

# RAZVOJ NAPONSKOG MERNOG TRANSFORMATORA BEZ MAGNETNOG JEZGRA - KARAKTERISTIČNI PROBLEMI

## DEVELOPMENT OF THE VOLTAGE MEASURING TRANSFORMER WITHOUT A MAGNETIC CORE - CHARACTERISTIC PROBLEMS SUMMARY

Dušan ČOMIĆ, Novi Sad, Srbija

Zoran MITROVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Boris ANTIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Dragan PEJIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Platon SOVILJ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

### KRATAK SADRŽAJ

Prema evropskoj normi EN 50160 dozvoljeno je izobličenje napona u elektro-distributivnoj mreži do 8%, što značajno „kviri“ sinusoidalnost napona. Primena ove norme zahteva i reviziju procesa i metoda merenja. Sada se u praksi na niskom i srednjem naponu, karakterističnom za elektro-distributivnu mrežu, uglavnom koriste konvencionalni naponski merni transformatori i otpornički razdelnici. Iako je njihova upotreba, posebno naponskih mernih transformatora, masovna, treba naglasiti da i jedni i drugi imaju po jedan ozbiljan nedostatak:

- naponski merni transformator je nelinearan i dopunski izobličuje mereni nesinusoidalni napon, a
- otpornički razdelnik ne obezbeđuje galvansko odvajanje mernog bloka od ulaznog merenog napona.

Ako napon u sredjenaponskoj elektro-distributivnoj mreži nije sinusoidaln, konvencionalni naponski merni transformatori (NMT) sa magnetnim jezgrom nisu pogodni za merenje, jer zbog ulaska u zonu zasićenja na svom sekundarnom namotu ne daju korektan talasni oblik, amplitudu i fazni pomeraj sekundarnog napona u odnosu na primarni napon. Koristeći tehnološki napredak u oblasti merenja i zaštite elektroenergetskih postrojenja, izrađeno je novo rešenje merenja napona na srednjem nivou koje neće imati navedene nedostatke i koje će:

- biti linearno u širokom opsegu frekvencije, pa neće dopunski izobličavati složenoperiodične napone,
- galvanski odvajati merni blok od ulaznog napona.

Radi provere zamisli, napravljen je prvo probni uzorak. On se sastojao od pred-otporn, dva namotaja dvostruko oklopljena gvozdanim kavezom i na njemu su vršena prvobitna merenja električnih veličina i linearnosti, odnosno faznim stavom primarnog i sekundarnog napona. Rezultati merenja su pokazali da se ovakav transformator može koristiti za merenje napona, kvaliteta električne energije u sredjenaponskim mrežama (do 35 kV), kao i za merenje energije u složenoperiodičnoj sredjenaponskoj mreži. Kako su rezultati merenja pokazali da je ideja dobra i ostvariva napravljena su dva identična NMT, kao prototip. U radu su date izmerene vrednosti parametara i performansi novog NMT, rezultati simulacije ponašanja transformatora, pokazana linearnost merenja, kao i druga ispitivanja značajna za određivanje performansi merila i tačnosti merenja. Konstruisan je novi uređaj za merenje napona u visokonaponskoj mreži koji stohastičkom metodom meri napon i harmonike napona. Kako se za merenje napona koristi transformator bez magnetnog jezgra, talasni oblici se sa primarnog namotaja verno prenose na sekundarni namotaj. U radu su opisani problemi koje je trebalo detektovati, objasniti, merenjem i teoretski potkrepiti i na kraju ponuditi jedno od mogućih rešenja problema merenja napona i kvaliteta napona u elektro-distributivnoj mreži, tako da bude usklađeno sa savremenim standardima i normama.

**Ključne reči:** naponski merni transformator bez magnetnog jezgra, karakteristični problemi.

### ABSTRACT

According to the European norm EN50160, the allowed distortion of the voltage in the power grid is up to 8%, which substantially affects the sine shape of the voltage. To apply this norm, the revision of the measuring process and methods is required.

Current measurement practice at low and medium power grid levels includes mainly conventional voltage measuring transformers with iron core and resistive dividers.

Although the wide spread application, especially of voltage measuring transformers, it needs to be stressed that both (transformers and voltage dividers) have serious disadvantages:

- voltage measuring transformer is non-linear with frequency and additionally distorts the measured voltage, and
- resistive divider does not provide galvanic isolation between the measuring block and the measured voltage.

If the voltage in the medium voltage power grid is not sinusoidal, then conventional voltage measuring transformers (VMT) with a magnetic core are not suitable because they do not give the correct waveform, amplitude and phase shift of the secondary winding due to nonlinearity and saturation of the magnetic core.

Therefore, using technological advances in the field of measurement and protection of power plants, the new solution for the voltage measurement is developed, which does not have the two disadvantages and which will:

- be linear over a wide frequency range, so it will not further distort complex periodic voltages,
- galvanically insulate the measuring block from the input voltage.

To test the idea, a test sample was first made. It consisted of a pre-resistor, two windings doubly shielded by an iron cage, and the initial measurements of electrical quantities and linearity were carried out on it, especially the phase between the primary and secondary voltage.

Measurement results have shown that such a transformer can be used to measure voltage, power quality in medium voltage networks (up to 35 kV), as well as to measure energy in complex periodic medium voltage networks.

As the measurement results proved that the idea was good and feasible, two identical VMTs were made as prototypes. The paper gives measured values of parameters and performances of the new VMT, simulation results of transformer behavior, demonstrates linearity of measurements, as well as other tests results important for determining the performances of the measurement and the measurement uncertainty.

A new device for measuring the voltage in the high-voltage network was constructed which implements the stochastic method to measure voltage and voltage harmonics. As the proposed device uses the voltage transformer without a magnetic core, the waveforms from the secondary coil match the ones from the primary coil.

The paper covers research related to problems that needed to be detected, explained, measured and theoretically described, and finally to offer one of the possible solutions for measuring voltage and voltage quality in the power grid network, so it corresponds to the contemporary standards and norms.

**Key words:** voltage measuring transformer without a magnetic core, characteristic problems.

Dušan Čović: [Dusan.comic52@gmail.com](mailto:Dusan.comic52@gmail.com), 064/ 837 2104,

Dragan Pejić: [pejicdra@uns.ac.rs](mailto:pejicdra@uns.ac.rs), 063/ 846 0922,

Zoran Mitrović: [zoranmit@uns.ac.rs](mailto:zoranmit@uns.ac.rs), 064/ 113 5095,

Boris Antić: [antic@uns.ac.rs](mailto:antic@uns.ac.rs), 063/ 842 8551,

Platon Sovilj: [platon@uns.ac.rs](mailto:platon@uns.ac.rs), 064/ 181 4793.

## UVOD

Značaj merenja kvaliteta isporučene električne energije je odavno poznat, a uticaj kvaliteta električne energije na rad električnih uređaja [1-2] i njihov životni vek [3] dobro su poznati inženjerima. Novi izazovi i ograničenja se javljaju u "zaprpljanim" mrežama [4-8] koje moraju uzeti u obzir stalno nadgledanje harmonika napona i struje [9-10]. Važnost merenja kvaliteta električne energije raste u otvorenim tržištima [11], gde postaje važan faktor u oceni tehničkih i finansijskih parametara.

Kriterijumi značajni za kvalitet isporučene električne energije za niskonaponsku stranu napojne mreže mogu se videti iz SRPS EN 50160.

Praktični zaključci koji se mogu dobiti iz SRPS EN 50160 su:

- Prihvatljive granice varijacije napona su široke;
- Važno je da se proverí da se sigurnosni uređaji i releji mogu razbuditi (poništiti) nakon propada napona jer se oni mogu javiti relativno često;
- Oprema (trošila) koja je osetljiva na napon treba da se koristi sa pažnjom jer je dozvoljeno odstupanje napona veoma široko i može da izađe iz granice  $\pm 10\%$  za 5% vremena;
- Dozvoljene granice u prelaznim režimima su, takođe, široke i prema tome treba pažljivo odabrati uređaje za zaštitu od prenapona, naročito u slučajevima proizvodnje skupe opreme ili tehnološkog procesa koji zahteva dugo i skupo ponovno pokretanje.

Kao što je to već navedeno u [11] tehnološki napredak je proizveo jednu grupu novih potrošača električne energije čiji je rad zasnovan na mikroprocesorima, elektronskoj i procesnoj opremi koja je veoma osetljiva na kvalitet isporučene električne energije, to jest njegovog reprezentativnog napona.

Povećanjem broja prijemnika koji narušavaju talasni oblik struje i napona problem merenja u nesinusoidalnoj distributivnoj mreži se sve više zaoštrava.

Izvori električne energije generišu sinusoidalni oblik napona, koji se prenosnom mrežom predaje elektrodistribucijama, koje svojom mrežom često predaju već dosta izobličen napon potrošačima. Prema tome, u elektrodistributivnoj mreži može doći do deformacije sinusoidalnog oblika napona, što ima za posledicu:

- Otkaz ili skraćeni životni vek elektronske opreme;
- Nepravilan rad izazvan šumovima i flikerima koji nepredvidivo prekidaju osetljive proizvodne procese;
- Štetu koja nastaje na proizvodnoj opremi izazvanoj impulsima, oscilacijama, prenaponima, podnaponima, komutacijama itd.;
- Trajno uništenje kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne snage izazvano rezonancijom;
- Povećanje gubitaka u magnetnim jezgrima elektromotora i kablovskoj mreži usled viših harmonika, itd.

U uslovima deformacije sinusoidalnog oblika napona sve je više prisutno zajedničko, partnersko utvrđivanje kvaliteta napona, merenjem u dužem periodu, čime se utvrđuje ko je izazvao izobličenje napona (distributer ili kupac) i preduzimanje aktivnosti da napon bude u okvirima definisanim standardom SRPS EN 50160.

Korektno merenje napona u distributivnoj mreži, u ovakvim uslovima, je standardni merni lanac za merenje napona koji će sa sigurnošću izmeriti napon i u uslovima „zaprjane mreže“. Na taj način će i kupac i distributer znati da je izmereni napon tačno izmeren i moći će se doći do rešenja koje će napon svesti u dozvoljene granice.

Standardni merni lanac za merenje napona se sastoji od otporničkog razdelnika, A/D konvertora koji meri napon i bloka za obradu signala. Performanse ovakvog lanca za merenje napona su takve da se na 0,4 kV korektno meri složenoperiodični napon koji se javlja u mreži.

Problem se javlja na višim naponskim nivoima od 0,4 kV gde se u merni krug dodaje i konvencionalni naponski merni transformator (NMT) sa magnetnim jezgrom.

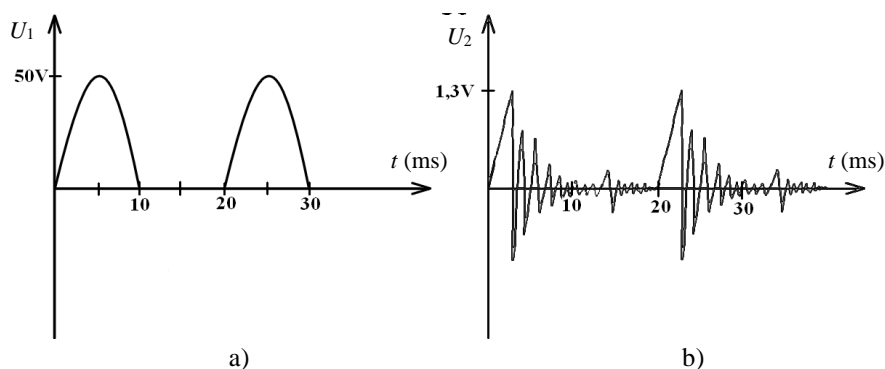
Uloga NMT je da transformiše merene napone u stalnom odnosu i to bez faznog pomaka između fazora primarnog i sekundarnog napona. Takav zahtev može da ispuni samo idealan transformator. To je transformator bez otpornosti, kod kog nema nikakvih padova napona, struja magnetćenja je jednaka nuli, magnetno jezgro je beskonačne magnetne provodnosti i nema rasipnog fluksa između primara i sekundara.

Kod realnog transformatora primarni i sekundarni namotaji imaju konačan omski otpor, a jedan deo magnetnog fluksa će zahvatati samo primarni namotaj i to je rasipni fluks primara koji je srazmeran primarnoj struji.

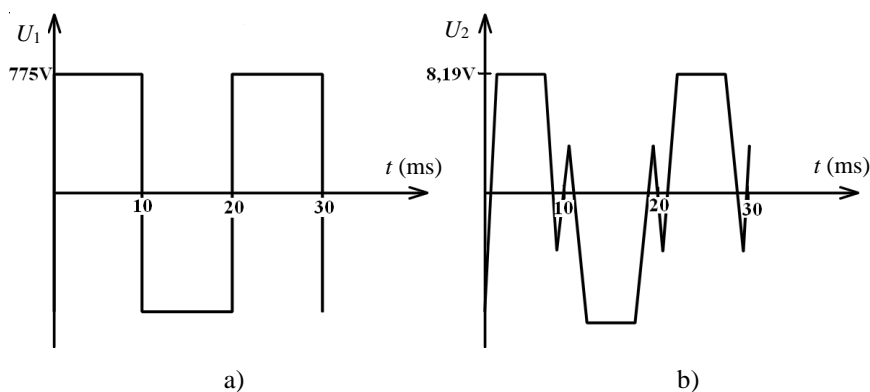
Ako je srednjenaponska elektrodistributivna mreža "zaprjvana", napon u njoj nije sinusoidalan, tada konvencionalni NMT sa magnetnim jezgrom nisu pogodni, jer mogu ući u zonu zasićenja, što ima za posledicu da se signal sa primarnog na sekundarni namotaj ne prenosi verno, a merenje napona nije tačno.

Znači, složenoperiodični napon kod konvencionalnog NMT sa magnetnim jezgrom dodatno izobličuje sekundarni napon i merenja nisu tačna. Da bi se proverilo navedeno ponašanje NMT, u laboratoriji FTN Novi Sad ispitan je jedan konvencionalni NMT  $20/\sqrt{3} : 0,1/\sqrt{3}$  kV/kV sa magnetnim jezgrom tako što su na primar dovođeni razni talasni oblici primarnog napona, a osciloskopom su mereni oblici sekundarnog napona i amplitude. Zbog ograničenja u snazi izvora ulaznog primarnog napona (za razne talasne oblike) vrednosti primarnog napona su bile relativno niske.

Samo neki, karakteristični, talasni oblici primarnog napona sa odzivima sekundarnog su dati na slikama 1 i 2.



Slika 1 - Jednostrano ispravljen sinusni oblik naponskog signala na: a) primarnom namotaju; b) sekundarnom namotaju



Slika 2 - Pravougaoni oblik naponskog signala na: a) primarnom namotaju; b) sekundarnom namotaju

Posmatrajući slike 1 i 2 može se videti da konvencionalni, jednopolno izolovani NMT ima smetnje kada mu se na primarni namotaj dovede jednostrano ispravljen sinusni signal, jer se na sekundarnom namotaju javlja impulsni signal koji se prigušuje.

Kod dvostrano ispravljenog sinusnog signala na sekundarnom namotaju javlja se isti signal kao i kod jednostrano ispravljenog sinusnog signala, samo sa dvostruko većom učestanošću.

Takođe, za pravougaoni oblik primarnog napona javljaju se izobličenja sekundarnog napona.

Analiza problema vezanih za merenje napona u srednjenaponskoj nesinusoidalnoj mreži, koristeći standard EN 50160, ukazuje da se u interesu tačnosti merenja moraju primeniti neka nekonvencionalna rešenja.

## MOGUĆA NEKONVENCIONALNA REŠENJA

Visokonaponski otpornici u otporničkom razdelniku daju vernu sliku merenog napona, ali je problem njihova galvanska veza sa osetljivim elektronskim kolima, a optički merni pretvarači imaju problem spoljašnjih uticaja. Razvojem savremene merne opreme i mikroprocesorske zaštite sve više dolazi do izražaja neusklađenost između postojećih rešenja NMT sa savremenim elektronskim mernim instrumentima i uređajima mikroprocesorske zaštite.

Navedeni razlozi su zahtevali novo merilo koje će eliminisati do sada navedene nedostatke.

Autori su se opredelili za NMT bez magnetnog jezgra, koji je zasnovan na ideji otporničkog razdelnika i teoretski diferencira ulaznu struju [12, 13 i 14], a kako je velika otpornost u primarnom namotaju, time diferencira i primarni napon.

Motivacija za razvoj i upotrebu nekonvencionalnog transformatora posledica je nekoliko značajnih prednosti, kao što su:

- Smanjenje cene;
- Integracija sa prekidačem i potencijalno smanjenje dimenzija transformatorskih stanica;
- Povećanje bezbednosti rukovalaca, jer je izbegnuta mogućnost eksplozije usled proboja izolacije;
- Unapređenje karakteristika merenja;
- Jednostavnost razmene digitalnih merenih vrednosti, ugradnje, provere, podešavanja i održavanja zaštitnih i drugih uređaja zasnovanih na ovakvom merenju.

Kao dodatni deo sistema nekonvencionalnih mernih pretvarača ugrađuju se elektronski sklopovi koji su često integrisani u same merne pretvarače, što predstavlja njihovu značajnu prednost u odnosu na konvencionalne transformatore.

## PROTOTIP NOVOG NMT BEZ MAGNETNOG JEZGRA

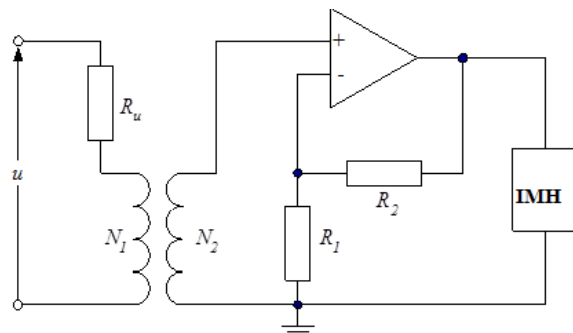
Da bi se potvrdila ispravnost opredeljenja za izradu novog NMT bez magnetnog jezgra izvršena su istraživanja i teoretska provera na probnom uzorku (prototipu) za niži napon, sa manjim brojem navojaka, sa i bez feromagnetnog oklopa. [15 i 16]. Potvrda teoretskih razmatranja datih u [17], u fazi razvoja i konstrukcije novog uređaja, izvršena je na uzorku prototipa novog NMT.

Prototip je uzorak sa po 2000 navojaka u primarnom i sekundarnom namotaju, izvedenih provodnikom  $\varnothing 0,22$  mm Cu. Pri izradi se imalo u vidu da će se merenja vršiti u laboratoriji koja nema generator visokog napona, pa je ovaj transformator izrađen za niski napon.

Na red sa primarnim namotajem uzorka povezan je otpornik od 300 k $\Omega$  i na primar je doveden promenljivi napon do 300 V.

Pokazalo se da je prototip NMT, bez metalnog oklopa, veoma podložan uticaju stranih polja, pa je zato odmah izvršeno dvostruko oklapanje namotaja primara i sekundara metalnim limom debljine 1 mm.

Imajući u vidu prirodu i potrebe merenja napona  $u$ , u složenoperiodičnoj srednjenaponskoj mreži uz NMT bez magnetnog jezgra koristi se baferski pojačavač i integrisano merilo harmonika (IMH), koje može meriti više harmonike, do 50-tog harmonika [18,19 i 20]. IMH meri pojedinačne harmonike ulaznog napona i to tako da je preciznost srazmerna rednom broju harmonika. Stoga se najtačnije mere najviši harmonici, a samim tim i efektivna vrednost napona u celini.



Slika 3 - Prototip novog merila složenoperiodičnog napona

Kako je transformator na slici 3 bez jezgra, uređaj je linearan i galvanski odvaja IMH od ulaznog napona  $u$ , koji se meri.

Kompleksni napon  $i$ -tog harmonika na ulazu u baferski pojačavač je dat formulom:

$$\bar{U}_{2i} = \frac{j\omega L_{12}}{R + j\omega L_1} \bar{U}_i \quad (1)$$

gde je  $\bar{U}_i$   $i$ -ti harmonik ulaznog napona u kompleksnom obliku, a  $j$  imaginarna jedinica.

Ulazni napon je  $U = 300$  V,  $R = 300$  k $\Omega$ . Pošto trafo nema jezgro, male su induktivnosti  $L_1$  i  $L_{12}$ ; kako je  $I \approx U/R$ , sledi da je struja primara  $I = 1$  mA. Struja u sekundaru  $I_2$  približno je jednaka 0 mA.

Kako je  $N_1 = N_2 = 2000$  navojaka, i poluprečnik navojka 1 cm, da bi se utvrdio red veličine napona  $U_2 = E_2$ , pretpostavimo da je  $L_1 \approx L_2$ ,  $L_{12} \approx \sqrt{L_1 L_2} \approx L_1$ , gde su  $L_1$ ,  $L_2$  i  $L_{12}$  iduktivnosti primara, sekundara i međuinduktivnost. Ako je struja prostoperiodična, sledi:

$$E_2 = \frac{\mu_0}{2} \cdot N_1 N_2 r \pi \omega I \quad (2)$$

Na mrežnoj učestanosti,  $f = 50$  Hz, vrednost napona  $E_2$  je  $E_2 \approx 25 \cdot 10^{-3}$  V.

S obzirom na pretpostavku da je  $L_1 \approx L_2 \approx L_{12}$  sledi da je:

$$\frac{E_2}{U} \approx \frac{E_1}{U} = \frac{\omega L_1}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L_1^2}} \quad (3)$$

Odnosno:

$$E_1 = \frac{\omega L_1}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L_1^2}} \cdot U \approx E_2 \quad (4)$$

U opštem slučaju je, za  $i$ -ti harmonik:

$$\bar{U}_{2i} = \frac{j\omega L_{12}}{R + j\omega L_1} \cdot \bar{U}_i \approx \frac{j\omega L_1}{R + j\omega L_1} \cdot \bar{U}_i \quad (5)$$

gde su  $\bar{U}_i$  i  $\bar{U}_{2i}$   $i$ -ti harmonik napona  $u$  i njemu odgovarajuća vrednost na sekundaru NMT bez jezgra. Iz relacije (5) sledi da je:

$$\frac{U}{E_2} \approx \frac{U}{E_1} \approx \frac{R}{\omega L_1} \approx M \approx 24000, \quad (6)$$

ako je napon prostoperiodičan i na mrežnoj učestanosti.

Elektromotorna sila  $E_2$  je relativno mala, pa je treba pojačati, a za naponski opseg od  $\pm 2,5$  V pojačanje iznosi  $k = 100$ . Na osnovu relacije (6) je:

$$\bar{U}_{2i} = \frac{j\dot{i} \frac{R}{M}}{R + j\dot{i} \frac{R}{M}} \cdot \bar{U}_i = \frac{j\dot{i}}{M + j\dot{i}} \cdot \bar{U}_i \quad (7)$$

Amplituda  $i$ -tog harmonika na sekundaru NMT bez jezgra je:

$$U_{2i} = \frac{i}{\sqrt{M^2 + i^2}} \cdot U_i, \quad (8)$$

a njegova faza je:

$$\phi_{2i} = i \cdot \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{i}{M} + \arg\{\bar{U}_i\} \quad (9)$$

Za  $M \gg i_{\max}$ , što se postiže i za  $i_{\max} = 50$  važi:

$$U_{2i} = \frac{i}{M} \cdot U_i \quad (10)$$

$$\phi_{2i} \approx i \frac{\pi}{2} - \frac{i}{M} + \phi_i \quad (11)$$

Relacije (10) i (11) daju jednostavne linearne veze amplitude i faze  $i$ -tog harmonika u sekundaru i  $i$ -tog harmonika napona  $u$  sa slike 3.

Relacije (10) i (11) su veoma pogodne za kalibracione svrhe jer su linearne; međutim, postavlja se pitanje do koje granice. Odgovor na to pitanje daje kvadratni član razvoja u red relacija (8) i (9). S obzirom na mogućnosti integrisanog merila harmonika (IMH) da meri do 50 harmonika, usvojeno je da je  $i_{\max} = 50$ . Tada će važiti sledeće aproksimacije:

$$\frac{1}{\sqrt{M^2 + i^2}} \approx \frac{1}{M} \text{ za amplitudu,} \quad (12)$$

odnosno:

$$\operatorname{tg} \frac{i}{M} \approx \frac{i}{M}, \text{ za fazni ugao.} \quad (13)$$

Relacija (12) može biti napisana kao:

$$\frac{1}{M} \left( 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{i^2}{M^2} \right) \approx \frac{1}{M}, \quad (14)$$

pa je relativna greška pretpostavke zbog nelinearnosti:

$$\Gamma_N = \frac{i^2}{2M^2} \leq \frac{i_{\max}^2}{2M^2} = 0,0000022, \quad (15)$$

tj. nije veća od 2,2 ppm.

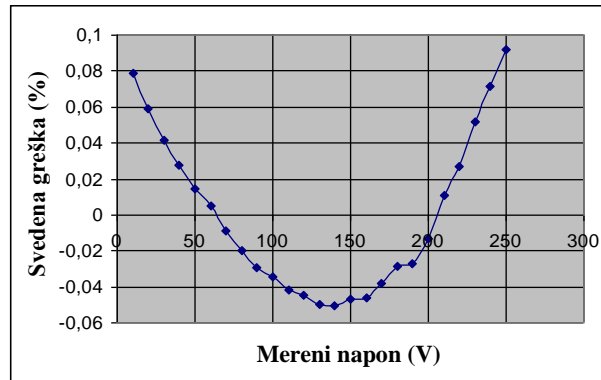
Relacija (13) može biti napisana kao:

$$\frac{i}{M} \cdot \left( 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{i^2}{M^2} \right) \approx \frac{i}{M} \quad (16)$$

te je relativna greška pretpostavke zbog nelinearnosti za fazni ugao:

$$\Gamma_N = \frac{i^2}{3M^2} \leq \frac{i_{\max}^2}{3M^2} = 0,0000015 \quad (17)$$

tj. nije veća od 1,5 ppm. Na slici 4 su prikazani rezultati validacije prototipa.



Slika 4 - Rezultati overe prototipa NMT bez magnetnog jezgra

Rezultati merenja su pokazali da je, u uslovima nesinusoidalnog napona, moguće, po uzoru na prototip, koristiti novi NMT i na srednjem naponu.

Iako je mala vrednost sekundarnog napona, što zahteva pojačanje, ona ima i prednost da se kod integrisane mikroprocesorske zaštite lakše uklapa u njena merna naponska kola, pogotovo što je odziv sekundarnog napona trenutna.

Novo merilo omogućava merenje složenoperiodičnog napona većeg od 0,42 kV, bez uticaja viših harmonika na tačnost merenja, što ga preporučuje za merenja koja se koriste za ocenu kvaliteta napona u distributivnoj mreži.

## REALIZOVANI NOVI NMT BEZ MAGNETNOG JEZGRA

Na osnovu izrađenog prototipa, koji je potvrdio ispravno opredeljenje za konstrukciju i mernu metodu, realizovan je novi NMT bez magnetnog jezgra za napon 20 kV, koji za predotpor ima 12 MΩ, a primar i sekundar su izvedeni sa po 15000 navojaka namotanih žicom Ø 0,16 mm [21].

Novi NMT daje mogućnost merenja u širokom frekventnom opsegu i galvanskog odvajanja, pa može biti korišćen za merenje naponskih harmonika u sredjenaponskim mrežama (do 35 kV), a lako se može prilagoditi za različite naponske nivoe promenom ulaznog otpornika.

Jasno je da je izlazni (sekundarni) napon srazmeran prvom izvodu ulaznog (primarnog) jer je otpornost visokonaponskog otpornika 12 MΩ, transformator je bez jezgra, pa je impedansa primara upravo 12 MΩ i to aktivna, a sekundar je otvoren. Ovo rešenje omogućila je pojava novih preciznih visokonaponskih otpornika čija cena je postala vrlo prihvatljiva. Činjenica da je NMT bez jezgra (međusobna induktivnost) ima za posledicu visoku linearnost prenosne karakteristike, što je merenjem dokazano.

Konstrukcija uređaja onemogućava uticaj stranih magnetnih polja ili ih smanjuje na najmanju meru.

Pošto je osnovna namena spoljašnjeg oklopa da smanji ili onemogući uticaj spoljašnjih polja, na rezultate merenja, variran je položaj i blizina oklopa, sa ciljem da se dobije željena zaštita, a da se previše ne pokvare parametri transformatora. Na realizovanom NMT, oklop je stavljen u blizini primarnih navojaka, da bi se obezbedila maksimalna zaštita transformatora od stranih polja i dobre frekventne karakteristike.

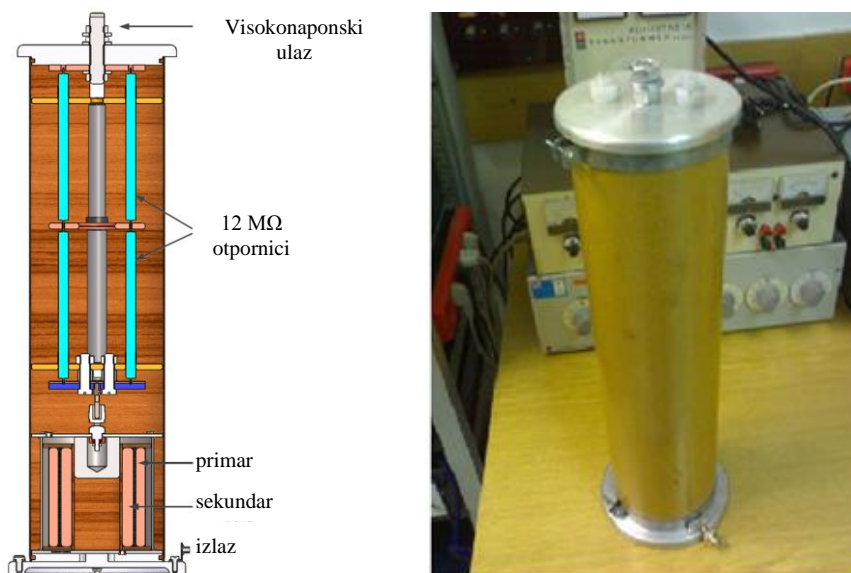
Ostali detalji u konstrukciji novog NMT dati su u radu [21].

Tokom izrade je uočeno da se ugljenoslojni otpornici različito zagrevaju, tako da se oni bliži visokonaponskom kraju mnogo više greju od onih bliže uzemljenju. Zaključak je bio da upotreba ugljenoslojnih otpornika ne dolazi u obzir, pogotovo što su posle (oko 40 minuta) pokazivali veliku nestabilnost mernog rezultata.

Umesto njih upotrebljeno je više preciznih visokonaponskih mernih otpornika u funkciji predotpora. Ovi otpornici su sa silikonskim premazom za temperaturu 225 °C. Ostale karakteristike su: 12 MΩ, 15,5 W na 70 °C. imaju tačnost 0,1 %, temperaturna stabilnost im je od 100 ppm/°C do 250 ppm/°C, a ostale karakteristike pokazuju dugoročnu stabilnost.

Postavljene su 2 grupe, vezane na red, od po dva visokonaponska paralelno vezana otpornika od 12 MΩ. Cilj je da se smanji pojedinačna struja kroz otpornike i obezbedi dugotrajan rad bez zagrevanja.

Ako se zna da je snaga otpornika 15,5 W po komadu, pod uslovom da temperatura ambijenta ne prelazi 70 °C, za jednu granu od dva otpornika dozvoljena snaga je 31 W, što je daleko veća vrednost od snage koja se očekuje tokom rada NMT bez jezgra. Izgled novog NMT bez magnetnog jezgra dat je na slici 5.



Slika 5 - Izgled novog NMT bez magnetnog jezgra

## MERENJA I KOMENTARI MERENJA NA NOVOM NMT BEZ MAGNETNOG JEZGRA

Prvo ispitivanje je izvršeno u akreditovanoj laboratoriji Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ u Beogradu [22]. Kada su ustanovljene mogućnosti merila (tačnost, frekvencijski opseg, brzina odziva, kratkotrajna i dugotrajna stabilnost i drugo), izvršena su naponska merenja u laboratorijama proizvođača mernih transformatora ABS i akreditovanoj laboratoriji Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

Pre naponskih ispitivanja, a u svrhu potvrde merne mogućnosti NMT bez magnetnog jezgra, izvršeno je merenje parametara transformatora za oklopljene i neoklopljene induktivnosti. Cilj je bio da se istraži uticaj feromagnetnog oklopa na otpornosti, kapacitivnosti i induktivnosti, kao i male nelinearnosti koje oklop izaziva, pošto može biti posmatran kao spoljašnje jezgro transformatora [22].

**Merenja parametara transformatora** su izvršena za oba transformatora (oklopljeni i neoklopljeni) korišćenjem HIOKI 3511-50 LCR Hi testera [23], sa klasom tačnosti 0,15 %. Otpornosti i induktivnosti su merene (četvorožičnom vezom) sa uzemljenim krajevima unutrašnjeg i spoljašnjeg oklopa. Za merenja kapacitivnosti, uzemljenje je uklonjeno da bi se izvršila merenja kapacitivnosti između različitih tačaka transformatora (primar, sekundar, unutrašnji i spoljašnji oklop).

Rezultati merenja (otpornost, impedansa i induktivnost primara i sekundara, kapacitivnost između primara i sekundara, primara i uzemljenja i sekundara i uzemljenja) korišćenjem napona 1 V, na frekvenciji od 120 Hz i 1 kHz, su dati u tabeli 1.

Kapacitivnosti u tabeli su date kao suma delimičnih kapacitivnosti. Tako je kapacitivnost između primara i uzemljenja kod oklopljenog transformatora data kao suma između unutrašnjeg namotaja i oklopa i oklopa i uzemljenja. Uzemljeni oklop ima značajan uticaj na parametre oklopljenog transformatora, zbog skin efekta i efekta blizine [24,25 i 26], što je jasno vidljivo iz rezultata merenja za oba transformatora. Feromagnetni oklop je postavljen u neposrednoj blizini spoljašnjeg namotaja (primara) da bi se odredio maksimalan uticaj na električne parametre. U daljim istraživanjima, položaj oklopa će biti menjan radi balansiranja zaštite od spoljašnjih polja i uticaja na parametre.



Tabela 1: Električni parametri za oklopljeni i neoklopljeni novi NMT mereni LRC mostom

|  |           | 120 Hz          |                 | 1 kHz           |                  |
|--|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
|  |           | Neoklopljen     | Oklopljen       | Neoklopljen     | Oklopljen        |
| Primarni namotaj                                       | $R_p$     | 3,03 k $\Omega$ | 3,65 k $\Omega$ | 6,06 k $\Omega$ | 21,65 k $\Omega$ |
|  | $Z_p$     | 7,3 k $\Omega$  | 8,43 k $\Omega$ | 74,7 k $\Omega$ | 71,43 k $\Omega$ |
|  | $L_p$     | 8,8 H           | 10,1 H          | 11,86 H         | 10,84 H          |
| Sekundarni namotaj                                     | $R_s$     | 2,04 k $\Omega$ | 2,21 k $\Omega$ | 2,97 k $\Omega$ | 7,36 k $\Omega$  |
|  | $Z_s$     | 4,02 k $\Omega$ | 4,38 k $\Omega$ | 35,9 k $\Omega$ | 35,57 k $\Omega$ |
|  | $L_s$     | 4,54 H          | 5,01 H          | 5,69 H          | 5,54 H           |
| Kapacitivnost (p-primarni, s-sekundarni, g-uzemljenje) | $C_{p-g}$ | 212,6 pF        | 323,5 pF        | 210,1 pF        | 311,47 pF        |
|  | $C_{p-s}$ | 93,6 pF         | 101,5 pF        | 89,4 pF         | 95,63 pF         |
|  | $C_{s-g}$ | 131,3 pF        | 206,3 pF        | 125,4 pF        | 196,21 pF        |

U tabeli 1 specificirani su parametri koji se na mereni objekat priključuju četvorožično sa odgovarajućim koaksijalnim provodnicima.

Ispitivani transformator je bio uzemljen, jer su jedan kraj primarnog i jedan kraj sekundarnog namotaja na potencijalu zemlje, što se i jasno vidi na slici 3.

### Komentari

Promene merenih otpornosti, induktivnosti i kapacitivnosti namotaja ispitivanog transformatora sa frekvencijom su normalne i povezane su sa činjenicom da realni otpornik, induktivitet i kondenzator uvek sadrže sve ove merene parametre, pa je uticaj učestanosti očekivan. Normalno je da postavljanje magnetnog oklopa menja otpornost, induktivnost i kapacitivnost merenih namotaja [27]. Glavni uzrok su vrtložne struje u oklopu i konstruktivnim metalnim delovima namotaja, skin efekat u namotaju, kao i površina oklopa koja utiče na kapacitivnost namotaja.

Po definiciji, skin efekat je neravnomerna raspodela vektora gustine struje po poprečnom preseku provodnika ili neravnomerna raspodela vektora  $B$  po poprečnom preseku provodnog feromagnetskog jezgra. Izrazitost skin efekta raste sa  $\sqrt{f \cdot \mu_r}$ , kao i efekat blizine, a indukovane struje u oklopu rastu linearno sa frekvencijom i rastu linearno sa  $\mu$ . Te struje stvaraju ponovo površinski efekat u magnetskom materijalu, koji vrši uticaj unutar oklopa od magnetskog materijala. Dubina prodiranja  $\sqrt{2}/(\omega \cdot \mu \cdot \sigma)$  predstavlja merilo izrazitosti skin efekta, ali je za isti materijal dubina prodiranja, kao i izrazitost površinskog efekta proporcionalna sa  $1/\sqrt{f}$ . Bez obzira na to što je površinski efekat manje izrazit kada se radi o jednom (usamljenom) provodniku na dve frekvencije od kojih je jedna  $n$  puta veća od druge, otpornost usamljenog provodnika bila bi približno  $\sqrt{n}$  puta veća na  $n$  puta višoj frekvenciji (Beselova funkcija u odnosu na eksponencijalnu – porast otpornosti je manji nego što bi bio  $\sqrt{n}$ , gde je  $n$  zbog ovoga odnos frekvencija). Ovde imamo i efekat blizine zbog bliskih provodnika u namotaju, zbog blizine oklopa, kao i indukovano polje u oklopu koje stvaraju indukovane struje i takođe prave uticaj na impedansu i primara i sekundara. Zbog geometrije (oklop je sa spoljašnje strane primara, sekundar je unutar primara i dalje je od oklopa), uticaj oklopa je veći na primarni namotaj, što se vidi i iz rezultata merenja. Uočava se da su promene otpornosti od 20 % pri 50 Hz do 114 % pri 1 kHz. Slično se ponaša i induktivnost. Međutim, sa stanovišta greške merenja primarnog napona merodavne veličine su primarna struja i međuinduktivnost primarnog i sekundarnog namotaja, jer je sekundarni napon rezultat  $j \cdot \omega \cdot M \cdot I$ .

Može se dati i varijacija  $M$  sa učestanošću, ali to će biti predmet drugog istraživanja.

Varijacija otpornosti primarnog namotaja utiče na struju, ali je taj uticaj reda 0,1 % s obzirom na to da na red sa primarnim namotajem dolazi otpornost od 12 M $\Omega$ . Simulacioni model je obuhvatio i ovu otpornost i stabilnost  $M$  sa učestanošću.

Merenje parametara transformatora pokazuje da oklop povećava kapacitivnosti, što neznatno smanjuje maksimalnu radnu frekvenciju. Uticaj oklopa na otpornosti je zanemariv, s obzirom na vrlo veliku vrednost rednog otpornika u primarnoj strani. Uticaj spoljašnjeg oklopa na induktivnosti (posebno primarne) i međusobne induktivnosti ne menja osnovnu funkciju diferenciranja, a nelinearnosti mogu biti otklonjene u procesu kalibracije.

**Merenja primarnog i sekundarnog napona na NMT bez magnetnog jezgra**, u potpunosti prikazana u [27], su potvrdila da parazitne kapacitivnosti u delitelju ne utiču na greške transformacije, a amplitudna greška novog NMT

je 0,158 %. Ovakav rezultat ukazuje da se kod merenja napona novim NMT bez jezgra može postići širok merni opseg. Zato se predlaže da se ovakav transformator koristi u standardnoj distributivnoj mreži za napone: 6, 10, 20 i 35 kV.

Najveću amplitudu imaju najviši harmonici i obrnuto. Iz prethodnih merenja se može zaključiti da je samo pri sinusnom primarnom naponu merenje napona NMT bez jezgra linearno, tačno i pomereno je za fazni ugao nešto veći od  $\pi/2$ .

**Merenje faznog ugla, između primarnog i sekundarnog napona**, izvršeno je u laboratoriji za visoki napon Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla" korišćenjem digitalnog multimetra tip PMM1 čija je greška 0,01°, za mereni ugao oko 90° [28].

Tabela 2 – Fazni ugao između primarnog i sekundarnog napona

|                          |       |       |       |       |        |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Napon $U_1$ [kV]         | 2,056 | 4,064 | 6,001 | 8,096 | 10,020 |
| Fazni ugao $\varphi$ [°] | 92,45 | 92,53 | 92,56 | 92,56 | 92,57  |

**Komentari i teoretska provera faznog ugla** Provera je izvršena simulacionim putem koristeći softverski alat koji služi za analizu električnih kola (jedna verzija LT Spice) [29].

Unošenjem podataka i analizom u LT Spice, putem zamenske šeme, prikazane u [29] uočava se da kapacitivnost primara i sekundara nemaju skoro nikakav uticaj na fazni stav. Proračunom je dobijen fazni stav 91,82°. Promenom kapacitivnosti primar-sekondar direktno se utiče na fazni stav koji može teoretski da se smanji i ispod 90 stepeni. Izvršena je simulacija njegove promene tako da je za svaku sledeću simulaciju ona smanjivana približno pet puta.

Tabela 3 - Zavisnost faznog ugla od simulirane kapacitivnosti između primara i sekundara

| Kapacitivnost između primara i sekundara | Fazni ugao $\varphi$ [°] |
|--|--------------------------|
| 69,5 nF                                  | 91,82                    |
| 10 nF                                    | 90,38                    |
| 2 nF                                     | 90,06                    |
| 0,4 nF                                   | 90,00                    |
| 0,08 nF                                  | 89,99                    |
| 0,0016 nF                                | 89,98                    |
| 0,0003 nF                                | 89,98                    |

Koliko se stvarno ova kapacitivnost može smanjiti, saznaće se iz budućih istraživanja u ovoj oblasti.

**Proračun kapacitivnosti novog NMT bez jezgra** je izvršen na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za teorijsku elektrotehniku, uz korišćenje odgovarajućeg sopstvenog softvera.

Svrha proračuna je bila da se na osnovu geometrije novog NMT bez jezgra i vrste materijala izračunaju vrednosti kapacitivnosti koje je moguće ovom metodom izračunati.

U cilju određivanja kapacitivnosti između pojedinih delova NMT, napravljen je njegov elektrostatički model.

Proračuni električnog polja, odnosno potencijala, su izvedeni u softveru COMSOL, baziranom na metodi konačnih elemenata. Modelovanje transformatora je dizajnirano u 2D osno-simetričnom AC/DC elektrostatičkom predefinisanim modelu u nekoliko osnovnih etapa. Prva se odnosi na kreiranje geometrije (Geometry Modeling), zatim definisanje električnih parametara poddomena (Subdomain Settings; Conductivity and permittivity) kao i definisanje graničnih uslova (Boundary Conditions: Symmetry/Zero Charge, Ground, Port). Sledeća faza u nizu je generisanje mreže konačnih elemenata (Mesh Analysis), potom sledi nalaženje rešenja (Solve Problem) i poslednja faza je prikaz rezultata proračuna tabelarno ili grafički i određivanje kapacitivnosti (Postprocessing).

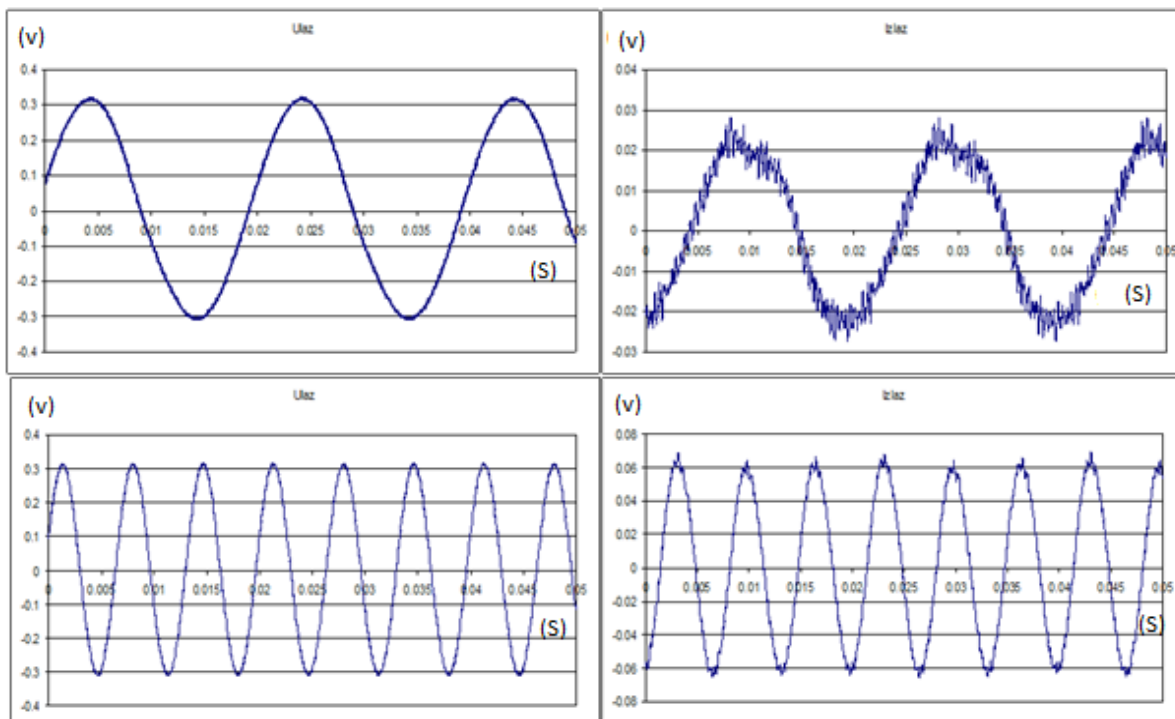
Tabela 4 - Proračun kapacitivnosti za oklopljene namotaje primara i sekundara

| Kapacitivnost       | Proračuni (pF) | Merenja (pF) |
|---------------------|----------------|--------------|
| C primar-sekondar   | 98,0           | 101,5        |
| C primar-ekran Cu   | 246,0          | 222,0        |
| C sekundar-ekran Cu | 155,0          | 139,5        |
| C sekundar-oklop    | 99,0           | 66,8         |
| C primar-oklop      | 131,0          | 101,5        |

Na rezultate značajno utiču dimenzije slojeva izolacije između primara i sekundara.

Na osnovu navedenih proračuna vidi se da su električne karakteristike NMT bez jezgra dobro izmerene.

**Merenje talasnog oblika sekundarnog napona za razne talasne oblike primarnog napona** NMT bez jezgra vršeno je u Laboratoriji za metrologiju FTN generisanjem raznih talasnih oblika napona. Cilj ovog oglada je utvrđivanje da li se NMT bez jezgra ponaša u skladu sa teoretskim pretpostavkama na bazi kojih je i konstruisan.



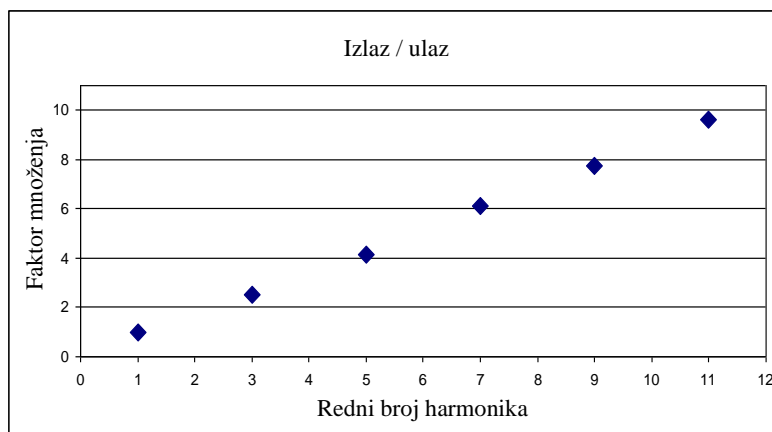
Slika 6 – Zavisnost amplitude sekundara od frekvencije primara

Ako se analizira talasni oblik primarnog napona može se uočiti da je sekundarni oblik napona u stvari izvod primarne struje, a pošto je otpornost primarnog namotaja dominantna, približno i izvod primarnog napona. Zato je sekundarni oblik napona najpribližniji  $\cos(\omega t)$ .

Takođe, može se uočiti, zbog diskretizacije po vremenu naponskog izvora, za vreme jedne periode, na primarnoj strani (256 vrednosti), da su te vrednosti praćene i na talasnom obliku sekundarnog napona.

**Ponašanje NMT bez jezgra za trougaoni talasni oblik primarnog napona.** Za trougaoni talasni oblik primarnog napona sprovedemo harmonijsku analizu ulaznog i izlaznog talasnog oblika, a nakon toga ćemo uporediti količnik između amplitude  $n$ -tog harmonika na sekundaru, odnosno izlazu prema amplitudi  $n$ -tog harmonika na primaru, odnosno ulazu. Ovaj količnik bi trebalo da se poklapa sa rednim brojem harmonika  $n$ .

Da bismo sproveli harmonijsku analizu potrebno je, koristeći tabelarne rezultate merenja, na osnovu kojih su nacrtani talasni oblici primarnog i sekundarnog napona, za trougaoni talasni oblik odrediti Furijeovu transformaciju. Od svih rezultata, za ovaj talasni oblik, sa već ranije snimljenog talasnog oblika na ulazu i izlazu, prikazana je samo jedna perioda.



Slika 7 – Faktor množenja izlaznog napona sa neparnim harmonicima

Nakon sprovedene analize ulaznog i izlaznog talasnog oblika, razvijanja u Furijev red, određeno je da amplitude prvih 11 harmonika budu reprezentivni signala, jer su oni bili dominantni.

Kao što je u prethodnom tekstu već rečeno, NMT bez jezgra je tako konstruisan i teoretski se od njega očekuje da diferencira ulaznu struju, a kako je velika otpornost u primarnom namotaju, i primarni napon. To znači da je za  $n$ -ti harmonik amplituda sekundarnog napona umnožena  $n$  puta. Na grafiku se uočava takav trend, što potvrđuje teoretska razmatranja o načinu rada NMT bez jezgra.

Sve prethodne analize su potvrdile bezopasnost upotrebe i tačnost merenja napona na srednjenaponskoj mreži i ukazale na pogodnost metode za merenje kvaliteta električne energije.

Nakon ovih ispitivanja potvrđeno je da je prototip novog NMT bez magnetnog jezgra funkcionalan i da su teorijska i praktična iskustva dala upotrebljiv proizvod za merenje napona u nesinusoidalnoj mreži [30].

## ZAKLJUČAK

Rezultati istraživanja su više praktičnog nego teorijskog značaja.

Istraživanja su ukazala na jednu od mogućih mernih metoda za merenje napona u složenoperiodičnom režimu, na srednjenaponskoj mreži.

Elektroprivredi je omogućeno praćenje realnog kvaliteta električne energije, po standardu EN 50160.

Dominantna linearnost zavisnosti sekundarnog od primarnog napona omogućava univerzalnost i tipizaciju primene ovog uređaja u elektrodistributivnim mrežama do 35 kV, klase tačnosti bolje od 0,2 % i treba raditi na izradi uređaja većih klasa tačnosti.

Transformator se lako može prilagoditi za različite naponske nivoe promenom ulaznog otpornika.

Nivo izlaznog napona je kompatibilan sa elektronskim instrumentima, posebno sa novom klasom instrumenata baziranih na stohastičkoj AD konverziji koji imaju ulaze prilagođene i za linearne i za diferencirajuće davače.

Korišćen sa takvim instrumentima, koji su kompatibilni sa linearnim ali i sa diferencirajućim pretvaračima, integrator može biti izostavljen i fazni ugao, koji je neizbežan kod integratora, može biti kontrolisan ili čak eliminisan, pa ovakav transformator može biti korišćen u merenju aktivne i reaktivne energije.

Novi NMT predstavljen u ovom radu može biti korišćen i sa integratorom. Uz integrator na sekundaru novog NMT, standardnim RMS voltmetrom moglo bi se vršiti merenje efektivne vrednosti zaprljanih napona.

Korišćenjem IMH moguće je prevazići šum i mali napon na sekundaru (do 2 V), a fazni ugao između primarnog i sekundarnog napona (iznosi oko 92 ° i skoro je nepromenljiv) je lako korekcionim faktorima uzeti u obzir.

Ako se ima u vidu da je izrada ovakvog mernog pretvarača veoma jeftina i da ne zahteva skupe materijale, smanjuje značajno upotrebu strateškog materijala (bakar), a izbacuje takođe skupe feromagnetne materijale, očigledno je da ovaj uređaj zaslužuje ravnopravan tretman u merenju napona u nesinusoidalnoj mreži.

Dalje istraživanje će ići u pravcu realizacije NMT bez jezgra sa manjim uticajem promene frekvencije (preko 1,5 kHz) na promenu električnih karakteristika primarnog i sekundarnog namotaja i takvo projektovanje geometrije namotaja primara i sekundara da fazni ugao između primarnog i sekundarnog napona bude 90 °.

## LITERATURA

- [1] A. Thapar, T. K. Saha, Y. D. Zhao: "Investigation of power quality categorisation and simulating its impact on sensitive electronic equipment", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 6-10 June 2004. IEEE, Vol. 1, pp. 528-533., 2004.
- [2] I. Kovacova, D. Kovac: "Inductive Coupling of Power Converter's- EMC", *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 6, No. 2, 2009.
- [3] R. C. Sermon: "An overview of power quality standards and guidelines from the end-user's point-of-view", *Rural Electric Power Conference*, 8-10 May 2005. IEEE, pp.B1/1-B1/5, 2005.
- [4] A. Broshi: "Monitoring power quality beyond EN 50160 and IEC 61000-4-30", *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007)*, 9-11 October 2007. IEEE, pp. 1-6, 2007.
- [5] V. Kuhlmann, A. Sinton, M. Dewe, C. Arnold: "Effects of sampling rate and ADC width on the accuracy of amplitude and phase measurements in power-quality monitoring", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22 (2), pp. 758-764, 2007.

- [6] D. Agrez: "Estimation and Tracking of the Power Quality Disturbances in the Frequency Domain", *Meas. Sci. Rev.*, Vol. 10, No. 6, 2010.
- [7] J. Hribik, P. Fuchs, M. Hruškovic, R. Michálek, B. Lojko: "Digital Power and Energy Measurement", *Meas. Sci. Rev.*, Vol. 4, No. 3, 2004.
- [8] P. Petrović: "Frequency and Parameter Estimation of Multi-Sinusoidal Signal", *Meas. Sci. Rev.*, Vol. 12, No. 5, 2012.
- [9] IEEE Standard 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- [10] European standard EN 50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, *CENELEC TC 8X*, 2006.
- [11] D. Čomić: "Kvalitet isporučene električne energije kao zajednički interes Elektrodistribucije i potrošača", Cired-Juko Cired, Herceg Novi, septembar 2000.
- [12] W. Rogowski, W. Steinhaus: "Die Messung der Magnetischen Spannung", *Arch. Elektrotech.*, Vol. 1, No. 4, pp. 141-150, 1912.
- [13] D. A. Ward: "Measurement of current using Rogowski coils", *Instrumentation in the Electrical Supply Industry, IEEE Colloquium on (Proc.)*, pp. 1-3, 1993.
- [14] Ming Zhang, Kaicheng Li, Shunfan He, Jun Wang: "Design and Test of a New High-Current Electronic Current Transformer with a Rogowski Coil", *Metrol. Meas. Syst.*, Vol. XXI (2014), No. 1, pp. 121-132.
- [15] V. Pjevalica, V. Vujičić: "Measurement of Nonsinusoidal Electrical Power and Energy", *Electronics*, Vol. 5, No. 1-2, pp. 111-113, 2001.
- [16] V. Pjevalica, V. Vujičić: "Further Generalization of the Low-Frequency True-RMS Instrument", *IEEE Trans. on Instr. Meas.*, Vol. 59, No. 3, pp. 736-744, 2010.
- [17] D. Čomić, S. Milovančev and V. Vujičić: "A New Approach to Voltage Measurements in Power Systems", *9th Int. Conf., Electrical Power Quality and Utilization, Barcelona*, Oct. 2007.
- [18] B.M. Antić, Z.L. Mitrović and V.V. Vujičić: "A Method for Harmonic Measurement of Real Power Grid Signals with Frequency Drift using Instruments with Internally Generated Reference Frequency", *Meas. Sci. Rev.*, Vol. 12, No. 6, 2012.
- [19] V. Vujičić, M. Sokola, Z. Mitrović, B. Santrač, V. Vujičić: "Coreless current measurement transducer and instrument for distorted and noisy currents", *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009. EPE '09, 2009, pp 1-9.
- [20] B. Santrač, M. Sokola, Z. Mitrović, I. Župunski, V. Vujičić: "A Novel Method for Stochastic Measurement of Harmonics at Low Signal-to-Noise Ratio", *IEEE Trans. on Instr. Meas.*, Vol. 58, Issue: 10, 2009, pp 3434 - 3441.
- [21] D. Čomić, D. Pejić, Z. Mitrović, B. Antić, P. Sovilj: "Problematika merenja napona u sredjenaponskoj mreži sa složenoperiodičnim naponom", *CIREĐ 2016*. Vrnjačka Banja.
- [22] Z. Mitrović, D. Čomić, S. Milovančev, D. Pejić: *Coreless Transformer for Power Quality Measurement at Medium Voltage Level*, Tehnički vjesnik/Technical Gazette (Print: ISSN 1330-3651, Online: ISSN 1848-6339), **Vol. 23/No. 5**, october 2016.
- [23] [https://www.hioki.com/products/lcr\\_resistance\\_signal/lcr\\_resistance\\_meters/537](https://www.hioki.com/products/lcr_resistance_signal/lcr_resistance_meters/537).
- [24] P. L. Dowell: "Effects of Eddy Currents in Transformer Windings", *Proc. IEE*, Vol. 113, No. 8, pp. 1387-1394, Aug. 1966
- [25] K. O. Meara: "Proximity Losses in AC Magnetic Devices," *PCIM Magazine*, Dec. 1996.
- [26] Z. Mitrović: "A Phase Angle Standard", *Measurement Science and Technology* No. 15, pp. 559-564, 2004.
- [27] D. Herceg, M. Prša: "Air-core Transformer with Multilayer Cylindrical Shields", *Proc. of the 5th PSU-UNS Int. Conf. on Engineering and Technology ICET-2011*, Phuket, May 2-3, 2011, Prince of Songka University, Thailand, pp. 565-568.
- [28] Z. Mitrović, S. Milovančev, I. Zupunski: "A Precision Power Amplifier for Calibration Systems", *Measurement Science and Technology* Vol. 20, No. 6, 2009.
- [29] LT Spice: softverski alat za analizu električnih kola", u vlasništvu Fakulteta tehničkih nauka Novi Sad.
- [30] N. Katić: "Benefits of Smart Grid Solutions in Open Electricity Markets", *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 10, No. 2, 2013.