

ETALONIRANJE UREĐAJA ZA PRIMARNO ISPITIVANJE RELEJNE ZAŠTITE U FUNKCIJI MERENJA VREMENSKIH INTERVALA

Milan DIMITRIJEVIĆ, Elektrotehnički institut „DEC“ DOO, Zrenjanin, Srbija
Slavko SABOVLJEV, Elektrotehnički institut „DEC“ DOO, Zrenjanin, Srbija
Nada VUČIJAK, Elektrotehnički institut „DEC“ DOO, Zrenjanin, Srbija
Siniša ŠOŠKIĆ, Elektrotehnički institut „DEC“ DOO, Zrenjanin, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Periodično etaloniranje uređaja za ispitivanja relejne zaštite obavlja se u laboratorijama koje su akreditovane za etaloniranje u skladu sa standardom SRPS/ISO/IEC 17025. Razlikuju se uređaji za primarno ispitivanje relejne zaštite i uređaji za sekundarno ispitivanje relejne zaštite. Uređaji za primarno ispitivanje relejne zaštite mogu da generišu velike struje i da istovremeno mere vremenski interval od trenutka uključenja do trenutka isključenja struje. U radu je dat kratak opis postupka etaloniranja uređaja za primarno ispitivanje relejne zaštite (u daljem tekstu DUT) za funkciju uređaja merenje vremenskih intervala, i analiza doprinosa pojedinih komponenti merne nesigurnosti rezultata etaloniranja. Pri etaloniranju se rezultat merenja vremenskog intervala DUT poredi sa rezultatom istovremenog merenja etalomom da bi se utvrdila greška merenja vremenskih intervala. Budžet merne nesigurnosti za rezultate određivanja greške merenja DUT proračunava se u skladu sa dokumentom EA-4/02M:2013 koji je obavezan za sve akreditovane laboratorije za etaloniranje. U radu je dat i konkretan primer rezultata etaloniranja za jednu mernu tačku: rezultat za grešku merenja i proširena merna nesigurnost.

Ključne reči — uređaji za primarno ispitivanje relejne zaštite, merenje vremenskih intervala, etaloniranje, metrološka sledivost, merna nesigurnost, dokument EA-4/02M:2013.

THE CALIBRATION OF TIME INTERVAL MEASUREMENT OF THE DEVICES FOR THE PRIMARY RELAY PROTECTION TESTING

SUMMARY

The periodic calibration of devices for testing relay protection are in responsibility of Laboratories accredited for calibration in accordance with SRPS / ISO / IEC 17025. The devices for primary testing of relay protection and devices for secondary testing of relay protection are distinguished. The devices for primary testing of relay protection can generate high currents and can measure the time interval between the moments of switch on current and switch off current. The paper gives a brief overview of the method of the time interval measurement calibration of the devices for the primary relay protection testing (hereinafter DUT) and the analysis of the contributions of components of the measurement uncertainty to the calibration results. During the calibration, the result of time interval measurement of the DUT is compared with the result of time interval measurement of the standard, in order to determine the error of time interval measurement. The uncertainty budget for the results of determining the DUT measurement error is calculated in accordance with EA-4 / 02M: 2013, which is mandatory for all accredited calibration laboratories. An example of the results of the calibration for one measurement point is given: the error of measurement and the expanded measurement uncertainty.

Key words — devices for primary testing of relay protection, time interval measurement, calibration, traceability, uncertainty of measurement, document EA-4/02M:2013.

Kontakt informacije o autorima: Milan Dimitrijević, etaloniranje@gmail.com, 063-508084; Slavko Sabovljević, etaloniranje@gmail.com; Nada Vučijak; nvucijak@gmail.com; Siniša Šoškić, etaloniranje@gmail.com

UVOD

Sistem relejne zaštite neophodan je u elektroenergetskom sistemu za brzo detektovanje i izolovanje elementa sa kvarom od ostatka sistema, Đurić i Stojanović (1). Osnovna podela releja je na primarne releje i sekundarne releje, Dotlić (2). Releji koji se priključuju direktno u primarna strujna ili naponska kola nazivaju se primarni releji. Primarni releji se koriste u niskonaponskoj, srednjenaponskoj i visokonaponskoj mreži.

Releji se moraju proveravati periodično.

Danas se koriste:

1) vremenski bazirano ispitivanje (TBM – time based maintenance – ispitivanje komponenti ili grupa komponenti posle vremena određenog na osnovu specifikacije proizvođača ili drugih propisa, npr. 1 godina);

2) PBM – performance based maintenance – ispitivanje komponenti ili grupa komponenti posle vremena koje je određeno na osnovu višegodišnjeg praćenja rezultata ispitivanja. To vreme se određuje u zavisnosti od pokazanih rezultata, tako da može biti kraće ili duže od vremena TBM; i

3) ispitivanje zasnovano na ispunjenju nevremenskih parametara (CMB – condition based maintenance – neprekidno ili često posmatranje komponenti kao selfmonitoring),

Uređaji kojima se obavljaju TBM, PBM i CBM ispitivanja moraju prethodno da budu etalonirani.

Na tržištu postoji više proizvođača uređaja za primarno i za sekundarno ispitivanje relejne zaštite. Takvi uređaji u svom sastavu imaju ampermetre, voltmetre, generatore struje i napona, i merila vremenskih intervala. Etaloniranje ovih uređaja obavljaju laboratorije akreditovane za etaloniranje u skladu sa standardom SRPS/ISO/IEC 17025 (3). Akreditovane laboratorije u ovim uređajima etaloniraju ampermetre, voltmetre, izvore napona, izvore struje i merila vremenskih intervala (tajmeri). U akreditovanim laboratorijama je obezbeđena sledivost etalona i rezultata merenja do nacionalnih etalona, a preko njih do međunarodnih etalona.

U radu Dimitrijević M. i drugi (4) je opisana metoda etaloniranja vremenske jedinice u uređaju za sekundarno ispitivanje relejnih zaštita u elektroenergetskom sistemu. Metoda se sastoji u poređenju merenja vremenskog intervala ispitivanim uređajem i etalon frekvencometrom, a mereni signal je zadavan iz generatora signala i istovremeno doveden na ispitivani uređaj i etalon. Na taj način su etalonirane i veoma male vrednosti vremenskog intervala.

U ovom radu razmatramo etaloniranje funkcije merenja vremenskih intervala u uređaju za primarno ispitivanje relejne zaštite. Uređaj za primarno ispitivanje relejne zaštite generiše AC struje frekvencije 50 Hz, vrednosti do npr. 2000 A, i ima mogućnost da prestane da generiše struju kada se pojavi uslov za zaustavljanje (engl. Stop condition). Kada se zadaje generisanje struje vremenska jedinica (tajmer) se resetuje i restartuje.

Primer specifikacije koju daje proizvođač jednog uređaja za primarno ispitivanje relejne zaštite za funkciju merenja vremenskog intervala: opseg merenja 0,000 s do 99999,9 s, granica dozvoljene greške: $\pm (1 \text{ dig} + 0,01\% \text{ od očitane vrednosti} + 1 \text{ ms})$.

POSTUPAK ETALONIRANJA VREMENSKE JEDINICE U UREĐAJU ZA PRIMARNO ISPITIVANJE RELEJNE ZAŠTITE

Etaloniranje (engl. calibration) je postupak kojim se pod određenim uslovima u prvom koraku uspostavlja odnos između vrednosti veličine s mernim nesigurnostima koje daju merni etaloni i odgovarajućih pokazivanja kojima su pridružene merne nesigurnosti uređaja koji je predmet etaloniranja, a u drugom koraku ti se podaci upotrebljavaju za uspostavljanje odnosa da se dobije merni rezultat iz pokazivanja.

Uređaj za primarno ispitivanje relejne zaštite prestaje da generiše struju u sledećim slučajevima:

- posle zadatog intervala vremena,

- kada se u mernom kolu pojavi zadati uslov zaustavljanja (engl. stop condition) koji se može zadati na više različitih načina, (zatvaranjem spoljašnjeg kontakta, otvaranjem spoljašnjeg kontakta, otvaranjem ili zatvaranjem spoljašnjeg kontakta, pojavom napona),

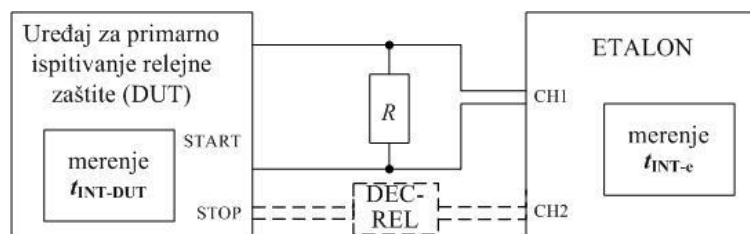
- kada se ručno pritisne taster za zaustavljanje generisanja struje.

Vremenski interval je definisan kao proteklo vreme između dva događaja. Kao etalon za merenje vremenskog intervala mogu se koristiti frekvencometar i osciloskop (5).

Blok-šeme veza za etaloniranje vremenske jedinice koja je sastavni deo uređaja za primarno ispitivanje relejne zaštite (DUT) data je na slici 1. Struja generisana iz ispitivanog uređaja propušta se kroz otpornički šant (R) na koji je povezan etalon za merenje vremenskog intervala.

Ukoliko se kao etalon za merenje vremenskog intervala koristi osciloskop, tada se signal sa otporničkog šanta R vodi na ulaz CH1 osciloskopa i meri.

Ukoliko se kao etalon za merenje vremenskog intervala koristi frekvencmetar, neophodno je koristiti i pomoćni elektronski sklop DEC-REL. On se vezuje sa STOP ulazom na DUT i CH2 ulazom na frekvencmetru. Signal sa otporničkog šanta R se vodi na ulaz CH1 frekvencmetra, a pomoćni elektronski sklop DEC-REL generiše jednosmerni signal za istovremeno isključenje DUT i etalon frekvencmetra.



Slika 1. Blok šema veza za etaloniranje vremenske jedinice koja je sastavni deo uređaja za primarno ispitivanje relejne zaštite. (oznake: R - strujni šant; $t_{INT-DUT}$ - vrednost vremenskog intervala koju izmeri DUT; t_{INT-e} – vrednost vremenskog intervala koju izmeri etalon; CH1 – kanal 1; CH2 – kanal 2)

Određuje se greška G merenja vremenskog intervala tajmera koji je sastavni deo uređaja za ispitivanje relejne zaštite. Greška se daje u uverenju o etaloniranju, zajedno sa proširenom mernom nesigurnošću U (eng. expanded uncertainty), u obliku: $G \pm U$.

Pri etaloniranju mora biti obezbeđena metrološka sledivost etalona i rezultata merenja do nacionalnih i međunarodnih etalona.

Merna nesigurnost

Merna nesigurnost je definisana kao parametar koji opisuje rasipanje vrednosti veličine koje se na osnovu upotrebljenih podataka pridružuju merenoj veličini.

Akreditovane laboratorije za etaloniranje u Republici Srbiji primenjuju međunarodni dokument EA-4/02M:2013 koji je objavila EA-European co-operation for Accreditation (6) zasnovan na GUM, kada procenjuju budžet merne nesigurnosti etaloniranja nekog uređaja.

Matematički model merenja povezuje izlaznu veličinu sa ulaznim veličinama (6).

Razlikuju se komponente tipa A i komponenti tipa B merne nesigurnosti. Komponente tipa A ocenjuju se statističkim metodama, a komponente tipa B ocenjuju se na druge načine.

Komponente tipa A potiču od rezultata jednog ili više merenja. Kada se isto merenje ponavlja N puta iz rezultata merenja izračuna se aritmetička sredina i pridružena standardna devijacija. Eksperimentalna standardna devijacija srednje vrednosti izračuna se deljenjem standardne devijacije sa kvadratnim korenom iz broja merenja i ta vrednost se naziva standardna nesigurnost za $(N-1)$ stepeni slobode, i predstavlja komponentu merne nesigurnosti tipa A. Komponenta merne nesigurnosti tipa A može se odrediti i iz istorijske (engl. pooled) merne nesigurnosti tipa A.

Komponente tipa B merne nesigurnosti izračunaju se iz drugih izvora podataka (npr. iz specifikacija proizvođača za grešku merenja etalona, rezolucije DUT) i najčešće imaju pravougaonu raspodelu verovatnoće za koju je broj stepeni slobode beskonačan.

Kombinovana standardna nesigurnost etaloniranja u_C data je kao koren iz zbira kvadrata svih komponenti merne nesigurnosti $u(x_i)$ pomnoženih sa odgovarajućim koeficijentima osetljivosti c_i .

Koeficijenti osetljivosti izračunaju se iz modela merenja, i on su jednaki izvodu izlazne veličine po ulaznoj veličini.

Proširena merna nesigurnost rezultata merenja dobije se množenjem kombinovane merne nesigurnosti sa faktorom obuhvata k . Za normalnu, Gausovu raspodelu i verovatnoću približno 95% koeficijent k ima vrednost 2.

Budžet merne nesigurnosti predstavlja listu svih izvora merne nesigurnosti zajedno sa pridruženim standardnim mernim nesigurnostima i metodama njihove ocene.

BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI

U skladu sa opisanim postupkom etaloniranja uređaja za primarno ispitivanje relejne zaštite, greška merenja vremenskog intervala DUT data je sledećim izrazom koji se naziva matematički model merenja:

$$G = t_{\text{INT-DUT}} + \delta t_{\text{INT-DUT-res}} - t_{\text{INT-e}} - \delta t_{\text{INT-e-spec}} - \delta t_{\text{INT-e-cal}}$$

gde su:

- G – greška merenja vremenskog intervala DUT,
- $t_{\text{INT-DUT}}$ – srednja vrednost N vrednosti vremenskog intervala izmerenih sa DUT,
- $\delta t_{\text{INT-DUT-res}}$ – korekcija usled rezolucije merenja vremenskog intervala sa DUT (uzimamo da je ova komponenta jednaka nuli, ali doprinosi mernoj nesigurnosti);
- $t_{\text{INT-e}}$ – srednja vrednost N vrednosti vremenskog intervala izmerenih etalomom, (iz N vrednosti merenja odredi se standardna devijacija i merna nesigurnost tipa A);
- $\delta t_{\text{INT-e-spec}}$ – korekcija usled specifikacije tačnosti etalon frekvencmetra koju je dao proizvođač (uzimamo da je ova komponenta jednaka nuli, ali doprinosi mernoj nesigurnosti),
- $\delta t_{\text{INT-e-cal}}$ – korekcija usled merne nesigurnosti etaloniranja etalona u akreditovanoj laboratoriji (uzimamo da je ova komponenta jednaka nuli, ali doprinosi mernoj nesigurnosti).

Prema modelu merenja komponente merne nesigurnosti su:

- u_{A1} – merna nesigurnost usled ponavljanja merenja sa DUT, tip A, normalna raspodela verovatnoće, broj stepeni slobode $N-1$,
- $u_{\text{DUT-res}}$ – merna nesigurnost usled rezolucije merenja sa DUT, tip B, pravougaona raspodela verovatnoće, broj stepeni slobode ∞ , (dobije se deljenjem rezolucije DUT sa $2\sqrt{3}$),
- u_{A2} – merna nesigurnost usled ponavljanja merenja etalomom, tip A, normalna raspodela verovatnoće, broj stepeni slobode $N-1$,
- u_{e-res} – merna nesigurnost usled rezolucije merenja sa etalomom, tip B, pravougaona raspodela verovatnoće, broj stepeni slobode ∞ , (dobije se deljenjem rezolucije etalona sa $2\sqrt{3}$),
- u_{e-spec} – merna nesigurnost usled specifikacije tačnosti etalona koju je dao proizvođač, tip B, pravougaona raspodela verovatnoće, broj stepeni slobode ∞ , (dobije se deljenjem dozvoljene vrednosti greške koju je specificirao proizvođač sa $\sqrt{3}$),
- u_{e-cal} – merna nesigurnost merenja vremenskog intervala iz uverenja o etaloniranju etalona u akreditovanoj laboratoriji, tip B, normalna raspodela verovatnoće, broj stepeni slobode ∞ (dobije se deljenjem proširene merne nesigurnosti iz uverenja o etaloniranju sa faktorom obuhvata $k = 2$).

Koeficijenti osetljivosti koji se izračunaju iz date jednačine kao izvod G po promenljivim, jednaki su 1 ili -1. Smatramo da ulazne veličine nisu korelisane.

Merenje vremenskog intervala frekvencmetrom

Primer kako proizvođač definiše grešku merenja vremenskog intervala (i grešku merenja širine impulsa) jednog frekvencmetra koji nije vrhunski, dat je npr. izrazom:

$$< \pm(750 \text{ ps} + \text{GreškaVremenskeBaze} \bullet \text{Interval} + \text{GreškaTrigera}),$$

gde je

$$\text{GreškaTrigera} = (15 \text{ mV} + 0,5\% \bullet \text{NivoTrigera}) \bullet 2/\text{VremeUsponaUzlaznogSignala},$$

a $\text{VremeUsponaUzlaznogSignala}$ je vreme uspona u tački postavljanja nivoa trigera. Kod merenja vremenskih intervala i širine impulsa greška trigera se sastoji od greške trigera start i greške trigera stop.

Komponente merne nesigurnosti koje se mogu smanjiti usrednjavanjem više merenja frekvencometrom potiču od: rezolucije merenja frekvencometra, greške okidanja (engl. jitter) u tački „start trigger“ i greške okidanja u tački „stop trigger“. Komponente merne nesigurnosti koje se ne mogu smanjiti usrednjavanjem više merenja potiču od: pomenosti (engl. offset) nivoa „start trigger“, pomenosti nivoa „stop trigger“, i asimetrije kanala frekvencometra.

U tabeli 1 dat je budžet merne nesigurnosti za grešku merenja vremenskog intervala vrednosti 86 ms. Etalon je frekvencometar koji je prethodno etaloniran u akreditovanoj laboratoriji. Kombinovana standardna merna nesigurnost $u_C = 0,041$ ms, a proširena merna nesigurnost za verovatnoću 95%, $k=2$, $U = 0,083$ ms.

U tabeli 1 najveći doprinos mernoj nesigurnosti potiče od rezolucije ispitivanog uređaja.

TABELA 1 - BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI ZA GREŠKU MERENJA VREMENSKOG INTERVALA (ETALON JE FREKVENCOMETAR)

Veličina	Vrednost [ms]	Nesigurnost $u(x_i)$		Tip	Br. stepeni slobode	Koeffic. osetljivosti c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ [ms]	
		[ms]	[ms]					
$t_{INT-DUT}$	86	$0,1/\sqrt{5}$	0,029	A	4	1	0,029	
$\delta t_{INT-DUT-res}$	0	$1/2 \cdot \sqrt{3}$	0,029	B	∞	1	0,029	
t_{INT-e}	85,63368	$0,01/\sqrt{5}$	0,0045	A	4	-1	-0,0045	
$\delta t_{INT-e-spec}$	0	$5 \cdot 10^{-6}/\sqrt{3}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	B	∞	-1	$-2,9 \cdot 10^{-6}$	
$\delta t_{INT-e-cal}$	0	$0,009/2$	0,0045	B	∞	-1	-0,0045	
G	0,36632							
Kombinovana standardna merna nesigurnost $u_C =$							0,041 ms	
Proširena merna nesigurnost za verovatnoću 95%, $k=2$, $U =$							0,08 ms	

Merenje vremenskog intervala osciloskopom

Primer kako proizvođač definiše grešku merenja vremenskog intervala dela t jednog osciloskopa koji nije vrhunski, dat je npr. izrazom: $\pm (30 \text{ ppm} + 0,0016 \cdot 8 \cdot 1,25 \text{ ms/div} + 100 \text{ ps})$.

U tabeli 2 dat je budžet merne nesigurnosti za grešku merenja vremenskog intervala vrednosti 10 ms. Etalon je osciloskop koji je prethodno etaloniran u akreditovanoj laboratoriji. Kombinovana standardna merna nesigurnost $u_C = 0,325$ ms, a proširena merna nesigurnost za verovatnoću 95%, $k=2$, $U = 0,65$ ms.

U tabeli 2 najveći doprinos mernoj nesigurnosti potiče od rezolucije ispitivanog uređaja.

TABELA 2 - BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI ZA GREŠKU MERENJA VREMENSKOG INTERVALA (ETALON JE OSCILOSKOP)

Veličina	Vrednost [ms]	Nesigurnost $u(x_i)$		Tip	Br. stepeni slobode	Koeffic. osetljivosti c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ [ms]	
		[ms]	[ms]					
$t_{INT-DUT}$	10,0	0	0	A	4	1	0	
$\delta t_{INT-DUT-res}$	0	$1/2 \cdot \sqrt{3}$	0,289	B	∞	1	0,289	
t_{INT-e}	10,0	0	0	A	4	-1	0	
$\delta t_{INT-e-spec}$	0	0,009	0,009	B	∞	-1	0,009	
$\delta t_{INT-e-cal}$	0	$0,3/2$	0,15	B	∞	-1	0,15	
G	0,0							
Kombinovana standardna merna nesigurnost $u_C =$							0,325 ms	
Proširena merna nesigurnost za verovatnoću 95%, $k=2$, $U =$							0,65 ms	

ZAKLJUČAK

Uređaji za primarno ispitivanje relejne zaštite etaloniraju se periodično u akreditovanim laboratorijama u kojima je obezbeđena sledivost etalona i rezultata merenja do nacionalnih etalona, a preko njih do međunarodnih etalona. Kao etaloni koriste se frekvencometar i osciloskop i sa njima se poredi pokazivanje vremenske jedinice u uređaju za primarno ispitivanje relejne zaštite. Signal iz ispitivanog uređaja je AC struja frekvencije 50 Hz. Ta

struja se propušta kroz otpornički šant, a napon sa šanta se vodi direktno na osciloskop radi merenja. Ako se kao etalon koristi frekvencometar napon sa šanta se vodi na jedan ulaz frekvencometra a drugi ulaz je preko elektronskog sklopa povezana na izlaz stop ispitivanog uređaja. Analizirali smo komponente merne nesigurnosti kod ovog etaloniranja i zaključili da najveći doprinos ukupnoj mernoj nesigurnosti potiče od rezolucije vremenske jedinice koju etaloniramo.

LITERATURA

1. Đurić M, Stojanović Z, 2014, „Relejna zaštita“, KIZ “CENTAR”, 258 str., ISBN 978-86-81287-68-2, Beograd, COBISS.SR-ID 205104140, 258 strana.
2. Dotlić G, 2006, „Elektroenergetika kroz standarde, zakone, pravilnike i tehničke preporuke – Tumačenja, komentari, primeri“, Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Beograd, str. 420-423.
3. SRPS ISO/IEC 17025:2017 „Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje“, Institut za standardizaciju, Srbija.
4. Dimitrijević M, Sabovljević S, Šoškić S, Vučijak N, 2017 „Etaloniranje vremenske jedinice u uređaju za ispitivanje relejne zaštite“, 33 savetovanje Cigre Srbija, Zlatibor. Zbornika-Spisak radova sa izveštajima stručnih izvestilaca, rad B513, str.82, ISBN 978-86-82317-80-7.
5. Application Note 200-3, 1997, „Fundamentals of Time Interval Measurements“, Agilent Technologies.
6. EA-4/02M:2013 „Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration“, EA-European co-operation for Accreditation, str. 1-23.