



## PRENESENI PRENAPONI U SEKUNDARNIM KRUGOVIMA MJERNIH TRANSFORMATORA

### SAŽETAK

U članku su dati kriteriji i metode određivanja prijenosnih karakteristika mjernih transformatora u slučajevima pojave brzih prenapona koji su prvenstveno uzrokovani uklapanjima i isklapanjima rastavljača u elektroenergetskim postrojenjima. Kriteriji i metode baziraju se na prijedlozima IEC normi koji su u razmatranju i odnose se na sve tipove mjernih transformatora. Također dani su rezultati eksperimentalnih istraživanja na tipovima onih transformatora koji se najčešće koriste u mreži Hrvatske elektroprivrede.

**Ključne riječi:** mjerni transformator, prijelazni prenapon, elektromagnetska kompatibilnost, prijelazna stanja

## TRANSIENT OVERVOLTAGES IN THE INSTRUMENT TRANSFORMERS SECONDARY CIRCUITS

### ABSTRACT

Criteria and methods of evolution instrument transformers transient characteristics in the case of appearance fast transient overvoltages, mainly caused by isolators switching operations, are described. Criteria and methods are based on the draft of IEC Standards that are under consideration and refer to the all types of instrument transformers. The results of the experimental research on the some types of instrument transformers mostly used in Croatian electrical network are given too.

**Key words:** measuring transformer, transient overvoltage, electromagnetic compatibility, transients

### 1. UVOD

Uklapanja i isklapanja u visokonaponskim mrežama vrlo često su povezana s pojavom veoma brzih prijelaznih prenapona. Preko kapaciteta glavne izolacije i rasipnih kapaciteta mjernih transformatora ti prenaponi prolaze i u sekundarne krugove mjernih transformatora. S obzirom da su na sekundarne namote mjernih transformatora galvanski vezani mjerni i zaštitni uređaji, ovi prenaponi ugrožavaju njihovu pogonsku sigurnost. U novijim izvedbama mjernih, zaštitnih i upravljačkih uređaja prevladavaju elektroničke komponente, koje su na prenaponske pojave znatno manje otporne od nekad uobičajnih elektromagnetskih uređaja, pa postoji opravdana bojazan da može doći do uništenja sekundarne opreme. Stoga se u okviru koncepta elektromagnetske kompatibilnosti u elektroenergetskim mrežama nastoje ti prenaponi ograničiti, a u okviru međunarodne normizacije propisati uvjete, metode i kriterije za provjerneru i

ispitivanje pojedinih komponenti sustava bilo da generiraju, prenose ili su samo podložne utjecajima brzih prijelaznih prenapona.

Od svih mogućih uzroka prenapona isklapanje, i uklapanje rastavljača je najnepovoljnije za primarnu i sekundarnu opremu koja se nalazi u njegovoj blizini.

Pri uklapanju rastavljača kontakt na kojem je narinut napon približava se kontaktu na kojem vlada beznaponsko stanje. Kada je razmak između kontakata takav da je prijeđena dielektrička čvrstoća okolnog medija, dolazi do preskoka između kontakata. Pošto rastavljač uklapa relativno sporo ovi preskoci, odnosno izboji prema zemlji, ponavljaju se mnogo puta ali sa smanjenim amplitudama napona i cijeli se proces odvija do konačnog spajanja kontakata. Najveći se prijelazni prenaponi događaju kod početnog preskoka.

Pri isklapanju rastavljača, preskoci se javljaju u samom početku otvaranja kontakata pri malim razmacima. Kako se razmak povećava, dolazi se do trenutka kada se luk gasi, a pripadni naboj ostaje na izoliranoj sekciji dalekovoda. Zadnji preskok koji se događa predstavlja najnepovoljniji slučaj, a uzrokuje ga dvostruka tjemena vrijednost izmjeničnog napona pri čemu je porast napona dvostruko veći nego kod uklapanja rastavljača.

Ako se ne poduzmu mjere za osiguranje elektromagnetske kompatibilnosti, u sekundarnim se krugovima elektroenergetskog postrojenja mogu pojaviti naponi čije amplitude dosežu i nekoliko kilovolti. Kako je već spomenuto da su mjerni transformatori zapravo glavni "transportni" sustavi za te prenapone potrebno je osigurati da ih mjerni transformator sam za sebe u dovoljnoj mjeri priguši. Stoga se u okviru Radne grupe 24 Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC) već duže vrijeme razmatra nacrt norme kojom bi se definirali zahtjevi, mjerne metode i kriteriji za mjerne transformatore glede elektromagnetske kompatibilnosti, odnosno njihovih svojstava pri prijenosu visokofrekventnih prijelaznih prenapona.

## 2. NACRT IEC NORME

Prema prvom prijedlogu Radne grupe 24 IEC, amandman [ 1 ] i [ 2 ] odnosi se na sve tipove mjernih transformatora (strujni, naponski i kombinirani) čiji je najviši napon opreme  $U_m \geq 72,5$  kV, a provjera zahtjeva predviđena je kao tipsko ispitivanje transformatora.

### 2.1 Zahtjevi na prenesene napone

Prenapon prenesen iz primarnog u sekundarne namote ne smije prijeći vrijednosti dane u Tablici I., a prema mjernim i ispitnim uvjetima danim u potpoglavlju 2.2.

Tablica I. - Značajke ispitnih i prenesenih prenapona

Tip impulsa	A	B
Tjemena vrijednost narinutog napona $U_p$	$1,6 \frac{\sqrt{2}U_m}{\sqrt{3}}$	$1,6 \frac{\sqrt{2}U_m}{\sqrt{3}}$
Oblik vala:		
Trajanje čela ( $T_1$ )	$0,25 \mu s \pm 20 \%$	5 do 10 ns
Trajanje hrbta ( $T_2$ )	$\geq 50 \mu s$	> 100 ns
Granična tjemena vrijednost prenesenog napona $U_s$	1,6 kV	1,6 kV

Zahtjevi impulsa tipa A primjenjuju se na mjerne transformatore u konvencionalnim postrojenjima, dok se zahtjevi impulsa tipa B primjenjuju na mjerne transformatore ugrađene u plinom izolirana i metalom oklopljena sklopna postrojenja. Nadalje, impuls tipa B ne primjenjuje se na kombinirane transformatore.

Radna grupa smatra da značajke valnih oblika ulaznih impulsa dovoljno reprezentativno predstavljaju naponske oscilacije koje se javljaju usljed sklopnih operacija u mreži. Također se smatra da

granična tjemena vrijednost prenesenog prenapona dana u Tablici I. i mjerena u skladu s postupkom opisanom u poglavlju 2.2 osigurava dovoljnu zaštitu elektroničkoj opremi spojenoj na sekundarne namote. Po potrebi, između proizvođača i naručitelja, je moguće dogovoriti i druge iznose graničnih tjemених vrijednosti prenesenih prenapona.

## 2.2 Mjerenje prenesenih napona

U prvom prijedlogu nacrtu norme predviđeno je da se niskonaponski impuls ( $U_1$ ) narine između jednog od primarnih priključaka i zemlje. Priključci sekundarnog namota namjenjeni da se uzemljuju u pogonu spajaju se s kućištem i uzemljuju.

Na priključke sekundarnog namota strujnih transformatora spajaju se neinduktivni otpornici čiji otpor odgovara nazivnom teretu, dok se kod naponskih transformatora priključuje otpor koji odgovara 25% nazivnog tereta s gornjom graničnom vrijednošću od 1000  $\Omega$ .

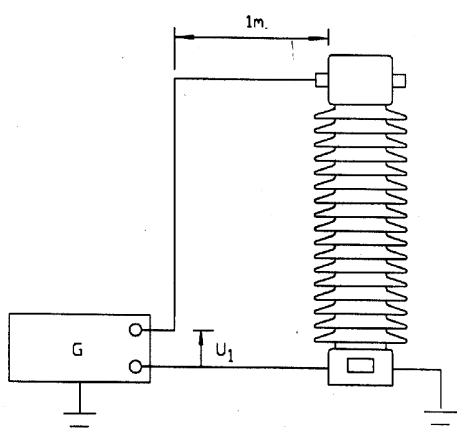
Dogovorom između proizvođača i naručitelja se preneseni napon i mogu mjeriti na zadanom teretu koji je na transformator spojen kabelom definiranih karakteristika i duljine.

Preneseni napon  $U_2$  mjeri se na priključcima tereta koristeći visokoimpedantni uređaj čija je širina pojasa jednaka ili veća od 100 MHz (osciloskop) i pomoću kojeg se mogu očitati tjemene vrijednosti napona. Ako transformator ima više sekundarnih namota, preneseni naponi se moraju izmjeriti na svakom namotu. Ako sekundarni namoti sadrže odcjepe, mjeri se samo na odcjepu koji obuhvaća cijeli namot. Na temelju izmjerenih vrijednosti prenapon prenesen u sekundarni namot računa se na sljedeći način:

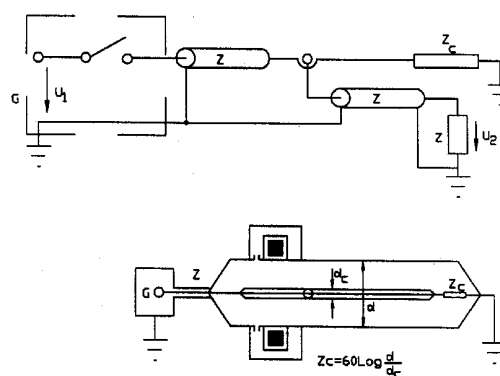
$$U_s = \frac{U_2}{U_1} * U_p$$

U drugom, za sada konačnom, nacrtu norme promjenio se mjerni postupak i to tako da se za mjerne transformatore namjenjene ugradbi u metalom oklopljena postrojenja niskonaponski impuls primjenjuje preko 50 omskog koaksijalnog kabela u skladu s mjernim rasporedom danim na slikama 2. i 4. Za transformatore namjenjene za ugradnju u klasična postrojenja mjerni raspored dan je na slikama 1. i 3. Glavna promjena u odnosu na prvi prijedlog norme je ta da se preneseni napon  $U_2$  mjeri bez posebnog opterećenja sekundarnih namota, a s pomoću 50 omskog koaksijalnog kabela koji se priključuje na osciloskop, čija je ulazna impedancija također 50  $\Omega$  i širina pojasa najmanje 100 MHz.

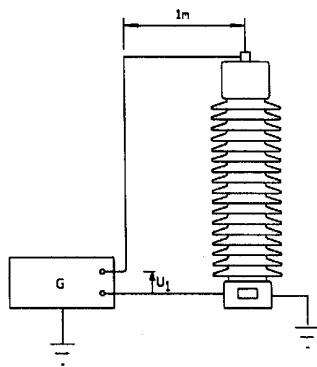
Karakteristični oblik vala s naznačenim parametrima dan je na slici 5.



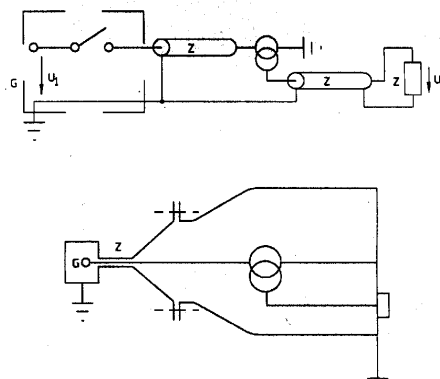
Slika 1. Strujni transformator - mjerni raspored za klasična postrojenja



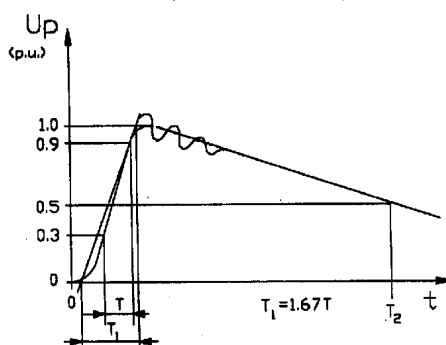
Slika 2. Strujni transformator - mjerni raspored za metalom oklopljena postrojenja



Slika 3. Naponski transformator - mjerni raspored za klasična postrojenja



Slika 4. Naponski transformator - mjerni raspored za metalom oklopljena postrojenja



Slika 5. Karakteristični parametri ulaznog vala za ispitivanje mjernih transformatora brzim prenaponima

### 2.3 Komentar prijedloga normi

Kao što je već prije rečeno, zadovoljavanje predloženih tipskih ispitivanja trebalo bi biti dovoljna zaštita elektroničke opreme priključene na sekundarne namote mjernih transformatora. Kriteriji dani u Tablici I. ne definiraju ništa drugo nego dozvoljene prijenosne omjere mjernih transformatora kada se na njih narine napon čiji je valni oblik također definiran u istoj tablici, a primjenjuje se mjerni postupak opisan u poglavlju 2.2. Shodno ovim zahtjevima mogu se definirati najmanji prijenosni omjeri u ovisnosti o najvišem naponu opreme  $U_m$  ( Tablica II. ).

Tablica II. - Najmanji dozvoljeni prijenosni omjer transformatora za ispitivanje prenesenih prenapona

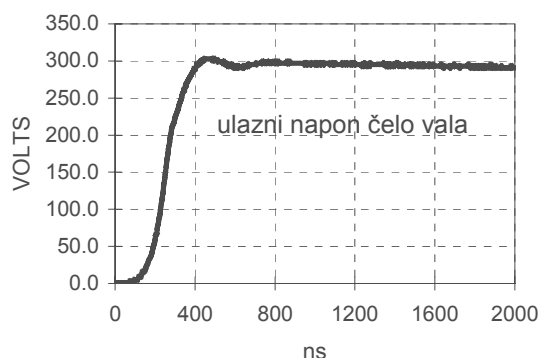
Najviši napon opreme $U_m$ ( kV )	123	245	420
Najmanji prijenosni omjer transformatora	100,43	200,04	342,93

Vidljivo je iz poglavlja 2.2 da se radna grupa IEC-a u fazi diskusije nacrta norme odlučila i na promjenu postupka mjerenja. Mišljena su eksperata da karakteristična impedancija zaštitnih i mjernih uređaja na visokim frekvencijama iznosi  $50 \Omega$ , te je na taj iznos prilagođena ulazna impedancija osciloskopa kojim se registriju preneseni prenaponi. Dodatno, prema konačnom prijedlogu na sekundarne namote transformatora ne priključuje se nikakav teret. S obzirom da je sekundarni namot transformatora ipak zatvoren ulaznom impedancijom osciloskopa i spojnim kabelom, mišljeno je autora da se preneseni naponi na sekundarnim namotima mjernih transformatora mogu znatno međusobno razlikovati u ovisnosti o primjenjenoj metodi ispitivanja.

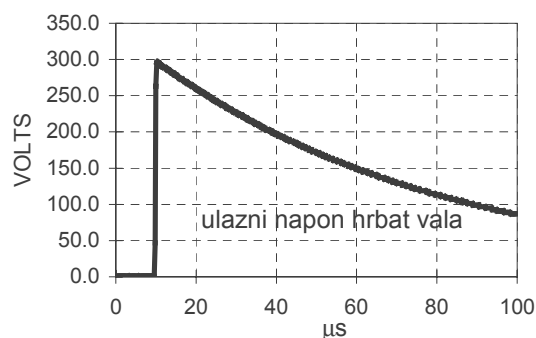
### 3. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Ekperimentalno istraživanje provedeno je na različitim tipovima mjernih transformatora iz proizvodnog asortimana poduzeća Končar - Mjerni transformatori. Za snimanje prenesenih prenapona korišten je Tektronix osciloskop tip TDS 540 s širinom pojasa od 500 MHz i mogućnošću izbora ulazne impedancije od 1 M $\Omega$  ili 50  $\Omega$ . Za generiranje ulaznih impulsa koristio se repeticijski generator Haefelly tip 481.

U skladu sa zadnjim prijedlogom IEC normi (otvoreni sekundarni namoti sa završnim otporom osciloskopa od 50  $\Omega$ ) istraživanje je provedeno u travnju 1999. godine. Tipični ulazni oblik vala dan je na slikama 6. i 7. Kao što se iz tih slika vidi, amplituda ulaznog napona je 300 V, trajanje čela vala iznosi 0,23  $\mu$ s dok je hrbat vala 50  $\mu$ s.

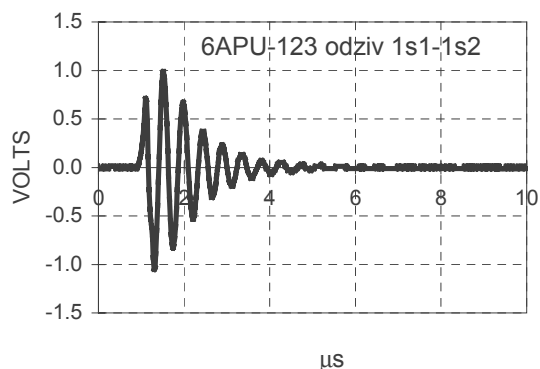


Slika 6. Ulazni napon - čelo vala

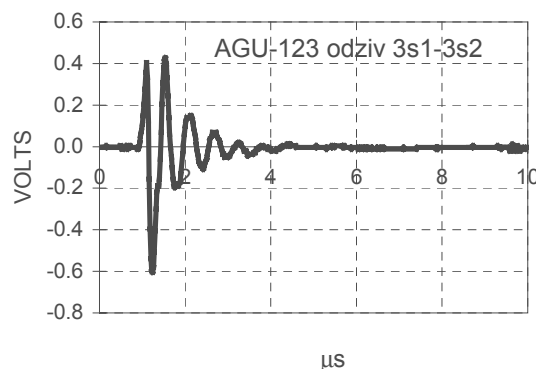


Slika 7. Ulazni napon - hrbat vala

Istraživanja su obuhvatila četiri tipa transformatora za najviši napon opreme 123 kV i to strujne transformatore 6APU - 123 i AGU -123, naponski transformator VPU-123 i kombinirani transformator VAU -123. Snimani su odzivi na gore navedenu pobudu na svim sekundarnim namotima, a na narednih pet slika dani su najnepovoljniji slučajevi (odabrana jezgra odnosno namot) odziva za svaki od navedenih transformatora.

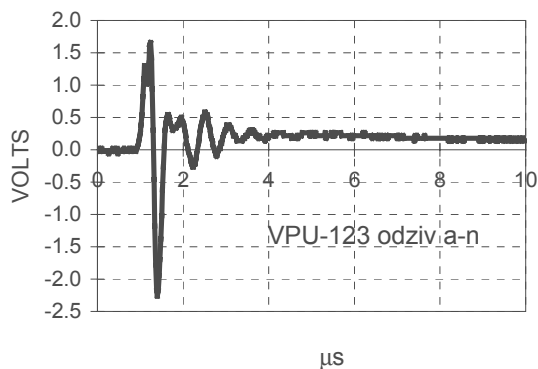


Slika 8. Odziv 1. jezgre transformatora 6APU-123

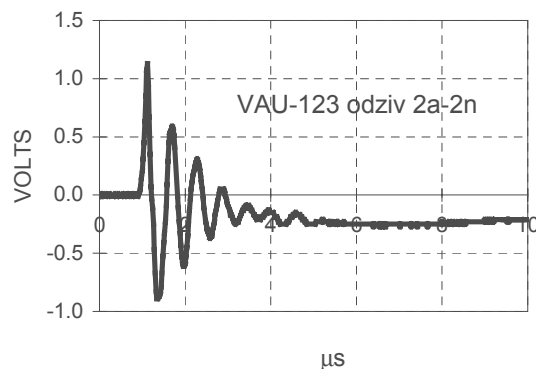


Slika 9. Odziv 3. jezgre transformatora AGU-123

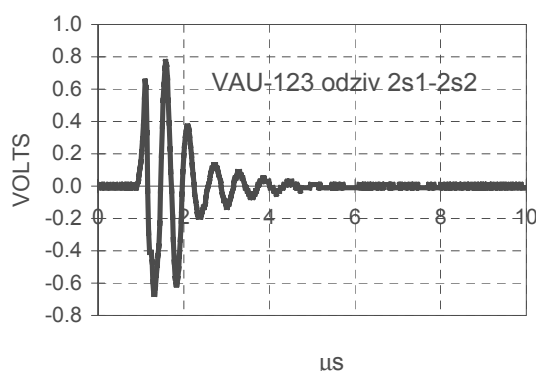
Iz oscilograma mjerenja evidentno je već na prvi pogled da kod strujnih transformatora cijeli prijelazni proces traje oko 3  $\mu$ s te da je osnovna frekvencija titranja oko 2 MHz. Kod naponskih transformatora u prve dvije  $\mu$ s dobiju se titraji otprilike sličnih frekvencija kao kod strujnih transformatora, a nakon tog vremena napon prenesen na sekundarni namot nekoliko puta je manji i končno se prigušuje nakon nekoliko desetaka  $\mu$ s (ovaj dio nije prikazan na oscilogramu).



Slika 10. Odziv 1. namota transformatora VPU-123



Slika 11. Odziv 2. namota transformatora VAU-123



Slika 12. Odziv 2. jezgre transformatora VAU-123

Za ocjenu kvalitete mjernih transformatora glede prenesenih prenapona bitna je amplituda pojave prenesene na sekundarnu stranu transformatora koja zajedno s amplitudom ulaznog vala određuje koji se maksimalni napon može javiti na transformatoru u pogonu. Rezultati analize dati su u Tablici III.

Tablica III. - Analiza ispitivanja prenesenih prenapona na mjernim transformatorima

Tip transformatora	Ispitni ulazni napon / V	Ispitni preneseni napon / V	Faktor prijenosa	Najviši napon u pogonu/ V
6 APU-123	300	1,05	285,7	562
AGU-123	300	0,60	500,0	321
VPU-123	300	2,26	132,7	1211
VAU-123 strujni dio	300	0,77	389,6	412
VAU-123 naponski dio	300	1,13	265,5	605

Tijekom ispitivanja obavljena su i dodatna istraživanja s ciljem da se verificira i sama ispitna metoda. Poznato je da se pri ispitivanju strujnih transformatora napon narine na jedan od priključaka primarnog namota, dok prema slici 1., za transformatore u klasičnim postrojenjima, drugi priključak ostaje otvoren. S obzirom da je jedan od primarnih priključaka direktno spojen i na glavu transformatora, na koju je također spojena i visokonaponska elektroda glavne izolacije, postavljalo se pitanje da li rezultati mjerenja ovise o mjestu primjene ispitnog napona. Mjerenja na transformatoru AGU-123 pokazala su da oblik i amplituda prenesenih napona praktično ne ovisi o tome na koji od primarnih priključaka se narine ispitni napon.

Također je provedeno istraživanje linearnosti cijelog mjernog sustava u ovisnosti o amplitudi narinutog napona, pri čemu je mijenjan izlazni napon repeticijskog generatora od 100 do 500 V. Rezultati istraživanja pokazuju da je linearnost zadovoljavajuća u rasponu napona od 100 do 300 V. Na višim naponima preneseni naponi se kvalitativno neznatno mjenjaju, ali njihova amplituda je skoro dvostruko veća od one koja se očekuje u potpuno linearnom sustavu. Uzrok tome je pojava da pri višim naponima sam repeticijski generator u okolišu čela vala stvara dodatne oscilacije (slika 5.) koje onda bitno utječu na iznose prenesenih napona.

Ova pojava dovodi u pitanje i valjanost same ispitne metode. Naime oscilacije u okolišu čela vala rezultat su omjera induktiviteta, kapaciteta i prigušnih otpora samog generatona, ali i ostalih djelova mjernog kruga, a teže ih je izbjeći kod udarnih valova strmijeg čela što je baš slučaj pri ovom ispitivanju. Iako se oscilacije prema slici 5. smatraju normalnim njihova amplituda i frekvencija nije normirana, pa preneseni prenaponi pri nominalno istim parametrima trajanja čela i hrbta vala mogu biti bitno različiti u ovisnosti o tome koliko je oscilacija sadržano u narinutom naponu.

#### 4. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih istraživanja i ispitivanja na različitim tipovima Končarevih mjernih transformatora za najviši napon opreme 123 kV može se zaključiti da svi oni zadovoljavaju prijedlog IEC norme kojom se definiraju zahtjevi za ograničenje prenesenih prenapona u sekundarne krugove mjernih transformatora u sklopu elektromagnetske kompatibilnosti elektroenergetskih postrojenja. Konkretni rezultati pokazuju (Tablica III.) da su izmjerene vrijednosti znatno ispod dozvoljenih, te da se u sekundarne krugove strujnih transformatora prenose prenaponi manje amplitude nego kod naponskih transformatora. U dijelu članka koji opisuje prijedlog IEC norme razmatrane su dvije različite mjerne metode koje se razlikuju po načinu spajanja ispitne opreme na sekundarne namote mjernih transformatora. Iako članak opisuje samo rezultate istraživanja prema za sada konačnom prijedlogu IEC norme, treba istaći da su preneseni prenaponi pri ispitivanju u skladu s tim prijedlogom niži nego u slučaju kada se tražilo da na mjerne transformatore bude priključen nazivni teret, a ulazna impedancija registracijskog osciloskopa imala uobičajnu vrijednost od 1 M $\Omega$ .

Nadalje, istraživanja su pokazala da ponovljivost mjerenja dolazi u pitanje kada se pojavljuju oscilacije u okolišu čela vala. Normirani parametri vala (trajanje čela i hrbta) ne uzimaju u obzir amplitudu i frekvenciju tih oscilacija, pa preneseni naponi za nominalno iste parametre vala mogu imati različite oblike i amplitude. Dobra ponovljivost mjerenja u praktičnim slučajevima mogla bi se osigurati ograničavanjem amplitude oscilacija na neki prihvatljivi iznos, npr. do 3% tjemene vrijednosti amplitude ulaznog vala.

Svakako treba napomenuti da ova istraživanja predstavljaju prve pokušaje da se definiraju zahtjevi elektromagnetske kompatibilnosti na mjerne transformatore. U praksi pouzdanost mjernih, zaštitnih i upravljačkih uređaja koji se priključuju na mjerne transformatore ovisi i o ostalim elementima elektroenergetskog postrojenja i njihovom razmještaju u prostoru. Iz tog razloga, istraživanja i mjerenje prenesenih napona u samim postrojenjima dalo bi kompletniju sliku njihove elektromagnetske kompatibilnosti.

#### LITERATURA

- [1] Amendment to IEC Publ. 60044-1: Current transformers - Measurement of the transmission factor of high frequency transient overvoltages, Document 38/208/CD, 1998.
- [2] Amendment to IEC Publ. 60044-2: Voltage transformers - Measurement of the transmission factor of high frequency transient overvoltages, Document 38/209/CD, 1998.
- [3] H. Remde, H. Schwarz : Transient overvoltages in CT and VT secondary circuit in high-voltage substations; ABB Review 1/91; 29-34