

Bruno Jurišić  
KONČAR - Institut za elektrotehniku d.d.  
bjurisc@koncar-institut.hr

Tomislav Župan  
KONČAR - Institut za elektrotehniku d.d.  
tzupan@koncar-institut.hr

Božidar Filipović-Grčić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb  
bozidar.filipovic-grcic@fer.hr

Ljupko Teklić  
Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o.  
ljupko.teklic@hops.hr

## VISOKOFREKVENCIJSKI MODEL ENERGETSKOG TRANSFORMATORA TEMELJEN NA MJERENJIMA FREKVENCIJSKI OVISNE MATRICE ADMITANCIJA

### SAŽETAK

U svakodnevnom pogonu, energetske transformatori izloženi su sklopnim te atmosferskim prenaponima. Kod transformatora koji su izloženi takvim pojavama ugrađuju se uređaji za monitoring transformatora koji omogućavaju promatranje stanja transformatora u svakom trenutku. Podaci snimljeni tranzijent rekorderom (modul monitoring uređaja) otvaraju mogućnost procjene utjecaja jačine, oblika i učestalosti prenapona na stanje transformatora. Sustavi monitoringa primjenjivi su i na visokonaponske regulacijske prigušnice.

Podatke dobivene iz tranzijent rekordera moguće je koristiti i za napredne simulacije u programskim alatima za računanje prijelaznih pojava (EMTP). Time se može provjeriti utjecaj prenapona na transformator te njegove okolne komponente. Takve simulacije podrazumijevaju upotrebu naprednih visokofrekvencijskih modela transformatora. U ovom radu opisan je visokofrekvencijski model transformatora temeljen na mjerenjima frekvencijski ovisne matrice admitancija te je prikazan primjer obrade podataka dobivenih iz sustava za monitoring transformatora.

**Ključne riječi:** Transformator, modeliranje, frekvencijski odziv, prenaponi, monitoring

## HIGH FREQUENCY POWER TRANSFORMER MODEL BASED ON FREQUENCY DEPENDENT ADMITTANCE MATRIX MEASUREMENTS

### SUMMARY

During their operation, power transformers are stressed by switching and lightning overvoltages. Transformers that are extensively exposed to these stresses are usually equipped with transformer monitoring system which enables assessing the transformer's condition at any given time. Recorded data, taken from the transient recorder (a module of transformer monitoring system), can be used to evaluate the strength and frequency of overvoltage occurrence for a given transformer. These transformer monitoring systems can be applied to the shunt reactors as well.

Furthermore, it is possible to use these data for advanced simulations in a transient simulations software (EMTP-type) in order to check the influence of overvoltages on transformers and neighbouring components. High frequency transformer models have to be used for these simulations. In this paper, a transformer model based on frequency dependent admittance matrix measurements is described, as well as the example of transformer monitoring system data analysis.

**Keywords:** Transformer, modelling, frequency response, overvoltages, monitoring system

## 1. UVOD

Izolacijski sustavi energetskih transformatora izloženi su u pogonu dielektričkim naprezanjima uzrokovanim različitim vrstama prijelaznih pojava kao što su prenaponi ili rezonantne pojave. Prenaponi visokih frekvencija, poput sklopnih prenapona, atmosferskih prenapona i vrlo brzih prenapona, mogu izazvati kvarove na energetskim transformatorima, ali se mogu i prenositi s primarne na sekundarnu stranu te na taj način ugroziti ostalu visokonaponsku opremu koja se nalazi u blizini transformatora. Česte promjene topologije u prijenosnim elektroenergetskim mrežama s visokim udjelom obnovljivih izvora ili ugradnja kompenzacijskih uređaja (kao što su statički var kompenzatori, regulacijske prigušnice ili kondenzatorske baterije) uzrokuju promjene frekvencijskog odziva mreže. Zbog toga je uslijed pojave kvara ili sklopnih manipulacija prekidačima moguća pojava internih rezonantnih prenapona u namotu transformatora ili pojava rezonancije u određenom dijelu mreže. Ovakve pojave mogu uzrokovati kvarove energetskih transformatora i ostale visokonaponske opreme u rasklopnim postrojenjima.

Sustavima za monitoring transformatora s ugrađenim tranzijentnim rekorderom moguće je snimiti signale prenapona koji nastaju prilikom kvara ili sklopnih manipulacija u elektroenergetskim mrežama [1], [2]. Takav sustav opisan je u poglavlju 2 ovog rada, kao i obrada snimljenih signala za unos u računalne alate za simulaciju prijaznih pojava.

Kvarove energetskih transformatora moguće je prevenirati u pogonu ili u fazi projektiranja ukoliko se izvrše detaljne simulacije gore navedenih prijelaznih pojava. Zbog toga je potrebno izraditi i verificirati modele komponenata prijenosne mreže koji su primjenjivi u širokom frekvencijskom opsegu od nekoliko Hz do nekoliko stotina kHz ili više ukoliko se radi o atmosferskim prenaponima ili sklopnim prenaponima u SF<sub>6</sub> postrojenjima [3], [4]. U poglavlju 3 ovog rada prikazan je postupak za izradu modela energetskog transformatora koji opisuje elektromagnetsko ponašanje transformatora u širokom pojasu frekvencija. Takav postupak podrazumijeva određivanje elemenata frekvencijski ovisne matrice admitancija transformatora korištenjem standardnog uređaja za mjerenje frekvencijskog odziva (SFRA) [5], [6]. Model transformatora moguće je provjeriti usporedbom s rezultatima mjerenja prenesenih atmosferskih prenapona u vremenskoj domeni, kakve je moguće provesti u pogonu pomoću sustava za monitoring transformatora s ugrađenim tranzijentnim rekorderom. Poglavlje 4 je zaključak.

## 2. SUSTAV ZA MONITORING TRANFORMATORA

U ovom poglavlju opisan je sustav za monitoring transformatora koji sadrži mogućnost mjerenja prenapona na priključcima transformatora. Zatim su dani primjeri obrade naponskih signala snimljenih u slučaju atmosferskih prenapona. Takvi signali mogu se koristiti kao ulaz za programske alate za proračun prijelaznih pojava u elektroenergetskom sustavu.

### 2.1. Metoda mjerenja prenapona na priključcima transformatora

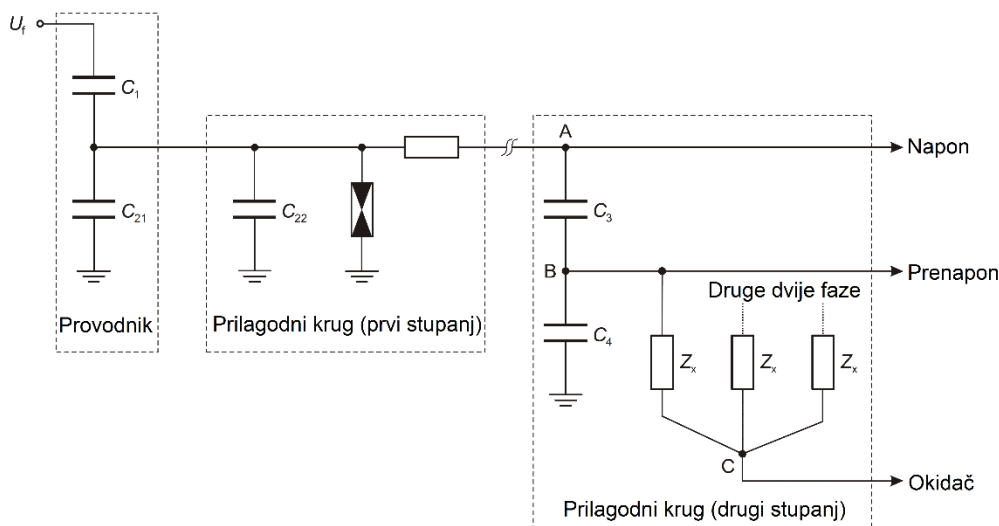
Dugogodišnje iskustvo u istraživanju, razvoju i terenskim dijagnostičkim ispitivanjima transformatora zajedno sa suvremenom industrijskom hardverskom platformom implementirano je u KONČAR TMS-u – suvremenom sustavu za monitoring i dijagnostiku energetskih transformatora. Jedan od modula TMS-a je sustav za snimanje prenapona na energetskom transformatoru. Sustav omogućuje snimanje valnih oblika napona i prenapona na mjernom priključku provodnog izolatora (slika 1 (a)). Sustav za snimanje prenapona povezan je s mjernim priključkom transformatorskog provodnika putem koaksijalnog kabela i specijalno dizajniranog prilagodnog kruga. Pri radu transformatora bez ugrađenog sustava za monitoring mjerni priključak je uzemljen, a koristi se samo kod periodičke kontrole izolacijskog sustava provodnika ( $C$ ,  $\tan\delta$ ). Isti se također koristi kod ispitivanja energetskog transformatora (mjerenje parcijalnih izbijanja, napona radio smetnji, ispitivanje sklopnim udarnim naponom, itd.). Za mjerenje se koristi kapacitivno naponsko dijelilo kojeg tvore kapacitet visokonaponskog provodnika i specijalno dimenzionirani niskonaponski kondenzatori koji se spajaju putem mjernog priključka i sastavni su dio kruga koji se koristi za prilagodbu mjernog signala za ulaz u sustav za akviziciju. Osim na energetskim transformatorima, sustav se može koristiti i za snimanje prenapona na kompenzacijskim prigušnicama, na kojima se javljaju strmi prenaponi uslijed rezanja struje i povratnog preskoka na kontaktima prekidača. Fotografija sustava TMS+ za snimanje prenapona na kompenzacijskoj prigušnici snage 100 MVAR u 110 kV postrojenju TS Ernestinovo prikazana je na slici 1 (b) [1], [2].

Jedan od osam ulaza koji se koriste za akviziciju prenapona koristi se kao okidač (triger) čija je osnovna funkcija odrediti vektorsku sumu napona sve tri faze. U normalnim pogonskim uvjetima taj zbroj jednak je nuli, a u slučaju pojave bilo kakve nesimetrije u sustavu (ne nužno prenapona) suma se razlikuje od nule i ako je dovoljno velikog iznosa, okida akviziciju.

Za razliku od prenapona koji se povremeno javljaju u sustavu i koje bilježi sustav, pogonski naponi se moraju kontinuirano mjeriti kako bi se mogle detektirati promjene u kapacitetu provodnog izolatora. Da bi se to postiglo, kontinuirano mjerenje napona provodi se s dodatnim analognim ulaznim modulom. Mjerni raspon modula za prenošenje prenapona je  $\pm 15$  V. Kako bi se raspon detekcije prenapona proširio na približno  $5 \cdot \hat{U}_{fn}$  (gdje je  $\hat{U}_{fn}$  vršna vrijednost nazivnog naponskog napona), potrebno je dimenzionirati kondenzatore odgovarajućeg kruga na način da je za nazivni napon amplituda signala koji ulazi u modul za prenošenje prenapona jednaka približno 3 V. Istovremeno, modul koji se koristi za kontinuirano uzorkovanje naponskog signala ima mjerni opseg  $\pm 60$  V. Kako bi se optimalno iskoristila oba mjerna područja odnosno vertikalna razlučivost oba akvizicijska modula, prilagodba signala obavljena je u dva koraka, kako je prikazano na slici 2.



Slika 1. (a) Mjerni priključak provodnog izolatora; (b) sustav Končar TMS+ za snimanje prenapona na kompenzacijskoj prigušnici snage 100 MVar u 110 kV postrojenju TS Ernestinovo.



Slika 2. Shema prilagodnog kruga.

U drugom stupnju prilagodnog kruga, nalazi se modul za trigeriranje akvizicije prenapona:

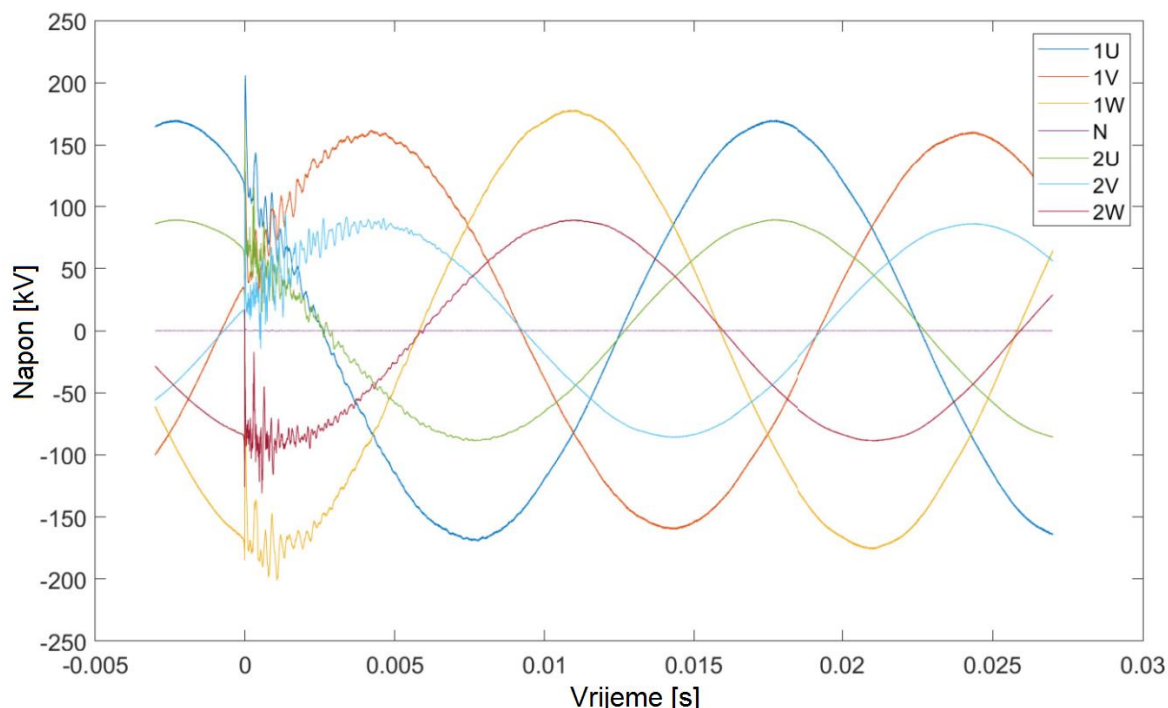
- Kapaciteti  $C_3$  i  $C_4$  odabrani su na način da je potencijal točke B otprilike 3 V kada je na provodniku nazivni napon  $\hat{U}_{fn}$ .
- Kapaciteti  $C_3$  i  $C_4$  ne smiju značajnije utjecati na potencijal točke A, tj. ukupni kapacitet serijskog spoja  $C_3$  i  $C_4$  mora biti zanemariv u usporedbi s kapacitetom  $C_2$  ( $C_2 = C_{21} + C_{22}$ ). Ulazna impedancija mjernog sustava za snimanje prenapona iznosi  $1 \text{ M}\Omega$  te ona ne utječe na promjenu potencijala točke A.
- Na frekvenciji 50 Hz impedancija kapaciteta  $C_4$  mora biti zanemariva u odnosu na ulaznu impedanciju mjernog sustava za snimanje prenapona ( $1 \text{ M}\Omega$ ).

Potencijal točke C koristi se za okidanje akvizicije prenapona. Ovaj potencijal iznosi 0 V kada su impedancije  $Z_x$  jednake i kada su mjereni naponi simetrični (nema naponske nesimetrije). U slučaju kada se pojavi naponska nesimetrija, kao npr. u slučaju pojave prenapona, potencijal točke C neće više iznositi 0 V. Na ovaj način će se uspješno okidati akvizicija prijelaznih pojava pri kojima amplituda prenapona nije nužno veća od amplitude nazivnog napona. Sustav je ugrađen na nekim energetske transformatorima i prigušnicama u prijenosnom sustavu HOPS-a, a do sada su snimljeni brojni oscilogrami prijelaznih pojava kao što su atmosferski prenaponi, sklopni prenaponi i privremeni prenaponi (npr. uslijed kratkog spoja na dalekovodu).

## 2.2. Snimljeni preneseni atmosferski prenaponi energetskog transformatora

Kao što je opisano u prethodnom paragrafu, sustav za monitoring transformatora pomoću kapacitivnog dijelila snima napone na provodnicima transformatora. To nam omogućava snimanje brzih prenapona [7] bez izobličenja naponskih signala (s obzirom da kapacitivno dijelilo ne mijenja signale koji sadrže komponente umjerenih frekvencija). Iako se u ovom radu ograničavamo samo na prenapone atmosferskog porijekla, ovakav sustav uspješno može mjeriti i pogonske napone, privremene prenapone te prenapone sporog porasta.

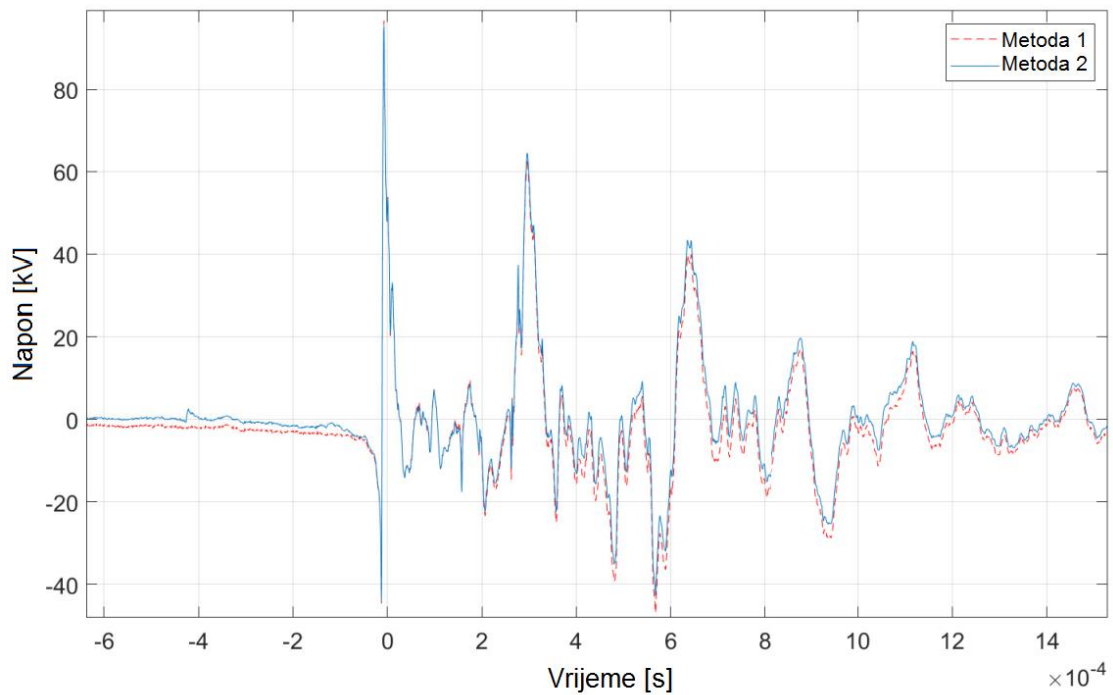
Primjer snimljenog signala, za slučaj prenapona atmosferskog porijekla, dan je na slici 3.



Slika 3. Snimljeni naponi u slučaju prenapona atmosferskog porijekla.

Ugrađena akvizicijska kartica dovoljno je brza za snimanje atmosferskih prenapona te njezina vremenska rezolucija iznosi  $0.5 \mu\text{s}$ , što odgovara maksimalnoj frekvenciji signala od 2 MHz. Atmosferski prenaponi najznačajniji dio energije sadrže u frekvencijskom spektru od nekoliko kHz do MHz. Broj snimljenih točaka po jednom događaju je 60000, čime se dobiva ukupno vrijeme snimanja od 30 ms (bilježenje signala počinje 0.3 ms prije nego prenapon počne).

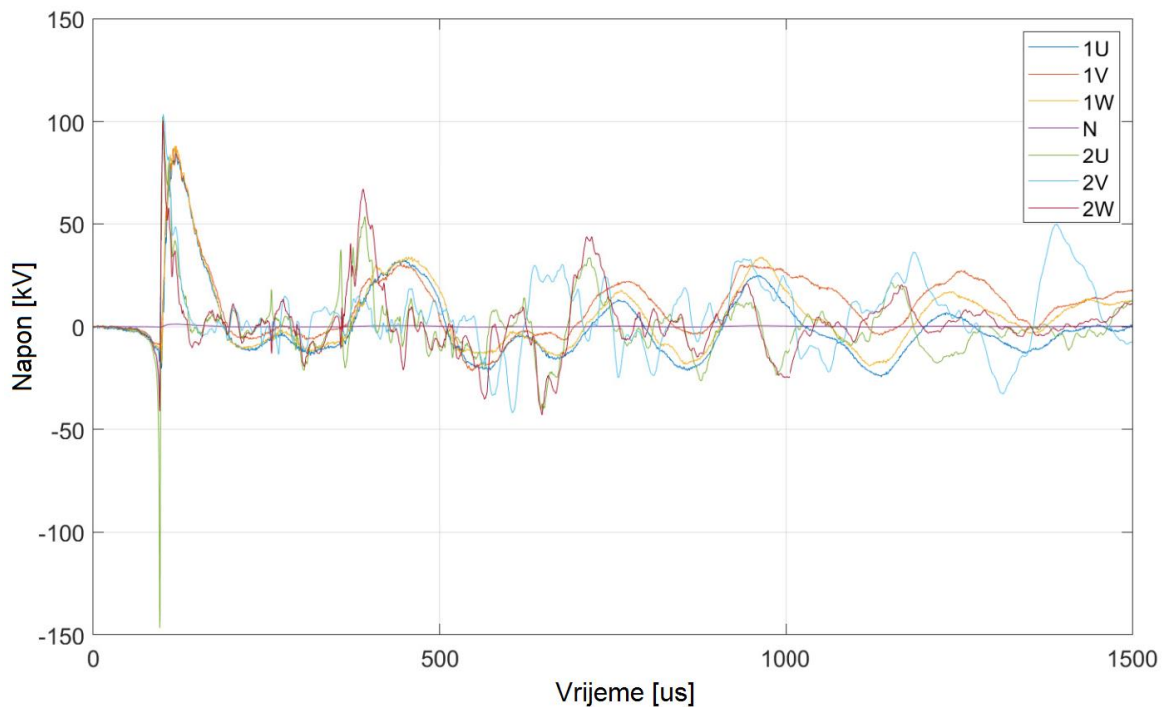
Za analizu događaja u EMTP alatima, ponekad je potrebno odvojiti signal prenapona od sinusnog napona frekvencije 50 Hz (neke verzije EMTP alata imaju ograničenja s obzirom na unos podataka). Za takvu obradu signala mogu se koristiti dvije metode: korištenje niskopropusnog FIR filtera kako bi se izdvojile komponente signala niskih frekvencija (do 1 kHz) te zatim oduzimanje takvog signala od originalnog (metoda 1) ili direktno korištenje visokopropusnog FIR filtera čime se izravno dobiva signal visokih frekvencija (iznad 1 kHz) spreman za unos u EMTP (metoda 2). Zbog ograničene duljine signala na 30 ms, samo filtriranje komponentne signala nazivne frekvencije (50 Hz) zahtijeva dodatnu obradu koja podrazumijeva skaliranje signala dobivenih filtriranjem tako da svi počinju od 0 V. Ovakve korekcije ne utječu na impulsne napone zbog njihovog kratkog trajanja u odnosu na signale od 50 Hz. Opisane metode za filtriranje signala uspoređene su na slici 4.



Slika 4. Usporedba metoda obrade snimljenih signala (ekstrakcija komponenata signala visokih frekvencija).

Kao što je prikazano na slici 4, obje metode obrade snimljenih signala dale su slične rezultate.

Primjer signala pripremljenih za unos u EMTP, za transformator sa 7 stezaljki, prikazane su na slici 5. Rezonancije koje su prisutne u signalima uzrokovane su refleksijama unutar rasklopnog postrojenja.



Slika 5. Naponski signali pripremljeni za unos u EMTP.

### 3. VISOKOFREKVENCIJSKI MODEL ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

U ovom poglavlju dan je kratak pregled visokofrekvencijskih modela transformatora, koji se mogu koristiti za simulaciju prijelaznih pojava u programskim alatima za proračun prijelaznih pojava u elektroenergetskom sustavu. Zatim je detaljno opisan model transformatora baziran na mjerenjima frekvencijskog odziva transformatora.

#### 3.1. Pregled naprednih modela transformatora

Napredni modeli transformatora potrebni su za simuliranje brzih i vrlo brzih prenapona u elektroenergetskom sustavu [8]. Zbog značajnog udjela visokih frekvencija u takvim prenaponima, nastaju rezonantne pojave unutar namota energetskog transformatora. Elektromagnetsko ponašanje transformatora na njegovim stezaljkama funkcija je tih rezonantnih pojava. Posljedično, tradicionalni modeli transformatora nisu dovoljno točni za simuliranje takvih pojava.

Visokofrekvencijski modeli transformatora mogu se podijeliti u tri skupine: modeli transformatora bijele kutije, modeli transformatora sive kutije te modeli transformatora crne kutije [9]. Modeli bijele kutije zahtijevaju detaljno znanje o geometriji transformatora te su kao takvi korišteni od strane proizvođača transformatora. Detaljni fizikalni ili modeli bijele kutije primjenjuju se za proračun raspodjele napona po transformatorskom namotu u slučaju brzih i vrlo brzih prenapona. Ovakvi modeli moraju biti detaljni jer prenaponi unutar transformatora, zbog refleksija između dijelova namota, postižu vrlo visoke frekvencije (i do par desetaka MHz). Parametri ovakvih modela su proračunati iz detaljne geometrije transformatora, koja je industrijska tajna pa takvi podaci često nisu dostupni elektroprivredama. Modeli crne kutije temelje se na matematičkoj aproksimaciji rezultata mjerenja frekvencijskog odziva transformatora te mogu biti konstruirani bez ikakvog dodatnog znanja o geometriji transformatora. Stoga takvi modeli mogu biti primijenjeni za proračun vanjskih prenapona, analizu interakcije između transformatora i ostatke elektroenergetske mreže te prilikom koordinacije izolacije. Modeli bijele kutije su usmjereni na primjenu za proračun standardnih testova dok su modeli crne kutije te modeli sive kutije usmjereni na primjenu za proračun prijelaznih pojava u elektroenergetskom sustavu. Zbog ograničenja modela crne kutije (koji zahtijevaju rezultate mjerenja koja nisu uvijek provediva ili dostupna) te modela bijele kutije (koji zahtijevaju detaljno znanje o geometriji transformatora), predstavljeni su i modeli sive kutije. Po svojoj složenosti te ulaznim parametrima takvi modeli se obično mogu svrstati između modela crne i bijele kutije. Takvi modeli imaju široku primjenu te je s njima moguće proračunati kako i raspodjelu prenapona po namotu transformatora tako i prenesene prenapone na vanjskim stezaljkama. Modeli sive kutije su fizikalni modeli koji postižu zadovoljavajuću točnost, a s parametrima dobivenim ili proračunatim iz podataka natpisne pločice, iz dostupnih podataka o geometriji transformatora te iz rezultata dostupnih mjerenja.

#### 3.2. Model transformatora temeljen na rezultatima SFRA mjerenja

Metoda mjerenja za konstruiranje modela transformatora crne kutije opisana je u ovom poglavlju. Takav model sastoji se od mjerene matrice admitancija ( $Y$ ), čiji su koeficijenti dobiveni iz frekvencijskog odziva transformatora te je opisan jednadžbama prostora stanja kako bi bio kompatibilan s programskim alatima za proračun prijelaznih pojava (EMTP) [10].

Frekvencijski odziv transformatora mjeri se komercijalnim analizatorom frekvencijskog odziva (SFRA) koji mjeri odnos ulaznog ( $V_{in}$ ) i izlaznog ( $V_{out}$ ) napona ( $H_{voltage}$ ) [5], [6]:

$$H_{voltage}(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} \quad (1)$$

Kako SFRA oprema nije namijenjena mjerenju  $Y$  matrice, izvedena je procedura za proračun takve matrice iz dostupnih mjerenja odnosa ulaznog i izlaznog napona. Ta procedura slijedi iz izraza:

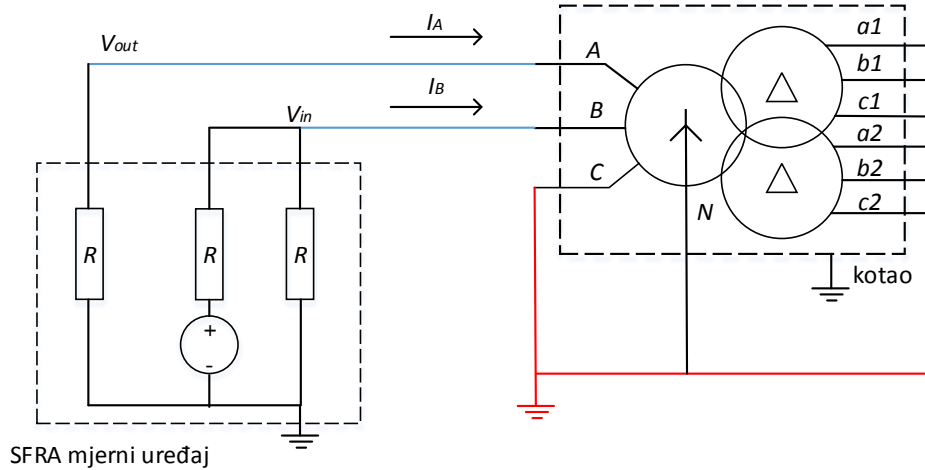
$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{N-1} \\ I_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & \cdots & Y_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{N-1} \\ V_N \end{pmatrix} \quad (2)$$

Izraz (2) je opći te vrijedi za transformator s  $N$  stezaljki.



### 3.2.1. Mjerenje van dijagonalnih elemenata

Mjerni krug za mjerenje van dijagonalnih elemenata matrice admitancija dan je na slici 6. Koaksijalni kabeli na slici su prikazani plavom bojom dok su bakrene trake prikazane crvenom bojom.



Slika 6. Mjerni krug za mjerenje van dijagonalnih elemenata matrice admitancije.

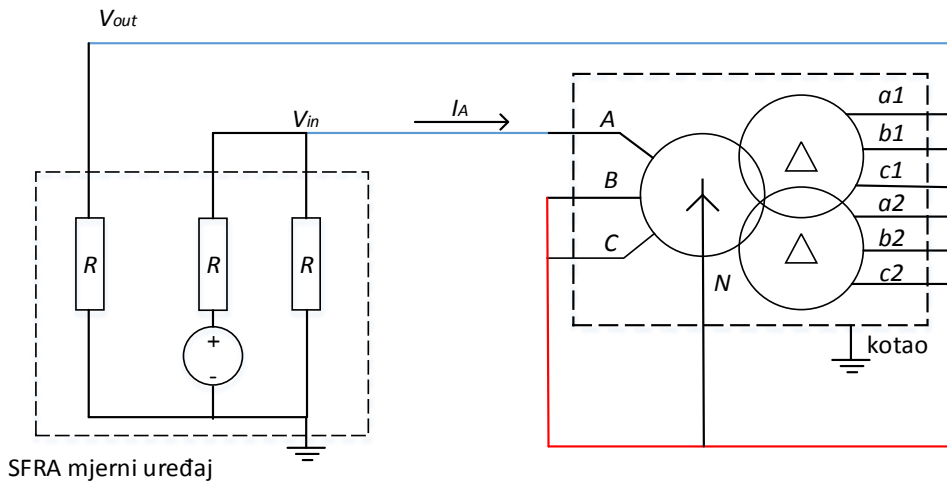
Kod standardne SFRA mjerne opreme, referentna stezaljka i stezaljka izvora dijele isti koaksijalni kabel, kao što je prikazano na slici 6. Unutarnji nepromjenjivi otpori R nalaze se u grani izvora, referentnoj grani te mjernoj grani SFRA uređaja. Njihov iznos je jednak valnoj impedanciji koaksijalnog kabela kako bi se eliminirale refleksije vala na njihovom spoju te time onemogućile smetnje koje mogu imati utjecaja na rezultate mjerenja. Posljedično, valna impedancija koaksijalnih kabela je zanemarena u nastavku, kao i utjecaj bakrenih traka (koje imaju zanemarivu impedanciju za područje frekvencija od interesa).

Na slici 6 prikazana su mjerenja  $Y_{12}$  koeficijenta matrice admitancija. Naponi stezaljki koje nisu spojene na mjerni uređaj iznose 0 V (ukoliko zanemarimo utjecaj bakrenih traka). Stoga iz jednadžbe (2) slijedi izraz za izračun van dijagonalnog elementa matrice admitancija:

$$Y_{ij}(s) = -\frac{V_i(s)}{V_j(s)} * \left( Y_{ii}(s) + \frac{1}{R} \right) \quad (3)$$

### 3.2.2. Mjerenje dijagonalnih elemenata

Kod mjerenja dijagonalnih elemenata matrice admitancije, unutarnji nepromjenjivi otpor SFRA uređaja koristimo kao mjerni otpor, na način da struju koja prolazi kroz njega mjerimo pomoću napona  $V_{out}$ .



Slika 7. Mjerni krug za mjerenje dijagonalnih elemenata matrice admitancije.

Sljedeći izraz za računanje dijagonalnih elementa matrice admitancija vrijedi za mjerni krug prikazan na slici 7:

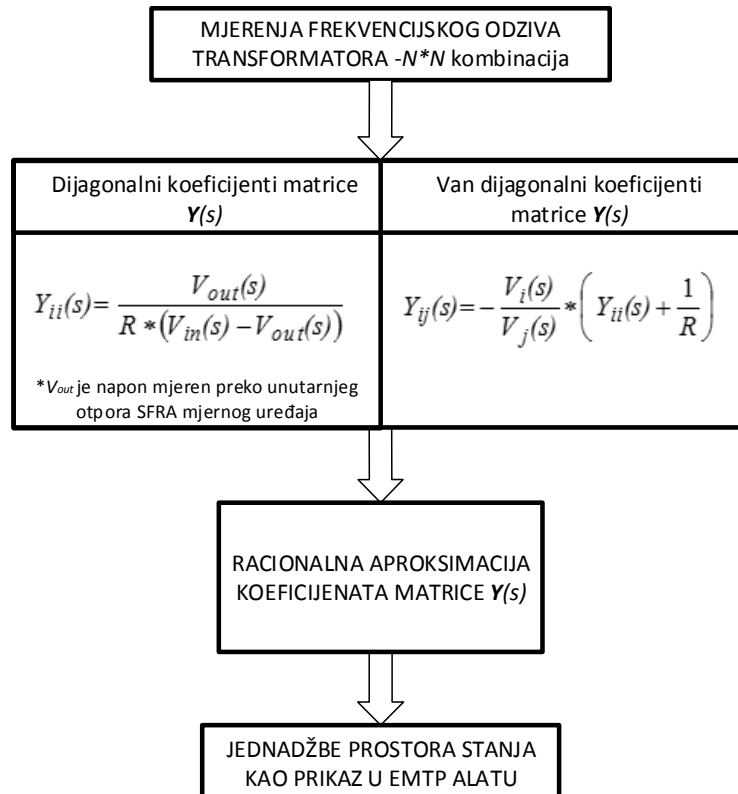
$$Y_{ii}(s) = \frac{I_i(s)}{(V_{in}(s) - V_{out}(s))} = \frac{V_{out}(s)}{R * (V_i(s) - V_{out}(s))} \quad (4)$$

Zbog povratne struje kroz uzemljivač, mjerenja dijagonalnih elemenata matrice admitancija mogu sadržavati sistemsku pogrešku. Kako bi se pogreška eliminirala, potrebno je koristiti nestandardnu SFRA mjernu opremu [6].

### 3.2.3. Implementacija modela u EMTP alatima

Kako bi model bio kompatibilan s EMTP alatima, potrebno je opisati rezultate mjerenja jednadžbama prostora stanja. To se može napraviti pomoću racionalne aproksimacije što podrazumijeva „vector fitting“ uz uvjet pasivnosti sustava [11]–[13]. Dobivene jednadžbe opisuju pasivni sustav (s obzirom da transformator ne proizvodi energiju).

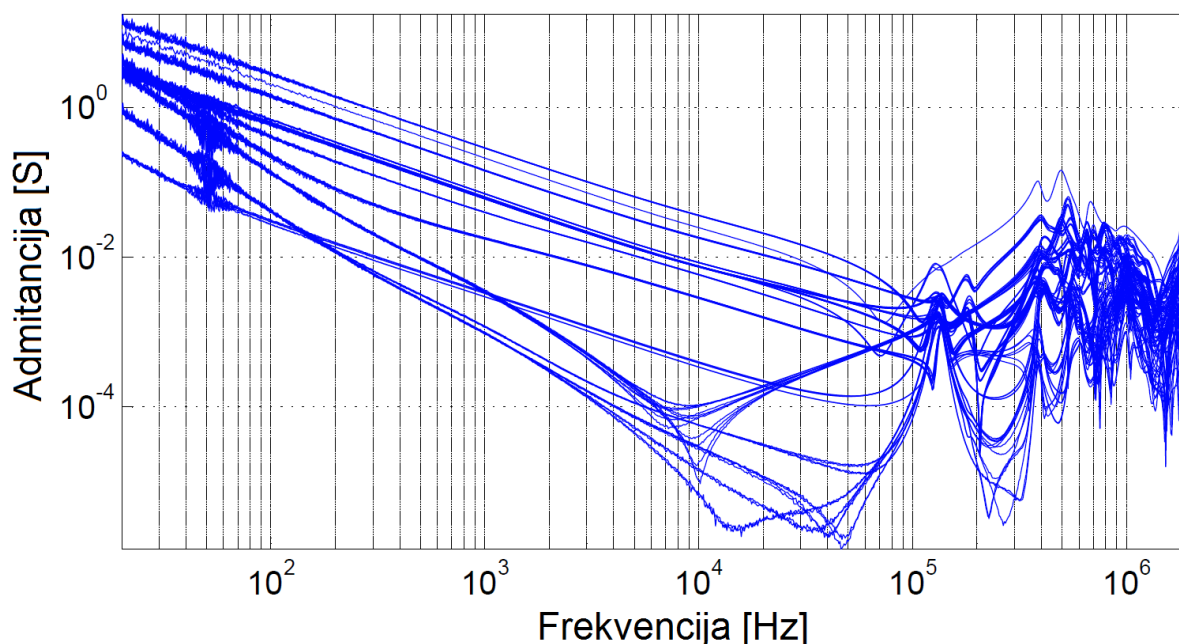
Na slici 8 je prikazana procedura za dobivanje modela transformatora crne kutije iz rezultata SFRA mjerenja.



Slika 8. Procedura za konstruiranje modela transformatora crne kutije.

Primjer rezultata mjerenja matrice admitancija energetskog transformatora prikazan je na slici 9. Iz odziva je vidljivo da se transformator ponaša nelinearno u odnosu na frekvenciju te da sadrži značajne rezonancije.





Slika 9. Koeficijenti matrice admitancije energetskog transformatora u odnosu na frekvenciju.

#### 4. ZAKLJUČAK

Energetski su transformatori u pogonu izloženi dielektričkim naprezanjima uzrokovanim sklopnim te atmosferskim prenaponima. Takvi prenaponi mogu se prenijeti preko transformatora te ugroziti elemente energetskog sustava koji se nalaze iza transformatora. Kako je izloženost prenaponima uobičajeno nepoznata, ugrađuju se sustavi za monitoring transformatora koji sadrže tranzijent rekorder čime je omogućeno praćenje prenapona koji mogu uzrokovati kvar i ubrzano starenje energetskih transformatora. Ovakvi uređaji za monitoring transformatora primjenjivi su i na visokonaponskim regulacijskim prigušnicama.

U ovom radu prikazan je primjer obrade podataka prenapona snimljenih u stvarnoj mreži pomoću tranzijent rekordera. Također je i opisan visokofrekvencijski model transformatora crne kutije koji se može koristiti za procjenu prenesenih prenapona energetskim transformatorom, što uz sustav monitoringa omogućuje simulaciju i provjeru rizičnih događaja u elektroenergetskom sustavu, uzrokovanih sklopnim te atmosferskim prenaponima. Za dodatnu analizu snimljenih signala potrebno je provesti detaljne simulacije u EMTP računalnim alatima kako bi se rezultati proračuna usporedili s rezultatima mjerenja.

#### ZAHVALA

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom 9299 „Razvoj naprednih visokonaponskih sustava primjenom novih informacijskih i komunikacijskih tehnologija“.

#### 5. LITERATURA

- [1] B. Filipović-Grčić, B. Franc, I. Uglešić, I. Pavić, S. Keitoue, I. Murat, and I. Ivanković, “Monitoring of transient overvoltages on the power transformers and shunt reactors – field experience in the Croatian power transmission system,” in 4th International Colloquium “Transformer Research and Asset Management,” 2017.
- [2] S. Keitoue, I. Murat, B. Filipović-Grčić, A. Župan, I. Damjanović, and I. Pavić, “Lightning caused overvoltages on power transformers recorded by on-line transient overvoltage monitoring system,” in SECOND SEERC CONFERENCE 2018: ENERGY TRANSITION AND INNOVATIONS IN ELECTRICITY SECTOR, 2018.
- [3] B. Jurišić, Methods for Calculations of High Frequency Transmitted Overvoltages Through a Power Transformer. 2016.

- [4] CIGRE WG A2/C4.39, Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power Systems. CIGRE, 2013.
- [5] B. Jurisic, I. Uglesic, A. Xemard, and F. Paladian, "Difficulties in High Frequency Transformer Modelling," *Electric Power Systems Research*, vol. 138, no. Special Issue: 11th International Conference on Power Systems Transients (IPST), pp. 25–32, 2016.
- [6] A. Holdyk, B. Gustavsen, I. Arana, J. Holboell, and S. Member, "Wideband Modeling of Power Transformers Using Commercial sFRA Equipment," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1–8, 2014.
- [7] International Electrotechnical Commission, IEC 60071-1 Insulation Co-ordination - Part 1: Definition, Principles and Rules. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 1993.
- [8] International Electrotechnical Commission, IEC 60071-4 Insulation Co-ordination - Part 4: Computational Guide to Insulation Co-ordination and Modelling of Electrical Networks. 2004.
- [9] CIGRE WG A2/C4.39, Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power Systems. 2013.
- [10] Z. Ye, "Noise Companion State-Space Passive Macromodeling for RF/mm-Wave Circuit Design," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 32, no. 9, pp. 1435–1439, 2013.
- [11] B. Jurisic, I. Uglesic, A. Xemard, and F. Paladian, "Difficulties in high frequency transformer modeling," *Electric Power Systems Research*, vol. 138, 2016.
- [12] B. Gustavsen, "Wide Band Modeling of Power Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 414–422, 2004.
- [13] Z. Ye, "Pmm: A Matlab Toolbox for Passive Macromodeling in RF/mm-Wave Circuit Design," in 2013 IEEE 10th International Conference on ASIC, 2013, pp. 1–4.