

CILINDRIČNI SEGMENTI VODIČA KAO SASTAVNICE ELEKTROMAGNETSKOG MODELA

CYLINDRICAL SEGMENT OF WIRING AS A COMPONENT OF ELECTROMAGNETIC MODEL

Zdenko Balaz

Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, Hrvatska

Sažetak

Svi elektroenergetski vodovi mogu se modelirati tehnikom konačnih elemenata ako se nadomjesti cilindričnim segmentima konačne duljine. U praksi oni mogu biti cilindrični segmenti vodiča ukopanih u tlo kao što su: vodiči ukopani iznad kablinskih vodova, ukopani između uzemljivača stupova nadzemnih vodova, vanjski metalni plaševi energetskih kabela i bilo koji goli puni ili šuplji vodič ukopan u tlo. Također i vodiči mrežastog uzemljivača elektroenergetskih objekata mogu se aproksimirati mrežom cilindričnih segmenata vodič.

Cilindrične segmente vodiča u zraku mogu predstavljati zaštitna užad i fazni vodiči nadzemnih vodova a i sam stup nadzemnog voda. U radu je prikazan pristup uvođenja aproksimacija i izračuna impedancija cilindričnih segmenata vodiča modeliranjem tehnikom konačnih elemenata i to Galjerkin-Bubnovovom metodom, koja se primjenjuje na integralnu formulaciju problema u frekvencijskoj domeni. Na tim osnovama razvijen je računalni program koji služi za analizi stanja u elektroenergetskom postrojenjima, te je prezentiran jedan konkretan primjer izračuna.

Ključne riječi: *tehnika, konačni, elementi, cilindrični, segment, impedancija, zrak, tlo,*

Abstract

All power lines can be modeled with finite elements technique if replaced by cylindrical segments of final length. In practice, they may be cylindrical sections of a guide buried in the ground. These guides are buried above the cable lines, between the grounding poles of overhead lines, external metal sheathing of power cables

and any naked full or hollow guide buried in the ground. Also, wires mesh grounding power facilities can be approximated by a network of cylindrical segments guide.

Cylindrical segments wires in the air can be earthing cable lines and the phase conductors of overhead lines and pole overhead line. The paper presents a method of introducing an approximation and calculated impedance of cylindrical segments wires modeling with finite element technique and Bubnov-Galerkin method, which is applied to the integral formulation of the problem in the frequency domain. On this basis is developed a computer program used for the analysis of the electric power plants and a concrete example of the calculation is presented.

Keywords: *technique, the finite elements, the cylindrical segment, impedance, air, soil,*

1. Poprečne impedancije cilindričnih segmenata golih vodiča

1.1 *Transverse impedance cylindrical segments bare conductors*

1.1 Poprečne impedancije segmenata u neograničenom sredstvu

1.1 *Transverse impedance segments in unlimited resources*

Prema tehnici konačnih elemenata, svaki se vodič dijeli na cilindrične segmente konačne duljine. Vlastite i međusobne impedancije segmenata vodiča računaju se po Galjerkin-Bubnovoj metodi, koja se u slučaju vlastitih i međusobnih

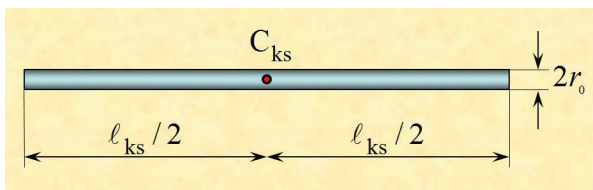
impedancija cilindričnih segmenata vodiča svodi na metodu srednjeg potencijala. Uvode se aproksimacije za struje segmenta, definirane uzdužnom i poprečnom komponentom, uz korištenje tankožičane aproksimacije. U slučaju izračuna vlastitih i međusobnih impedancija segmenata cilindričnih vodiča, uzima se u obzir da vodiči mogu biti u izravnom kontaktu s tлом (goli vodiči), ili su pak od tla odvojeni s jednim ili više izolacijskih slojeva, gdje neki od unutarnjih slojeva može biti vodljiv. Razvijeni elektromagnetski model omogućuje da vodiči i u zraku mogu imati jedan ili više izolacijskih slojeva, [1].

Goli puni vodiči mogu biti različitog oblika. Za pravokutni poprečni presjek, kao što je npr. pocinčana čelična traka, segmenti takvih vodiča se aproksimiraju cilindričnim segmentima po kriteriju istog opsega [2-3]. Vlastita poprečna impedancija cilindričnog segmenta vodiča u homogenom neograničenom sredstvu opisana je izrazom [4]:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{ks,ks}^p &= \bar{Z}_{ks,ks}^{qp} \\ &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \bar{K} \cdot \ell_{ks}^2} \cdot P(\ell_{ks}, r_0) \end{aligned} \quad (1)$$

gdje je:

$$P(\ell, v) = \ell \cdot \ln \frac{\sqrt{\ell^2 + v^2} + \ell}{v} - \sqrt{\ell^2 + v^2} + v \quad (2)$$



Slika 1 Cilindrični segment vodiča u homogenom neograničenom sredstvu

Figure 1 Cylindrical segment conductor in homogeneous unlimited resources

1.1.1 Posebni slučaj paralelnih segmenata

1.1.1 Special case of parallel segments

U posebnom slučaju paralelnosti dvaju segmenata iste duljine (slika 2), njihova međusobna

impedancija u homogenom neograničenom sredstvu opisana je sljedećim izrazom:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{ks,is}^p &= \bar{f}_{ks,is} \cdot \bar{Z}_{ks,is}^{qp} \\ &= \bar{f}_{ks,is} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \bar{K} \cdot \ell_{ks}^2} \cdot P(\ell_{ks}, d) \\ &\equiv \bar{Z}_{is,ks}^{qp} \end{aligned} \quad (3)$$

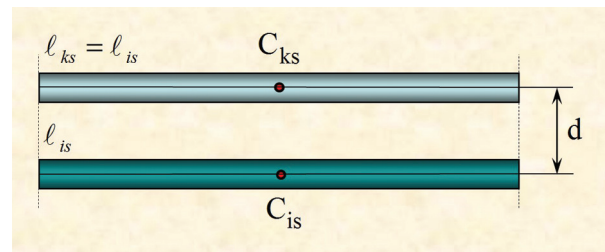
gdje je, u ovom slučaju, prigušno-fazni faktor ks-tog i is-tog segmenta opisan izrazom:

$$\begin{aligned} \bar{f}_{ks,is} &= e^{-\bar{\gamma} \cdot d} \\ \bar{\gamma} &= \sqrt{j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \bar{K}} \end{aligned} \quad (4)$$

U izrazu (3), član $P(\ell_{ks}, d)$ opisan je izrazom (2), dok je:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{ks,is}^{qp} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \bar{K} \cdot \ell_{ks}^2} \cdot P(\ell_{ks}, d) \\ &\equiv \bar{Z}_{is,ks}^{qp} \end{aligned} \quad (5)$$

kvazistatička međusobna poprečna impedancija dvaju paralelnih cilindričnih segmenata vodiča u homogenom neograničenom sredstvu.



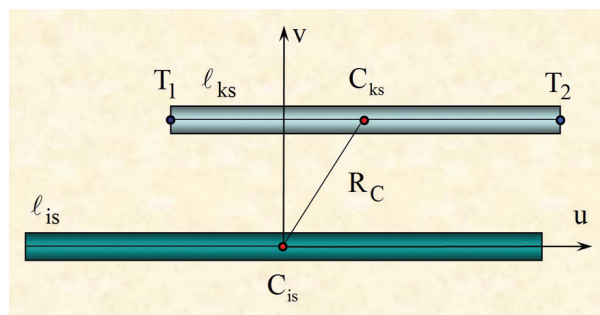
Slika 2 Dva jednaka međusobno paralelna cilindrična segmenta vodiča u homogenom neograničenom sredstvu

Figure 2 Two equal mutually parallel cylindrical conductors segment in a homogeneous unlimited resources

1.1.2 Opći slučaj paralelnih segmenata

1.1.2 General case of parallel segments

U općem slučaju paralelnosti dvaju cilindričnih segmenata vodiča u homogenom neograničenom sredstvu, (slika 3), segmenti se promatraju u lokalnom koordinatnom sustavu (u, v). Za ks-ti segment u tom sustavu krajnje točke is-tog segmenta su: $T_1(u_1, v_{is})$ i $T_2(u_2, v_{is})$.



Slika 3 Dva međusobno paralelna cilindrična segmenta vodiča u homogenom neograničenom sredstvu

Figure 3 Two mutually parallel cylindrical conductors segment in a homogeneous unlimited resources

Izraz za međusobnu poprečnu impedanciju paralelnih cilindričnih segmenata vodiča u homogenom neograničenom sredstvu, (slika 3) glasi:

$$\begin{aligned} {}^n \bar{Z}_{ks, is}^p &= \bar{f}_{ks, is} \cdot {}^{qn} \bar{Z}_{ks, is}^p \\ &= \bar{f}_{ks, is} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \bar{\kappa} \cdot \ell_{is} \cdot \ell_{ks}} \\ &\cdot (C_1 + C_2 - C_3 - C_4) \\ &\equiv {}^n \bar{Z}_{is, ks}^p \end{aligned} \quad (6)$$

gdje je:

$$C_k = w_k \cdot \ln \left(\sqrt{w_k^2 + v_{is}^2} + w_k \right) - \sqrt{w_k^2 + v_{is}^2} \quad (7)$$

$$w_1 = u_2 + \frac{\ell_{ks}}{2} \quad (8)$$

$$w_2 = u_1 - \frac{\ell_{ks}}{2} \quad (9)$$

$$w_3 = u_1 + \frac{\ell_{ks}}{2} \quad (10)$$

$$w_4 = u_2 - \frac{\ell_{ks}}{2} \quad (11)$$

dok je, u ovom slučaju, prigušno-fazni faktor:

$$\begin{aligned} \bar{f}_{ks, is} &= e^{-\bar{\gamma} \cdot R_C} \\ \bar{\gamma} &= \sqrt{j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \bar{\kappa}} \end{aligned} \quad (12)$$

gdje je, R_C udaljenost između središnjih točaka is-tog i ks-tog segmenta.

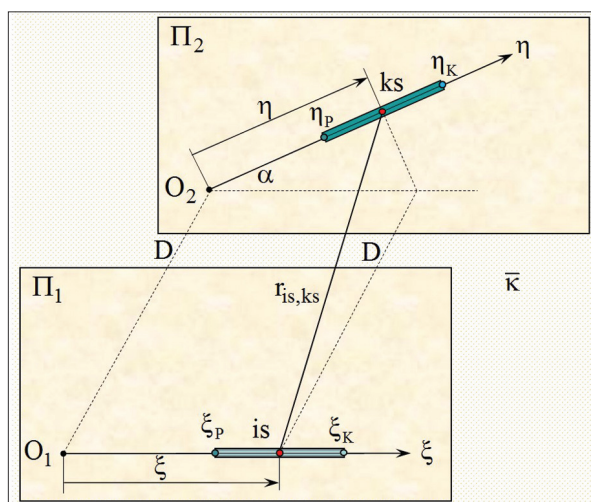
Prema (6), kvazistatička međusobna poprečna impedancija dvaju cilindričnih segmenata vodiča u homogenom neograničenom sredstvu, u općem slučaju paralelnosti (slika 3), glasi:

$$\begin{aligned} {}^{qn} \bar{Z}_{ks, is}^p &= \\ &= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \bar{\kappa} \cdot \ell_{is} \cdot \ell_{ks}} \cdot (C_1 + C_2 - C_3 - C_4) \quad (13) \\ &\equiv {}^{qn} \bar{Z}_{is, ks}^p \end{aligned}$$

1.1.3 Slučaj ne paralelnih segmenata - inženjerski pristup modeliranju

1.1.3 Case with no parallel segments - engineering approach to modeling

Slučaj kada su dva cilindrična segmenta vodiča neparalelna, što znači da mogu biti međusobno kosa ili okomita, predstavlja poseban izazov za pristup kod inženjerskog modeliranja. U kontekstu modeliranja tehnikom konačnih elemenata za ovaj slučaj, kada ga promatramo kao beskonačno mali konačni element, postoji jedan i samo jedan par međusobno paralelnih ravnina u kojima ti segmenti leže (slika 4). U tom posebnom slučaju, te dvije ravnine se teorijski mogu preklapati pa tada neparalelni segmenti leže u istoj ravnini. Ta je paradigma u stvari pravi inženjerski izazov pristupu za matematičko modeliranje.



Slika 4 Dva neparalelna cilindrična segmenta vodiča u homogenom neograničenom sredstvu

Figure 4 Two parallel cylindrical conductors segment in a homogeneous unlimited resources

Međusobna poprečna impedancija neparalelnih cilindričnih segmenata vodiča u homogenom neograničenom sredstvu kompleksne provodnosti $\bar{\kappa}$ (slika 4), definirana po metodi srednjeg potencijala, opisana je izrazom:

$$\begin{aligned} {}^n \bar{Z}_{ks, is}^p &= \bar{f}_{ks, is} \cdot {}^{qn} \bar{Z}_{ks, is}^p = \\ & \bar{f}_{ks, is} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \bar{\kappa} \cdot \ell_{is} \cdot \ell_{ks}} \int_{\xi_p}^{\xi_k} \int_{\eta_p}^{\eta_k} \frac{d\xi \cdot d\eta}{r_{is, ks}} \quad (14) \\ & \equiv {}^n \bar{Z}_{is, ks}^p \end{aligned}$$

gdje vrijedi da je međusobna udaljenost između točaka na osima segmenata, (slika 4):

$$r_{is, ks} = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + D^2 - 2 \cdot \xi \cdot \eta \cdot \cos \alpha} \quad (15)$$

dok je razmak između međusobno paralelnih ravnina u kojima leže segmenti, α kut između pravaca na kojima leže segmenti, ξ udaljenost promatrane točke na osi is-tog segmenta od ishodišta O_1 , η udaljenost promatrane točke na osi ks-tog segmenta od ishodišta O_2 .

Nakon provedene dvostruke integracije naznačene u izrazu (14), može se dobiti sljedeći izraz poznat pod imenom Cejtinova formula, [4]:

$$\begin{aligned} {}^n \bar{Z}_{ks, is}^p &= \bar{f}_{ks, is} \cdot {}^{qn} \bar{Z}_{ks, is}^p \\ &= \bar{f}_{ks, is} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \bar{\kappa} \cdot \ell_{is} \cdot \ell_{ks}} \cdot \\ & \left[A(\xi_p, \eta_p) + A(\xi_k, \eta_k) \right. \\ & \left. - A(\xi_p, \eta_k) - A(\xi_k, \eta_p) \right] \quad (16) \end{aligned}$$

gdje je:

$$\begin{aligned} A(\xi, \eta) &= \xi \cdot \ln(\eta - \xi \cdot \cos \alpha + r_{is, ks}) \\ &+ \eta \cdot \ln(\xi - \eta \cdot \cos \alpha + r_{is, ks}) \quad (17) \\ &+ \frac{2 \cdot D}{\sin \alpha} \cdot \arctg \left(\frac{\xi + \eta + r_{is, ks}}{D} \cdot \tg \frac{\alpha}{2} \right) \end{aligned}$$

dok je prigušno-fazni faktor $\bar{f}_{ks, is}$ opisan izrazom (12).

Prema (16), kvazistatička međusobna poprečna impedancija dvaju cilindričnih neparalelnih segmenata vodiča u homogenom neograničenom sredstvu (slika 4), glasi:

$$\begin{aligned} {}^{qn} \bar{Z}_{ks, is}^p &= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \bar{\kappa} \cdot \ell_{is} \cdot \ell_{ks}} \cdot \\ & \left[A(\xi_p, \eta_p) + A(\xi_k, \eta_k) \right. \\ & \left. - A(\xi_p, \eta_k) - A(\xi_k, \eta_p) \right] \quad (18) \end{aligned}$$

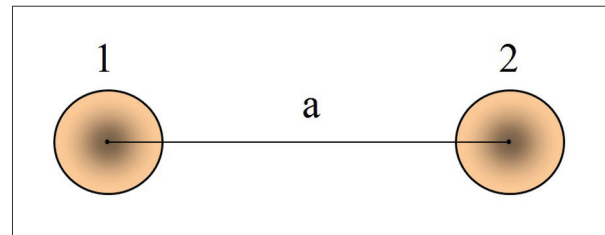
Ovim primjerom je pokazano kako od beskonačno malog razmaka između međusobno paralelnih

ravnina u kojima leže segmenti, dolazimo do promatrane točke kojom se definira obrada segmenata dvostrukom integracijom za izračun potrebnih parametara. Paradigma je izazov svakom kreativnom inženjerskom pristupu koji počiva na tehnici konačnih elemenata a koja, (tehnika kao način razmišljanja), može biti uporabljena i za slična rješavanja.

1.1.4 Poprečne impedancije segmenata snopa golih nadzemnih vodiča

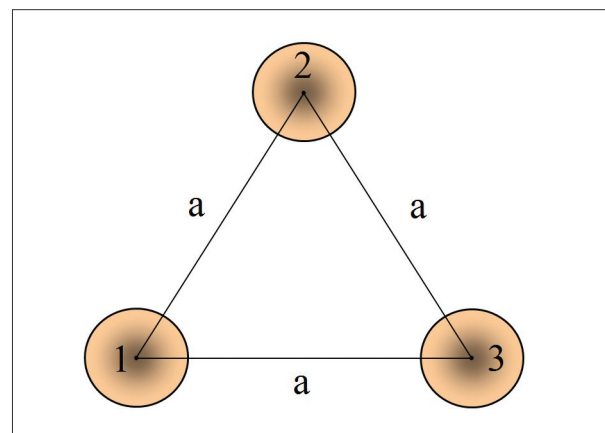
1.1.4 *Transverse impedance beam segments of bare wire lines*

U daljnjoj razradi uvedenih aproksimacija korisno je razmotriti i slučajeve vodiča u snopu. Kod visokonaponskih nadzemnih vodova svaka pojedina faza može imati i više cilindričnih vodiča u snopu. U razvijenom računalnom programu [1], moguće je uzeti u račun dva vodiča u snopu (slika 5), tri simetrično raspoređena vodiča u snopu (slika 6) i četiri simetrično raspoređena vodiča u snopu (slika 7).



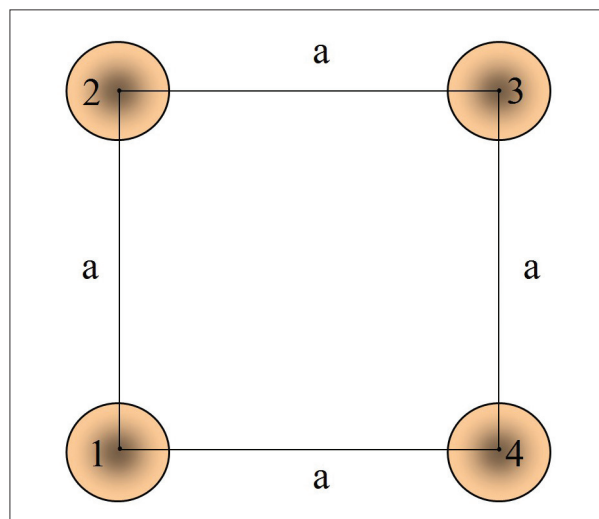
Slika 5 Dva vodiča u snopu

Figure 5 Two wadded conductors



Slika 6 Tri simetrično raspoređena vodiča u snopu

Figure 6 Three symmetrically arranged wadded conductors



Slika 7 Četiri simetrično raspoređena vodiča u snopu

Figure 7 Four symmetrically arranged wadded conductors

Uvedenom aproksimacijom, međusobne poprečne impedancije snopa vodiča i ostalih sastavnica elektromagnetskog modela, računaju se tako da se segment snopa vodiča nadomjesti segmentom jednog nadomjesnog vodiča u središtu snopa. Vlastita poprečna impedancija ks-tog segmenta snopa vodiča računa se tada prema izrazu:

$$\bar{Z}_{ks,ks}^p = \frac{\bar{Z}_{11}^p + \sum_{i=2}^n \bar{Z}_{i1}^p}{n} \quad (19)$$

gdje je:

n - ukupan broj vodiča u segmentu snopa vodiča,

\bar{Z}_{11}^p - vlastita poprečna impedancija segmenta vodiča broj 1 u ks-tom segmentu snopa vodiča,

\bar{Z}_{i1}^p - međusobna poprečna impedancija segmenta vodiča broj 1 i segmenta i-tog vodiča u ks-tom segmentu snopa vodiča.

Na isti se način uvode aproksimacije i provodi izračun uzdužnih impedancija cilindričnih segmenata vodiča i ostalih sastavnica elektromagnetskog modela. Izračun uzdužnih vlastitih impedancija segmenata vodiča može se provoditi za sve tipove vodiča, (puni kružni, cilindrični, višeslojni, kvadratni,...). Tada se analiza provodi preko jediničnih unutarnjih impedancija segmenta. Taj dio problematike rješava se za puni cilindrični vodič izračunima

pomoću Besselovih funkcija, a za šuplji pomoću Neumannovih funkcija, [1].

2. Rezultati proračuna prema uvedenom modeliranju

2. Results of calculations according to this modeling

Na temelju provedenog modeliranja izrađen je računalni program za koji je na konkretnom primjeru pripremljena množina osnovnih ulaznih podataka. Oni obuhvaćaju elektroenergetske objekte za koje se kreiraju modeli pomoću segmenata vodiča, (tablica 1). Količina ulaznih podataka odnosi se na konkretno distribucijsko područje površine trideset kvadratnih kilometara s preko dvjesto elektroenergetskih objekata.

Tablica 1 Podaci elektroenergetskih objekata i segmenata vodiča korišteni u analizi odabranog područja

Table 1 Data of power facilities and segments of the conductors used in the analysis of the selected area

Komponenta	Br. komada
Ukupan broj uzemljivača	175
Ukupan broj uzemljivača 110 kV transformatorskih stanica	3
Ukupan broj uzemljivača stupova 110 kV voda	167
Ukupan broj uzemljivača dvosustavnih 110 kV stupova	25
Ukupan broj uzemljivača jednosustavnih 110 kV stupova	142
Ukupan broj uzemljivača TS 10 (20) / 0,4 kV	2
Ukupan broj uzemljivača stupova 10 (20) kV voda	2
Ukupan broj segmenata Cu uzemljivačkog užeta	36
Ukupan broj segmenata jednožilnih kabela	114
Ukupan broj segmenata 35 kV jednožilnih kabela	27
Ukupan broj segmenata 10 (20) kV jednožilnih kabela	87

Ukupan broj tipova nadzemnih vodiča	2
Ukupan broj segmenata nadzemnih vodiča	751
Ukupan broj segmenata faznih vodiča	582
Ukupan broj segmenata zaštitnih užadi	169

Izvor: HOPS-Hrvatski operator prijenosnog sustava, Prijenosno područje Split: Osnovna shema elektroenergetskih objekata Dalmacije, Služba za upravljanje područnom mrežom, Odjel za pogon, analizu i poslovne informacije, Split, 2014.

Source: HOPS - Croatian Transmission System Operator, Transmission area of Split: The basic scheme of power facilities Dalmatia Management Service regional network, the Department of operation, analysis and business information, Split, 2014.

U kontekstu kreacije specijalističkog računalnog programa navedeno modeliranje dio je cjelokupno razvijene teorije koja među sastavnicama elektromagnetskog modela obrađuje vlastite i međusobne poprečne i uzdužne impedancije cilindričnih segmenata vodiča. Teorija započinje razradom stanja u

4. Reference

4. References

- [1] Balaž Z.; Elektromagnetski model za izračun raspodjele struje zemljospoja; Doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, Hrvatska, rujan 2015.
- [2] Kurtović M.; Vujević S.; "Earthing Grid Parameters with Conductor Surrounded by an Additional Substance", IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 147, No. 1, pp. 57-61, 2000.
- [3] Vujević S.; Kurtović M.; "Utjecaj dodatnog materijala u kanalu na parametre uzemljivača", Četvrto savjetovanje HK CIGRE, pp. 151-160, Cavtat, 1999.
- [4] Sarajčev P., "Elektromagnetski model sustava vodiča u višeslojnom sredstvu", Doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu, FESB, Split, 2008.
- [5] Vujević S.; Lucić R.; Jurić-Grgić I.; Lovrić D.; Modrić T.; Balaž Z.; "Izrada pravila i mjera sigurnosti za osiguranje mjesta rada na elektroenergetskim vodovima", HEP Operator prijenosnog sustava d.o.o., Prijenosno područje Split, Sveučilište u Splitu, FESB, Split, 2013.
- [6] Balaž Z.; Vujević S.; Lucić R.; Bernardić A.; "Razvoj ekspertnog sustava za optimizaciju elektroenergetskog sustava Hrvatskih autocesta", Zbornik 18. međunarodnog simpozija EIS 2009, , Elektrotehničko društvo Zagreb, pp. (S-10) 16- 20, Šibenik, 2009.
- [7] Ibrahim A. I.; "An Intelligent Support System for the Analysis of Power System Transients", Dissertation, The University of British Columbia, Vancouver, 2000.
- [8] Vujević S.; Sarajčev I.; Lucić R.; "Priručnik pogonske dokumentacije, planova i rokova pregleda i održavanja elektroenergetskih postrojenja HAC-a", Dokumentacija br.: 01-143/3-89-2004, Sveučilište u Splitu, FESB, Split, 2004.
- [9] Sarajčev I.; Vujević S.; Lucić R.; "Program ispitivanja prijelaznih stanja u 35 kV postrojenju TS 35/20 (10) kV Obrovac", Sveučilište u Splitu, FESB, Split, 2004.

neograničenom sredstvu a konkretizira ga za dvoslojno sredstvo tlo i zrak metodom kvazistatičkog odslikavanja, [1].

3. Zaključak

3. Conclusion

U radu je prezentiran pristup pri modeliranju komponenti za razvoj računalnog programa koji je korišten u opširnoj studiji za izradu pravila i mjera sigurnosti prilikom rada na elektroenergetskim vodovima, [5]. U preko dvjesto obrađenih primjera pogonskih stanja i kvarova na 35 kV, 110 kV i 220 kV nadzemnim vodovima, kabelskim vodovima i podmorskim kabelima posebno je analiziran utjecaj konduktivne sprege. Provjerom izračuna, obradom i razvrstavanjem dobivenih rezultata koji su se odlično potvrdili, kreirane su vlastite baze znanja i baze podataka ekspertnog sustava [6], uspoređivani s obradama srodnih ekspertnih sustava [7]. Računalni program je korišten i za rješavanje elektroenergetske problematike povezane s gradnjom hrvatskih autocesta [8-14].

- [10] Gazivoda S.; Rožanković S.; Nujić I.: “Mjerenje sklopnih prenapona u TS 35/20 (10) kV Obrovac”, Končar - Zagreb, VN Laboratorij, Zagreb, 2005.
- [11] Balaž Z.; Sarajčev I.; Vujević S.; Lucić R.; “Utjecaj električnih mreža Hrvatskih autocesta na distribucijske mreže”, Zbornik radova 16. međunarodnog simpozija EIS 2008, Elektrotehničko društvo Zagreb, pp. (S-5) 7-12, 2008.
- [12] Balaž Z.; Vujević S.; Lucić R.; “Problemi u elektroenergetskom napajanju Tunela Sveti Rok”, Zbornik radova Prvog savjetovanja Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije - CIRED, Šibenik, pp. (SO1-17) 1-10, 2008.
- [13] Balaž Z.; “Tehno-ekonomski aspekti pouzdanog napajanja električnom energijom objekata hrvatskih autocesta”, Elaborat, HAC, Sektor za projektiranje i razvoj, Zagreb, 2009.
- [14] Vujević S.; Lucić R.; Tadin F., “Elektromagnetski utjecaj i elektromagnetska kompatibilnost u objektima Hrvatskih autocesta – utjecaj TS 400/220/110 kV Konjsko na instalacije i objekte autoceste Zagreb – Split, dionica Prgomet – Dugopolje, u Tunelu Konjsko i njegovoj okolini”, Sveučilište u Splitu, FESB, Split 2004.

AUTORI · AUTHORS

Zdenko Balaž – nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 4, No. 2, 2016.

Korespondencija

zbalaz@tvz.hr