

Modelovanje frekvencijski zavisnog modela stubnog uzemljivača na osnovu merenja impulsnog odziva

Ranko Jasika¹, Jovan Mrvić¹, Stefan Obradović¹, Ninoslav Simić¹

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

rankojasika@ieent.org, jmrvic@ieent.org

Kratak sadržaj: Adekvatno modelovanje stubnog uzemljivača od ključnog je značaja u analizama prenapona nastalih prilikom atmosferskih pražnjenja u nadzemne vodove. U radu je demonstriran postupak modelovanja frekvencijski zavisnog modela uzemljivača, u programskom alatu ATP/EMTP, na osnovu rezultata merenja impulsnog odziva. Za analizu signala u vremenskom domenu i formiranje frekvencijske zavisne karakteristike uzemljivača primenjen je MPM (*Matrix Pencil Method*). U drugom delu rada detaljno je opisan postupak implementacije frekvencijski zavisne komponente, kao što je model uzemljivača, u programske alate tipa EMTP-a. Na kraju rada, opisani postupak je primenjen na jednom konkretnom merenju impulsnog odziva uzemljivača. Dobijeni rezultati pokazuju da impulsni odziv formiranog modela uzemljivača odgovaraju merenjima. Takođe, pokazalo se da MPM veoma dobro filtrira merene signale.

Ključne reči: ATP/EMTP, stubni uzemljivač, impulsni odziv, frekvencijski zavisan model

1. Uvod

Uzemljivači stubova predstavljaju bitan faktor koji utiče na izolacione karakteristike nadzemnih vodova [1]. Prilikom atmosferskih pražnjenja, u vrh stuba ili zaštitno uže, vrednost potencijala na koji dolazi konzola stuba – odnosno vrednost napona koji se javlja na izolatoru, najviše zavisi od impedanse uzemljivača. Prema tome, verovatnoća pojave povratnog preskoka na fazni provodnik dominantno zavisi od karakteristika samog uzemljivača, zbog čega je od velikog značaja njegovo adekvatno modelovanje pri numeričkim proračunima prenapona nastalih atmosferskim pražnjenjima.

Struje atmosferskih pražnjenja karakteriše širok frekvencijski spektar, od nekoliko herca do više megaherca. Sa obzirom da se uzemljivač stuba različito ponaša pri različitim frekvencijama, za adekvatan proračun neophodno je formirati frekvencijski zavisani model uzemljivača. Softveri za analizu tranzijentnih prenapona kao što je ATP/EMTP nemaju razvijene namenske modele uzemljivača koje bi uvažile njihovu frekvencijsku zavisnost, što je jedan od glavnih razloga da se u proračunima atmosferskih prenapona obično primenjuju pojednostavljeni modeli predstavljeni preko stacionarne otpornosti ili preko jednostavnih RLC modela, sa tipičnim vrednostima parametara [2].

Jedan od načina da se pouzdano odredi frekvencijski zavisna karakteristika stubnog uzemljivača je da se sprovede merenje njegovog impulsnog odziva, na osnovu čega se može odrediti frekventno zavisna impedansa uzemljivača. Implementacija frekventno zavisnih komponenti u programske alate tip EMTP-a nije jednostavna. Jedan od najčešće korišćenih načina za njihovu implementaciju je aproksimacijom impedanse/admitanse uzemljivača racionalnim funkcijama što omogućava njihovo modelovanje nizom jednostavnih RLCG grana. U literaturi se postupak aproksimacije (fitovanja) impedanse najčešće sprovodi primenom tehnike vektorskog fitovanja [1,3]. Navedenim postupkom se frekvencijski zavisna admitansa aproksimira sumom racionalnih funkcija u sledećem obliku:

$$Y(j\omega) \approx \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{j\omega - p_i} + h \cdot j\omega + d \quad (1)$$

što je čini veoma pogodnom za dalju implementaciju u EMTP programe.

Navedena tehnika je iterativna, tako da je za njenu primenu neophodno zadavanje početnih parametara (polova racionalnih funkcija), a dodatna nepogodnost su i problemi sa stabilnošću sistema [4]. Takođe da bi se, na osnovu merenja, iz vremenskog domena dobila frekvencijski zavisna impedansa neophodna je primena Furijeove transformacije.

U radu je prikazan drugačiji pristup u aproksimaciji racionalnim funkcijama: primenom MPM (Matrix Pencil Method) [5,6]. MPM omogućava da se direktno iz vremenskog domena odredi frekventno zavisna karakteristika uzemljivača u obliku pogodnom za njegovu implementaciju u programski alat EMTP/ATP. Navedena metoda nije iterativna - ne zahteva zadavanje početnih parametara, nema poteškoća sa zadovoljenjem uslova pasivnosti (sistem je uvek stabilan). Osim toga dodatna pogodnost je i to što nije potrebna primena Furijeove transformacije za prelazak iz vremenskog u frekventni domen.

2. MPM (*Matrix Pencil Method*)

U ovom poglavlju ukratko je prikazan postupak primene MPM na signal u vremenskom domenu kao i njegova predstava u obliku pogodnom za implementaciju u EMTP programe. U opštem slučaju proizvoljan signal se u vremenskom domenu može predstaviti ("fitovati") sumom M kompleksnih eksponencijalnih funkcija u sledećoj formi:

$$y(t) = x(t) + n(t) = \sum_{i=1}^M r_i \cdot e^{s_i t} + n(t) \quad (2)$$

gde je $x(t)$ – koristan signal, $n(t)$ – signal šuma, r_i – kompleksna amplituda, $s_i = -\alpha_i + j\omega$ (α – koeficijent prigušenja, ω – učestanost).

S obzirom da mereni signal nije kontinualan, jednačina (2) se može napisati i u diskretnoj formi zamenom parametra t sa kT_s :

$$y(kT_s) = \sum_{i=1}^M r_i \cdot z_i^k + n(kT_s), \quad k = 0 \dots N \quad (3)$$

gde je: $z_i = e^{s_i T_s}$, N – broj odbiraka signala, T_s – perioda odabiranja.

MPM omogućuje pronalaženje optimalnih parametara eksponencijalnih funkcija M , z_i , r_i ($i=1 \dots M$). Na slici 1 je prikazan blok dijagram algoritma MP metode. U programskom alatu MATLAB realizovan je programski kod prema predloženom algoritmu koji omogućava pronalaženje nepoznatih parametara. Ulazni podaci su: odbirci izmernog signala (y), takozvani *pencil* parametar (L) koji ima značajnu ulogu u eliminisanju šuma iz signala – usvojeno je $L=N/2$, željena tačnost p – usvojeno je $p=10^{-3}$.

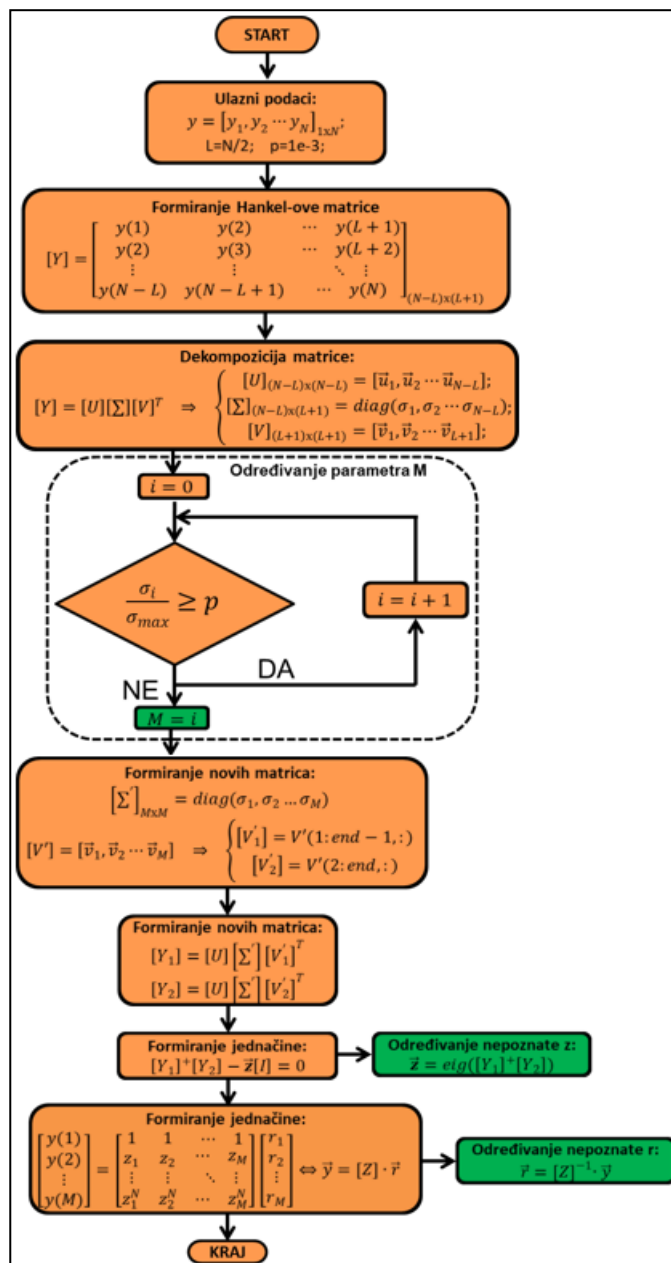
Nakon sprovedenog postupka fitovanja i određivanja parametra M i vektora z i r , posmatrana funkcija se u vremenskom domenu može predstaviti sumom kompleksnih eksponencijalnih funkcija:

$$y(kT_s) \approx \sum_{i=1}^M r_i \cdot z_i^k = \sum_{i=1}^M r_i \cdot e^{s_i T_s \cdot k}, \quad k = 0 \dots N \quad (4)$$

gde je: $s_i = 1/T_s \cdot \ln(z_i)$.

Prikaz signala u obliku sume eksponencijalnih funkcija veoma je pogodan jer omogućuje analitičko rešavanje Furijeove transformacije, tako da se jednostavno može preći u frekvencijski domen, prema sledećem izrazu:

$$Y(j\omega) = \mathcal{F}\{y(t)\} = \mathcal{F}\left\{\sum_{i=1}^M r_i \cdot e^{s_i T_s \cdot k}\right\} = \sum_{i=1}^M \frac{r_i}{s_i + j\omega} \quad (5)$$



Slika 1. Blok dijagram MP metode

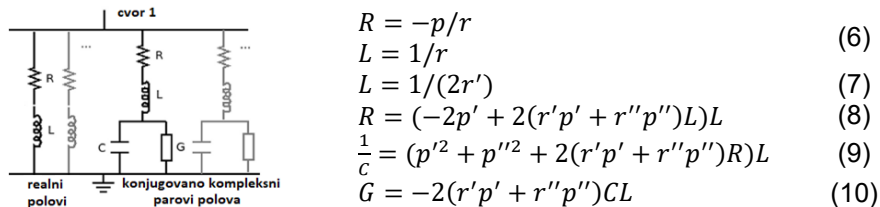
Na osnovu jednačine (5) može se uočiti da parametri r i s predstavljaju rezidualne i polove funkcije što znači da se na osnovu dobijenih parametara primenom MPM funkcija može napisati u pogodnoj pol-rezidualnoj formi, koja

omogućava implementaciju modela uzemljivača u programske alate tipa EMTP-a, kao što je bio slučaj sa primenom vektorskog fitovanja.

3. Implementacija frekventno zavisnog modela uzemljivača u programski alat ATP/EMTP

U programskim alatima za proračun tranzijentnih pojava, kao što je EMTP/ATP, frekvencijski zavisna komponenta, čija je frekvencijska karakteristika predstavljena u obliku sume racionalnih funkcija (jednačina (5)) može se ekvivalentirati nizom jednostavnih RLCG grana (*Foster-type* mreža). Na slici 2 prikazan je jedan segment mreže, koji ilustruje sve tipove mogućih RLCG grana. Stubni uzemljivači se najčešće modeluju kao jednoterminalne komponente, tako da je takav model u potpunosti određen jednom frekvencijski zavisnom admitansom $Y(j\omega)$.

Vrednosti elemenata *Foster-type* mreže određuju se na osnovu dobijenih polova i reziduala funkcije $Y(j\omega)$, jednačina (5). Svakom realnom polu funkcije $Y(j\omega)$, odgovara jedna R-L grana kako je to prikazano na slici 2. Pri tome se parametri R i L određuju na osnovu realnih polova p i reziduala r prema jednačini (6). Polovi ne moraju biti realni, pa u tom slučaju svakom konjugovano kompleksnom paru polova u obliku $\frac{r'+jr''}{s-(p'+jp'')} + \frac{r'-jr''}{s-(p'-jp'')}$, odgovara jedna RLCG grana prikazana na slici 2 čiji se parametri računaju prema jednačinama (7-10).



Slika 2. Niz RLCG grana

Nakon određivanja vrednosti svih elemenata *Foster-type* mreže potrebno je sprovesti njenu implementaciju u ATP. To se može uraditi "ručno" formiranjem kompletne RLCG šeme u grafičkom pretprocesoru (ATPDraw). Mnogo bolje rešenje je formirati tekst datoteku formatiranu kao na slici 3. Na slici 3 je prikazan postupak realizacije jedne grane (između čvora "čvor1" i zemlje) koju čine RLC elementi (50 Ω, 0.05 mH i 0.01 μF). Na ovaj način u tekst fajla potrebno je uneti svaku granu Foster-type mreže. Kako je format tekst fajla jasno definisan i jednostavan, ceo postupak se može automatizovati, čime se omogućava formiranje šeme proizvoljne veličine. Složena RLCG mreža definisana ovakvim tekst fajlom može se jednostavno implementirati u ATP-u primenom naredbe *INCLUDE*.

```

$VINTAGE,1
C <BUS1><BUS2><BUS3><BUS4>< OHM      >< milliH  >< microF  >
C
  cvor1          50.      0.05      0.01
$VINTAGE,0

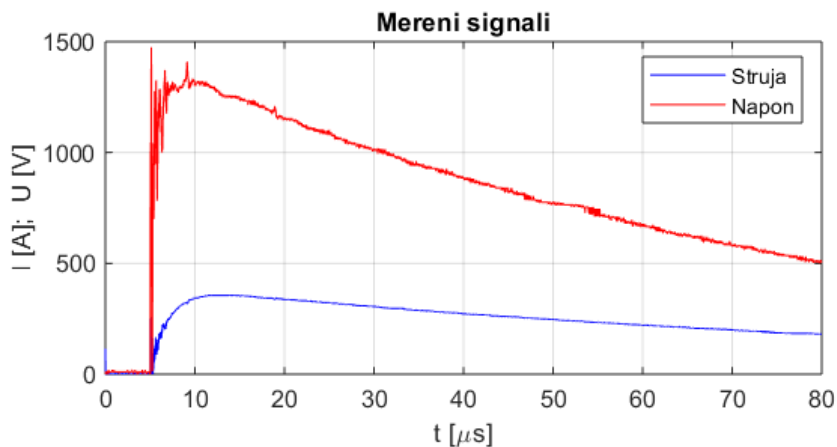
```

Slika 3. Format tekst fajla za jednu RLC granu

Sa slike 3 se može uočiti da je pri formiranju tekst fajla neophodno definisati ime čvora (drugi čvor je zemlja). Osim toga kada je potrebno formirati RLCG granu mora se zadati i ime međučvora. Da bi se izbegle moguće greške sa definisanjem imena čvorova pogodno je u ATPDraw-u formirati novu komponentu primenom *Data Base Module*-a, koja će predstavljati uzemljivač i čija interna imena čvorova neće biti "vidljiva" ostatku električnog kola.

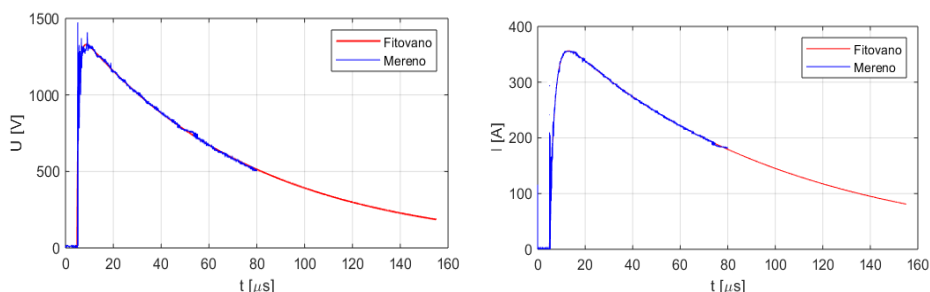
4. Primer modelovanja uzemljivača

Postupak opisan u prethodna dva poglavlja iskorišćen je za formiranje frekventno zavisnog modela uzemljivača na osnovu rezultata merenja impulsnog odziva [9]. Na slici 4 je prikazan izmereni naponski odziv uzemljivača na injektirani strujni impuls. Napon dostiže maksimalnu vrednost 1.35kV za oko 3.5 μ s, dok struja dostiže maksimum 360A za oko 7 μ s.



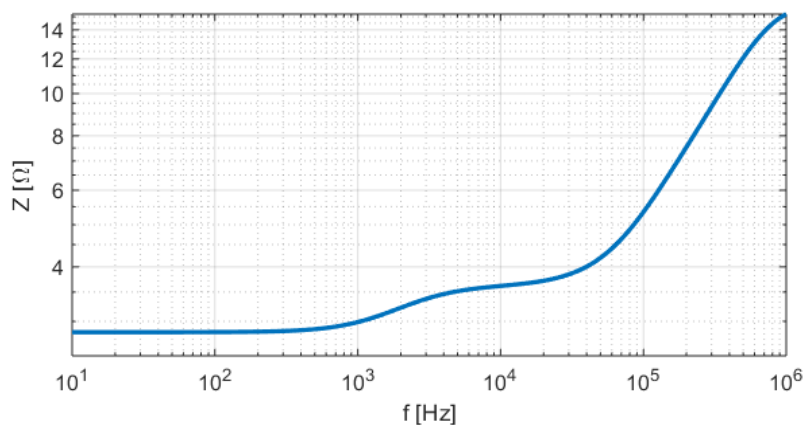
Slika 4. Talasni oblik napona i struje

Predložena *Matrix Pencil* metoda primenjena je na merene signale struje i napona. Na slici 5 su prikazani mereni signali kao i odgovarajući signali dobijen nakon fitovanja (jednačina (4)). Osim veoma tačne reprezentacije signala, može se uočiti da MP metoda veoma dobro filtrira šum u signalu.



Slika 5. Fitovani signal naponskog i strujnog impulsa

Nakon sprovedenog fitovanja nad signalima struje i napona, primenom izraza (5), sprovedena je njihova transformacija u frekventijski domen, čime je omogućeno pronalaženje frekventijski zavisne impedanse $Z(j\omega) = U(j\omega)/I(j\omega)$. Na slici 6 je prikazana dobijena frekventijski zavisna impedansa uzemljivača, u opsegu frekvencije od 10Hz do 1MHz. Može se uočiti da impedansa ima približno konstantnu vrednost, jednaku stacionarnoj otpornosti, na širokom frekventijskom opsegu do približno 1 kHz, sa daljim povećanjem frekvencije impedansa uzemljivača blago raste (1kHz - 50 kHz). U frekventijskom opsegu od 50 kHz do 1 MHz izraženo je induktivno ponašanje uzemljivača usled čega dolazi do značajnog povećanja njegove impedanse.



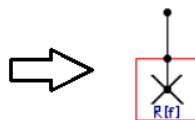
Slika 6. Frekventijski zavisna impedansa uzemljivača

S obzirom na to da je frekventijski zavisna impedansa određena primenom MPM poznati su polovi i rezidualni racionalnih funkcija kojima je impedansa opisana, što omogućava određivanje vrednosti elemenata *Foster-type* mreže i dalju implementaciju modela u programski alat ATP/EMTP. Model uzemljivača je formiran kao nova komponente primenom ATP-ovog *Data Base Module*-a, čija je sintaksa data na slici 7.

```

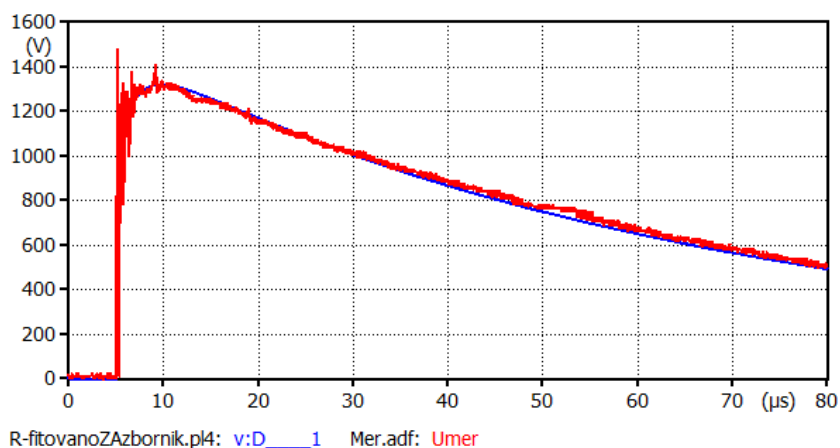
BEGIN NEW DATA CASE ---NOSORT---
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG
NUM
DUM
/BRANCH
Grane Foster type mreže
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH,ime PUNCH fajla
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
$EOF

```



Slika 7. Sintaksa DBM-a formiranog modela uzemljivača

Da bi se verificovao formirani model, na njega je doveden mereni strujni impuls (filtriran) primenom ATP-ovog *Empiric Type* strujnog izvora, pri čemu je meren naponski odziv. Rezultati simulacije prikazani su na slici 8, plava kriva predstavlja naponski odziv dobijen simulacijom, crvena kriva predstavlja izmereni naponski odziv. Može se uočiti da simulirani naponski odziv vrlo dobro odgovara izmerenom.



Slika 8. Naponski odziv uzemljivača dobijen simulacijom i merenjem

Ovako formirani model uzemljivača može se primeniti za analizu naponskih odziva pri delovanju strujnih impulsa različitih talasnih oblika. Model je primenjiv i za 50Hz-ne signale, što znači da se na osnovu impulsnog odziva može odrediti stacionarna otpornost uzemljivača.

5. Zaključak

U radu je detaljno opisan postupak modelovanja frekvencijski zavisnog modela uzemljivača, u programskom alatu ATP/EMTP, na osnovu rezultata merenja impulsnog odziva. Za razliku od uobičajenih pristupa koji koriste tehniku vektorskog fitovanja (VF) za aproksimaciju frekvencijske karakteristike uzemljivača, ovde je primenjena MPM (*Matrix Pencil Method*). Prednost u primeni navedene metode je pre svega u mogućnosti direktne primene na signale u vremenskom domenu za dobijanje frekvencijske karakteristike, dok je kod VF metode potrebna prethodna primena Furijeove transformacije što zbog prisustva izraženog šuma u signalu najčešće nije pogodno. Osim toga MPM nije iterativna tako da ne zahteva zadavanje početnih vrednosti nepoznatih parametara, što nije slučaj sa VF metodom.

Opisani postupak implementacije demonstriran je na rezultatima merenja impulsnog odziva jednog realnog stubnog uzemljivača. Dobijeni rezultati pokazuju da impulsni odziv formiranog modela uzemljivača odgovara merenjima. Takođe, pokazalo se da MPM veoma dobro filtrira merene signale.

Zahvalnica

Rad je nastao u okviru projekta TR 33024, „Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana EPS-a utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora i primenom novih metoda ispitivanja i daljinskog nadzora”, koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Literatura

- [1] Andrzej Holdyk, Bjorn Gustavsen, "Inclusion of Field Solver-Based Tower Footing Grounding Models in Electromagnetic Transients Programs", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 6, Nov.-Dec. 2015.
- [2] IEC 60071-4 *Insulation coordination, Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks*, 2004.
- [3] Petar Sarajcev, Slavko Vujevic, Dino Lovric, "Interfacing harmonic electromagnetic models of grounding systems with the EMTP-ATP software package", *Renewable Energy* 68, 2014.
- [4] Bjørn Gustavsen, Adam Semlyen, "Enforcing Passivity for Admittance Matrices Approximated by Rational Functions", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 1, February 2001.

- [5] Tapan K. Sarkar, Odilon Pereira, "Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials", *IEEE Antennas and Propagat. Mag.*, vol. 37, Issue: 1, Feb. 1995.
- [6] Keyhan Sheshyekani, Hamid R. Karami, Parisa Dehkhoda, Reza Kazemi, S. Vakili Sadeghi, Rouzbeh Moini, Farhad Rachidi-Haeri, "A New Method for the Inclusion of Frequency Domain Responses in Time Domain Codes", *2011 International Conference on Power Systems Transients (IPST2011)*, Delft, the Netherlands June 14-17, 2011.
- [7] Javad Gholinezhad, Reza Shariatinasab, Keyhan Sheshyekani, Mohammadreza Alemi, "The Effect of High Frequency Model of Tower-Footing Grounding Systems on the Back Flashover Rate of Transmission lines", *International conference on Lightning Protection*, 25-30 September 2016.
- [8] L Prikler, HK. Hoidalen *ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista: User's Manual*, Norwegian University of Technology, Trondheim, Norway; 2009.
- [9] Studija br 310313 Uzemljenje stubova nadzemnih vodova od 10kV do 110kV, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, 2003.

Abstract: The tower footing grounding system is of major importance for analysis of the lightning overvoltages on an overhead transmission line during backflashover and shielding failure. This paper presents one approach to wide-band modelling of tower footing grounding impedance based on impulse response measurement. The model derived is implemented in the simulation software ATP/EMTP. A general methodology is presented based on the Matrix Pencil Method (MPM) for rational fitting of time domain measured signals and determining frequency domain response. The MPM is used to estimate the poles and residues of the frequency response using time domain signals. The second part of the paper describes the process of implementation of the model capable of representing grounding structures over a wide band of frequencies in EMTP type software. At the end of the paper, it is shown how the described procedure was applied to one measured impulse response of the tower-footing grounding system. The obtained results show that the simulation results of the impulse response of the tower footing grounding systems model correspond very well to the measured impulse response. It has also been shown that MPM model filters the measured signals appropriately.

Keywords: ATP/EMTP, tower footing grounding system, impulse response, wide-band modeling

Wide-Band Modelling of Tower-Footing Grounding Systems Based on the Impulse Response Measurement

Ranko Jasika, Jovan Mrvić, Stefan Obradović, Ninoslav Simić

Rad primljen u uredništvo: 15.10.2019. godine.

Rad prihvaćen: 25.11.2019. godine.

