.

3. Istorijско održavanje (etaloniranje) volta

NBS (The United States National Bureau of Standards) je postavio 12 Vestonovih kadmijumskih ćelija za upotrebu 1906. godine da budu korištene za prenos i upotrebu. Konstanta efekta termičkog napona koja je određena za ove ćelije je bazirana na poređenju sa Klarkovim ćelijama. Maja 1910. godine, eksperimentom sa srebrnim i živinim voltmetrima popravili su vrijednosti internacionalnog ampera. Etalon volta, održavan u obliku Vestonovih ćelija, ispostavilo se da ima vrijednost od 852 μV. Narednih 61 godinu, vrijednost volta je održavana paketom saturisanih etalonskih ćelija. Nadležnost nad svim etalonima potpada pod dužnost BIPM (*Bureau international des poids et mesures*).

II. ETALONI JEDNOSMIJERNOG NAPONA I STRUJE

1. SI definicija jednosmjerne struje i napona

Amper je bazna jedinica za jačinu električne struje u Međunarodnom Sistemu Jedinica. SI definicija volta je

Zdravko Gotovac – Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija (e-mail: gotovaczdravko17@gmail.com).

Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija (e-mail: urekarm@uns.ac.rs).

izražena preko jedinice za jačinu električne struje ampera (A) i jedinice za snagu vat (W).

1.1. Amper

SI sistem povezuje jedinicu za snagu i jedinicu za jačinu električne energije, definišući amper kao “konstantnu jačinu električne struje koja, ako prolazi kroz dva paralelna provodnika sa zanemarljivom površinom poprečnog presjeka koji se nalaze na rastojanju od 1m u vakuumu, proizvodi silu koja je jednaka 2×10^{-7} njutna (N) po metru (m) dužine provodnika”. Zbog toga što je teško praktično ostvariti ovaj eksperiment, dolazi do velikih grešaka koje iznose nekoliko ppm (parts per million) [1]. Magnetno polje koje stvaraju namotaji, dok struja protiče kroz njih, i privlačna sila koju magnetno polje stvara na lijevoj strani su izbalansirani sa desne strane tegom poznate težine. Sila je prouzrokovana elektromagnetnim poljem koje sa javlja prilikom kretanja elektrona. Drugim riječima, jedan amper je jednak protoku jednog kulona elektrona tokom svake sekunde unutar električnog kola. Zbog toga što je nepraktičan za realizaciju, ne postoji standardni etalon ampera, i on je realizovan koristeći se odnosom volta (V) i oma (Ω), $I=E/R$ gdje je: I – jačina električne struje u amperima

E – elektromotorna sila izražena u voltima

R – otpornost izražena u omima

1.2. Volt

Volt je definisan preko ampera u Sistemu SI jedinica kao „razlika električnog potencijala između dvije tačke na električnom provodniku, prilikom čega kroz njega protiče električna struja jačine jednog ampera i na njemu se disipira snaga od jednog vata“. Koristeći se mehaničkim jedinicama volt je:

$$V=W/A \quad W=J/s \quad J=Nm \quad (1), \text{ gdje je}$$

J – džul (izvedena SI jedinica za rad/energiju)

2. Etaloni jednosmjernog napona

Mnogobrojne nacionalne laboratorije su sprovele eksperimente u oblasti fizike kojima su obezbijedili realizaciju etalona ampera, volta i oma. Otkrića u oblasti kvantne mehanike su dovela do nove realizacije volta i oma, koristeći se Džozefsonovim i Kvantnim Holovim efektom [2]. Etalon volta izrađen u tehnologiji diskretne elektronike i saturisane standardne ćelije su takođe korištene kao etaloni volta.

2.1. Etaloni izrađeni korišćenjem Džozefsonovog spoja

Džozefsonov efekat je fizička pojava kod superprovodnika, koja je odnos napona i frekvencije predstavljen preko osnovnih konstanti. Džozefsonov niz, koristeći integrisano električno kolo u kom se nalazi veliki broj Džozefsonovih spojeva, je intrinzični, nezavisno izvedeni etalon koji je korišten, umjesto SI realizacije volta. Napon koji se javlja na jednom Džozefsonovom spoju predstavljen je sa

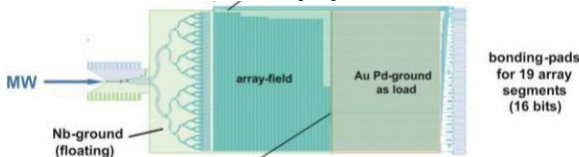
$$V_i = \frac{nf}{K_{j-90}} \quad (2), \text{ gdje su:}$$

V_i – napon presjeka
 f – frekvencija u GHz
 K_{j-90} – 483597.9 GHz

n – pozitivni ili negativni prost broj

Od 1988. godine, CiPM (*Certificate in Investment Performance Measurement*) preporučuje da sve laboratorije na nacionalnom nivou, koriste istu vrijednost Džozefsonove konstante. K_{j-90} ($K_{j-90} = 483597.9 \text{ GHz}$) je preporučena vrijednost koja je stupila na snagu 1. januara 1990. godine.

Džozefsonov efekat [3] je otkriven 1962. godine, koji se javlja između dva superprovodnika, koji su razdvojeni tankim slojem izolatora u vidu oksida. Džozefsonov niz obezbjeđuje (slika 1) DC napon upotrebom 18992 spoja (može i više) koji su redno vezani, bar što se tiče njihovog DC napona i struje polarizacije. Međutim, što se tiče AC struje, spojevi su organizovani kao 16 paralelnih grupa od po 1187 spojeva koji su redno povezani, i zbog visokih kapacitivnosti, se ponašaju kao provodna traka. Kada mikrotalasi koji nose snagu emitovanu iz Gunn diode prođe kroz njih, pri jednakoj impedansi na kraju svake grupe. Filtrirajući kondenzatori i kalemovi su korišteni za razdvajanje DC i AC veličina.



Slika 1 Džozefsonov niz

Spojevi se nalaze u kriogenoj komori rashlađeni na 4.2 K upotrebom tečnog helijuma. Uniformnost u predstavljanju etalona DC napona među laboratorijama na nacionalnom nivou, koji se zasniva na Džozefsonovom spoju, postignuta je 1. januara 1990. godine. Ranije izrade etalona volta zasnovane na Džozefsonovom spoju bile su nepraktične za upotrebu, najviše zbog toga što se javlja mali naponski nivo, čija je vrijednost 10mV, na jednom Džozefsonovom spoju. Pokušaji da se spojevi povežu u red da bi se obezbijedio veći naponski nivo, ograničene su zbog toga što je neophodno obezbijediti nezavisnu struju polarizacije za svaki pojedinačni spoj. Problem struje polarizacije je izbjegnuto tako što se prave spojevi velike kapacitivnosti, koji su serijski povezani, i koji su pobuđeni mikrotalasnom AC strujom čija je frekvencija značajno veća od plazma frekvencija tih spoja. Plazma frekvencija je prirodna rezonantna frekvencija, koja je funkcija induktivnosti i kapacitivnosti spoja. Ova tehnologija je upotrebljena u Džozefsonovom nizu koji može da proizvede 15×10^4 kvantifikovanih DC naponskih nivoa u rasponu od -10V do 10V.

Dok bi bilo dobro posjedovati naprednu tehnologiju kao što je Džozefsonov spoj, ta tehnologija je skupa za nabavku i za održavanje. Cijena nabavke Sistema Džozefsonovog spoja u Americi 1992. godine je iznosila \$85000, dodatnih \$25000 potrošeno je na inženjerske poslove i puštanje sistema u rad. Godišnji radni troškovi iznose \$10000, od kojih većina predstavlja cijenu tečnog helijuma. Danas najskuplji programabilni sistemi koštaju i do nekoliko stotina hiljada dolara (SRI 6000e Series Programmable Josephson Voltage

Standard košta preko \$300000) [4]. Troškovi na helijum se mogu smanjiti upotrebom zatvorenog helijumskog sistema. Adekvatni naponski etaloni mogu biti izrađeni i u diskretnoj elektronici. Moderne kalibracije zasnovane na statističkim metodama i šeme održavanja, omogućavaju postavljanje standarda sa malim mjernim greškama nesigurnosti, koje su tipično do 0.3 ppm. Dok je sistem Džozefsonovog spoja sam po sebi sposoban da da mjerenja sa mjernom nesigurnošću od nekoliko milijarditih djelova, mora se uzeti u obzir da na većinu etaloniranja utiče šum i nestabilnost koju izaziva uređaj koji kalibrišemo.

2.2. DC naponski etaloni izrađeni u diskretnoj elektronici
 Danas se koriste dva tipa DC naponskih etalona izrađenih u diskretnoj elektronici: referentni pojačavač sa integrisanom zener diodom i jednu ili više temperaturno kompenzovanih zener dioda, koji su prevazišli ograničenja saturisanih standardnih ćelija. Etaloni izrađeni u tehnologiji diskretne elektronike su mehanički robusni, i mogu da se ponašaju kao strujni potrošač i izvor. Bez ikakvih fizičkih oštećenja, i imaju malu temperaturnu disipaciju. Pored toga, mogu da se ponašaju kao izvor visokih napona koji smanjuje efekte termalnog naponskog šuma koji se javlja u spojevima. Ovo ih čini boljim za upotrebu i kalibraciju.

Referentni pojačavač je integrisano električno kolo koje se sastoji od zener diode i tranzistora. Referentni napon V_{ref} , je suma napona zener diode i napona koji se nalazi između baze i emitera na tranzistorskom spoju. Ova konfiguracija obezbjeđuje temperaturnu kompenzaciju, kao i stabilnije stanje prilikom upotrebe. Referentni pojačavač ima prednosti u odnosu na upotrebu diskretne zener diode. Struja u zener diodi se može podešavati nezavisno od struje baze tranzistora. Tako se može podesiti kolektorska struja referentnog pojačavača da bude blizu neutralne.

Otkrića 1950-ih iz fizike koja se bave čvrstim stanjem materije, između ostalog su dovela do otkrića zener diode, i naponskih regulatora diskretne elektronike. Prvobitne zener diode nisu bile naročito stabilne i imale su velike nivoe šuma. Današnje, naprednije, zener diode imaju stabilnost uporedivu sa saturisanim ćelijama. Međutim, čak i kada se proizvode koristeći istu tehnologiju na istoj traci, one nisu iste, i postoje značajne razlike prilikom dugotrajne upotrebe. Te razlike je možda nemoguće detektovati kratkotrajnim testiranjem, ali one moraju biti definisane selektivnim dugotrajnim testiranjima, koja se obavljaju pod precizno određenim uslovima i električnim zahtjevima. Diskretne zener diode imaju mnoge poželjne karakteristike. Mehanički su stabilne i na njih ne utiču razumni nivoi udara i vibracija, i relativno stabilne u ekstremnim temperaturnim uslovima.

Većina dioda posjeduje temperaturni koeficijent (TC). Zener diode pravljenе za primjene prilikom upotrebe referentnih naponskih nivoa imaju pozitivan TC od $\sim 2\text{mV}/^\circ\text{C}$, kombinovane su sa normalno polarizovanom diodom koje imaju negativan TC koji iznosi $\sim -2\text{mV}/^\circ\text{C}$. Tako dobijamo električno kolo sa TC bliskim nuli. Tipične vrijednosti radnog napona referentne zener diode je između 6.2 i 6.3V. Koriste se kao šantovski naponski regulator, koji neće biti oštećen nizom kratkih spojeva na njegovim priključcima, i može brzo vratiti naponski nivo na izlazu kada se otklone kratki spojevi. Prilikom implementacija, gdje je potrebno dati struju pri

referentnom naponskom nivou, napon na zener diodi može biti povezan na bafer, koji će obezbijediti neophodnu struju. Radni napon zener diode značajno smanjuje efekat termičkog bježanja, koji se javlja na spojevima. Problem je što 6.2V nije pogodan referenti naponski nivo za laboratoriju, pa se zener dioda koristi kao osnova za dobijanje referentnih nivoa od 10V ili 1.018V. Pojačavač tog izvora obezbijeduje izolaciju referentne zener diode i mogućnost da pruži povećanu izlaznu struju pri referentnim naponskim nivoima, kao i ograničenje struje u slučaju kratkog spoja. Nedostatak diskretnog pojačavača, u poređenju sa referentnim pojačavačem, je ta što može da unese grešku prilikom definisanja referentnog napona. Ofset i šum u pojačavaču, drift u naponskom razdjelniku, drift u izlaznoj kontrolnoj jedinici, direktno dodaju ofset referentnom naponu zener diode, zbog čega utiču na izlazni napon od 10V. Ako postoje izlazi od 1V ili 1.018V, oni su obično napravljeni upotrebom naponskog razdjelnika na izlazu od 10V. Zbog toga će se i na njih prenijeti greška sa izvora, ali će se javiti i dodatna greška zbog naponskog razdjelnika koji nosi dodatni ofset.

Etaloni diskretne elektronike mogu da pokažu male permanentne promjene na izlazu, kada je isključeno i uključeno napajanje, ili kad se jave temperaturne promjene. Zbog toga, za najbolje etalone, etaloni diskretne elektronike moraju uvijek biti napajani. Ovo je naročito bitno prilikom njihovog transporta.

2.3. Standard saturisanih ćelija

Saturisane ćelije se i danas koriste kao etalon u mnogim kalibracionim laboratorijama. Sve je teže nabaviti saturisane ćelije, zbog toga nove laboratorije sve češće koriste naponski standard izrađen u diskretnoj elektronici kao referencu.

Etalon saturiranih ćelija, ponekad nazvan Vestonova ćelija, je bio defakto naponski etalon dugi niz godina. Poznat je kao „normalna“ ćelija radi lakšeg razlikovanja od nesaturisane ćelije. Njihov nominalni naponski izlaz je 1.0183V na 20°C, dok se pojedinačnih ćelija razlikuje.

Saturisane ćelije imaju veliki temperaturni koeficijent i moraju da se koriste u toplotno strogo kontrolisanim uslovima da bi davale stabilan napon. Jednačina koja pokazuje odnos termičkog bježanja je:

$$E_t - E_{20} = [-40.6(t-20) + 0.95(t-20)^2 - 0.01(t-20)^3] \times 10^{-6} \quad (3)$$

E_t – temperaturna indukcija pri datoj temperaturi

E_{20} – temperaturna indukcija na 20°C

Precizna kontrola je lakša ukoliko se samo dodaje temperatura. Komercijalne temperaturne komore (uljane i vazdušne) često rade na temperaturi od 30°C. Saturisane ćelije imaju obično histerezisnu promjenu ukoliko im je temperatura promjenjena, i onda vraćena na prvobitnu vrijednost. Ćelijski temperaturni naponski ofset je nestabilan nakon promjene temperature, prije nego što se vrati ili na staru vrijednost, ili se stabilizuje na novu vrijednost temperaturnog naponskog ofseta. Ofset se mijenja do 90 dana, prije nego što se vrati na 0.5ppm od prvobitne vrijednosti. Isto tako fizičko oštećenje, vibracija, prolivanje, formiranje gasnih mjehura na elektrodama i proticanje struje u i iz ćelije može da dovede do nastavka promjene drifta.

Kako individualni etaloni saturisane ćelije mogu da pokažu promjene u njihovom naponu, grupa do 12 ćelija se koristi, i pakuje u jedno kućište. Greška u temperaturnoj kontroli u jednom kućištu često može da prođe neopaženo, i može da utiče na sve ćelije koje se nalaze u njemu, pa se nekoliko kućišta, tri ili više, obično koriste da bi se obezbijedio stabilni naponski izvor. Ovakvo pakovanje omogućava lakši transport za potrebe održavanja metrološke sledivosti. Ćelije u svakom od kućišta moraju biti redovno međusobno poređene, pri čemu bi se rezultati poređenja zapisivali u vidu kontrolnih grafika. Mjerenja se obavljaju tako što se ćelije redno povezuju, prilikom čega su njihovi polovi obrnuto okrenuti, i mjeri se razlika sa potenciometrom ili mikrovoltmetrom visoke unutrašnje otpornosti.

Kada se koriste i porede etaloni saturisanih ćelija, izuzetno je bitno da se izbjegne proticanje struje u i iz ćelije. Struje jačine 10^{-15} A, ukoliko traju nekoliko minuta mogu da izazovu ozbiljnije promjene, pa se ćelije povezuju obrnuto serijski i koriste se multimetri sa velikim otpornostima. Skeneri standardnih ćelije su specijalno dizajnirani prekidački sistemi sa veoma malom vrijednost temperaturnog naponskog ofseta, i oni su često programibilni IEEE-488 sistemi, oni povezuju ćelije, očitavaju vrijednosti razlike, statistički analiziraju podatke, i iscrtavaju grafike. Uporedivost lokalnih ćelija ne obezbijeduje dovoljnu sigurnost u njihove vrijednosti, kao ni uporedivost sa ćelijama na nacionalnom nivou. Uspostavljanje metrološke sledivosti uključuje i transportovanje paketa ćelija i transportovanje etalona, između laboratorija na nacionalnom i lokalnom nivou. Ovaj proces je vremenski zavisn, zbog toga što transportovane ćelije moraju da miruju nakon transporta. Na primjer, nekoliko nedelja mora proći prije nego što se stabilizuje napon ćelija, i tek tada se može mjeriti. Nakon što se etalon vrati, nazad, u laboratoriju, ćelije moraju da se stabilizuju. Ako temperaturna regulacija nije održavana, mora se sačekati od 10 do 12 nedelja da bi se ćelije koristile pri proglašenoj klasi tačnosti.

3. Etaloni jednosmjerne struja

Uprkos tome što je amper SI jedinica za jačinu električne struje, nacionalne laboratorije ne posjeduju etalone jačine struje. Umjesto toga, vrijednost jačine struje se na lokalnom nivou izražava preko mjerljivog pada napona na etaloniranom otporniku.

III. ETALONIRANJE

1. Definicije

Etaloniranje strujnih i naponskih generatora se izvršava u svrhe određivanja napona otvorenog kola čiji su priključci na generatoru, i struje kratkog spoja na priključcima generatora. Etaloniranje se praktično realizuje povezivanjem digitalnog multimetra na generator, mjerenjem, povezivanjem digitalnog multimetra na etalon, mjerenjem, i poređenjem rezultata.

2. Metode etaloniranja

Etaloniranje naponskog i strujnog generatora, pokazanog na Sl. 6, obavlja se metodom zamjene, kod koje se koristi digitalni multimetar (koji će dalje biti obilježavan kao DMM) da se izvrši mjerenje i poređenje izlaznog signala koje daje generator i signala koji daje sertifikovani etalon.



Sl.2 Yokogawa GS200 generator jednosmjernog napona i struje DMM, prikazan na Sl. 7, koji se koristi za poređenje mora da bude dovoljno precizan, da se omogući precizno poređenje razlike signala generatora i signala etalona, koja mora biti linearna.



Sl.3 FLUKE 8846A digitalni multimetar

Potrebno je voditi računa o kvalitetu materijala od kojih su napravljeni kablovi koji služe za povezivanje, kao i o njihovoj dužini. Različite smetnje koje oni mogu da izazovu će biti kasnije prodiskutovane. Izolacija na kablovima mora da bude dobra da bi se smanjilo curenje struje i druge greške koje se javljaju zbog dielektričnih osobina.

Postupak mjerenja je sledeći:

- (1) Povezati generator koji se testira na DMM, i postaviti vrijednost izlaznog signala na nominalnu, odnosno $V_{NOMINAL}$, i pročitati vrijednost V_{OUT} koja se ispisuje na displeju DMM
- (2) Povezati etalon koji koristimo za poređenje na DMM, postaviti vrijednosti izlaznog signala na nominalnu, i pročitati vrijednost V_{STD} (STD – etalon) koja se ispisuje na displeju DMM.
- (3) Jednačinom:

$$C_{OUT} = + C_{STD} - V_{STD} + V_{OUT} \quad (4) \text{ treba odrediti } C_{OUT}.$$

C_{STD} je kalibraciona vrijednost nominalnog napona, koju dobijamo od višeg kalibracionog tjela. Potrebno je obezbjediti mijernu sledljivost C_{STD} .

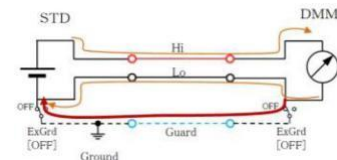
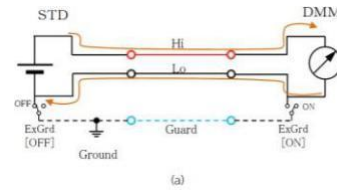
3. Postupak etaloniranja

3.1. Standardni uređaji i digitalni multimetri

Za potrebe kalibracije mogu se koristiti uređaji različitih kompanija, koje nabavljaju laboratorije. Neophodno je i te uređaje kalibrisati, što rade viša metrološka tjela, što je u Srbiji Direkcija za mere i dragocene metale.

3.2. Metode povezivanja

Kada se povezuju standardni naponski i strujni generator na DMM, potrebno je uzemljiti jedan od mjernih terminala da bi se povećala stabilnost mjerenja. Standardni naponski i strujni generator i DMM su povezani sa dva zaštićena i izolovana kabla, kod kojih je izolacija povezana na zaštitne priključke. Uređaji se nalaze u faradejevom kavezu radi dodatne zaštite od smetnji prilikom mjerenja.



Sl.4 Povezivanje generatora sa digitalnim multimetrom

3.3. Neophodnost puštanja struje prije procesa mjerenja

Može se zaključiti da postoje razlike kod mjerenja DC veličina, ako se uzme u obzir da dolazi do porasta temperature elemenata električnog kola koja prouzrokuje promjenu u vrijednosti otpornosti, pa je neophodno povesti računa prilikom mjerenja.

3.4. Rezultati etaloniranja

Broj cifara kod kalibracionih rezultata zavisi od više parametara, i može da ima različite vrijednosti za različite veličine koje digitalni multimetar mjeri. Naravno treba i napomenuti da ukoliko se koriste pojačavači u generatorima signala, oni mogu da unesu značajno veliku nesigurnost, pa se tačnost vrijednosti prikazane na DMMu može dovesti u pitanje.

4. Obrada mjerne nesigurnosti

Mjerna nesigurnost koja postoji prilikom kalibracije, se izražava kao prošireni nivo nesigurnosti, i mora da postoji 95% sigurnosti u izvršena mjerenja. Veličina mjerne nesigurnosti zavisi od vrijednosti koju u sistem unosi više različitih parametara, i određuje se jednačinom:

$$u(C_{OUT}) = \sqrt{u(C_{STD})^2 + u(V_{STD})^2 + u(V_{OUT})^2 + s^2} \quad (5) \text{ gdje je:}$$

$u(C_{OUT})$ – Nesigurnost uređaja koji etaloniramo

$u(C_{STD})$ – Nesigurnost etalona koji je korišten prilikom etaloniranja

$u(V_{STD})$ – Nesigurnost vrijednosti mjerenja koju daje DMM, kada je vrijednost signala koju etalon daje na izlaz postavljena na nominalnu

$u(V_{OUT})$ – Nesigurnost vrijednosti mjerenja koju daje DMM, kada je vrijednost signala koju generator daje na izlazu postavljena na nominalnu

s – varijabilnost rezultata kalibracije

4.1. Nesigurnosti standardnih uređaja

U kalibracionom sertifikatu mora da se nalazi izvještaj o proširenom nivou nesigurnosti, koji se dobija množenjem nivoa standardne nesigurnosti sa faktorom $k=2$. Tako dobijamo nivo mjerne sigurnosti koji je približno 95%. Etaloniranje standardnih generatorskih uređaja se izvršava jednom godišnje, a karakteristike kalibrisanog uređaja se mijenjaju u toku te godine. Nivo promjene mora da piše u izvještaju, i dok god uređaj nije oštećen, promjene u nivoima izlaznih signala moraju da se slažu sa izvještajem.

4.2. Nesigurnost mjernih rezultata etalona

Kada se etalon poveže na DMM i izvrše se mjerenja, mjerna nesigurnost vrijednosti V_{STD} zavisi od performansi DMMa, rezolucije DMMa, termoelektričnih efekata i efekata naponskog opterećenja. Zbog nesigurnosti performansi DMMa koji se koristi za mjerenje napona i struje etalona, linearnost i stabilnost multimetra utiču na rezultate kalibracije. Pošto je potrebno malo vremena da se izvrše mjerenja etalona i uređaja koji kalibrišemo, može se smatrati da DMM ima zadovoljavajuću stabilnost. Male razlike u nivou signala koje daju etalon i uređaj koji se kalibriše su u opsegu kod kog je linearnost DMM na zadovoljavajućem nivou. Zbog ovoga se smatra da je nesigurnost izazvana od strane DMMa jednaka 0. Pošto nije moguće znati vrijednosti cifara koje DMM ne može da prikaže, one se smatraju nesigurnošću. Ako se uzme u obzir da je vrijednost mjerenog rezultata 0.98V, onda se ta vrijednost javlja za sve vrijednosti napona koje se kreću u opsegu od 0.975V do 0.985V. Zbog toga što se vrijednost može nalaziti bilo gdje u tom opsegu, raspodjela je uniformna, pa se tako računa i nesigurnost. Kada se vrše mjerenja neophodno je imati podatke o temperaturi prostorije u kojoj se vrše mjerenja, ali i o temperaturama priključaka etalona. Da bi se smanjile smetnje, temperaturna razlika u temperaturi na priključcima etalona mora da bude manja od $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, i materijal od kog se prave priključci etalona, je standardizovan (da se smanji uticaj Zebekovog efekta) i koristi se legura metala bakra i telura. Zbog toga termički napon koji može nastati, ima linearnu vrijednost, koja se mijenja sa $^{\circ}\text{C}$ koeficijentim $1.3\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Za mjerenja strujnih veličina, otpornost na priključcima DMM morala bi da bude $0\text{ }\Omega$, što nije slučaj. Zbog toga dolazi do pada napona između priključaka na terminalu DMM. Ovaj pad napona se zove efekat naponskog opterećenja, i on zavisi od osobina DMMa koje koristimo prilikom mjerenja, i od osobina etalona, pa treba uvijek imati na umu da on može izazvati manje ili veće greške prilikom mjerenja. Veličine grešaka moraju biti napisane za etalon koji se koristi, kao i za DMM. Kada se uređaj koji kalibrišemo poveže na DMM, vrijednosti V_{out} moraju da posjeduju određene nesigurnosti koja dolazi iz više izvora. Ti izvori su performanse DMM, rezolucija, termoelektrični efekat, kao i efekat naponskog opterećenja.

4.3. Varijabilnost i smanjenje rezultata mjerenja

Da bi se smanjile varijabilnosti rezultata mjerenja prilikom kalibracije, neophodno je sistematizovati proces mjerenja. Mjerenja se izvršavaju u nekoliko setova, kod kojih jedan set ima 100 mjerenja. Potrebno je smanjiti vrijeme proteklo između procjene mjerne nesigurnosti etalona i kalibracije generatora, takođe idealno bi bilo raditi sa nekoliko etalona istih vrijednosti.

IV. INDUSTRIJA 4.0 U ETALONIRANJU

1. Industrija 4.0 i IoT-u

Budući da je nauka u procesu neprestane digitalizacije i da se potencira primjena novih tehnologija, trebalo je napraviti okvirne standarde u kojima bi se ona kretala. Čak i kada ti uslovi nisu bili unaprijed određeni i postavljeni, njih bi nauka i industrija organski odredile i poprimile. To je dovelo do

industrije 4.0 koja predstavlja promjenu u tradicionalnim tehnologijama proizvodnje i upravljanja u industriji. Ona obuhvata uvođenje povezanosti, upotrebe vještačke inteligencije i fleksibilne automatizacije.

2. Primjena novih tehnologija u procesu etaloniranja uređaja

Prvo što bi trebalo napomenuti je da je u procesu etaloniranja čovjek, odnosno inženjer koji obavlja etaloniranje, izuzetno značajan faktor. On mora da povezuje uređaje, da upoređuje rezultate, i izvlači zaključke iz tih poređenja. Jasno je da ukoliko on napravi grešku, ta greška se prenosi na sve djelove procesa etaloniranja. Zbog napretka u svjetu tehnologije, neki od djelova procesa etaloniranja se mogu izmijeniti tako da smanjuju mogućnost pravljenja greški.

2.1. Prilagodavanje opreme za etaloniranje

Opisani postupak etaloniranja mora da se izmjeni u skladu sa zahtjevima integracije sa industrijom 4.0. Da bi se to uradilo, morali bi izmijeniti opremu koja se koristi, postupak etaloniranja, kao i pristup problemu etaloniranja.

Većina digitalnih multimetara nema mogućnost komunikacije sa računarom, odnosno nema mogućnost razmjene podataka. I ako ima to je najčešće jednosmjerna komunikacija u vidu prosleđivanja podataka na računar, bez mogućnosti slanja podataka na DMM. U slučaju da je taj problem prevaziđen trebalo bi voditi računa i o brzini konekcije digitalnog multimetra sa računarom, jer ukoliko nije adekvatna, to može da dovede do akvizicije netačnih podataka, ili čak do oštećenja elemenata koji se koriste za akviziciju podataka i etaloniranje, kao i čitavog sistema za etaloniranje. Uređaji koji se koriste prilikom procesa etaloniranja bi na sebi morali da posjeduju poseban modul za komunikaciju koji bi im omogućio komunikaciju sa kontrolnim uređajem, čije se programiranje zasniva na upotrebi vještačke inteligencije.

Komunikacija bi se obavljala po master-slave komunikacionom protokolu. DMM koji koristimo za etaloniranje bio bi slave uređaj (što ostavlja mogućnost povezivanja više slave uređaja, odnosno digitalnih multimetara). Master uređaj bi morao na sebi da posjeduje SOC (System On a Chip) sa AI (Artificial Intelligence) tehnologijom, mogao bi se koristiti i čip iz mobilnih uređaja kao što su Qualcomm Snapdragon [5], Mediatek Dimensity [6] i sl. Slave uređaji bi slao očitane podatke master uređaju, dok bi od njega primao komande koje bi kontrolisale različite funkcije uređaja. DMM koji se koristi u procesu etaloniranja, ukoliko posjeduje mogućnost implementacije sistema automatske kalibracije, mora da posjeduje algoritam koji će smanjiti greške izazvane mjerenjem različitih vrijednosti signala na različitim opsezima. Greška koju bi izazvalo mjerenje signala čija vrijednost iznosi 1% mjernog opsega DMM-a bila bi značajno veća od greške koju bi dobili mjerenjem signala čija vrijednost iznosi 80% mjernog opsega. Da bi to izbjegli, master bi posjedovao algoritam kojim će sam da selektuje opseg na kom će DMM mjeriti. Počeo bi na najvećem opsegu, i rezultat mjerenja bi se poredio sa opsegom u kom se mjeri, kao i sa opsegom ispod njega, tako bi smanjili i mogućnost oštećenja opreme. To bi se ponavljalo dok se ne bi došlo do najmanjeg opsega na kom se može mjeriti.

Informacije o vrijednosti izmjerenog signala, kao i vrijednost opsega bi se prosleđivale inženjeru, nakon čega bi on mogao

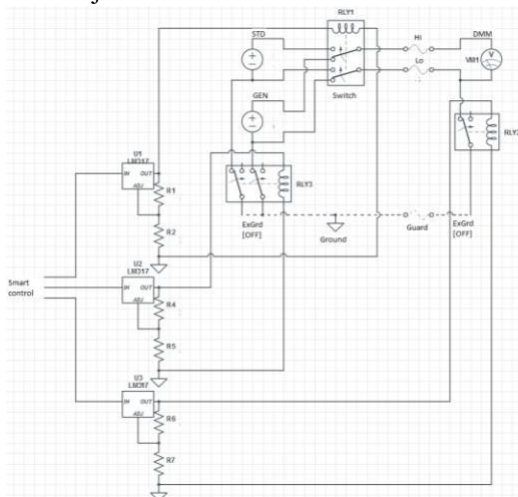
da izvrši provjere, kao i da napravi izmjene opsega ukoliko smatra da je to potrebno.

2.2. Izmjena načina povezivanja

Master uređaj bi mogao da šalje upozorenja u slučaju nepravilnog povezivanja uređaja, i da ugasi napajanje uređaja u slučaju da postoji mogućnost njihovog oštećenja. To bi se obavljalo tako što bi rezultati u slučaju pogrešnog povezivanja slave uređaja mogli da pokazuju određene karakteristike koje master uređaj ne očekuje, a određivanje tipa očekivanih rezultata bi zavisilo od vrste mjerenja. Na Sl. 14 vide se izmjene koje su napravljene. Digitalni multimetar bi imao terminal za uzemljenje preko kog bi vezom mogli da uzemnjimo i kućište etalona (generatora), ali ta konekcija bi se morala i softverski autorizovati, jer bi postojao softverski kontrolisan prekidač.

2.3. Izmjene prilikom puštanja struje prije procesa mjerenja

Prethodno je naglašeno da je neophodno pustiti struju prije nego što se počne sa mjerenjima, što bi se moglo prilagoditi mogućnostima koje pruža industrija 4.0. AI uređaj koji kontroliše funkcionisanje sistema bi mogao da mjeri vrijeme koje je proteklo od puštanja struje, do vremena kada digitalni multimetar počinje sa mjerenjima signala koje daje etalon. Jedna od mogućnosti je da se rezultati izmjereni u periodu u kom se još nije stabilisao sistem označavaju na poseban način, koji će nam govoriti da postoji veća nesigurnost za te izmjerene vrijednosti, druga je da se ne prosleđuju dok ne prođe vrijeme potrebno za stabilizaciju, koje bi korisnik mogao da odredi. Sličan sistem bi se mogao implementirati i prilikom mjerenja temperature uređaja, kao i prostorijske u kojoj se vrši etaloniranje. Noviji senzori imaju i mogućnost komunikacije sa drugim uređajima korišćenjem zigbee protokola (protokol komunikacije bi se mogao izmijeniti tako da odgovara konkretnom slučaju). Vještačka inteligencija master uređaja može da programira slave uređaje, i tako definiše parametre potrebne za ispravno očitavanje rezultata. Još jedna od mogućnosti je da izmjena DMM, tako da se omogući povezivanje sa više uređaja u isto vrijeme. To ne bi značilo da se istovremeno vrše mjerenja sa više uređaja, ali bi vještačka inteligencija (ili inženjer) određivala sa kog se uređaja očitavaju rezultati.



Sl.15 Izmjenjena šema za povezivanje generatora sa digitalnim multimetrom, sa softverski kontrolisanim uzemljenjem i selektovanja različitih uređaja

2.4. Obrada rezultata

Matematička obrada rezultata koja zavisi i od parametara koje daje više kalibraciono tjelo, mogli bi se automatski prosleđivati master uređaju koji bi imao komunikaciju sa računarom koji obrađuje rezultate, ili bi on mogao da bude računar zadužen za obradu rezultata. To bi smanjilo vrijeme potrebno za dostavu tih podataka, jer bi više kalibraciono tjelo automatski moglo prosleđivati nove podatke.

2.5. Napredne mogućnosti

Inženjeru bi trebalo dati mogućnost video prikaza objekta i uređaja koji se koriste. Upotreba Google ARCore [7] protokola bi nam omogućila upotrebu tehnologije koja omogućava 3D virtuelni prikaz tog okruženja, što bi pružilo dodatno razumjevanje uslova i procesa etaloniranja, koja bi se mogla koristiti i za obuku budućih inženjera koji će se baviti etaloniranjem.

V. ZAKLJUČAK

Nakon osvrta na istoriju i proces etaloniranja, potrebno je pogledati gdje bi se mogli napraviti mogući iskoraci u svijetu etaloniranja, što bi potencijalno omogućilo smanjenje cijene proizvodnje sistema za etalorniranje, greške izazvane ljudskim faktorom i tehnološku nepristupačnost.

Jedna je automatizacija fizičkog procesa mjerenja, gdje bi izbacili djelove etaloniranja prilikom kojih inženjer može napraviti greške kao što su greške povezivanja. Isto tako su poželjne izmjene na nivou tehnologije koja se koristi prilikom etaloniranja, odnosno unapređenja procesorske logike i komunikacije među uređajima. Potrebno je naravno ostaviti i mogućnost upotrebe tehnologija u razvoju kao što je virtuelna realnost.

LITERATURA

- [1] The Ampere, LNE, Laboratoire national de métrologie et d'essais, <https://www.lne.fr/en/learn-more/international-system-units/ampere>
- [2] Richard E. Prange, Steven M. Girvin, The Quantum Hall Effect, Maryland Subseries: Based on Lectures at the University of Maryland, College Park, 1990.
- [3] B.D. Josephson, Possible new effects in superconductive tunnelling, Physicss Letters Volume 1, 1962.
- [4] SRI 6000 Series Programmable Josephson Voltage Standard (PJVS), NIST: National Institute of Standards and Technology, <https://www.nist.gov/sri/standard-reference-instruments/sri-6000-series-programmable-josephson-voltage-standard-pjvs>, Septembar 5, 2019.
- [5] Qualcomm Snapdragon Mobile Platforms, Processors, <https://www.qualcomm.com/snapdragon>
- [6] MediaTek Dimensity 5G, <https://i.mediatek.com/mediatek-5g>
- [7] ARCore - Google Developers, <https://arvr.google.com/arcore/>

ABSTRACT

This paper represents short historical and technical overview of calibration of direct current and voltage, and in light of new scientific and technological inventions, discussion of potential improvements which can be made. Development of different standard technogies will be discussed, differences between them, as well as their adoption and usage by higher international ogranizations, who are responsible for their appointment and maintenance.

DC voltage and current calibration in concept of Industry 4.0

Zdravko Gotovac, Marjan Urekar