



Sandra Hutter
HEP ODS d.o.o.,
DP Elektra Zagreb
sandra.hutter@hep.hr

Michael Muhr
Institut für Hochspannungstechnik und
Systemmanagement, TU Graz
muhr@hspt.tu-graz.ac.at

PRIKAZ METODE ANALIZE FREKVENCIJSKOG ODZIVA TRANSFORMATORA I PRVA ISKUSTVA

SAŽETAK

Transformatori predstavljaju važan dio opreme u energetsom sustavu, te o njihovoj ispravnosti u visokoj mjeri ovisi i pouzdanost sustava, kvaliteta električne energije, te ekonomski troškovi odnosno cijena električne energije koju plaća krajnji korisnik. Metodu analize frekvencijskog odziva (ili skraćeno FRA) koristi danas veliki broj elektro kompanija i proizvođača i ubraja se u napredne dijagnostičke metode. Posebno je pogodna za otkrivanje pomaka namota u radijalnom ili aksijalnom smjeru i deformacije namota. Glavni problem predstavlja ocjena rezultata i promjena (pomaka) na FRA karakteristikama, kako bi se detektirali već nastali ili potencijalni kvarovi.

Ključne riječi: analiza frekvencijskog odziva (FRA), transformator, dijagnostička metoda, pomaci namota

OVERVIEW OF TRANSFORMER'S FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS METHOD AND FIRST EXPERIENCES

SUMMARY

Transformers represent important part of equipment in the utility grids and on their proper functioning depend in a high degree reliability of the system, power quality, economic costs and the price of the electrical energy that pays the customer. Frequency Response Analysis method (or abbreviation FRA) are nowadays widely used by the electric companies and producers and it represents an advanced diagnostic methods. It is especially useful for detection of the winding movements in the radial or axial direction or winding deformations. The main problem represents interpretation of the results and alternations (shifts) in the FRA characteristics, in order to detect already present failures or failure tendencies.

Key words: Frequency Response Analysis (FRA), transformer, diagnostic method, winding movement

1. UVOD

1.1. Dijagnostička metoda za utvrđivanje mehaničkih deformacija transformatora

Metoda analize frekventijskog odziva ili skraćeno FRA od *engl. Frequency Response Analysis* je dijagnostička metoda za utvrđivanje mehaničkih deformacija transformatora. Zadnjih godina ova metoda postaje sve popularnija, te se razvojem mjernog instrumentarija (analizatora mreža i različitih usko specijaliziranih instrumenata namijenjenih isključivo FRA mjerenjima) bitno pojednostavljuje.

Za otkrivanje mehaničkih deformacija transformatora razvijeno je pet osnovnih postupaka: mjerenja impedancije kratkog spoja, prijenosna funkcija, niskonaponski impulsni odziv (LVI), mjerenja istosmjernog otpora i FRA [1]. Ovi postupci su opisani u normi IEC 60076-5.

2. METODE

Ukoliko promatramo složeni model transformatora moguće ga je zamisliti kao mrežu induktiviteta, uzdužnih i poprečnih kapaciteta, te otpora. Njihove vrijednosti ovise o geometriji, te osobinama materijala. Ako dođe do promjene geometrije ili do promjene osobina materijala (uslijed procesa starenja) to će se odraziti i na promjeni frekventijskog odziva. Ove promjene (npr. promjena geometrije namota) mogu nastupiti uslijed kratkih spojeva u mreži, transporta ili ispitivanja.

Kratki spojevi u mreži uzrokuju visoke struje u namotima transformatora. Mehaničke sile koje pri tom nastaju mogu dovesti do deformacija ili pomicanja namota. Ove deformacije ne moraju uvijek nužno uzrokovati i ispad transformatora iz pogona, te u većini slučajeva ostaju neotkrivene. Međutim, mehanički deformirani namotaji povećavaju rizik ispada transformatora, pa se FRA mjerenja često provode nakon ispitivanja kratkog spoja.

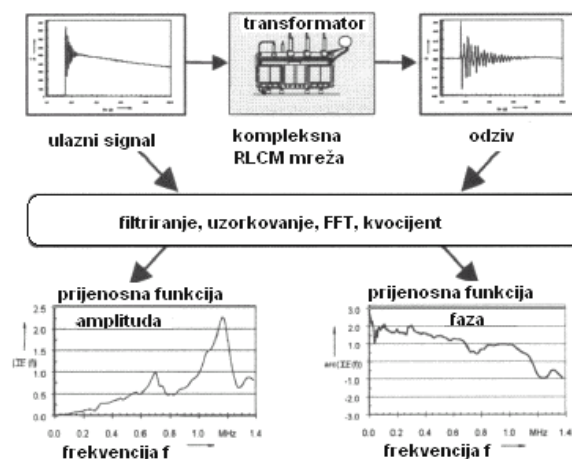
Glavni problem FRA analize je interpretacija mjerenja i ocjena utvrđenih promjena u FRA krivuljama. FRA metoda predstavlja usporednu metodu i razvila su se tri moguća i smislena postupka:

- usporedba aktualnih mjerenja sa referentnim mjerenjem,
- usporedba između faza,
- usporedba između istih tipova transformatora.

Promjene u frekventijskom odzivu ukoliko se radi o slijedećim vrstama kvarova; kratko spojenim zavojima, zatvorenim strujnim petljama, problemima vezanim uz jezgru ili neuzemljenu jezgru mogu se očekivati u donjem dijelu frekventijskog spektra (do 10 kHz), dok se u srednjem dijelu mogu otkriti aksijalni pomaci namota (iznad 200 kHz) ili radialni pomaci unutarnjih namota (od 5 kHz o 500 kHz) [2], [3], [4].

2.1. FRA u vremenskoj domeni

Prilikom FRA mjerenja transformator se mora odspojiti od mreže. Ispitni transformator se pobuđuje sa širokopojasnim signalom. Odzivni signal će biti ovisan o ulaznom signalu. Oba signala se analiziraju pomoću brze Fourierove transformacije (FFT). Kompleksna FRA krivulja se dobije kao kvocijent FFT transformiranog izlaznog i ulaznog signala [5].



Slika 1. Mjerenje prijenosne funkcije u vremenskoj domeni

2.2. FRA u frekvencijskoj domeni

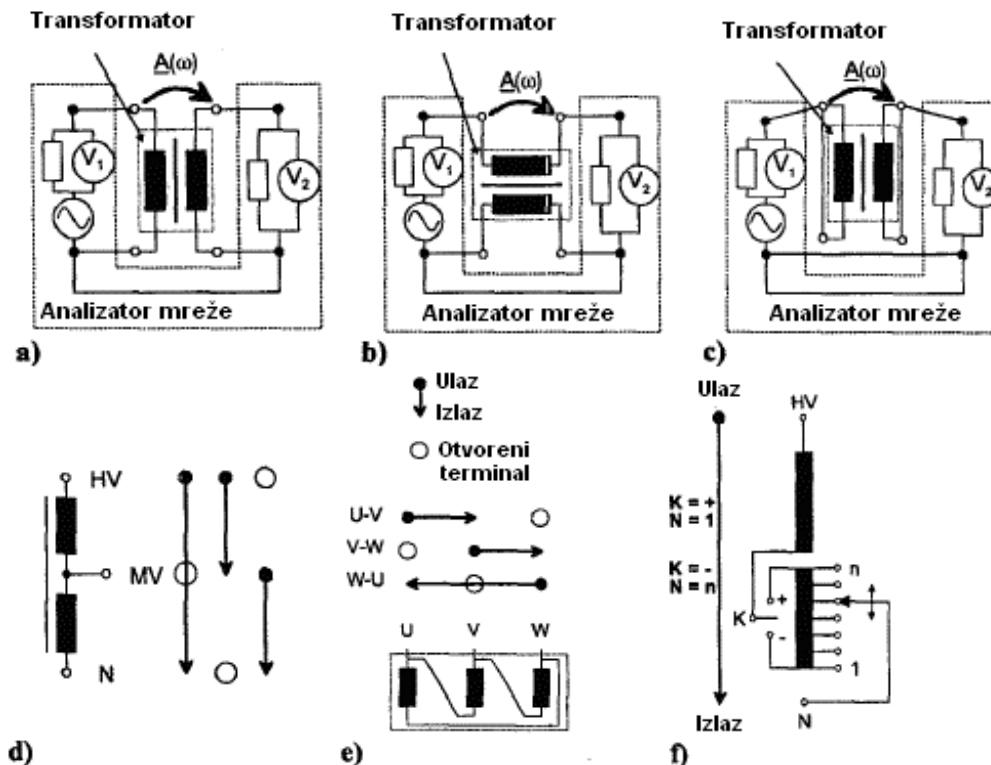
Prilikom FRA mjerenja u frekvencijskoj domeni ispitivani transformator se pobuđuje sa sinusnim naponima varijabilne frekvencije. Odziv se ovisno o vrsti spoja mjeri na drugom namotu ili na drugom kraju istog namota (Slika 2.).

Prijenosna funkcija se dobiva direktno iz omjera izlaznog i ulaznog signala, na širokom pojasu frekvencija od 100 Hz do 1 MHz.

Izražava se kao:

$$k = 20 \log (V_2(f) / V_1(f)) \quad (1)$$

Postoji 6 mogućih vrsta spojeva, (prikazane su na slici 2.) ovisno o grupi spoja i izvedbi transformatora [6].



- a) Prijenosna funkcija – M spoj
 - b) Prijenosna funkcija duž jednog namota – L spoj
 - c) Ispitivanje glavne izolacije – C spoj
 - d) Autotransformator
 - e) Namot spojen u trokut
 - f) Regulacijski namot
- Slika 2. Sheme spoja

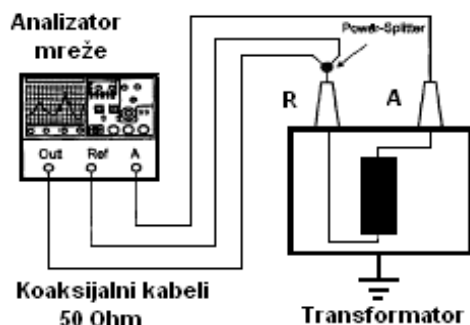
Ulazna i izlazna impedancija analizatora mreže ima utjecaja na rezultate mjerenja, te je stoga kod većine uređaja odabrana konstantna vrijednost od 50 Ω.

Iskustveno je pokazano da kod malih geometrijskih promjena mjerenje prijenosne admitancije daje manje relativne promjene omjera, nego kod mjerenja prijenosne funkcije napona. Razlog tome je što je izlazni signal kod mjerenja struje izrazito mali, te se stoga prakticira mjerenje prijenosne funkcije napona.

3. FRA MJERENJA NA TRANSFORMATORU SNAGE 40 MVA

FRA mjerenja su provedena u Končar D&ST na obnovljenom transformatoru snage 40 MVA. Nakon dugogodišnjeg pogona odlučeno je na osnovi loših rezultata mjerenja rasipnog induktiviteta, da se transformator pošalje u tvornicu, gdje je izvršena zamjena VN i SN namota u svim fazama.

Prilikom preuzimanja transformatora uz standardna ispitivanja provedena su i FRA mjerenja na transformatoru. Korišten je analizator mreže Hewlett-Packard HP4915A i univerzalni izvor HP3245A. Mjerena je prijenosna funkcija za tri različite konfiguracije tzv. M, L i C konfiguracije mjerenja.



Slika 3. Principijelna shema spoja

Prva mjerenja su bila začuđujuća, naime bilo da smo ulazni mjerni signal narinuli na primar (i mjerili odziv na sekundaru) ili na sekundar (i mjerili odziv na primaru) dobivali smo istu prijenosnu funkciju.

Međutim nakon detaljnije analize rezultata pronašli smo uzrok, što je potvrđeno teoretski pomoću zakonitosti iz Teorije mreža i linija, te proračunima u EMTP. Također smo pronašli i potvrdu i u prvom članku iz ovog područja od E.P.Dicka iz 1978. [7];, u kojem je ova metoda i po prvi put objašnjena:

„The theorem of the reciprocity states that if a voltage is applied in one branch of a linear, bilateral, passive network produces, the same voltage applied in the second branch will produce the same current in the first branch. Since low impedance connections are used in our measuring circuit, the above theorem implies that the input and output terminals of the transformer winding may be interchanged without affecting the response. Our test results confirmed that our measurement approached the necessary conditions.“

Odnosno u prijevodu: "Teorem reciprociteta govori da napon narinut na jednu granu linearne, bilateralne, pasivne mreže uzrokuje istu struju kao i napon narinut u drugoj grani (u tom slučaju se mjeri struja u prvoj grani). Kako se u mjernom krugu koriste nisko impedantne veze, gornji teorem implicira da se ulazni i izlazni terminali mogu zamijeniti bez utjecaja na odziv. Naši ispitni rezultati dokazali su da ovo mjerenje zadovoljava nužne uvjete."

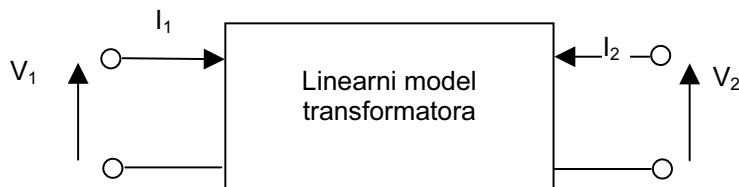
Model jednofaznog transformatora može se opisati s hibridnim parametrima [8]:

$$I_1 = Y_1 * V_1 - H_{12} * I_2 \quad (2)$$

$$V_2 = H_{12} * V_1 + Z_k * I_2 \quad (3)$$

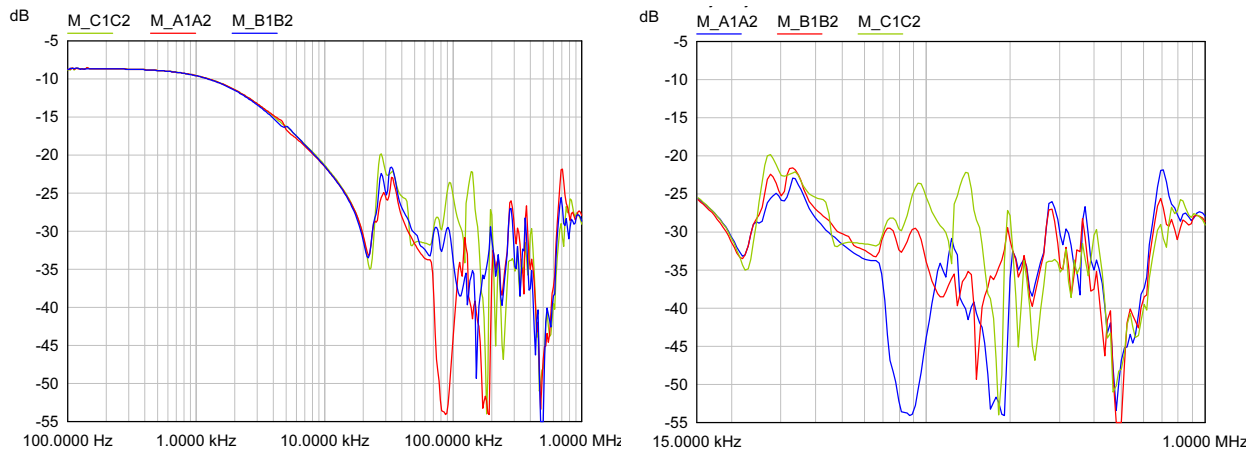
Gdje je: Y_1 – admitancija praznog hoda, H_{12} – prijenosna funkcija Z_k – Impedancija kratkog spoja

Transformator možemo promatrati kao linearni, vremenski nepromjenjivi, pasivni i kompleksni sustav.

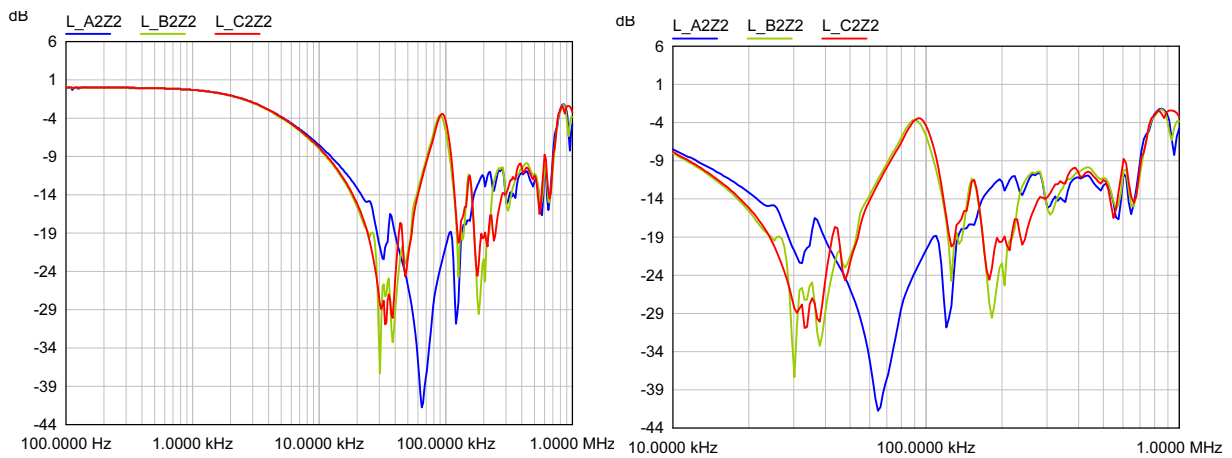


Slika 4. Linearni model transformatora

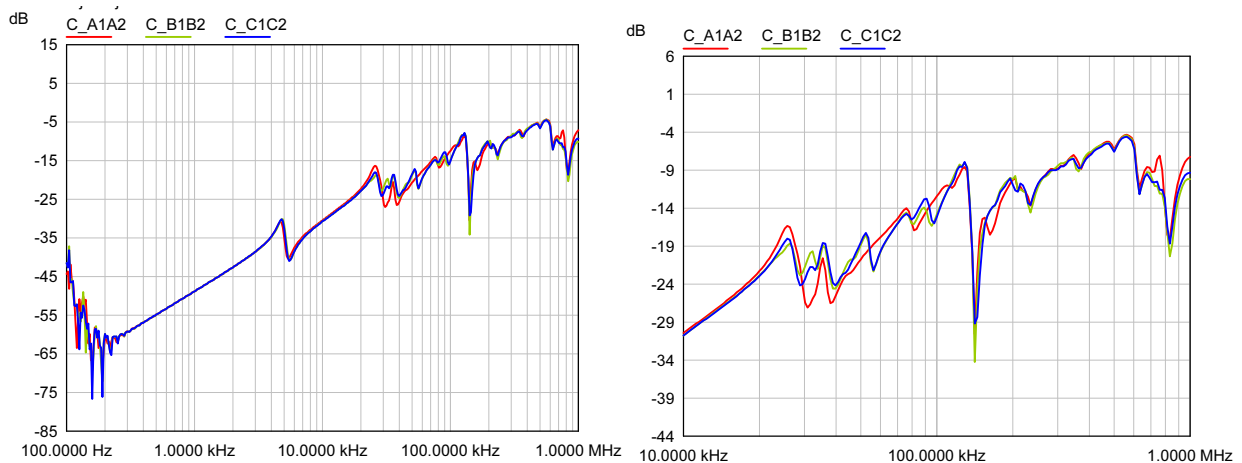
Drugim riječima kombinacije mjerenja primar-sekundar nije potrebno dva puta ponavljati. Međutim različiti odziv će se dobiti ukoliko se ulazni signal narine jednom na donji, a drugi put na gornji dio namota, ta je mjerenja potrebno provesti za ove dvije kombinacije.



Slika 5. Rezultati mjerenja za M-spoj



Slika 6. Rezultati mjerenja za L-spoj



Slika 7. Rezultati mjerenja za C-spoj

Na slici 5. je vidljivo izrazito odstupanje karakteristike za mjerenje između faza A1-A2 u području od 70 do 100 kHz u odnosu na mjerenja između faza B1-B2, te C1-C2. Na slici 6. je također vidljivo odstupanje za namot A2-Z2 (dakle mjerenje duž namota) u području od 50 do 100 kHz, osim toga je uočljiva pojava nove rezonantne točke na 55 kHz. Na slici 7. je za mjerenje između faza A1-A2 također uočljivo manje odstupanje. Općenito je kod analize rezultata važnije obratiti pozornost na pojavu novih rezonantnih točaka u odnosu na moguće odstupanje u iznosu prijenosne funkcije. S obzirom da su mjerenja provedena na potpuno obnovljenom transformatoru, na kojem su sva ostala ispitivanja dala očekivane rezultate, osim dodatnog praćenja SN namota A2, nije moguće dati analizu uzroka odstupanja odziva FRA krivulje, bez ponovnog pregleda (otvaranja) transformatora. Očigledno da usporedba između faza nije dovoljna, već i zbog različitog položaja srednjeg namota, te se kao najpouzdanija usporedba

preporuča usporedba sa prethodnim (referentnim) FRA mjerenjem. Također bi bilo zanimljivo provesti FRA mjerenja na istim tipovima transformatora.

4. STATISTIČKA ANALIZA REZULTATA

FRA krivulje mogu biti uspoređivane grafički ili statistički. Statistička analiza mora pokazati koliko se dobro preklapaju dvije grupe rezultata.

Korelacijski koeficijent dvije grupe brojeva $X (x_1 , x_2 , \dots , x_n)$ i $Y (y_1 , y_2 , \dots , y_n)$ je izražen kao:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (4)$$

Devijacija spektra između X i Y se definira kao:

$$\rho = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{x_i - \frac{x_i + y_i}{2}}{\frac{x_i + y_i}{2}} + \frac{y_i - \frac{x_i + y_i}{2}}{\frac{x_i + y_i}{2}}} \quad (5)$$

Prikaz ovakve vrste analize je detaljno opisan u [2] i [9].

5. ZAKLJUČAK

FRA mjerenja su se dosad pokazala kao korisna metoda, a trenutno je u toku i izrada normi odnosno smjernica za ovu vrstu ispitivanja (Cigre WG A2.26). Neki proizvođači koriste ovu metodu prilikom transporta velikih transformatorskih jedinica. Da bi se stekla dragocjena iskustva bilo bi potrebno provesti opsežno ispitivanja na transformatorima koji su doživjeli veća ili manja oštećenja, te napraviti plan prema kojem bi se izmjerili frekvencijski odzivi prije i poslije popravka, zatim snimili i usporedili frekvencijski odzivi istih tipova transformatora ili promjena frekvencijskog odziva jednog transformatora tokom procesa starenja.

Osim toga snimljeni frekvencijski odzivi transformatora su vrlo korisni i pri modeliranju transformatora [10], [11], jer je moguće napraviti nadomjesne sheme za pojedine frekvencijske opsege, odnosno procijeniti točnost vlastitog modela.

Trenutno je u trendu i razvoj metoda za on-line praćenje FRA karakteristika transformatora [12].

6. LITERATURA

- [1] A. Schachenhofer, "Diagnostik an Transformatoren der elektrischen Energietechnik", diplomski rad, Graz, kolovoz 2004.
- [2] J-W. Kim, B.K. Park, S.C. Jeong, S.W. Kim, P.G. Park, "Fault Diagnosis of a Power Transformer Using an Improved Frequency-Response Analysis", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 20, siječanj 2005, 169-178.
- [3] M. Nigris, R. Passaglia, R. Berti, L. Bergonzi, R. Maggi "Application of Modern Techniques for the Condition Assessment of Power Transformers", Cigre Paris 2004, A2-207.
- [4] S. A. Ryder, "Transformer Diagnosis Using Frequency Response Analysis: Results from Fault Simulations", IEEE, 2002, 399-404.
- [5] J. Christian, "Erkennung mechanischer Wicklungsschaden in der Transformatoren mit der Übertragungsfunktion", doktorska dizertacija, Shaker Verlag, 2002.
- [6] M. Hassig, R. Braunlich, R. Gysi, J.-J. Alf, V. Der Houhanessian, W. S. Zaengl, "On-Site Applications of Advanced Diagnosis Methods for Quality Assessment of Insulation of Power Transformers", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001, 441-447.

- [7] E.P. Dick, C.C. Erevan, "Transformer diagnostic testing by frequency response analysis", IEEE Trans PAS-97, No.6, pp 2144-2153, 1978.
- [8] P.T.M. Vaessen, E. Hanique - A new frequency response analysis method for power transformers, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 7, No.1, pp 384-390, 1992.
- [9] S. A. Ryder, "Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, travanj 2002, 187-190.
- [10] J. Pleite, E. Olias, A.Barrado, A. Lazaro, J. Vazquez, "Transformer Modeling for FRA Technigues", IEEE, 2002, 317 – 321.
- [11] E. Rahimpour, "Hochfrequente Modellierung von Transformatoren zur Berechnung der Übertragungsfunktion", doktorska dizertacija, Shaker Verlag, 2001.
- [12] N. Pinhas, S. Islam, J. Hullett, "On the developement of Transfer Function Method for Fault Identification in Large Power Transformers on load", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000, 747-751.