

## Optimizacija parametara dinamičkog modela MOP-a primenom programskog alata ATP/EMTP

Ranko Jasika<sup>1</sup>, Jovan Mrvić<sup>1</sup>, Ninoslav Simić<sup>1</sup>, Ljubiša Čičkarić<sup>1</sup>

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

[ranko.jasika@ieent.org](mailto:ranko.jasika@ieent.org), [jmrvic@ieent.org](mailto:jmrvic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U radu je demonstriran postupak estimacije parametara dinamičkog modela metaloksidnog odvodnika prenapona primenom genetskog algoritma, implementiranog u optimizacionom modulu grafičkog predprocesora (ATPDraw) programskog alata ATP/EMTP. Prikazane su prednosti novih opcija ATPDraw-a koje omogućavaju optimizaciju parametara zadatog električnog kola. Postupak optimizacije je primenjen na dva frekventno zavisna modela odvodnika. Na kraju rada dato je poređenje rezultata dobijenih pre i nakon optimizacije.

**Ključne reči:** optimizacija, metaloksidni odvodnik prenapona (MOP), dinamički model, ATP/EMTP, genetski algoritam, estimacija parametara

### 1. Uvod

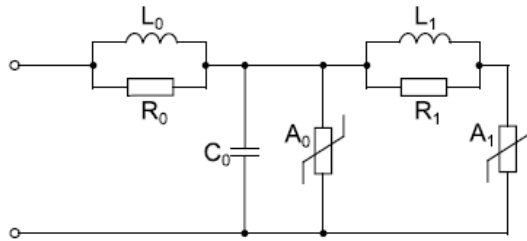
Najčešći uzročnici pojave prenapona u elektroenergetskim sistemima (EES) su sklopne operacije i atmosferska pražnjenja. Prenaponi mogu uzrokovati oštećenja izolacije energetske opreme, što u krajnjem slučaju dovodi do havarija i velikih materijalnih šteta. Kao osnovna mera za ograničenje prenapona koriste se metaloksidni odvodnici prenapona. Za potrebe proračuna prenapona, koji se javljaju tokom prelaznih procesa u EES-u, neophodno je formirati odgovarajući model mreže, na kome će se sprovesti potrebne simulacije. Pri analizi brzih strujnih talasa (vreme uspona kraće od 10 $\mu$ s) od velikog je značaja adekvatno modelovanje odvodnika prenapona. Brojna merenja preostalog napona ukazuju na dinamički karakter odvodnika prenapona [1]. Naime, preostali napon odvodnika raste sa smanjenjem vremena uspona strujnog talasa, i preostali napon dostiže maksimalnu vrednost pre nego što strujni talas dostigne svoj maksimum. Iz ovih razloga odvodnik prenapona nije dovoljno modelovati nelinearnim otpornikom, jer

njegov preostali napon ne zavisi samo od amplitude već i od strmine primenjenog strujnog talasa [1-3]. U slučaju analize prenapona nastalih sklopnim operacijama, odvodnik se može dovoljno dobro modelovati svojom nelinearnom U-I karakteristikom [1-3]. Međutim, u slučaju prenapona uzrokovanih atmosferskim pražnjenjima takav model bio bi neadekvatan, zbog čega je razvijeno nekoliko modela odvodnika koji simuliraju frekvencijski zavisno ponašanje MOP-a. U ovom radu optimizacija parametara sprovedena je na dva dinamička modela, često korišćena u praksi: model preporučeni od IEEE radne grupe [1] i model predložen od strane Pinčetija i Đanetonija [2]. Postupak određivanja neophodnih parametara za formiranje dva pomenuta modela ukratko je prikazan u sledećem poglavlju (detaljan opis je dat u [1-2]). Inicijalne vrednosti parametara, određene prema datim izrazima, često ne daju optimalno rešenje, ali mogu poslužiti kao dobra polazna pretpostavka za dalju estimaciju parametara. Razvijeno je nekoliko različitih metoda optimizacije parametara dinamičkih modela odvodnika prenapona. U [4, 5, 6] ilustrovana je primena Genetskog algoritma u optimizaciji parametara MOP-a, u [7] se algoritam bazira na rojevima čestica (*Particle Swarm Optimization*), dok je u [8] primenjen algoritam Veliki Prasak-Veliko Sažimanje. Svi navedeni postupci optimizacije zahtevaju relativno složenu implementaciju u nekom od softverskih alata (npr. Matlab [4]), da bi se na kraju dobijeni parametri iskoristili za formiranje simulacionog modela u programskom alatu za numeričku simulaciju (npr. ATP/EMTP [5, 7, 8]). U ovom radu predstavljen je jednostavan metod za optimizaciju parametara dinamičkog modela MOP-a koji se može direktno sprovesti u programskom alatu ATP/EMTP.

## 2. Modelovanje odvodnika prenapona

### 2.1 IEEE model

Na slici 1 je prikazan frekventno zavisni model odvodnika prenapona preporučeni od strane IEEE radne grupe [1]. Model formiran na ovakav način daje zadovoljavajuće rezultate za strujne talase strmine od  $0.5\mu\text{s}$  do  $45\mu\text{s}$  [1]. Sastoji se od dva paralelna nelinearna otpornika  $A_0$  i  $A_1$ , povezana preko  $R_1L_1$  filtera. Na slici 2 date su inicijalne U-I karakteristike nelinearnih otpornika  $A_0$  i  $A_1$ , svedene na napon  $U_{r(10,8/20)}$  (preostali napon odvodnika za strujni talas amplitude 10 kA i oblika 8/20 $\mu\text{s}$ ). Pri pojavi strujnih talasa niske strmine, impedansa koju čine elementi  $R_1$  i  $L_1$  je veoma mala tako da su nelinearni otpornici  $A_0$  i  $A_1$  praktično paralelno vezani. Nasuprot tome, pri pojavi strujnih talasa velike strmine impedansa ima veliku vrednost, zbog čega veći deo struje teče kroz nelinearni otpornik  $A_0$  čija je U-I karakteristika veća (Slika 2). Kao posledica toga pri pojavi strmih strujnih talasa dolazi do povećanja preostalog napona odvodnika, što je i trebalo postići.



$$L_1 = 15d/n \text{ } [\mu H] \quad (1)$$

$$R_1 = 65d/n \text{ } [\Omega] \quad (2)$$

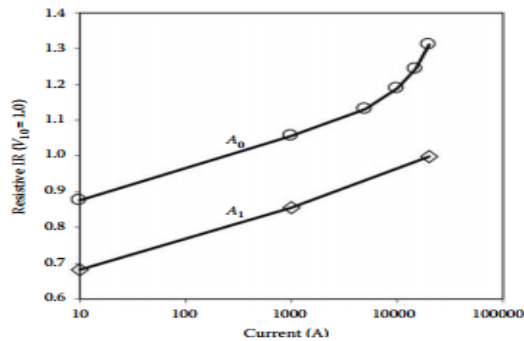
$$L_0 = 0.2d/n \text{ } [\mu H] \quad (3)$$

$$R_0 = 100d/n \text{ } [\Omega] \quad (4)$$

$$C_0 = 100n/d \text{ } [pF] \quad (5)$$

Slika 1. IEEE model odvodnika prenapona

Kapacitet odvodnika modelovan je preko kondenzatora  $C_0$ , dok je preko induktivnosti  $L_0$  u obzir uzeto prisustvo magnetnog polja u neposrednoj blizini odvodnika. Uloga otpornika  $R_0$  je pre svega u smanjenju numrećkih oscilacija [1].



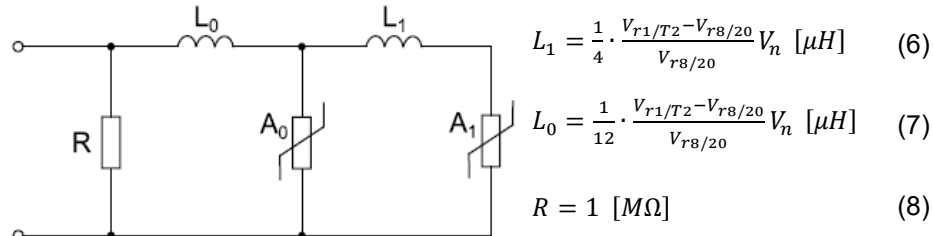
Slika 2. Nelinearne U-I karakteristike otpornika  $A_0$  i  $A_1$

Vrednosti linearnih komponenti modela zavise od dimenzija MOP-a i računaju se prema izrazima (1) do (5) [1], gde je sa  $d$  označena visina odvodnika dok je  $n$  broj paralelnih kolona metaloksidnih blokova odvodnika. Prema [1] konačne vrednosti parametara  $L_1$ ,  $A_0$  i  $A_1$  određuju se daljim iterativnim postupkom tako da se ostvare dobra poklapanja proračunatih vrednosti preostalog napona sa vrednostima datim od strane proizvođača.

## 2.2 Pinčeti - Đanetoni - jev model

Na bazi IEEE modela MOP-a Pinčeti i Đanetoni su razvili novi frekventno zavisni model odvodnika koji je prikazan na slici 3 [2]. U odnosu na prethodni model, zanemaren je kapacitet odvodnika  $C_0$ , kao i otpornosti  $R_0$  i  $R_1$  koje su zamenjene otpornikom  $R$  (otpornosti  $1M\Omega$ ) čija je osnovna uloga smanjenje numeričkih oscilacija tokom simulacije. Glavna novina datog modela je u predloženom postupku za određivanje njegovih parametara, koji ne zahteva iterativni proces niti poznavanje geometrijskih osobina odvodnika. Na osnovu električnih veličina datih od strane proizvođača, parametri modela se računaju prema izrazima (6) do (8), gde je  $V_n$ - naznačeni napon odvodnika,  $V_{r(1/T_2)}$ - preostali napon odvodnika pri strujnom talasu  $10kA$  velike strmine  $1/T_2$ ,

$V_{r(8/20)}$ - preostali napon odvodnika pri strujnom talasu 10kA oblika 8/20 $\mu$ s. Nelinearne karakteristike otpornika  $A_0$  i  $A_1$  određuju se prema slici 2.



Slika 3. Pinčeti-Đanetoni-jev model odvodnika prenapona

### 3. Postupak optimizacije parametara MOP-a

Parametre frekvencijski zavisnog modela odvodnika potrebno je odrediti tako da vrednosti proračunatog preostalog napona što manje odstupaju od izmerenih vrednosti datih u katalogu proizvođača odvodnika, pri čemu se parametri mogu optimizovati prema jednom [4] ili većem broju istovremeno primenjenih strujnih talasa [6]. Prema tome kriterijumska funkcija koju je potrebno minimizovati može se definisati na sledeći način [4,6]:

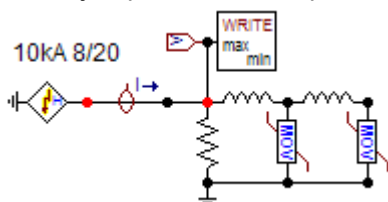
$$KF = \sum_{i=1}^N \left| \frac{V(x)_{r(I_i, T_{1i}/T_{2i})} - V(x)_{rm(I_i, T_{1i}/T_{2i})}}{V(x)_{rm(I_i, T_{1i}/T_{2i})}} \right| \quad (9)$$

gde je:

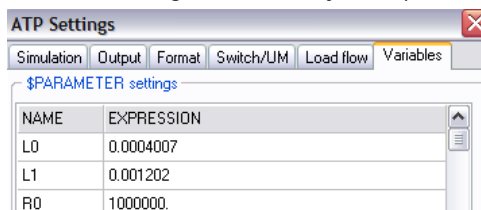
- $N$  – broj primenjenih strujnih impulsa,
- $V(x)_{r(I_i, T_{1i}/T_{2i})}$  – proračunata vrednost preostalog napona za slučaj  $i$ -tog strujnog impulsa (amplitude  $I_i$  i oblika  $T_{1i}/T_{2i}$ ),
- $V(x)_{rm(I_i, T_{1i}/T_{2i})}$  – izmerena vrednost preostalog napona za slučaj  $i$ -tog strujnog impulsa (amplitude  $I_i$  i oblika  $T_{1i}/T_{2i}$ ),
- $x$  – vektor nepoznatih veličina (u slučaju IEEE modela  $x = [L_0, R_0, C_0, L_1, R_1]$ , dok je za Pinčeti-Đanetoni – jev model  $x = [L_0, R, L_1]$ ).

Grafički predprocesor ATPDraw, programskog alata ATP/EMTP, sadrži modul koji omogućava optimizaciju parametara proizvoljno formiranog električnog kola u cilju minimizacije/maksimizacije zadate kriterijumske funkcije. Pomenuti modul može se iskoristiti za optimizaciju kriterijumske funkcije definisane izrazom (9). Optimizacioni modul podržava tri metode optimizacije: gradijentnu metodu i dve heurističke - metode Genetskog algoritma i metoda Simuliranog kaljenja bazirana na algoritmu Nelder-Mead [10]. Za pronalaženje globalnog minimuma/maksimuma ciljne funkcije pogodna je metoda genetskog algoritma, dok se u sledećem koraku može primeniti gradijentna metoda za "preciznije" određivanje rešenja.

Optimizacioni modul pokreće ATP i sprovodi simulacije u cilju minimizacije kriterijumske funkcije prilagođavanjem promenljivih parametara električnog kola. Da bi se postupak optimizacije mogao sprovesti, u kolu mora biti prisutna ciljna funkcija definisana blokom Models-WriteMaxMin (Slika 4), dok je promenjive parametre kola potrebno definisati kao globalne “variable” (Slika 5).

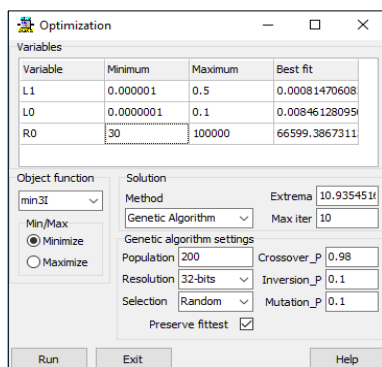


Slika 4. ATP model MOP-a



Slika 5. Parametri modela

Otvaranjem Optimizacionog bloka (Slika 6) iz padajuće liste biraju se parametri kao i odgovarajući opsezi u kojima se vrednosti parametara nalaze.



Slika 6. Optimizacioni modul

Nakon izbora željene ciljne funkcije (ukoliko postoji više od jedne), prethodno definisane blokom Models-WriteMaxMin, potrebno je odabrati metodu optimizacije i podesiti odgovarajuće parametre.

## 4. Rezultati simulacije

Predloženi postupak optimizacije primenjen je na metaloksidnom odvodniku prenapona naznačenog napona 420 kV čiji su proizvođački podaci dati u tabeli 1. Prikazane su maksimalne vrednosti preostalih napona ( $U_{rm}$ ), date od strane proizvođača, za različite talasne oblike primenjenog strujnog impulsa. Pored električnih parametara data je i visina odvodnika ( $d$ ), dok je broj paralelnih kolona metaloksidnih blokova  $n = 1$ .

Tabela 1. Parametri odvodnika prenapona

$U_n$ [kV]	$U_c$ [kV]	$U_{rm}$ [kV]						$d$ [m]
		1/2 $\mu$ s		8/20 $\mu$ s		30/60 $\mu$ s		
		20 kA	3 kA	10 kA	20 kA	0.5 kA	2 kA	
420	335	1371	1086	1104	1162	895	930	4.71

Minimizacijom funkcije (9) određene su optimalne vrednosti parametara oba modela MOP-a. U prvom slučaju optimizacija je sprovedena za svaki strujni talas zasebno, tako da proračunati preostali napon odvodnika što manje odstupa od vrednosti iz Tabele 1 samo za jedan primenjeni strujni talas. Posmatrani su strujni talasi velike strmine (oblika 8/20 $\mu$ s i 1/2 $\mu$ s). U tabelama 2. i 3. prikazane su dobijene optimalne vrednosti parametara za IEEE i Pinčeti-Đanetoni model, respektivno. U svakoj od kolona tabela dati su optimalni parametri za odgovarajući strujni talas naveden u zaglavlju tabele. Inicijalne vrednosti parametara određene su prema izrazima (1-8).

Tabela 2. Parametri IEEE modela za različite strujne talase

Parametri	Inicijalne vrednosti	Optimalne vrednosti (10kA 8/20 $\mu$ s)	Optimalne vrednosti (20kA 8/20 $\mu$ s)	Optimalne vrednosti (3kA 8/20 $\mu$ s)	Optimalne vrednosti (20kA1/2 $\mu$ s)
$L_1$ [ $\mu$ H]	70.65	33.989	24.0073	271.229	69.045
$L_0$ [ $\mu$ H]	0.942	6.6850	2.7133	6.3779	0.195
$R_1$ [ $\Omega$ ]	306.15	61.959	687.27	454.95	283.47
$R_0$ [ $\Omega$ ]	471.0	651.483	1064.089	807.49	936.32
$C_0$ [pF]	21.23	31.773	479.9	247.687	984.92

Tabela 3. Parametri Pinčeti-Đanetoni modela za različite strujne talase

Parametri	Inicijalne vrednosti	Optimalne vrednosti (10kA 8/20 $\mu$ s)	Optimalne vrednosti (20kA 8/20 $\mu$ s)	Optimalne vrednosti (3kA 8/20 $\mu$ s)	Optimalne vrednosti (20kA1/2 $\mu$ s)
$L_1$ [ $\mu$ H]	18.886	0.41834	18.8905	99.040	74.833
$L_0$ [ $\mu$ H]	6.295	0.4579	3.3176	98.25	0.2246
$R_0$ [ $\Omega$ ]	10 <sup>6</sup>	1213.56	172.73	59173971	2123.676

U Tabelama 4. i 5. date su proračunate vrednosti maksimalnog preostalog napona za inicijalne i optimizovane parametre oba modela MOP-a, za sve primenjene strujne talase. Osim vrednosti preostalih napona ( $U_r$ ) data su i njihova relativna odstupanja  $\varepsilon = (U_r - U_{rm})/U_{rm} \cdot 100\%$ . od vrednosti iz Tabele 1 ( $U_{rm}$ ).

Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da se za svaki oblik strujnog talasa parametri modela mogu optimizovati tako da praktično nema odstupanja (blisko nuli) maksimalnih vrednosti preostalog napona.

Tabela 4. Proračunate vrednosti preostalog napona

Model	(10kA 8/20 $\mu$ s)				(20kA 8/20 $\mu$ s)			
	Inicijalne vrednosti		Optimalne vrednosti		Inicijalne vrednosti		Optimalne vrednosti	
	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]
IEEE	1139.3	3.20	1104	~0	1238.9	6.62	1162.2	0.02
Pinčeti-Đanetoni	1124.1	1.82	1104	~0	1215.2	4.58	1162.3	0.03

Tabela 5. Proračunate vrednosti preostalog napona

Model	(3kA 8/20 $\mu$ s)				(20kA 1/2 $\mu$ s)			
	Inicijalne vrednosti		Optimalne vrednosti		Inicijalne vrednosti		Optimalne vrednosti	
	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]
IEEE	1020.5	-6.03	1085.8	-0.01	1368.8	-0.20	1371	~0
Pinčeti-Đanetoni	1019.5	-6.12	1082.0	-0.37	1434.4	4.62	1370.1	-0.06

Model odvodnika najčešće nije potrebno prilagoditi samo jednom strujnom talasu, kako je to rađeno u prethodnom slučaju, već je potrebno da daje zadovoljavajuće rezultate za strujne talase različitih strmina i amplituda. Zbog toga je u sledećem primeru optimizacija parametara MOP-a sprovedena za sve strujne talase istovremeno, tako da proračunati preostali naponi što manje odstupaju od vrednosti iz Tabele 1. za četiri primenjena strujna talasa. Optimizovani parametri modela dobijeni ovakvim postupkom dati su u tabelama 6 i 7.

Tabela 6. Parametri IEEE modela

Parametri	Inicijalne vrednosti	Optimalne vrednosti
$L_1$ [ $\mu$ H]	70.65	34.3866
$R_1$ [ $\Omega$ ]	306.15	1412.57
$L_0$ [ $\mu$ H]	0.942	0.2443
$R_0$ [ $\Omega$ ]	471	1644.53
$C_0$ [pF]	21.23	2903.3

Tabela 7. Parametri Pinčeti-Đanetoni modela

Parametri	Inicijalne vrednosti	Optimalne vrednosti
$L_1$ [ $\mu$ H]	18.886	0.81471
$L_0$ [ $\mu$ H]	6.295	8.46128
$R_0$ [ $\Omega$ ]	$10^6$	1997690.9

Prema proračunatim parametrima (tabele 6 i 7) formirani su modeli odvodnika, na kojima su sprovedene simulacije u cilju određivanja preostalog napona za različite strujne talase. Dobijene maksimalne vrednosti preostalog napona, kao i njihova relativna odstupanja date su u tabeli 8, za oba modela odvodnika.

Kao što se moglo očekivati, ovakvim postupkom nije moguće relativna odstupanja svesti na nulu, ali se ona mogu značajno smanjiti optimizacijom.

Tabela 8. Proračunate vrednosti preostalog napona

Model	(10kA 8/20 $\mu$ s)		(20kA 8/20 $\mu$ s)		(3kA 8/20 $\mu$ s)		(20kA 1/2 $\mu$ s)	
	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]	$U_r$ [kV]	$\varepsilon$ [%]
IEEE	1107.7	0.33	1179.0	1.45	1040.5	-4.20	1366.8	-0.30
Pinčeti- Đanetoni	1113.4	0.85	1197.0	3.00	1018.0	-6.20	1360.3	-0.78

## 5. Zaključak

U radu je demonstriran postupak estimacije parametara dinamičkog modela odvodnika prenapona primenom optimizacionog modula implementiranog u grafičkom predprocesoru ATPDraw-u. Kao optimizacioni metod primenjen je genetski algoritam, dok je kriterijum optimizacije bio minimizacija odstupanja proračunatih i izmerenih maksimalnih vrednosti preostalog napona. Prikazani postupak optimizacije parametara MOP-a korišćenjem ATPDraw-a ima nekoliko prednosti u poređenju sa optimizacionim postupcima koji se mogu naći u literaturi: može se primeniti na bilo koji dinamički model odvodnika, ne zahteva dodatno programiranje, mogu se primeniti različite kriterijumske funkcije. Efikasnost predloženog postupka potvrđuju rezultati simulacija prikazani u tački 4.

Postupak optimizacije može se dalje unaprediti korišćenjem kriterijumske funkcije koja ne uzima u obzir samo maksimalnu vrednost preostalog napona, već i njegov talasni oblik (kada je poznat) i druge električne parametre koje daje proizvođač odvodnika. Osim toga poboljšanje se može ostvariti i ukoliko se estimacija, osim na linearnim elementima modela odvodnika, sprovede i na nelinearnim otpornicima  $A_0$  i  $A_1$ .

## Literatura

- [1] "Modeling of metal oxide surge arresters," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 1, pp. 302-309, Jan 1992. doi: 10.1109/61.108922
- [2] P. Pinceti and M. Giannettoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 393-398, Apr 1999. doi: 10.1109/61.754079
- [3] F. Fernandez, R. Diaz, "Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations", paper 144, *International Conference On Power System Transients*, IPST'01, 20-24 June. 2001.



- [4] P.F. Evangelides, C.A. Christodoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, "Parameters' selection for metal oxide surge arresters models using genetic algorithm", *30th International Conference on Lightning Protection – ICLP 2010*.
- [5] A. Bayadi, "Parameters Calculation of ZnO Surge Arrester Models by Genetic Algorithms", *Journal of Electrical Systems*, 2-3, pp.162-171, 2006.
- [6] C.A. Christodoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, "Estimation of the parameters of metal oxide gapless surge arrester equivalent circuit models using genetic algorithm", *Electric Power System Research*, 81, pp.1881-1886, 2011
- [7] Mehdi Nafar, Gevork Gharehpetian, Taher Niknam, "A novel parameter estimation method for metal oxide surge arrester models", *Indian Academy of Sciences*, Vol. 36, Part 6, pp. 941-961, Dec 2011.
- [8] M. M. Abravesh, A. Sheikholeslami, H. Abravesh and M. Yazdani Asrami, "Estimation of parameters of metal-oxide surge arrester models using Big Bang-Big Crunch and Hybrid Big Bang-Big Crunch algorithms", *Journal of Artificial Intelligence & Data Mining – JAIDM*, vol 4, No 2, pp. 235-241, 2016.
- [9] Andre Meister, Rafael Amaral Shayani, Marco Aurelio Goncalves de Oliveira, "Comparison Of Metal Oxide Surge Arrester Models In Overvoltage Studies" *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 3, No. 11, pp. 35-45, 2011.
- [10] Hans Kristian Hoidalén, Daniel Radu, Delcho Penkov, "Optimization of cost functions in ATPDraw", *European EMTP User Group meeting*, At Delft, Netherlands, September 2009.

**Abstract:** This paper demonstrates the procedure for estimating parameters of a dynamic metal-oxide surge arrester model by using a genetic algorithm, implemented in ATP/EMTP graphic preprocessor (ATPDraw) optimization module. The advantages of new ATPDraw options that allow optimization of electric circuit elements are shown. The optimization process is applied to two frequency-dependent MOSA models. At the end of the work, a comparison of results obtained before and after optimization is given

**Keywords:** optimization, metal-oxide surge arrester (MOSA), dynamic model, ATP/EMTP, genetic algorithm, parameter estimation

## **Optimization of Dynamic MOSA Model Parameters Using ATP/EMTP Software Tool**

Ranko Jasika, Jovan Mrvić, Ninoslav Simić, Ljubiša Čičkarić

Rad primljen u uredništvo: 31.10.2017. godine.

Rad prihvaćen: 09.11.2017. godine.