

Metrološka sledljivost merenja napona dodira primenom FSM koncepta u visokonaponskom postrojenju

VOJIN I. KOSTIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ a.d, Beograd

ORCID: 0000-0002-7517-5927

STOJANOVIĆ P. ŽELJKO, Elektromreža Srbije a.d, Beograd

MARKOVIĆ P. MARKO, Elektromreža Srbije a.d, Beograd

Stručni rad

UDC: 621.314.222.6

621.3.027.7

DOI: 10.5937/tehnika2603269K

Merenja napona dodira se uobičajeno sprovode u visokonaponskom postrojenju u normalnom pogonskom stanju. Navedeno za posledicu ima superponiranje konduktivne sistemske smetnje (u našim uslovima 50 Hz) na rezultate merenja. Sa druge strane, nivo konduktivne sistemske smetnje nije uvek isti i u postrojenjima sa direktno uzemljenom neutralnom tačkom zavisi od nesimetričnog opterećenja faznih provodnika. U tim uslovima, obezbeđenje poverenja u kvalitet rezultata merenja, uspostavljanjem metrološke sledljivosti, predstavlja složen istraživački zadatak. U ovom radu prikazani su rezultati merenja napona dodira u istom visokonaponskom postrojenju (transformatorskoj stanici), ali bitno različitim uslovima sredine i u vremenskom intervalu od pet godina. Na praktičnom primeru, na bazi statistički reprezentativnog uzorka od jedanaest karakterističnih lokacija, jasno je pokazano da primena FSM (Frequency Shift Method) koncepta omogućava uspostavljanje metrološke sledljivosti rezultata merenja napona dodira.

Ključne reči: napon dodira, merenje, FSM, metrološka sledljivost

1. UVOD

Sistem uzemljenja visokonaponskog (VN) postrojenja treba da omogući da, pri pojavi kratkog spoja sa zemljom, naponi dodira i naponi koraka (osnovne sigurnosne karakteristike uzemljivačkih sistema), pre svega unutar postrojenja, ne premaše maksimalno dozvoljene vrednosti. O tom aspektu vodi se računa u fazi projektovanja. Posle puštanja u rad VN postrojenja, ponavljaju se odgovarajuća merenja u normalnom pogonskom stanju. Izmerene vrednosti postaju referentne vrednosti relevantne za ocenu stanja postrojenja tokom eksploatacionog veka, jer se iste periodično proveravaju (uobičajeno, svakih 5 godina). U toj fazi metrološki problem postaje vrlo značajan. Naime, u VN postrojenju permanentno je prisutna intenzivna konduktivna smetnja na mrežnoj frekvenciji, čiji je intenzitet srazmeran naponskom nivou VN postrojenja. Sa druge strane, napon dodira i napon koraka tre-

ba meriti/deklarirati na 50 Hz. Jasno je da u tom pogledu postoje problemi koji se direktno reflektuju na tačnost merenja tj. na mernu nesigurnost. Posledično, tačnost (ili netačnost) merenja ima ozbiljne sigurnosne i ekonomske posledice.

Uvažavajući prethodno navedeno, treba istaći da se verodostojnost merenja obezbeđuje poverenjem u kvalitet rezultata merenja. U skladu sa [1] akreditovane laboratorije, kakva je i Specijalizovana laboratorija za ispitivanja sistema uzemljenja, gromobranskih i električnih instalacija Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“, moraju sprovoditi sistematske provere kontrole kvaliteta svojih rezultata merenja, koje mogu biti interne i eksterne. Preciznije, laboratorija mora da uspostavi i održava metrološku sledljivost svojih rezultata merenja, gde svaki od rezultata doprinosi mernoj nesigurnosti [1].

Merenje napona dodira vrši se između uzemljenih metalnih masa i potencijalnih stajališta na tlu, pri čemu međusobno rastojanje iznosi 1 m. Merne tačke za merenje napona koraka nalaze se na površini tla, na međusobnom rastojanju od 1 m, jer se smatra da to rastojanje čovek može premostiti korakom.

U naučnoj literaturi i tehničkim standardima iz predmetne oblasti, prevladava mišljenje da je napon

Adresa autora: Vojin Kostić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ a.d, Beograd, Koste Glavinića 8a

e-mail: vojnin@ieent.org

Rad primljen: 09.02.2026.

Rad prihvaćen: 16.04.2026.

dodira rigorozniji sigurnosni indikator od napona koraka [2-6]. Mišljenje je zasnovano na nekoliko ključnih stavki:

- Prostiranje struje kroz telo: Kod napona dodira, struja cirkuliše kroz telo od uzemljene metalne mase (strukture) preko ruke do stopala koja su na tlu, prolazeći kroz vitalne organe - srce i grudni koš. Kod napona koraka, tok struje je od stopala do stopala, zaobilazeći vitalne organe, što je znatno manje opasno po život.
- Električna otpornost tela: Kontaktna otpornost stopala doprinosi ukupnoj otpornosti, s tim da je kod napona dodira ona vezana za paralelnu vezu oba stopala, dok je kod napona koraka reč o rednoj vezi, što dodatno smanjuje struju koja teče kroz telo usled napona koraka.
- Verovatnoća incidenta: Veća je verovatnoća da će osoba rukom dodirnuti metalnu masu pod naponom nego da će se naći u zoni kritičnog gradijenta potencijala na tlu sa dovoljno velikim raskorakom da doživi strujni udar.

Stoga, dalja razmatranja u tekstu koji sledi, odnosiće se samo na napon dodira.

U tom kontekstu, u radu će biti opisana interna kontrola kvaliteta rezultata merenja napona dodira ponavljanjem merenja istom metodom i u istom aktivnom VN postrojenju, uvažavajući propisanu periodiku ispitivanja, konkretnije period: 2020. godina (u daljem tekstu, scenario 1) – 2025. godina (u daljem tekstu, scenario 2). U nastavku, ovaj rad sadrži i pet sekcija. U sekciji 2 data je elaboracija blok šeme za merenje napona dodira. Prikupljanje i obrada rezultata merenja opisani su u sekciji 3. Eksperimentalni rezultati istraživanja prikazani su u sekciji 4. U sekciji 5 sprovedena je analiza merne nesigurnosti. Zaključna razmatranja izložena su u sekciji 6.

2. DETALJAN OPIS BLOK ŠEME MERNOG SISTEMA ZA ISPITIVANJE NAPONA DODIRA

Kolo ispitne struje i metodologija. Striktno posmatrano, za potrebe merenja napona dodira trebalo bi izvršiti kontrolisani zemljospoj u ispitivanom VN postrojenju. Međutim, takav pristup je nepraktičan i ekonomski neopravdan. U praksi, merenje napona dodira realizuje se sa magnitudom struje koja je, u svakom slučaju, mnogo manja od projektovane struje kvara, I_f . Podaci o intenzitetu i trajanju struje kvara, za VN postrojenje u kome se vrše merenja, navedeni su u odgovarajućoj projektnoj dokumentaciji. Pored toga, iz ekonomskih razloga, merenje treba sprovediti u uslovima kada je VN postrojenje u normalnom pogonskom stanju. S tim u vezi, potrebno je eliminisati uticaj sistemske smetnje (smetnja na mrežnoj frekvenciji, u našim uslovima 50 Hz). U tu svrhu, primenjen je

metodološki pristup Frequency Shift Method (FSM) [7-8]. U skladu sa navedenim, vrši se sukcesivno injektovanje ispitne struje na tri ispitne frekvencije ($f_1 = 40$ Hz, $f_2 = 60$ Hz i $f_3 = 75$ Hz).

Ovde, ulogu strujne sonde vrši pomoćno uzemljenje, tj. uzemljenje susedne transformatorske stanice. Strujna sonda je, preko dvosistemskog dalekovoda u beznaponskom stanju, sa kratko-spojenim faznim provodnicima, povezana na izvor ispitne struje. Osnovni motiv za ovakav izbor i povezivanje strujne sonde uslovljen je zahtevom da strujna sonda, preko koje teče struja reda 10 A, ne utiče na ispitivano uzemljenje dimenziono velikog VN postrojenja. Preciznije, rastojanje strujne sonde od ispitivanog sistema uzemljenja mora biti veće od tri ili četiri dužine dijagonale ispitivanog uzemljenja¹. Pri takvom zahtevu, logičan je izbor da uzemljenje susedne transformatorske stanice služi kao strujna sonda.

Kolo ispitnog napona. Nakon uspostavljanja kola ispitne struje, pristupa se merenju napona dodira, V_d . U električnom smislu, ljudsko telo je predstavljeno ekvivalentnom otpornošću $R_B = 1$ k Ω . Ispitna struja generiše odgovarajući napon na R_B . Taj napon je srazmeran naponu dodira.

Konačno, kompletirana je merna šema. Za merenje napona dodira, predlaže se principna šema prikazana na slici 1. Oznake na slici 1 imaju sledeće značenje: do-prenosivi digitalni osciloskop (Metrix, model Scopix III OX7104), I_{test} - ispitna struja, crvena linija-kolo ispitnog napona, si-frekvencijski agilni izvor (California Instruments, model 10001iM), ns-naponska sonda (dijametar 6 mm, dužina 150 mm), $R_B = 1000$ Ω , plava linija-kolo ispitne struje, ss-strujni senzor (Metrix, model HX0073), td-ns-tačke između kojih se vrši merenje napona dodira, umm-uzemljena metalna masa, zem-zemljovod.

3. PRIKUPLJANJE I OBRADA REZULTATA MERENJA

Radi jednostavnosti i preglednosti, principi merenja i obrade rezultata biće detaljno prikazani na primeru napona dodira pri ispitnoj frekvenciji f_i .

¹ Navedena preporuka primenljiva je u slučajevima kada su dimenzije polusferne strujne sonde znatno manje u odnosu na ekvivalentnu polusferu ispitivanog sistema uzemljenja. Međutim, upotrebom sistema uzemljenja susedne transformatorske stanice kao strujne sonde, ekvivalentne polusfere ispitivanog i pomoćnog uzemljenja postaju dimenziono samerljive. Shodno tome, rastojanje između ispitivanog i pomoćnog uzemljenja treba da bude 15 do 20 dijagonala ispitivanog uzemljenja. Rastojanje između susednih VN transformatorskih stanica ispunjava navedeni uslov.

Na bazi odmeraka napona dodira u vremenskom domenu, koji su prikupljeni sa otpornika R_B pri ispitnoj frekvenciji f_i i memorisani u digitalnom osciloskopu, posle digitalnog filtriranja dobija se napon dodira, $V'_i(f_i)$. Slično, na bazi odmeraka ispitne struje, na frekvenciji f_i dobija se $I'_{test}(f_i)$.

Sa $V'_T(f_i)$ označen je napon dodira, ako je na otporniku R_B napon $V'_i(f_i)$. U tom slučaju, može se zapisati sledeća relacija

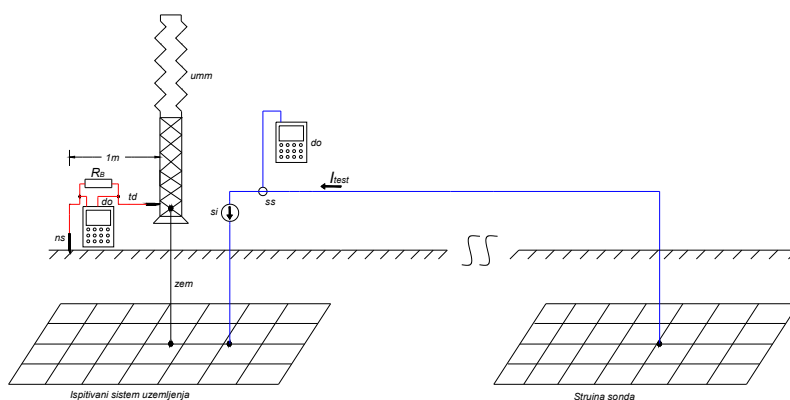
$$\frac{V'_T(f_i)}{V'_i(f_i)} = \frac{I'_{test}(f_i)}{I'_{fa}(f_i)} \quad (1)$$

gde je $I'_{fa}(f_i)$ deo struje kvara koja se pri realnom zemljospoju odvodi sa sistema uzemljenja. Dakle, ako je za razmatrano postrojenje redukcion faktor vodova $r_v(f_i)$ na frekvenciji f_i , tada je

$$I'_{fa}(f_i) = r_v(f_i) \cdot I_f(f_i) \quad (2)$$

gde je $I_f(f_i)$ struja kvara na frekvenciji f_i . Kombinujući izraze (1) i (2), dobija se:

$$\begin{aligned} V'_T(f_i) &= V'_i(f_i) \cdot \frac{I'_{fa}(f_i)}{I'_{test}(f_i)} \\ &= V'_i(f_i) \cdot \frac{I_f(f_i)}{I'_{test}(f_i)} \cdot r_v(f_i) \\ &= Z_{t,trans}(f_i) \cdot I_f(f_i) \cdot r_v(f_i) \end{aligned} \quad (3)$$



Slika 1 - Principna šema sistema za merenje napona dodira

4. EKSPERIMENT

U cilju utvrđivanja metrološke sledljivosti, koja predstavlja važan koncept za obezbeđenje uporedivosti rezultata merenja, merenja odgovarajućih transimpedansi napona dodira (U-I metodom) realizovana su:

- 21. jula 2020. godine, pri suvom tlu i ambijentalnoj temperaturi 27°C (scenario 1) i
- 4. novembra 2025. godine, pri vlažnom tlu i ambijentalnoj temperaturi 14°C (scenario 2).

Merenja odgovarajućih transimpedansi napona dodira, u oba merna scenaria, sprovedena su u transformatorskoj stanici TS 400/110 kV (Beograd 20, Beo-

gde je

$$Z_{t,trans}(f_i) \triangleq \frac{V'_T(f_i)}{I'_{test}(f_i)} \quad (4)$$

transimpedansa na frekvenciji f_i . Naime, odnos napona $V'_T(f_i)$ na otporniku R_B , i test struje, $I'_{test}(f_i)$ daje veličinu čija je dimenzija $[\Omega]$.

U strogo formalnom smislu, odnos $V'_T(f_i)/I'_{test}(f_i)$ nije impedansa budući da struja $I'_{test}(f_i)$ ne protiče kroz otpornik R_B .

Međutim, očigledno je da je struja, $I_R(f_i)$, koja protiče kroz otpornik R_B , proporcionalna sa ispitnom strujom $I'_{test}(f_i)$ koja protiče kroz sistem uzemljenja. Stoga, odnos $V'_T(f_i)/I'_{test}(f_i)$ je proporcionalan sa impedansom sistema uzemljenja. Otuda naziv transimpedansa [9]. Primenom linearne regresije nad vrednostima $Z_{t,trans}(f_1)$, $Z_{t,trans}(f_2)$ i $Z_{t,trans}(f_3)$, dobija se regresiona prava. Sa regresione prave, za $f = 50$ Hz, očitava se vrednost $Z_{t,trans}(50 \text{ Hz})$. U daljem radu, fokus je na metrološkom aspektu, a ne na proveru zadovoljenja sigurnosnih kriterijuma sa aspekta maksimalno dozvoljenih vrednosti napona dodira, pa odgovarajuća transimpedansa napona dodira predstavlja karakteristiku koja je od značaja za dalju analizu.

grad). Veza između ispitivanog sistema uzemljenja i strujne sonde ostvarena je preko neaktivnog dvo-sistemskog nadzemnog voda nazivnog napona 110 kV, br. 129A/2 i 129B/2, čiji su fazni provodnici, za ovu namenu, međusobno galvanski povezani (korišćeno šest faznih provodnika u paralelnoj vezi). Strujna sonda se nalazi na rastojanju 14 km od ispitivanog sistema uzemljenja. Vrednost redukcionog faktora korišćenog nadzemnog voda iznosi $r=0,787$ (podatak preuzet iz odgovarajuće projektne dokumentacije). TS 220/110 kV (Beograd 3, Beograd), čiji je uzemljivački sistem imao ulogu strujne sonde, bila je u normalnom pogonskom stanju.

Tabela 1. Rezultati merenja transimpednasi napona dodira, $Z_{t,trans}$, pozicije #1 - #6

TS 400/110 kV „Beograd 20“		F [Hz]	$r \cdot I'_{\text{est}}(f_i)$ [A]	$V'(f_i)$ [mV]	$Z_{t,trans}(f_i)$ [Ω]	$Z_{t,trans}(50 \text{ Hz})$ [Ω]	$ \varepsilon_r $ [%]
#1	scenario 1	40	13.69	154.7	0.01130	0.01166	2.12
		60	13.61	163.8	0.01204		
		75	13.56	169.3	0.01249		
	scenario 2	40	17.31	190.8	0.01102	0.01141	
		60	17.16	203.2	0.01184		
		75	17.16	210.3	0.01225		
#2	scenario 1	40	13.69	163.1	0.01191	0.01240	5.12
		60	13.61	176.5	0.01297		
		75	13.56	181.2	0.01336		
	scenario 2	40	17.31	216.6	0.01252	0.01303	
		60	17.16	233.6	0.01362		
		75	17.16	242.8	0.01415		
#3	scenario 1	40	13.69	160.9	0.01175	0.01227	5.87
		60	13.61	174.7	0.01284		
		75	13.56	182.3	0.01344		
	scenario 2	40	17.31	191.7	0.01108	0.01155	
		60	17.16	207.4	0.01209		
		75	17.16	214.9	0.01252		
#4	scenario 1	40	13.69	137.3	0.01003	0.01050	1.09
		60	13.61	149.4	0.01098		
		75	13.56	157.2	0.01159		
	scenario 2	40	17.31	174.7	0.01009	0.01061	
		60	17.16	191.6	0.01117		
		75	17.16	201.4	0.01173		
#5	scenario 1	40	13.69	150.1	0.01096	0.01154	0.19
		60	13.61	165.3	0.01215		
		75	13.56	174.4	0.01286		
	scenario 2	40	17.31	190.3	0.01100	0.01152	
		60	17.16	206.7	0.01205		
		75	17.16	218.9	0.01275		
#6	scenario 1	40	13.69	146.4	0.01069	0.01111	5.04
		60	13.61	157.2	0.01155		
		75	13.56	164.3	0.01212		
	scenario 2	40	17.31	192.5	0.01112	0.01167	
		60	17.16	211.2	0.01231		
		75	17.16	220.3	0.01283		

Rezultati merenja odgovarajućih transimpedansi napona dodira, zbog preglednosti, prikazani su u Tabelama 1 i 2. U pitanju je 11 karakterističnih pozicija, koje su označene sa #1 do #11, na kojima su prethodnim periodičnim (scenario 1) i aktuelnim (scenario 2) ispitivanjima registrovane najveće vrednosti. Budući da je reč o 11 karakterističnih lokacija, može se konstatovati da uzorak statistički reprezentativan.

Merna mesta nalaze se na rubovima uzemljivača, gde je gradijent potencijala najveći. Vrednosti transimpedanse, relevantne za napon dodira na mrežnoj frekvenciji, navedene su u pretposlednjoj koloni tabele.

Poslednja kolona odnosi se na relativnu grešku transimpedanse napona dodira na mrežnoj frekvenciji $|\varepsilon_r|$ i data je u procentima.

Tabela 2. Rezultati merenja transimpednasi napona dodira, $Z_{t,trans}$, pozicije #7 - #11

TS 400/110 kV „Beograd 20“		F [Hz]	$r \cdot I'_{test}(f_i)$ [A]	$V'(f_i)$ [mV]	$Z_{t,trans}(f_i)$ [Ω]	$Z_{t,trans}(50\text{ Hz})$ [Ω]	$ \varepsilon_r $ [%]
#7	scenario 1	40	13.69	129.4	0.00945	0.00973	1.46
		60	13.61	136.4	0.01002		
		75	13.56	140.8	0.01038		
	scenario 2	40	17.31	164.7	0.00952	0.00987	
		60	17.16	176.6	0.01029		
		75	17.16	181.6	0.01058		
#8	scenario 1	40	13.69	103	0.00752	0.00732	0.49
		60	13.61	96.86	0.00712		
		75	13.56	92.5	0.00682		
	scenario 2	40	17.31	129	0.00745	0.00736	
		60	17.16	125.2	0.00730		
		75	17.16	119.9	0.00699		
#9	scenario 1	40	13.69	98.85	0.00722	0.00700	5.37
		60	13.61	91.46	0.00672		
		75	13.56	90.68	0.00669		
	scenario 2	40	17.31	130	0.00751	0.00738	
		60	17.16	124.5	0.00726		
		75	17.16	120.5	0.00702		
#10	scenario 1	40	13.69	108.7	0.00794	0.00772	5.13
		60	13.61	102.2	0.00751		
		75	13.56	96.24	0.00710		
	scenario 2	40	17.31	128.7	0.00744	0.00732	
		60	17.16	124.5	0.00726		
		75	17.16	117.8	0.00686		
#11	scenario 1	40	13.69	115.3	0.00842	0.00817	5
		60	13.61	107.6	0.00791		
		75	13.56	102	0.00752		
	scenario 2	40	17.31	152	0.00878	0.00858	
		60	17.16	143.6	0.00837		
		75	17.16	138.2	0.00805		

Poređenjem vrednosti za relativnu grešku transimpedanse napona dodira na mrežnoj frekvenciji (poslednja kolona tabela 1 i 2), nalazimo da je u mernim tačkama #1, #4, #5, #7 i #8 poklapanje rezultata izuzetno dobro, vrednosti se kreću od svega 0.19% do 2.12%. Slično, ali sa nešto većim odstupanjem, na mernim mestima #2, #3, #6, #9, #10 i #11, vrednosti se kreću od 5% do 5.87%. Navedeno korespondira sa istraživanjima, detaljno opisanim u [10], gde je predstavljeno merenje impedanse sistema uzemljenja za dva različita merna scenarija. S tim u vezi treba istaći sledeće, iako se za merenje transimpedansi napona dodira koristi isto strujno ispitno kolo kao kod merenja impedanse sistema uzemljenja, značajnu razliku predstavlja što su merene veličine višestruko manje. Takođe, značajan je induktivni uticaj na kolo

ispitnog napona, koje se, zbog načina izvođenja merenja transimpedansi napona dodira, nalazi relativno blizu, u zoni uticaja aktivne visokonaponske opreme. Dalja analiza po toj osnovi, biće elaborirana u sekciji koja sledi.

5. ANALIZA MERNE NESIGURNOSTI

Naposletku, potrebno je izračunati interval merne nesigurnosti. Naravno, nije u pitanju vrsta analize koja je karakteristična isključivo za merenje napona dodira. U opštem slučaju, za bilo koje merenje, posebno ono koje se ponavlja više puta, korisno je sprovesti takvu analizu radi provere da li su pojedinačni rezultati regularni, tj. da li se nalaze unutar očekivanog opsega.

Radi uvida u specifičnosti rasipanja rezultata i preciznosti merenja, a s tim u vezi i radi uvida u motiv

za kvantitativno razmatranje merne nesigurnosti, potrebno je odrediti izvore merne nesigurnosti pri merenjima odgovarajućih transimpedansi napona dodira.

Ključni izvori merne nesigurnosti su:

- Greška mernih uređaja koji su involvirani u proces merenja. Greške u merenju, kao i podaci o rezoluciji mernih uređaja, daju se u specifikacijama proizvođača [11]. Tokom eksploatacije mernog uređaja, etaloniranje je jedini način da se ustanovi da li je merni uređaj zadržao odgovarajuće performanse. Etaloniranje se u metrološkoj praksi ne koristi samo za potvrdu tačnosti, već i kao primarni alat za analizu stanja i „starenja“ mernih uređaja. Rezultati etaloniranja predstavljaju su u dokumentu pod nazivom Uverenje o etaloniranju, koji predstavlja odgovarajući dokaz za ostvarenu sledljivost merenja. Pa tako, za merni *scenario 1* važi [12], dok za merni *scenario 2* važi [13]. Navedeni izvor merne nesigurnosti uzet je u razmatranje.
- Eliminacija uticaja konduktivne sistemske smetnje, u našim uslovima dominantno 50 Hz. Detaljna elaboracija *FSM* metoda izložena je u radovima [7, 8]. Ovde, samo kratko podsećanje. Radi suštinskog razumevanja razlike u performansama, treba imati u vidu bitne funkcionalne razlike između standardizovanog, i do sada dominantnog metoda, Test Current Reversal Method (TCRM) [14] i *FSM*. Naime, TCRM, pretpostavlja idealizovani fazor ispitnog signala na mrežnoj frekvenciji, zanemaruje kompozitnu smetnju i širokopojasni šum, a pri tome uopšte ne koristi filtriranje. Zbog toga, intenzitet struje ispitnog signala mora biti znatno iznad nivoa kompozitne smetnje i širokopojasnog osnovnog šuma. To je teško kontrolisati. Stoga, paušalno se preporučuje relativno velika magnituda ispitne struje. Sasvim drugačija situacija je u slučaju primene *FSM*. Naime, *FSM* koristi uskopojasno filtriranje, pa na kontrolisan način eliminiše kompozitnu smetnju i širokopojasni šum. Zato, *FSM* radi u praktično savršenim uslovima i to sa vrlo malim intenzitetom ispitne struje. Teorijski i praktično, tačnost ovog metoda zavisi od klase tačnosti mernih uređaja koji su involvirani u proces merenja.
- Vrednost specifične električne otpornosti površinskog sloja tla ρ_s . Izmerene vrednosti napona dodira određene su vrednošću specifične električne otpornosti površinskog sloja tla, koja je, ukoliko nema zaštitnog sloja (šljunak, tucanik, asfalt), u značajnoj meri podložna uticaju sezonskih faktora (kišna sezona, zamrzavanje i isušivanje tla). U našoj mernoj kampanji (vidi Sekciju 4), koja je sprovedena u letnjem i jesenjem periodu, pri

različitim ambijentalnim temperaturama (razlika $\pm 13^\circ\text{C}$), odnosno suvom i vlažnom tlu, navedeni izvor merne nesigurnosti nije uzet u razmatranje. Intuitivno je jasno da samo merenje ρ_s na terenu, za određenu lokaciju, nije izvodljivo zbog intrakcije sa položenim provodnicima uzemljivača.

- Pozicija naponske sonde (vidi sliku 1, oznaka *ns*). Uvažavajući činjenicu da su ponovljena merenja sprovedena nakon pet godina (*scenario 2*), jasno je da pozicije naponske sonde za *scenario 1* i *scenario 2* nisu identične. Navedeni izvor merne nesigurnosti nije uzet u razmatranje.
- Kontaktna otpornost naponske sonde sa tlom (vidi sliku 1, oznaka *ns*). *Scenario 1* realizovan je u letnjem periodu kada površina tla otvrdne i ispucava. Sasvim drugačije, *scenario 2*, realizovan je u jesenjem periodu kada je kišovito vreme. Tada se na površini tla zadržavaju površinske vode, što zahteva određeno vreme da se zemljište ocedi. Usled visoke vlažnosti, zemlja postaje blatna, teška i lepljiva. Navedeni izvor merne nesigurnosti nije uzet u razmatranje.
- Kontaktna otpornost naponskog ispitnog kola i uzemljene metalne mase (vidi sliku 1, oznaka *td*). Ova kontaktna otpornost u velikoj meri zavisi od ljudskog faktora, konkretnije ispitivača. U našoj mernoj kampanji, *scenario 1* i *scenario 2*, merenja su sprovedla dva različita ispitivača. Preciznije, u oba merna scenarija rukovodilac ispitivanja je bio isti, dok su se ispitivači promenili. Navedeni izvor merne nesigurnosti nije uzet u razmatranje.

U daljoj analizi, videti i gore naveden osenčeni tekst, samo su izvori merne nesigurnosti na pozicijama 1 i 2, uzeti u dalje razmatranje, što umnogome utiče na opseg merne nesigurnosti i u skladu sa tim poklapanje rezultata merenja. Preciznije, što više parametara utiče na mernu nesigurnost veći su i intervali merne nesigurnosti. Uzimajući u obzir navedeno, svrsishodno je sprovesti analizu merne nesigurnosti za rezultat koji bazira na primeni *FSM* (merenje napona i struja na tri različite frekvencije). U konkretnom primeru, merna nesigurnost se odnosi na transimpedansu.

Dakle, problem se svodi na izračunavanje merne nesigurnosti [15], za $Z_{t,trans}$.

U opštoj formi, analiza obuhvata:

$$\frac{V \pm \Delta V}{I \pm \Delta I} \Rightarrow Z \pm \Delta Z$$

Intervali merne nesigurnosti, predstavljeni su u Tabelama 3 i 4. Na slikama 2-12, ilustracije radi, dati su grafički rezultati odgovarajućih transimpedansi napona dodira na pozicijama #1 - #11, respektivno. Kvadrati (*scenario 1*) i krugovi (*scenario 2*) označavaju

merne rezultate na ispitnim frekvencijama. Vertikalni graničnici odstupanja (error bars), definišu moguće odstupanje rezultata za transimpedansu na pojedinačnoj ispitnoj frekvenciji.

Preciznije, vertikalni graničnik odstupanja označava mogući raspon vrednosti unutar kog se može naći veličina sa ordinate, a po osnovu merenja napona i struje. Uvidom u slike 2-12, jasno se može videti da se intervale merne nesigurnosti scenarija 1 i 2, preklapaju na svim ispitnim frekvencijama sa kojima je rađeno. Navedeno korespondira sa rezultatima izloženim u

[16], a gde je elaboriran opseg frekvencijske linearnosti impedanse sistema uzemljenja. Dodatno, sa slika 2-12, može se uočiti da osetljivost² mernog uređaja nije ista za merni scenario 1 i merni scenario 2. Navedeno je posledica prisustva konduktivne sistemske smetnje, čiji intenzitet nije bio isti.

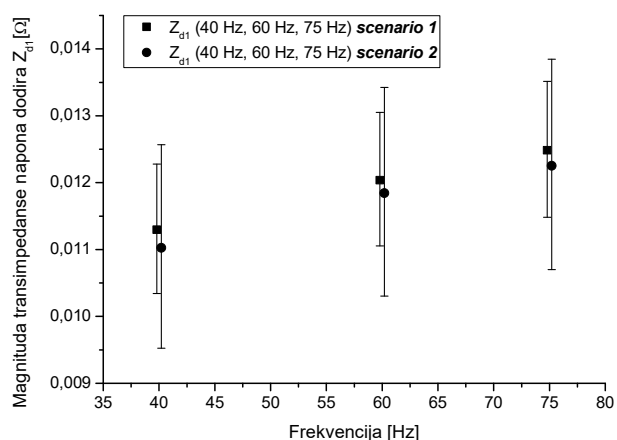
² Odabir pravilne osetljivosti omogućava da se vide fini detalji signala, čime se poboljšava tačnost očitavanja amplitude, a kako bi se dobio optimalan prikaz signala.

Tabela 3. Procena merne nesigurnosti, $Z_{t,trans}$, pozicije #1 - #6

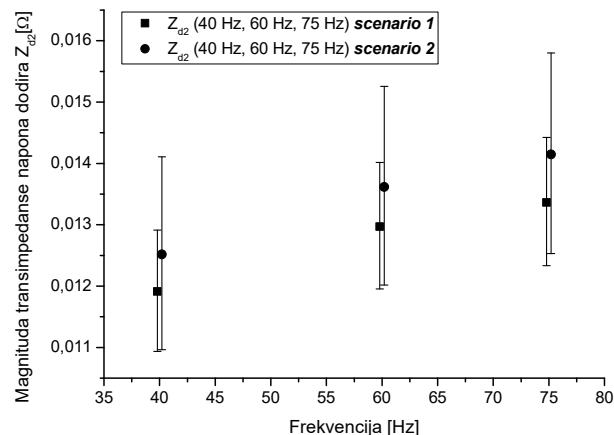
TS 400/110 kV „Beograd 20“		F [Hz]	$\pm \Delta Z$ [Ω]	$Z_{t,trans}(f_i) \pm \Delta Z$ [Ω]
#1	scenario 1	40	0.00097	0.01130±0.00097
		60	0.00100	0.01204±0.00100
		75	0.00102	0.01249±0.00102
	scenario 2	40	0.00152	0.01102±0.00152
		60	0.00156	0.01184±0.00156
		75	0.00157	0.01225±0.00157
#2	scenario 1	40	0.00099	0.01191±0.00099
		60	0.00103	0.01297±0.00103
		75	0.00105	0.01336±0.00105
	scenario 2	40	0.00157	0.01252±0.00157
		60	0.00162	0.01362±0.00162
		75	0.00164	0.01415±0.00164
#3	scenario 1	40	0.00099	0.01175±0.00099
		60	0.00103	0.01284±0.00103
		75	0.00105	0.01344±0.00105
	scenario 2	40	0.00152	0.01108±0.00152
		60	0.00157	0.01209±0.00157
		75	0.00158	0.01252±0.00158
#4	scenario 1	40	0.00093	0.01003±0.00093
		60	0.00097	0.01098±0.00097
		75	0.00099	0.01159±0.00099
	scenario 2	40	0.00149	0.01009±0.00149
		60	0.00154	0.01117±0.00154
		75	0.00156	0.01173±0.00156
#5	scenario 1	40	0.00096	0.01096±0.00096
		60	0.00101	0.01215±0.00101
		75	0.00103	0.01286±0.00103
	scenario 2	40	0.00152	0.01100±0.00152
		60	0.00157	0.01205±0.00157
		75	0.00159	0.01275±0.00159
#6	scenario 1	40	0.00095	0.01069±0.00095
		60	0.00099	0.01155±0.00099
		75	0.00101	0.01212±0.00101
	scenario 2	40	0.00153	0.01112±0.00153
		60	0.00158	0.01231±0.00158
		75	0.00159	0.01283±0.00159

Tabela 4. Procena merne nesigurnosti, $Z_{t,trans}$, pozicije #7 - #11

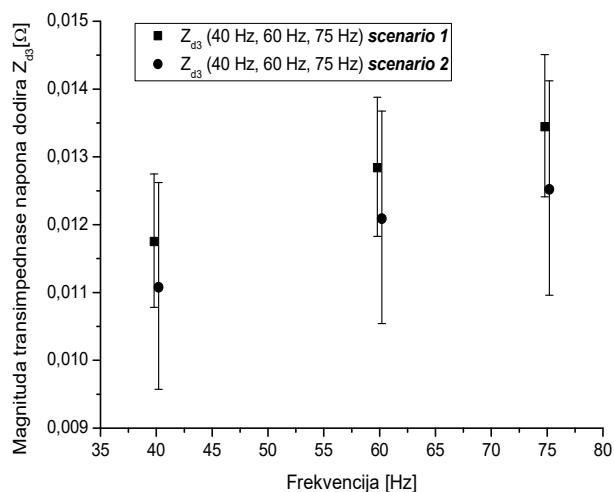
TS 400/110 kV „Beograd 20“		F [Hz]	$\pm \Delta Z$ [Ω]	$Z_{t,trans}(f_i) \pm \Delta Z$ [Ω]
#7	scenario 1	40	0.00091	0.00945 $\pm$ 0.00091
		60	0.00093	0.01002 $\pm$ 0.00093
		75	0.00095	0.01038 $\pm$ 0.00095
	scenario 2	40	0.00147	0.00952 $\pm$ 0.00147
		60	0.00151	0.01029 $\pm$ 0.00151
		75	0.00152	0.01058 $\pm$ 0.00152
#8	scenario 1	40	0.00084	0.00752 $\pm$ 0.00084
		60	0.00083	0.00712 $\pm$ 0.00083
		75	0.00082	0.00682 $\pm$ 0.00082
	scenario 2	40	0.00140	0.00745 $\pm$ 0.00140
		60	0.00141	0.00730 $\pm$ 0.00141
		75	0.00140	0.00699 $\pm$ 0.00140
#9	scenario 1	40	0.00083	0.00722 $\pm$ 0.00083
		60	0.00082	0.00672 $\pm$ 0.00082
		75	0.00082	0.00669 $\pm$ 0.00082
	scenario 2	40	0.00141	0.00751 $\pm$ 0.00141
		60	0.00141	0.00726 $\pm$ 0.00141
		75	0.00140	0.00702 $\pm$ 0.00140
#10	scenario 1	40	0.00086	0.00794 $\pm$ 0.00086
		60	0.00085	0.00751 $\pm$ 0.00085
		75	0.00083	0.00710 $\pm$ 0.00083
	scenario 2	40	0.00140	0.00744 $\pm$ 0.00140
		60	0.00141	0.00726 $\pm$ 0.00141
		75	0.00139	0.00686 $\pm$ 0.00139
#11	scenario 1	40	0.00087	0.00842 $\pm$ 0.00087
		60	0.00086	0.00791 $\pm$ 0.00086
		75	0.00085	0.00752 $\pm$ 0.00085
	scenario 2	40	0.00145	0.00878 $\pm$ 0.00145
		60	0.00144	0.00837 $\pm$ 0.00144
		75	0.00143	0.00805 $\pm$ 0.00143



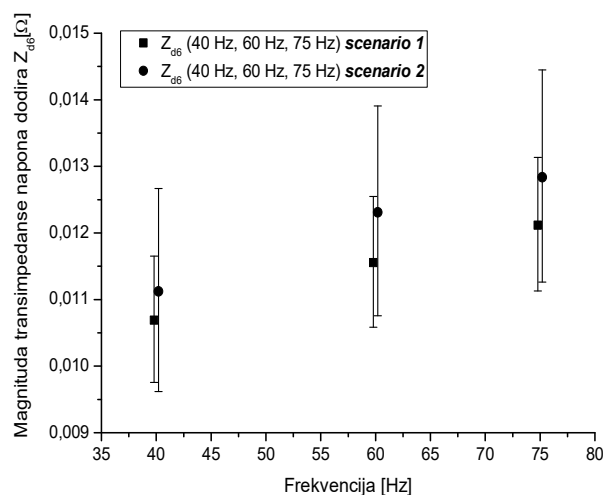
Slika 2 – Transimpedansa napona dodira, merno mesto #1.



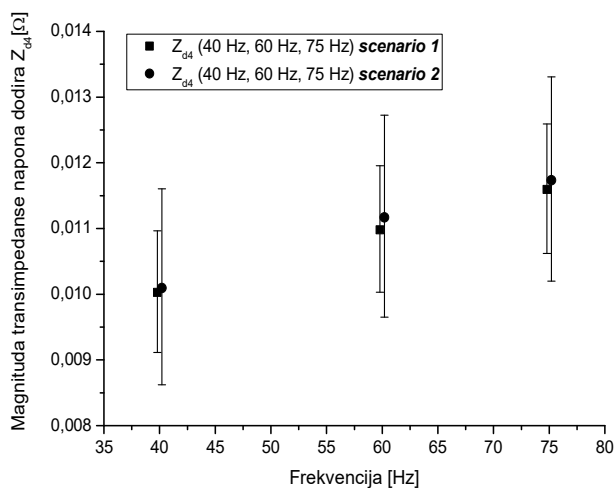
Slika 3 - Transimpedansa napona dodira, merno mesto #2



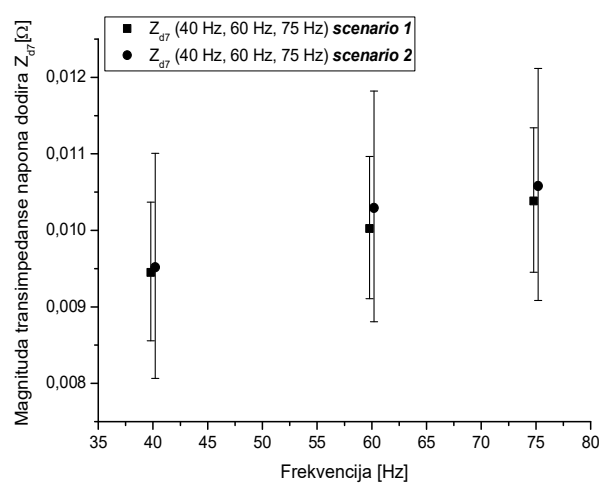
Slika 4 - Transimpedansa napona dodira, merno mesto #3



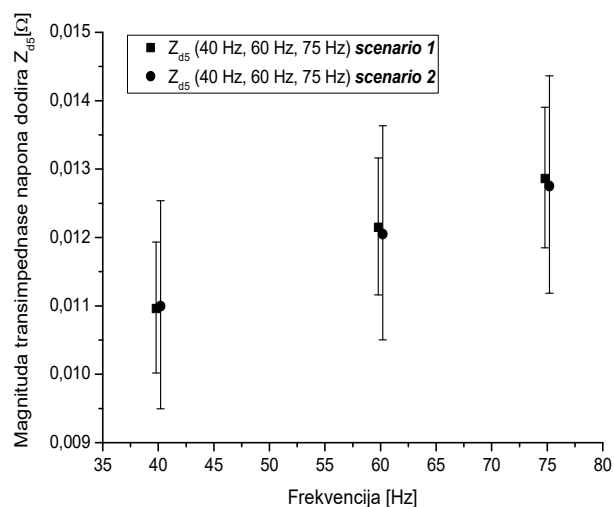
Slika 7 - Transimpedansa napona dodira, merno mesto #6



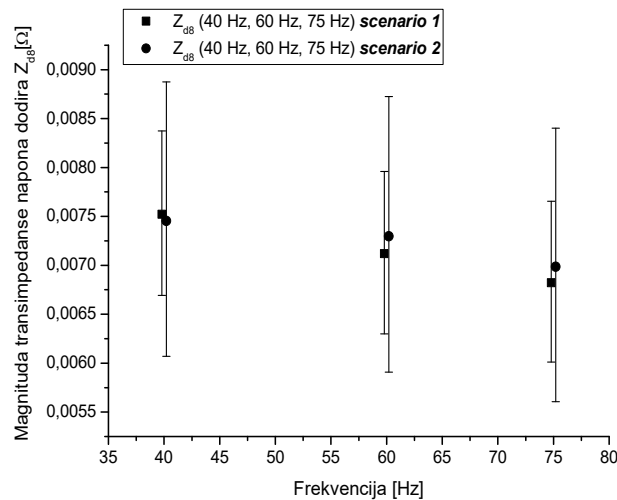
Slika 5 - Transimpedansa napona dodira, merno mesto #4



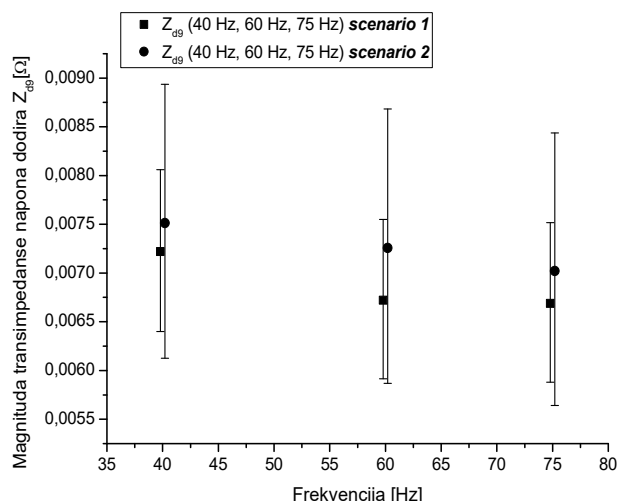
Slika 8 - Transimpedansa napona dodira, merno mesto #7



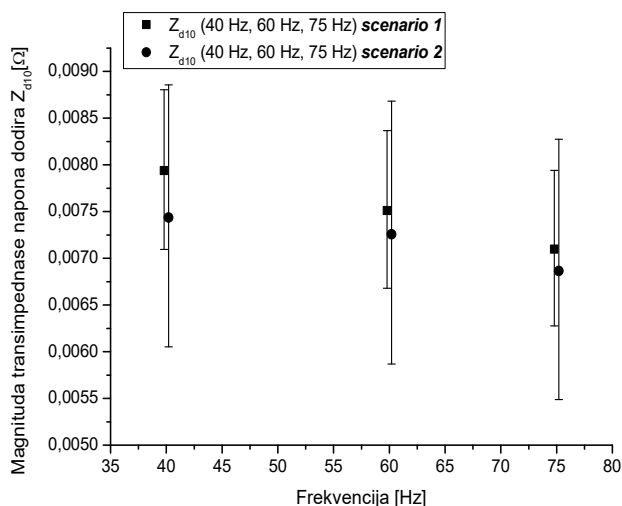
Slika 6 - Transimpedansa napona dodira, merno mesto #5



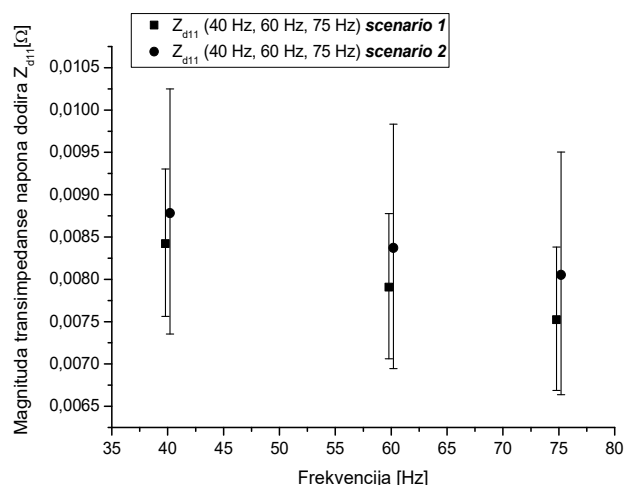
Slika 9 - Transimpedansa napona dodira, merno mesto #8



Slika 10 - Transimpedansa napona dodira, merno mesto #9



Slika 11 - Transimpedansa napona dodira, merno mesto #10



Slika 12 - Transimpedansa napona dodira, merno mesto #11

6. ZAKLJUČAK

Periodično merenje napona dodira je od suštinskog značaja za obezbeđenje sigurnosti unutar i u okolini VN postrojenja. Međutim, dobijanje „tačnih“ vrednosti napona dodira u aktivnom VN postrojenju, sa metrološkog aspekta, predstavlja složen istraživački zadatak. U tom kontekstu, odgovarajuća transimpedansa napona dodira predstavlja osnovnu metrološku karakteristiku. Cilj ovog rada bio je da se uporede rezultati merenja odgovarajućih transimpedansi napona dodira u VN postrojenju u normalnom pogonskom stanju, korišćenjem metodološkog pristupa koji je imenovan kao FSM. Poređenja su zasnovana na eksperimentima koji su sprovedeni u istom VN postrojenju, ali u veoma različitim ambijentalnim uslovima i sa vremenskom distancom od pet godina. Pokazano je da rezultati merenja transimpedansi napona dodira (U-I metodom), uvažavajući samo uticaj mernih uređaja involviranih u proces, imaju u suštini isti kvalitet. Naime, minimalna relativna greška transimpedanse napona dodira na mrežnoj frekvenciji iznosi svega 0.19%, dok maksimalna relativna greška iznosi 5.87%. Navedeno predstavlja snažnu indicaciju metrološke sledljivosti, budući da se radi o statistički reprezentativnom uzorku, konkretno 11 karakterističnih lokacija.

7. ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije kroz Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2025. godini.

Posebnu zahvalnost autori duguju kompaniji EMS a.d.

LITERATURA

- [1] SRPS ISO/IEC 17025, Општи захтеви за компетентност лабораторија за испитивање и еталонирање, Дец. 2017.
- [2] R. Kosztaluk, R. Mukhedkar, and Y. Gervais, Field measurements of touch and step voltages, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 11, pp. 3286–3294, Nov. 1984.
- [3] X. Long, M. Ding, W. Xu, and Y.W. Li, Online Monitoring of Substation Grounding Grid Conditions Using Touch and Step Voltage Sensors, *IEEE Transactions Smart Grid*, vol.3, no.2, pp. 761-769, Jun. 2012.
- [4] D. G. Koliushko, S. S. Rudenko, and A. N. Saliba, Determination of the Scope of the Experimental-Calculation Method for Measuring the Touch Voltage, *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 77-82, Jan. 2023.

- [5] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding – IEEE Std 80-2013, Dec. 2013.
- [6] SRPS EN 50522, Уземљење енергетских постројења наиземничног напона који прелази 1 kV, Авг. 2022.
- [7] V. I. Kostić, Pregled metoda za eliminisanje uticaja sistemske smetnje u aktivnom visokonaponskom postrojenju, *Tehnika*, Br. 70, Iz. 4, str. 467- 472, 2021.
- [8] V. I. Kostić, N. B. Raičević, D. S. Kovačević, The choice of suitable frequencies for measurements based on FSM, *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, vol.15, no.1, pp. 9–16, 2016.
- [9] V. I. Kostić, N. B. Raičević, An alternative approach for touch and step voltages measurement in high-voltage substations, *Electric Power Systems Research Journal*, vol. 130, pp. 59–66, Jan.2016.
- [10] V. Kostić, N. Raičević, Grounding system impedance measurement using shifted frequency method, *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives - POWERENG 2015*, Riga, Latvia, LF-000124 (CD), pp. 1-4, 11-13 May 2015.
- [11] User's Manual, METRIX SCOPIX III Portable Oscilloscope OX 7104.
- [12] Uverenje o etaloniranju br. 75719 od 08.11.2019. godine, izdato od strane Laboratorije za ispitivanje i etaloniranje Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“.
- [13] Uverenje o etaloniranju br. 127424 od 12.12.2024. godine, izdato od strane Laboratorije za ispitivanje i etaloniranje Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“.
- [14] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding Systems – IEEE Std 81-2012, Dec. 2012.
- [15] Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, Sep. 2008.
- V. I. Kostić, Grounding System Impedance: Range of Frequency Linearity, *Tehnika*, Br. 70, Iz. 6, str. 791-797, 2021.

SUMMARY

METROLOGICAL TRACEABILITY OF TOUCH VOLTAGE MEASUREMENTS USING FSM CONCEPT IN THE HIGH-VOLTAGE FACILITY

In order to avoid interruption of service and costly downtime, touch voltage measurements are usually performed in an energized high-voltage substation. Due to conductive interference in the grounding system (usually several amperes, up to about 15 A), caused by power frequency, its harmonics and background noise, the energized high-voltage substation is an extremely challenging environment for the measurements of touch voltage. Under these conditions, ensuring confidence in the quality of the measurement results, by establishing metrological traceability, appears to be a complex research task. This paper presents the results of measuring touch voltage in the same high-voltage substation, but under significantly different environmental conditions and with a time interval of five years. On a practical example, on the basis of a statistically representative sample of eleven characteristic locations, it was clearly shown that the application of the FSM concept enables the establishment of metrological traceability of the touch voltages test results.

Key Words: touch voltage, measurements, FSM, metrological traceability