

**VALIDACIJA MERENJA AMPLITUDNE I FAZNE GREŠKE VISOKONAPONSKIH STRUJNIH TRANSFORMATORA U POGONU BEZ PREKIDA ISPORUKE ELEKTRIČNE ENERGIJE****VALIDATION OF LIVE LINE MEASUREMENT OF AMPLITUDE AND PHASE DISPLACEMENT ERRORS OF HIGH-VOLTAGE CURRENT TRANSFORMERS WITHOUT INTERRUPTION OF ELECTRICITY SUPPLY**

Uroš KOVAČEVIĆ\*, Inovacioni centar, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija  
Vladeta MILENKOVIĆ, Netico Solutions D.O.O. Niš, Srbija  
Dragana NAUMOVIĆ VUKOVIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Srbija  
Nenad KARTALOVIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Srbija  
Nenad STOJANOVIĆ, Elektrodistribucija Srbije D.O.O. Beograd, Srbija  
Miodrag STOJANOVIĆ, Elektronski Fakultet, Univerzitet u Nišu, Srbija

**KRATAK SADRŽAJ**

U radu je opisan razvoj inovativne i patentirane metodologije i tehnologije koja omogućava merenje amplitudne i fazne greške visokonaponskih strujnih transformatora u pogonu bez prekida isporuke električne energije, čime se rešava jedan od gorućih problema u prenosu i distribuciji električne energije. Takođe je prikazana validacija merenih veličina. Detaljno je opisana nova merna metoda bazirana na primeni vremenski sinhronizovanih merenja uz korišćenje signala Global Positioning System kao i elementi inovativne bežične tehnologije koja omogućava rad u blizini visokog napona, ali i tačno, efikasno i bezbedno merenje. Prikazana su sprovedena laboratorijska eksperimentalna istraživanja i najznačajniji rezultati metrološke sertifikacije, ispitivanja elektromagnetske kompatibilnosti i visokonaponskih laboratorijskih testova. Rezultati realnih merenja u elektrodistributivnom pogonu potvrđuju da razvijeni i validirani merni sistem omogućava tačno, efikasno i bezbedno merenje amplitudne i fazne greške visokonaponskih strujnih transformatora u pogonu, bez prekida isporuke električne energije.

**Ključne reči:** amplitudna greška, fazna greška, rad pod naponom, strujni transformator, sinhronizovana merenja, visoki napon

**ABSTRACT**

The paper describes the development and validation of innovative and patented methodology and technology that allows live line measuring the ratio error and phase displacement of high voltage current transformers without interruption of electricity supply. Validation of measured quantities is also shown. A new measurement method based on the application of time-synchronized measurements with the use of Global Positioning System timestamped signals is described in detail, as well as elements of innovative wireless technology that allows operation near high voltage but also accurate, efficient and safe measurement. The conducted laboratory experimental research and the most significant results of metrological certification, electromagnetic compatibility testing and high voltage laboratory tests are presented. The results of real measurements in the distribution substations confirm that the developed and validated measuring system enables accurate, efficient and safe measurement of amplitude and phase displacement errors of high voltage current transformers live line without interruption of electricity supply.

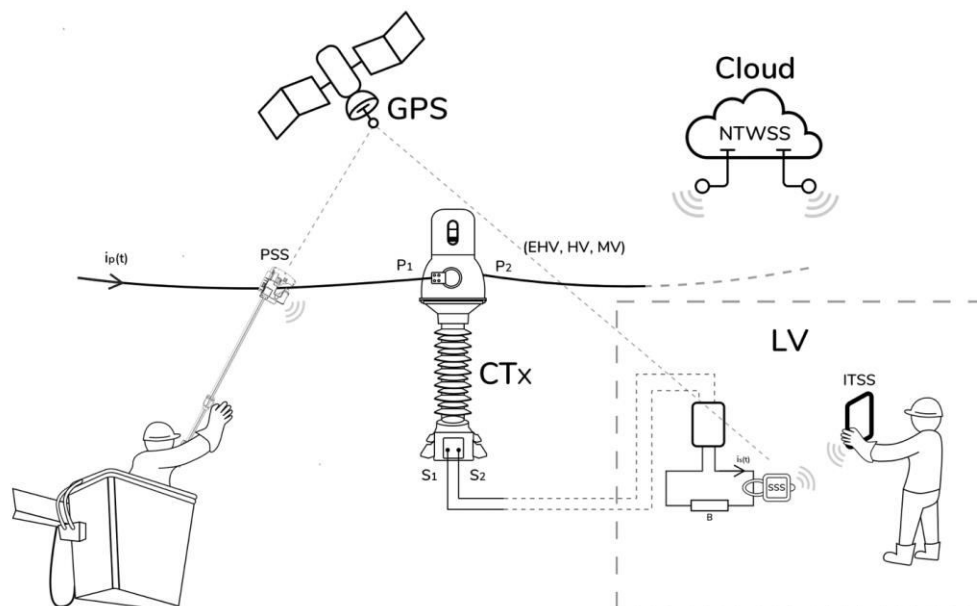
**Key words:** amplitude error, current transformer, high voltage, live line operation near voltage, phase displacement error, time synchronized measurements

## 1. UVOD

Uprkos velikom tehničkom napretku u elektroenergetskim sistemima, metrološke osobine, posebno amplitudna i fazna greška, strujnih transformatora koji se godinama ili decenijama koriste u električnim mrežama, postrojenjima i sistemima, u osnovi su nepoznate ili nedovoljno istražene. Ovo nepoznato, stvarno metrološko stanje strujnih transformatora može kompromitovati rad i osnovne funkcije elektroenergetskih sistema i postrojenja u sledećim oblastima: naplata električne energije, proračun snage i tokova električne energije, proračun gubitaka električne energije, funkcije brojala električne energije, funkcije napredne merne infrastrukture (AMI), sistemi relejne zaštite, funkcija nadzora i kontrole i prikupljanja podataka (SCADA) i funkcija za Phase Measurement Unit (PMU). Ovakva nepovoljna situacija nastala je zbog nepostojanja adekvatnog sistema ispitivanja i metodologije za merenje amplitudne i fazne greške u realnim pogonskim uslovima, u pogonu pod naponom, bez prekida napajanja.

Glavni izazov, koji je opisan u ovom radu, je razvoj i implementacija novog koncepta merenja amplitudne i fazne greške strujnih transformatora u energetskim mrežama i postrojenjima, zasnovan na korišćenju komercijalno dostupnih tehnologija, koji će omogućiti u potpunosti bes kontaktno, bežično testiranje, live-line, bez potrebe za razvezivanjem provodnika i prekidom napajanja. Odgovarajući sistem za testiranje treba da bude ekonomičan, lak i bezbedan za rukovanje i sa dovoljnom tačnošću.

Individualni pokušaji da se ovaj problem reši korišćenjem principa rada live-line zasnovani su na posebno dizajniranim, veoma složenim, nekomercijalnim, veoma skupim i veoma robusnim i teškim tehničkim rešenjima, koja su ograničila njihovu primenu na pojedinačne slučajeve i nisu omogućili masovnu komercijalizaciju i primenu u trafo stanicama svih naponskih nivoa, [1]-[3].



Slika 1. Šematski prikaz primene razvijenog test-sistema za ispitivanje amplitudne i fazne greške strujnog transformatora, [4]

Šematski prikaz razvijenog test-sistema primenom direktne metode rada pod naponom (live-line) za merenje i brzu kontrolu (fast screening) amplitudne i fazne greške ispitivanog strujnog transformatora (CTx) u realnim pogonskim uslovima u transformatorskoj stanici prikazan je na slici 1, [4]. PSS predstavlja primarni podsistem koji se montira na nadzemno uže/sabirnicu pod naponom na sredjenaponskom ili visokonaponskom provodniku, kroz koji protiče primarna struja  $I_p$  CTx. SSS predstavlja sekundarni podsistem koji se montira na niskonaponskom provodniku kroz koji protiče sekundarna struja  $I_s$  CTx. PSS i SSS se montiraju na provodnike pod naponom bez potrebe za prekidom napajanja CTx i bez razvezivanja primarnih i sekundarnih provodnika strujnog transformatora. Sistem CT Sense je u stanju da precizno izmeri, tačnije, da uporedi, u smislu amplitudne i fazne greške, dve naizmenične struje, posebno primarne i sekundarne struje CTx, koje mogu biti različitog intenziteta, na različitim nivoima napona i na različitim međusobno udaljenim lokacijama.

Ova metoda je potpuno neinvazivna za opremu u postrojenju i CTx. Fast screening testiranje se sprovodi u realnim pogonskim uslovima rada, sa realnim opterećenjem sekundarnog kola, i sa zadovoljavajućom tačnošću od  $\pm 0,1\%$  i  $\pm 3$  min pri merenju amplitudne i fazne greške, respektivno.

## 2. MERNI METODA

Merni transformatori, posebno strujni transformatori (ST) se koriste u elektroenergetskim sistemima i objektima više od jednog veka. Njihove funkcije i karakteristike dobro su definisane i usklađene sa međunarodnim i nacionalnim standardima [5], [6].

Prema međunarodnim standardima ST je vrsta mernog transformatora u kome je sekundarna struja, u normalnim uslovima upotrebe, u velikoj meri proporcionalna primarnoj struji i fazno se od nje razlikuje za ugao koji je približno nula za odgovarajući smer.

ST se dele u dva glavna tipa: merni ST, namenjen za prenos informacionog signala do mernih instrumenata i brojila i zaštitni ST, namenjen za prenos informacionog signala do zaštitnih i kontrolnih uređaja.

Prema međunarodnim standardima greške merenja ST, u stacionarnim uslovima, definisane su kao: amplitudna greška ( $\varepsilon_{CTx}$ ) koju merni transformator unosi u merenje i koja proizilazi iz činjenice da stvarni odnos transformacije nije jednak naznačenom koeficijentu transformacije i fazna greška ( $\varphi_{CTx}$ ) koja predstavlja razliku u fazi između primarne struje i sekundarnih strujnih ili naponskih fazora, pri čemu je pravac fazora odabran tako da je ugao nula za idealni transformator. Fazna greška je pozitivna kada sekundarni fazor napona ili struje prednjači za primarnim strujnim fazorom, i obično se izražava u minutima ili radijanima centa.

Sistem za testiranje live-line pod naponom za merenje amplitudne i fazne greške strujnog transformatora kao što je prikazano na slici 1. uključuje četiri podsistema: primarni podsistem PSS je konfigurisan da meri i digitalizuje primarnu struju  $I_p$ , na strani visokog napona CTx, i bežično komunicira unutar celog sistema; sekundarni podsistem SSS je konfigurisan da meri i digitalizuje sekundarnu struju na niskonaponskoj strani CTx i bežično komunicira sa celim sistemom; mrežni podsistem NTWSS je konfigurisan da integriše sve bežične komunikacione kanale, najmanje GPS, radio, Wi-Fi i komunikaciju; Podsistem informacionih tehnologija ITSS je konfigurisan za kontrolu svih funkcija merenja i upravljanja, kalibracije softverskih grešaka i korekcije bloka SECC, dijagnostike i automatizovanog izveštavanja.

Metodološko objašnjenje osnovnih mernih funkcija testnog sistema i metrološki zahtevi su navedeni korišćenjem teorije fazora. Naizmenične struje su analizirane više od 100 godina, korišćenjem konstrukta koji je razvio Charles Proteus Steinmetz 1893, poznatog kao fazor. Razvijena je relativno nova varijanta ove tehnike koja sinhronizuje izračunavanje fazora sa apsolutnim vremenom, poznata kao vremensko sinhronizovano merenje fazora ili sinhro fazori, [7].

Realizovani sistem meri dve struje, kao što je prikazano na slici 1, trenutne vrednosti primarne i sekundarne struje CTx, koje se matematički izražavaju kao:

$$i_p(t) = \sqrt{2} I_p \cos(\omega t + \alpha_p) = I_p \angle \alpha_p \quad (1)$$

$$i_s(t) = \sqrt{2} I_s \cos(\omega t + \alpha_s) = I_s \angle \alpha_s \quad (2)$$

gde su:

$i_p(t)$ ,  $i_s(t)$  - trenutne vrednosti primarne i sekundarne struje, respektivno,

$I_p$ ,  $I_s$  - efektivne vrednosti (pravi RMS) primarne i sekundarne struje, respektivno,

$\omega = 2\pi f$  - ugaona frekvencija struje u mreži,

$\alpha_p$ ,  $\alpha_s$  - fazni ugao u trenutku  $t = 0$  primarne i sekundarne struje, respektivno.

U skladu sa definicijama iz standarda, a polazeći od jednačina (1) i (2) amplitudna greška  $\varepsilon$  i fazna greška  $\varphi$  izračunavaju se kao:

$$\varepsilon = \frac{k_n \cdot I_s - I_p}{I_p} 100 (\%) \quad (3)$$

$$\varphi = \alpha_s - \alpha_p = 2 \pi f (t_{0s} - t_{0p}) \quad (4)$$

gde su:

$k_n = I_{pn} / I_{sn}$  - nominalni odnos transformacije CTx,

$I_{pn}$ ,  $I_{sn}$  - nominalne vrednosti primarne i sekundarne struje CTx, respektivno,

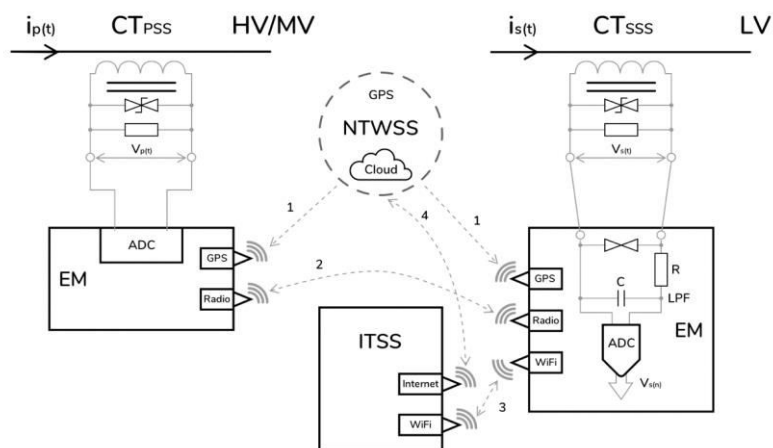
$f$  - osnovna frekvencija struje u mreži,

$t_{0p}$  i  $t_{0s}$  - su vreme prolaska kroz nulu primarne i sekundarne struje, respektivno.

Vremensku sinhronizaciju obezbeđuje GPS (Global Positioning Sistem) ili drugi satelitski sistem za pozicioniranje kao što su GLONNAS, GNSS, GALILEO koji zrače vremenski referentni signal koji se koristi za vremensku sinhronizaciju primarnih i sekundarnih strujnih signala CTx. Merna nesigurnost u određivanju vremena u najboljem slučaju ( $k=2$ ) za visokokvalitetni jednofrekventni GPS koji je pažljivo kalibrisan je oko 10 ns. Merna nesigurnost u određivanju vremena, u najgorem slučaju za GPS gde su sva hardverska kašnjenja zanemarena i nekalibrisana, mogla bi da dostigne 1 ns.

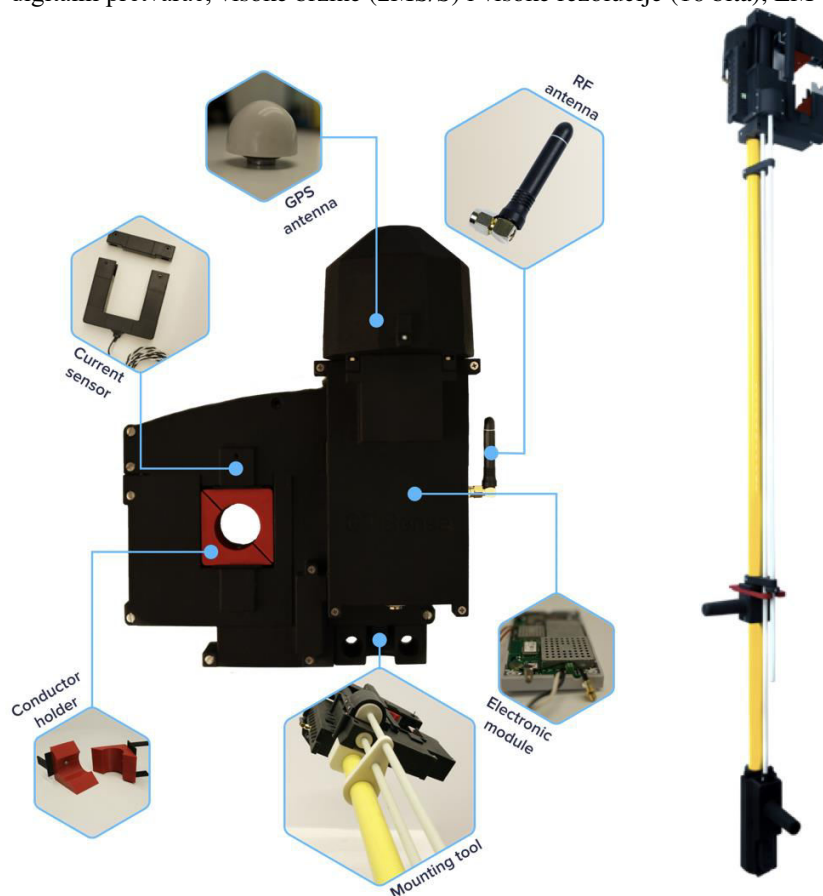
### 3. REALIZACIJA MERNOG SISTEMA

Za razliku od konvencionalnih mernih instrumenata za ovu namenu, sistem CT Sense za testiranje primenjuje najsavremenije komercijalno dostupne tehnologije zasnovane na industrijskom internetu stvari i cloud rešenjima, kao što se može videti na slikama 2 i 3.



Slika 2. Pojednostavljeni šematski prikaz realizovanog test sistema: glavne funkcije merenja i bežične komunikacije

Objašnjenje značenja skraćenica na slici 2: CTpss strujni transformator sa rasklopljivim jezgrom ( $V_{pn}=1$  V AC, klasa tačnosti 0,2S) montira se pod naponom na primarni provodnik CTx CTsss strujni transformator sa rasklopljivim jezgrom ( $V_{sn}=1$  V AC, klasa tačnosti 0,2) montiran na sekundarni provodnik CTx pod naponom, ADC- analognodigitalni pretvarač, visoke brzine (2MS/S) i visoke rezolucije (16 bita), EM-elektronski modul.



Slika 3. Prikaz osnovnih tehnoloških komponenti merne glave za merenje primarne struje CTx na visokom naponu, kao i alata za montažu na visokonaponski provodnik metodom hot stick.

Na slici 3. označeni su: 1-GPS komunikacija, 2-radio komunikacija, 3-Wi-Fi komunikacija, 4-Internet komunikacija. Merni sistem CT Sense koristi radio komunikacije na radnoj frekvenciji 866 Hz da bi omogućio PSS i SSS da komuniciraju i razmenjuju merne podatke, GPS interfejs za postizanje vremenskog sinhronizovanja (timestamp) izmerenih podataka, koristi Wi-Fi komunikaciju prema IEEE 802,11 b/g.

Primarni podsistem PSS se sastoji od specijalno dizajnirane, merne glave koja je prikazana na slici 3 koja se daljinski otvara i u koju se mogu montirati senzori za merenje različitih mernih opsega. Merna glava montira se na sredjenaponski ili visokonaponski provodnik pod naponom, principom hot stick, upotrebom posebno dizajniranog alata za montažu na bazi izolacionih šipki od fiberglasa. Na slici 3 prikazana je PSS merna glava sa njenim najvažnijim komponentama.

## 4. VALIDACIJA MERNOG SISTEMA

### 4.1. Metrološka validacija

U cilju provere metroloških karakteristika, sprovedeno je više eksperimenata, uporedna merenja sa dve različite metode i sistema ispitivanja za merenje amplitudne i fazne greške strujnog transformatora pri ispitivanju CTx. Šema merenja za eksperimentalna istraživanja je prikazana na slici 4.

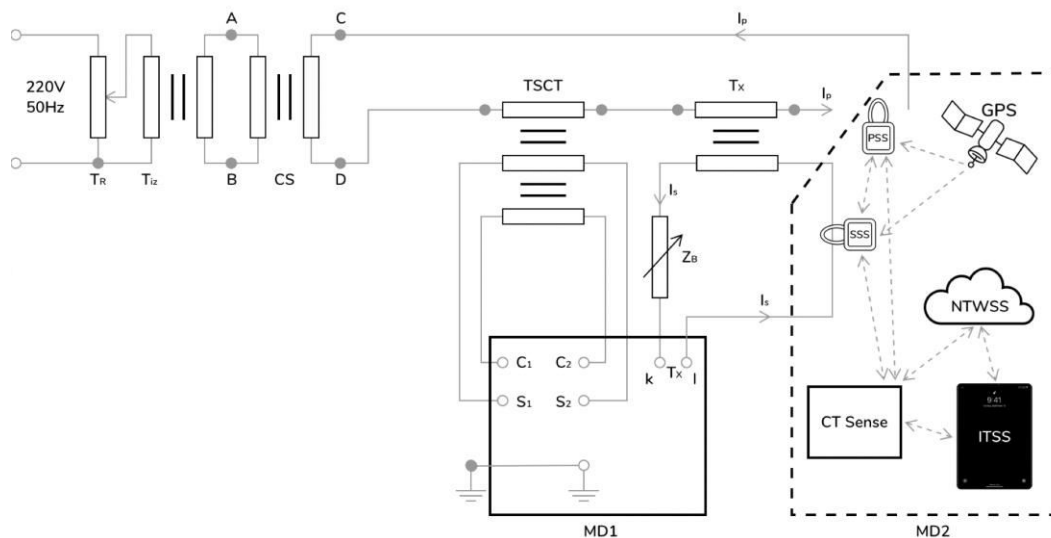
Merni uređaj MD1 je merni uređaj koji radi na principu diferencijalne metode. MD1 se sastoji od standardnog strujnog transformatora sa elektronskom kompenzacijom grešaka tipa 4764 (TSCT) koji ima nominalnu amplitudnu grešku od  $\pm 0,001\%$  (10 ppm) i nominalnu faznu grešku od  $\pm 0,05'$  (17,4 ppm) i uređaja za ispitivanje tačnosti instrumentalnih transformatora tip 2767 koji ima nominalnu tačnost za merenje amplitudne greške od  $\pm 0,5\%$  izmerene vrednosti  $\pm 10$  ppm  $\pm 1$  digit i nominalnu tačnost merenja fazne greške  $\pm 0,5\%$  merene vrednosti  $\pm 0,034'$  (10 ppm)  $\pm 1$  digit.

Merni uređaj MD2 je merni sistem CT Sense koji radi na principu direktnog merenja, metodom live line on line i ima nominalnu amplitudnu grešku od  $\pm 0,1\%$  i nominalnu faznu grešku od  $\pm 3$  min.

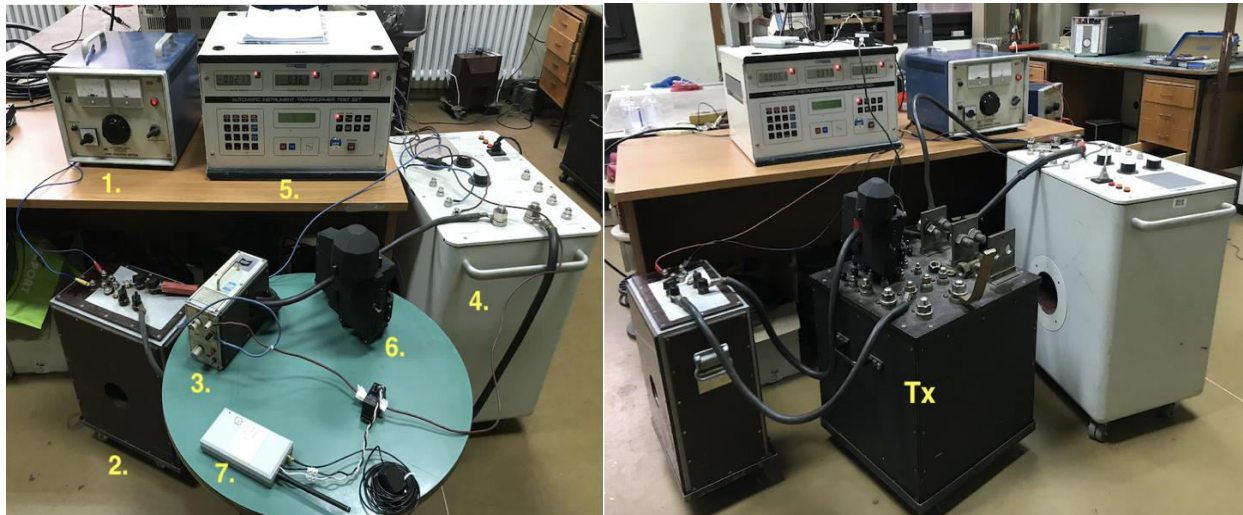
Prema šemi sa slike 4. vršena su jednovremena merenja sa uređajima MD1 i MD2, kako bi se procenila međusobna odstupanja u merenju amplitudne i fazne greške strujnog transformatora.

Na slici 5.a. prikazana je laboratorijska postavka za kalibraciju mernog sistema CT Sense, gde su: 1-regulacioni transformator, 2-strujni izvor, 3-etalon strujni transformator INT sa promenljivojvom greškom STG-1, 4,5-merni sistem Tetex MD1, 6,7- merni sistem CT Sense.

Na slici 5.b. prikazana je laboratorijska postavka za uporedna merenja na etalon strujnom transformatoru (Tx), serijski broj 540371 čija je amplitudna greška  $\pm 0,01\%$  i fazna greška  $\pm 0,5$  min. Opterećenje sekundarnog kola ZB Tx-a bilo je samo opterećenje koje čine veze i merni uređaj MD1.



Slika 4. Šema merenja za eksperimentalna istraživanja metroloških karakteristika.



Slika 5. a). Podešavanja za kalibraciju CT Sense mernog Sistema; b). Laboratorijska oprema za uporedna merenja na etalon strujnom transformatoru (Tx)

U tabeli 1. dati su merni rezultati uporednih merenja amplitudne i fazne greške etalon strujnog transformatora, dobijeni mernim sistemima MD1 i MD2.

Tabela 1. Rezultati uporednih merenja mernim sistemima MD1 i MD2 na etalon strujnom transformatoru (Tx).

$i$ [r.u.]		0,05	0,2	1	1,2
CT Sense MD2	$g_a$ [%]	0,05	-0,03	-0,01	-0,01
	$g_f$ [min]	3,7	1,5	2,4	0,8
Tetex MD1	$g_a$ [%]	-0,011	0,01	0,0117	0,0107
	$g_f$ [min]	3,52	1,182	0,593	0,567

Rezultati detaljnih ispitivanja dati su u dokumentu [8].

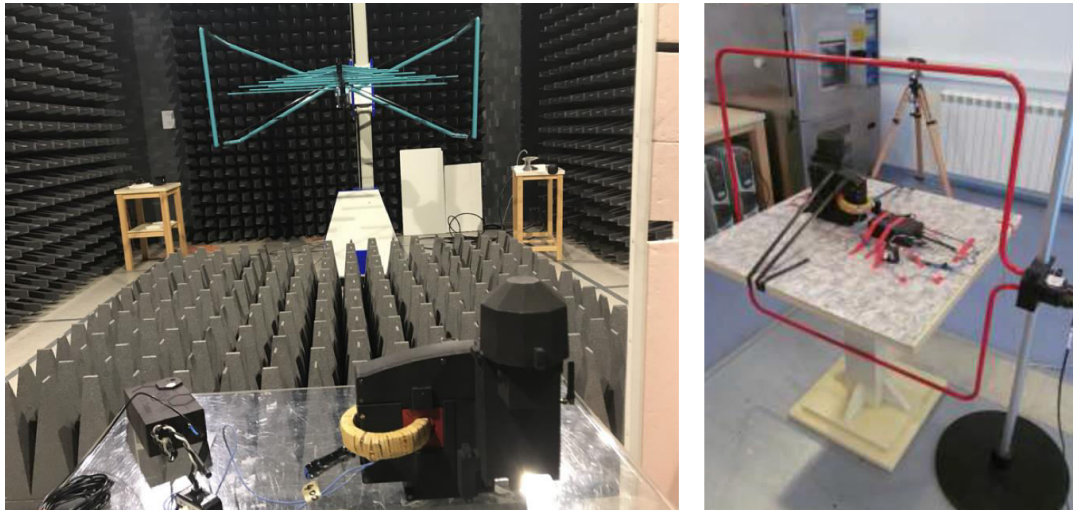
#### 4.2. Validacija mernog sistema u smislu elektromagnetske kompatibilnosti

Merni sistem CT Sense ispitan je u smislu elektromagnetne kompatibilnosti (EMC) u Idivorski laboratorije D.O.O. u Beogradu. Merni sistem validiran je sledećim tipovima testova: test radijacione RF emisije, test kondukcione RF emisije, test emisije harmonika, test limita filkera, test imunosti na magnetno polje, test imunosti na zračenje RF elektromagnetnog polja, test imunosti na elektrostatičko pražnjenje (ESD), test imunosti na brze tranzijente (EFT), test imunosti na injektirane struje, test imunosti na varnice, test imunosti na propade napona.

Merni sistem CT Sense validiran je prema sledećim međunarodnim standardima: EN 61000-6-4:2007 + A1:2011, EN 61000-6-5:2015 (za opremu namenjenu za upotrebu u transformatorskim stanicama), EN 55014-1:2006 + A1:2009 + A2:2011, EN 55014-2:2015 (za opremu kategorije IV), EN 61000-3-2:2014 i EN 61000-3-3:2013. Fotografije sa EMC validacije mernog Sistema CT Sense prikazane su na slici 6.

Validacija mernog Sistema CT Sense u smislu elektromagnetne kompatibilnosti rezultirala je tako što je merni sistem prošao sve izvršene testove, [9].





Slika 6. Fotografije sa testiranja mernog Sistema na elektromagnetnu kompatibilnost u Idvorski Laboratorijama.

#### 4.3. Validacija mernog sistema u laboratorijskim uslovima na visokom naponu

Merni sistem CT Sense validiran je u laboratorijskim uslovima na visokom naponu do 400 kV u visokonaponskoj laboratoriji KKM Power d.o.o. u Beogradu. Cilj ovog eksperimenta bilo je testiranje funkcionalnosti i rada uređaja CT Sense pri visokom naponu do 400 kV.

Oprema koja je korišćena pri visokonaponskom testiranju u laboratoriji bila je sledeća:

- visokonaponski izvor je kaskadni transformator 2T 333-333, nazivnog napona primara 1,5 kV i 3 kV, nazivnog napona sekundara 666 kV;
- visokonaponski delitelj sledećih karakteristika: naznačenog napona 700 kV, prenosnog odnosa 2500.

Testiranje funkcionalnosti i rada uređaja CT Sense vršeno je u prisustvu visokog napona. Primarni senzor (merna glava) uređaja CT Sense povezan je na baterijski strujni izvor i kompletna konstrukcija je postavljena na visokonaponsku elektrodu visokonaponskog generatora u beznaponskom stanju, slika 7.



Slika 7. Fotografije sa laboratorijskog ispitivanja na visokom naponu (KKM).

Baterijski strujni izvor radi na principu generisanja struje kroz provodnik na bazi kondenzatorskog senzora osetljivog na električno polje prouzrokovano radom visokonaponskog generatora. Provodnik baterijskog strujnog generatora kroz koji se generise struja kao posledica pojave visokog napona provučen je kroz deo merne glave koji služi za beskontaktno merenje struje na visokom naponu. Sekundarni senzor mernog sistema CT Sense bio je postavljen na provodnik kroz koji je proticala struja od 5 A dobijena preko izolacionog i regulacionog transformatora iz mreže, u cilju simulacije sekundarnog kola strujnog transformatora. Sekundarni senzor nije bio u blizini visokog napona. Nakon testa funkcionalnosti uređaja CT Sense u beznaponskom stanju, u smislu provere komunikacionih kanala i funkcionalnosti merenja, uključen je visokonaponski generator. Napon na

visokonaponskoj elektrodi generatora je podizan u sledećim koracima: 100 kV, 130 kV, 200 kV, 240 kV, 300 kV, 400 kV.

Tokom trajanja testa baterijski izvor struje je, u zavisnosti od intenziteta visokog napona na visokonaponskoj elektrodi generatora, proizvodio različite vrednosti struje, stabilno pri svakom od generisanih naponskih nivoa. Kompletan test je osmišljen i izveden kako bi se simuliralo merenje na visokom naponu mernim sistemom CT Sense.

Na slici 7 prikazane su fotografije sa testiranja na visokom naponu (primarni senzor na visokonaponskoj elektrodi, sekundarni senzor na niskom naponu).

Analiza rezultata ispitivanja ukazuje da je merni sistem CT Sense radio stabilno bez prekida na svim naponskim nivoima do 400 kV, tokom celokupnog trajanja testa. Komunikacioni kanali (GPS, radio, Wi-Fi) su radili stabilno bez prekida na svim naponskim nivoima do 400 kV, tokom celokupnog trajanja testa.

Ponovljivost merenja je bila izuzetno dobra, kao i neometan rad svih funkcija mernog sistema CT Sense u uslovima rada pod visokim naponom do 400 kV, [10].

#### 4.4. Validacija u pogonu (demo merenja)

Validacija mernog sistema CT Sense vršena je u pogonu u nekoliko distributivnih transformatorskih stanica. U ovom poglavlju biće prikazani rezultati demo merenja u jednoj transformatorskoj stanici 110 kV/20 kV, u kojoj je ispitivan strujni transformator 110 kV naponskog nivoa, koji se nalazi na izvodu transformatorskog polja 110 kV broj 1 u fazi 0, prenosnog odnosa 200 A/1 A. Za ispitani strujni transformator merene su amplitudne i fazne greške pod naponom na sva četiri jezgra, tj. na dva merna i dva zaštitna jezgra.

Primarni i sekundarni senzori montirani su tako što je primarni senzor montiran uz pomoć izolacione klupice i izolacionog alata za montažu primarnog senzora. Sekundarni senzor je montiran na dva mesta na kojima su bili dostupni sekundarni krajevi strujnog transformatora 110 kV koji je ispitivan, i to:

- u razvodnom ormanu u otvorenom delu 110 kV postrojenja
- u razvodnom ormanu u zatvorenom delu transformatorske stanice.

Tokom montaže primarnog i sekundarnog senzora nisu uočeni problemi koji bi narušili bezbednost i standarde.

Fotografije ispitivanja amplitudne i fazne greške strujnih transformatora 110 kV u pogonu, pod naponom, uređajem CT Sense prikazane su na slici 8.



Slika 8. Fotografije sa ispitivanja sistema u postrojenju TS 110 kV/20 kV.

U tabeli 2 prikazani su rezultati merenja amplitudne i fazne greške mernim sistemom CT Sense na strujnom transformatoru 110 kV za svako od četiri jezgra.



Tabela 2. Rezultati validacije u pogonu mernog sistema CT Sesne u transformatorskoj stanici 110 kV/20 kV

Merno jezgro 1, Klasa tačnosti 0.2, Faktor sigurnosti FS5, Nominalno opterećenje sekundarnog kola 15 VA			
$I_p$ [A]	$I_s$ [A]	$g_a$ [%] (srednja vrednost)	$g_f$ [min] (srednja vrednost)
55,88	0,279	-0,11	-3,9
Merno jezgro 2, Klasa tačnosti 0.5, Faktor sigurnosti FS10, Nominalno opterećenje sekundarnog kola 30 VA			
$I_p$ [A]	$I_s$ [A]	$g_a$ [%] (srednja vrednost)	$g_f$ [min] (srednja vrednost)
56,01	0,282	0,46	11,1
Zaštitno jezgro 1, Klasa tačnosti 5P30, Nominalno opterećenje sekundarnog kola 30 VA			
$I_p$ [A]	$I_s$ [A]	$g_a$ [%] (srednja vrednost)	$g_f$ [min] (srednja vrednost)
55,39	0,277	1,05	32,8
Zaštitno jezgro 2, Klasa tačnosti 5P30, Nominalno opterećenje sekundarnog kola 30 VA			
$I_p$ [A]	$I_s$ [A]	$g_a$ [%] (srednja vrednost)	$g_f$ [min] (srednja vrednost)
56,02	0,280	-0,81	-5,42

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan novi patentirani merni sistem za ispitivanje amplitudne i fazne greške strujnih transformatora u pogonu bez isključenja isporuke električne energije. Opisana je merna metoda koja se bazira na primeni GPS vremenski sinhronizovanog merenja primarne i sekundarne struje strujnog transformatora, kao i osnovni tehnološki elementi realizovanog sistema. Detaljno su prikazani sledeći rezultati:

- metrološka validacija je pokazala da merni sistem ima veoma dobre merne karakteristike i da su greške merenja amplitudne i fazne greške strujnih transformatora u granicama  $\pm 0,1\%$  i  $\pm 3$  min respektivno;
- ispitivanja elektromagnetne kompatibilnosti su dokazala da je merni sistem imun na elektromagnetske smetnje, kao i da merni sistem ne emituje štetne emisije elektromagnetskog zračenja kod primene u elektroenergetskim objektima;
- laboratorijski testovi na visokom naponu (do 400 kV) dokazali su da merni sistem može nesmetano da radi i u uslovima prisustva visokog napona;
- testovi u elektrodistributivnim postrojenjima pokazali su da je merni sistem radio stabilno, da je rukovanje mernim sistemom bezbedno i veoma efikasno.

Dalja istraživanja u ovoj oblasti su usmerena na razvoj mernog sistema za ispitivanje amplitudne i fazne greške visokonaponskih naponskih transformatora, kao i merenje snage i energije na visokom naponu.

## LITERATURA

- [1] P.E.Doing, M.A.Hancock, C.N.Gunn, B.J.Forth, P.C.Cowan, S.H.Lightbody, M.L. Cochrane, S.J.Harding, D.N. Loewen, "Method and apparatus for instrument transformers reclassification", US Patent, US2005028877, 2005.
- [2] C. Cherbauchich, P. Mazza, N. Kuljaca, G. de Dona, S. Weiss, U. Brand, "A new tool for live, on site, HV instrument transformers accuracy check", CIRED 19<sup>th</sup> International conference on electricity distribution, Vienna 21-24 May 2007, paper 0778.
- [3] B. Kingham, C. Gunn, CT Reclassification and verification, CIRED 19<sup>th</sup> International conference on electricity distribution, Vienna 21-24 May 2007, paper 0833.
- [4] U. Kovačević, V. Milenković, Real Time Live Line Measurement of Metrological Properties of Current Transformers, PCT/EP2021/071535, 12.08.2021 (priority date 28.08.2020).
- [5] IEC61869 serija, Instrument transformers.
- [6] IEEE C57.13 serija, Standard Requirements for Instrument Transformers.
- [7] A.G.Phadke, J.S.Thorp, "Synchronized Phasor Measurements for Power Systems", (Book), Springer Verlag, 2008.
- [8] Uverenje o etaloniranju 21121, Elektrotehnički Institut Nikola Tesla Beograd AD, Laboratorija za ispitivanje i etaloniranje, 08.03.2021.
- [9] EMC Test report no. 975, Idvorsky laboratories ltd Belgrade, 06.04.2021.
- [10] Izveštaj o izvršenom visokonaponskom testiranju funkcionalnosti i rada uređaja Ct Sense u prisustvu visokog napona do 400 kV, KKM Power D.O.O. Beograd, 15.06.2021.