

# NAPONSKE PRILIKE UZDUŽ SAMONOSIVOG OPTIČKOG KABELA OVJEŠENOG NA STUPOVE VISOKONAPONSKOG VODA

Prof. dr. sc. Mislav Majstrovic, dipl. ing.  
Petar Sarajcev, dipl. ing.

U novije vrijeme došlo je do demonopolizacije u elektroenergetskom i telekomunikacijskom sektoru, što je dodatno otežalo dobivanje novih ili proširenje postojećih koridora. Zbog toga se sve češće optički kabeli postavljaju na stupove visokonaponskih vodova. Ovi kabeli se nalaze u jakom električnom polju, pa svako onečišćenje njihovog plašta može dovesti do oštećenja istih. U članku se analiziraju naponske i strujne prilike uzduž onečišćenog plašta samonosivog optičkog kabela bez metalnih dijelova, koji je ovješena na čeličnoretkastu stupove visokonaponskog voda.

Ključne riječi: dalekovod, optički kabel, napon, suha zona, preskok

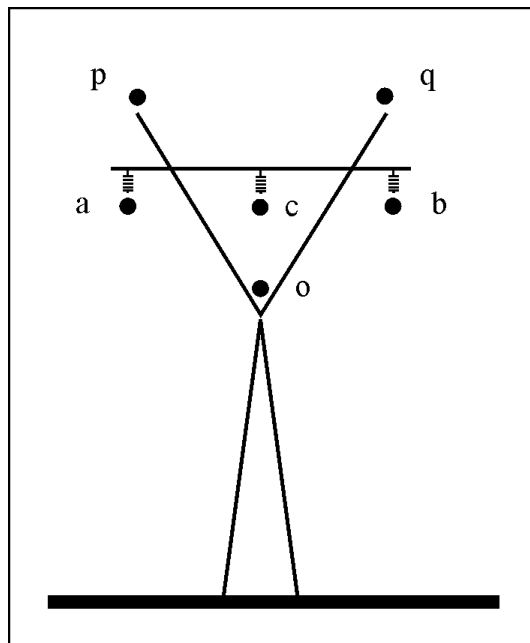
## 1. UVOD

Zamjenom klasičnih telekomunikacijskih vodova (vodovi s metalnim vodičima (paricama)) s optičkim (bez metalnih dijelova) izostaje poznati elektromagnetski utjecaj elektroenergetskih vodova na vodove telekomunikacija. Zbog toga se danas oni često postavljaju relativno blizu visokonaponskih vodova. U nekim zemljama može ih se naći i na stupovima dalekovoda. Očekuje se da će u budućnosti ovakav način polaganja naći sve veću primjenu zbog ograničenosti prostora i sve težeg dobivanja pripadnih koridora. Intencija će biti da se postojeći koridori iskoriste maksimalno kako u energetskom tako i telekomunikacijskom pogledu tj. da se jedan koridor koristi za obje namjene. Današnja tehnološka dostignuća omogućavaju izradu optičkih kabela bez metalnih dijelova (engl.: all-dielectric self-supporting - ADSS) kojima se mogu savladati rasponi, ovisno o dodatnom teretu, od 800 do 1000 m. Posebna pozornost treba biti posvećena kod postavljanja ovih kabela na stupove visokonaponskih dalekovoda naročito u sredinama u kojima se javljaju prirodna i/ili umjetna onečišćenja ([2, 3, 4]). Onečišćenje plašta optičkog kabela nastaje taloženjem čestica nečistoće na njegovoj površini i pritom se formira jedana tanka naslaga. Ovisno o njevoj strukturi i vremenskim uvjetima (vlažnosti zraka) ona postaje manje ili više vodljiva. Pri povećanoj vodljivosti ona postaje vodič drugog reda (ima svojstva elektrolita). S obzirom da se nalazi u električnom polju visokonaponskog voda, njome će teći uzdužna struja. Ova struja će biti veća što je veća vodljivost naslage i uzrokovati će Jul-ove gubitke u istoj. Zbog toga će doći do njenog zagrijavanja, a potom i sušenja. Sušenje je diskontinuirano, što dovodi do toga da se uzduž plašta optičkog kabela javljaju suhe zone na kojima se javljaju razlike potencijala. Ove razlike potencijala mogu biti takvog iznosa da uzrokuju preskoke preko pripadnih suhih zona. Ovisno o lokalnim uvjetima, spomenuti se parcijalni preskoci mogu spontano ugastiti ili mogu prerasti u veći električni luk. U ovom radu će se analizirati elektrostatski utjecaj faznih vodiča visokonaponskog dalekovoda na optički kabel kojem je onečišćen plašt. Fazni vodiči, dozemna užad i optički kabel su ovješeni na istim stupovima. Prezentirat će se razvijeni matematički model koji

omogućava proračun naponskih prilika uzduž onečišćenog plašta optičkog kabela. Na temelju ovog proračuna mogu se odrediti naponska naprezanja suhih zona, te tokovi struja i radni gubici snage (Jul-ovi gubici) uzduž plašta optičkog kabela.

## 2. MATEMATIČKI MODEL

Potencijal na onečišćenom plaštu optičkog kabela javlja se usljed kapacitivne sprege između faznih vodiča i optičkog kabela. Ovi kapaciteti se određuju koristeći se pripadnom matricom potencijalnih koeficijenata **P**. Dimenzija ove kvadratne matrice jednaka je ukupnom broju vodiča koji utječu na električno polje u prostoru dalekovoda (fazni vodiči, dozemna užad i ADSS optički kabel s onečišćenim plaštem). Prepostavi li se da dalekovod ima dva dozemna užeta (Slika 1) slijedi da su elementi ove matrice, ([5]):



Slika 1 Dalekovod s dva dozemna užeta i onečišćenim optičkim kabelom

- dijagonalni elementi

$$P_{ii} = 18 \cdot 10^9 \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad \left[ \frac{V_m}{As} \right] \quad (1)$$

$i = a, b, c, o, p, q.$

gdje je:

$h_i$  - visina i-tog vodiča nad zemljom,

- $r_i$  - radius i-tog vodiča
- a, b, c - fazni vodiči,
- p, q - dozemna užad,
- o - ADSS optički kabel s onečišćenim plaštom,

- vandijagonalni elementi

$$P_{ik} = 18 \cdot 10^9 \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \quad \left[ \frac{Vm}{As} \right] \quad (2)$$

$i = a, b, c, o, p, q.$   
 $k = a, b, c, o, p, q.$   
 $i \neq k$

gdje je:

- $d_{ik}$  - udaljenost između i-tog i k-tog vodiča,
- $D_{ik}$  - udaljenost između i-tog vodiča i zrcalne slike k-tog vodiča.

Slijedi da su naponi vodiča

$$\mathbf{V}^{abcopq} = \mathbf{P}^{abcopq} \cdot \boldsymbol{\lambda}^{abcopq} \quad (3)$$

gdje je:

- $\mathbf{P}^{abcopq}$  - matrica potencijalnih koeficijenata vodiča,
- $\boldsymbol{\lambda}^{abcopq}$  - stupčana matrica linijskih gustoća naboja vodiča.

Budući da su dozemna užad uzemljena na svakom stupu (njihovi naponi su jednaki nuli ( $\mathbf{V}^{pq} = \mathbf{0}$  (V))) slijedi da je:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}^{abco} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_I & \mathbf{P}_{II} \\ \mathbf{P}_{III} & \mathbf{P}_{IV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}^{abco} \\ \boldsymbol{\lambda}^{pq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Transformacijom ove matrične jednadžbe dobija se:

$$\mathbf{V}^{abco} = \mathbf{P}^{abco} \cdot \boldsymbol{\lambda}^{abco} \quad (5)$$

gdje je

$$\mathbf{P}^{abco} = \mathbf{P}_I - \mathbf{P}_{II} \cdot \mathbf{P}_{IV}^{-1} \cdot \mathbf{P}_{III} \quad (6)$$

Matrica kapacitivnih koeficijenata po jedinici duljine je:

$$\mathbf{K}^{abco} = (\mathbf{P}^{abco})^{-1} \quad (7)$$

Budući da je poznata matrica kapacitivnih koeficijenata slijedi da su:

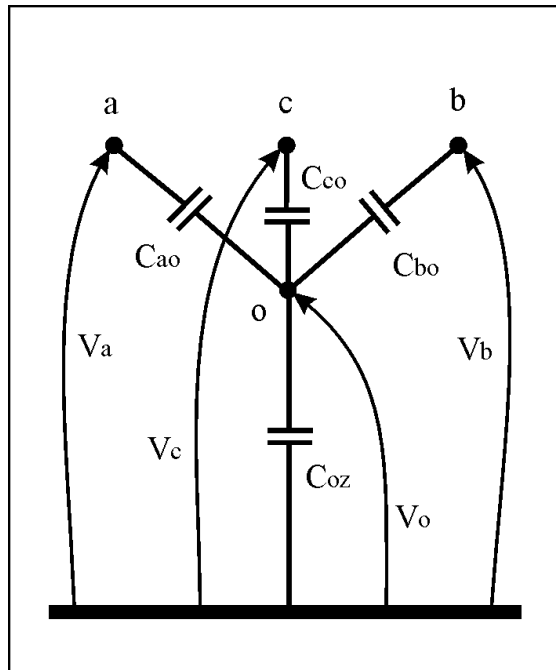
- međusobni kapaciteti po jedinici duljine:

$$\begin{aligned} C_{ij} &= -K_{ij} \\ i &= a, b, c, o. \\ j &= a, b, c, o. \\ i &\neq j \end{aligned} \quad (8)$$

- dozemni kapaciteti po jedinici duljine:

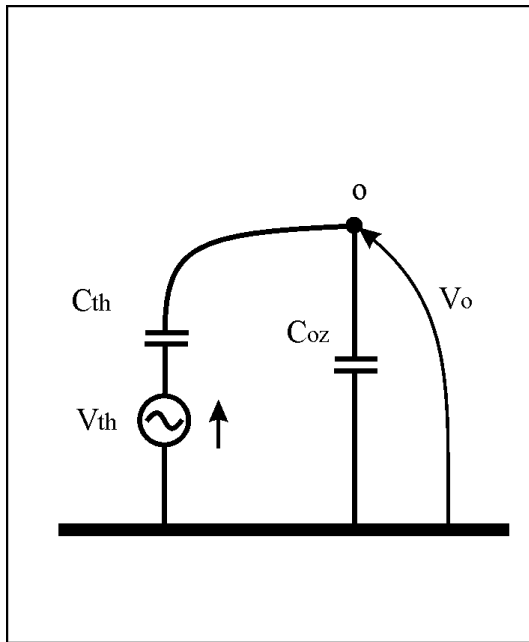
$$\begin{aligned} C_{iz} &= \sum_{j=a}^o K_{ij} \\ i &= a, b, c, o. \end{aligned} \quad (9)$$

Utjecaj faznih vodiča (a,b i c) na optički kabel s onečišćenim plaštem prikazan je na Slici 2.



Slika 2 Kapacitivna veza faznih vodiča i optičkog kabela s onečišćenim plaštem

U skladu s Millman-ov teoremom utjecaj faznih vodiča može se prikazati pomoću Thevenin-ovog ekvivalenta (Slika 3).



Slika 3 Kapacitivna veza optičkog kabela s onečišćenim plaštem i Thevenin-ovog ekvivalentna faznih vodiča

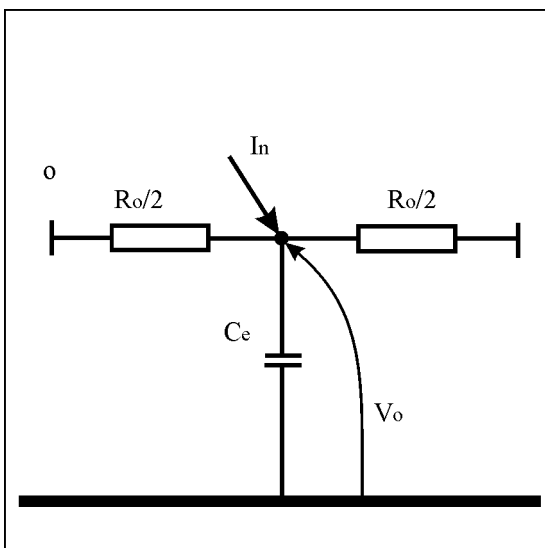
Pritom je:

$$V_{th} = \frac{V_a C_{ao} + V_b C_{bo} + V_c C_{co}}{C_{ao} + C_{bo} + C_{co}} \quad (10)$$

Odnosno

$$C_{th} = C_{ao} + C_{bo} + C_{co} \quad (11)$$

Nadomjesna shema dionice optičkog kabela jedinične duljine prikazana je na slici 4. Pritom je Thevenin-ov ekvivalent prikazan pomoću Norton-ovog ekvivalenta.



Slika 4 Nadomjesna shema jedinične duljine optičkog kabela s onečišćenim plaštem

Nepoznate veličine na slici određuju se pomoću slijedećih izraza:

$$I_n = j 2 \pi f C_{th} V_{th} \quad (12)$$

i

$$C_e = C_{th} + C_{oz} \quad (13)$$

$R_o$  je uzdužni radni otpor onečišćenog plašta optičkog kabela po jedinici duljine ( $\Omega/m$ ).

Da bi dobili što vjerniju sliku o naponskom i strujnom stanju na onečišćenom plaštu optičkog kabela duž jednog raspona isti će se podijeliti na  $n$  dionica. Na plaštu optičkog kabela može postojati jedna ili više suha zona. Na tim mjestima dolazi do porasta uzdužnog otpora (teoretski do beskonačne vrijednosti). Na slici 5 prikazana je nadomjesna shema optičkog kabela s onečišćenim plaštem duž jednog raspona s jednom suhom zonom. Pritom je:

$$R'_o = R_o \cdot \ell_d \quad (14)$$

$$C'_e = C_e \cdot \ell_d \quad (15)$$

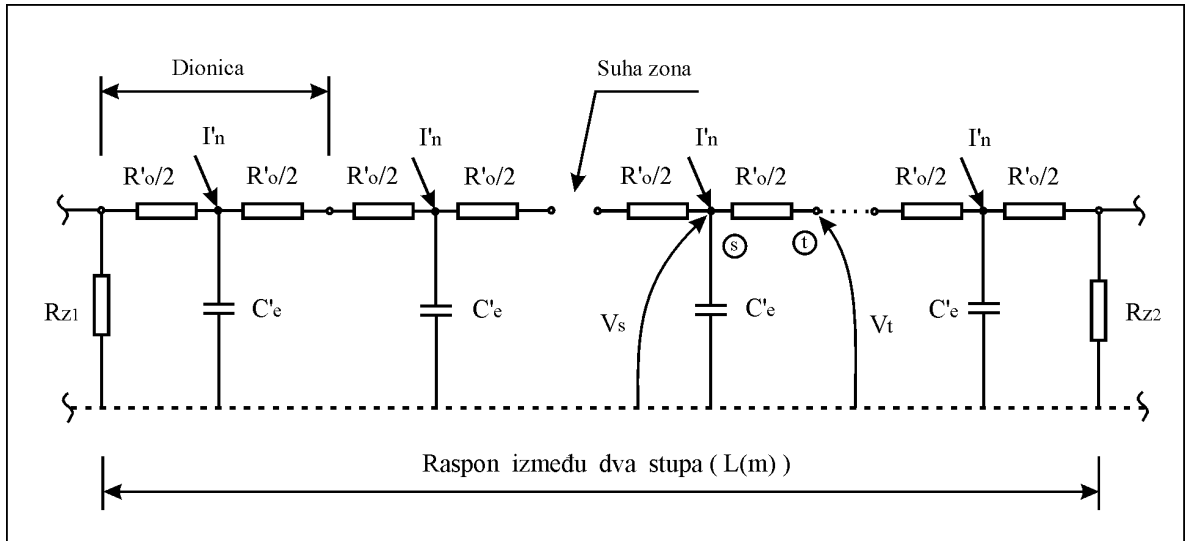
$$I'_n = I_n \cdot \ell_d \quad (16)$$

gdje je:

$\ell_d$  - duljina dionice, (m),

$R_{z1}$  - otpor između onečišćenog plašta optičkog kabela i referentne osi na lijevoj strani raspona, ( $\Omega$ ),

$R_{z2}$  - otpor između onečišćenog plašta optičkog kabela i referentne osi na desnoj strani raspona, ( $\Omega$ ).



Slika 5 Nadomjesna shema jednog raspona

Raspodjela napona duž optičkog kabela određuje se slijedećom matričnom jednažbom.

$$\mathbf{V}_c = \mathbf{Y}_c^{-1} \cdot \mathbf{I}_c \quad (17)$$

gdje je:

$\mathbf{V}_c$  - vektor napona čvorova, (V),

$\mathbf{Y}_c$  - matrica vlastitih i međusobnih admintancija čvorova, (S),

$\mathbf{I}_c$  - vektor struja čvorova, (A).

Ako je dobivena vrijednost napona na suhoj zoni veća od vrijednosti koja odgovara probojnoj čvrstoći zraka doći će do njegovog proboja, odnosno do preskoka.

Raspodjela struja koje teku onečišćenim plaštem optičkog kabela može se lako odrediti. Tako je ona za element s - t (slika 5):

$$I_{s-t} = 2 \frac{V_s - V_t}{R_o'} \quad (18)$$

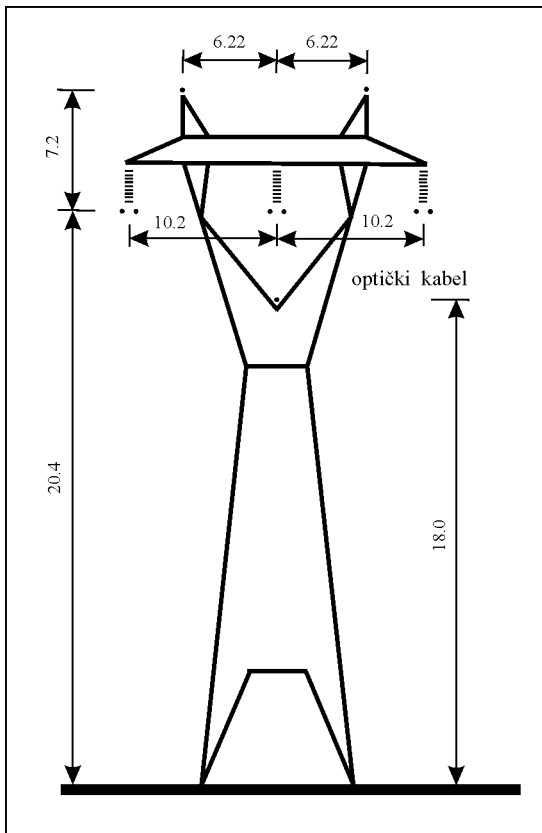
gdje su  $V_s$  i  $V_t$  naponi čvorova s i t između kojih se nalazi otpor  $R_o' / 2$ .

Gubitak radne snage na ovom elementu je:

$$\Delta P_{s-t} = |I_{s-t}| \cdot \frac{R_o'}{2} \quad (19)$$

### 3. PRIMJER

Izložena teorija primijenit će se na jednom konkretnom primjeru. Odabran je ADSS optički kabel tvrtke Alcatel tipa R-LT-144-A2J-SX. Isti je postavljen na čelično rešetkasti stup oblika "Y" 400 kV dalekovoda (slika 6).

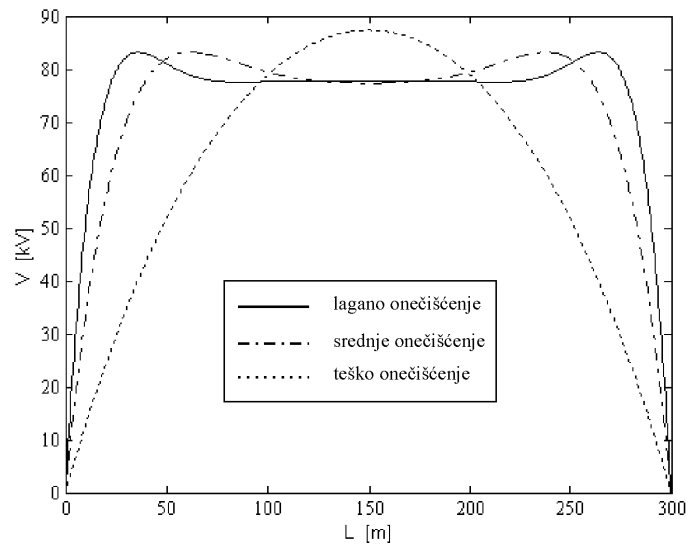


Slika 6 Silueta stupa DV 400 kV s ADSS optičkim kabelom

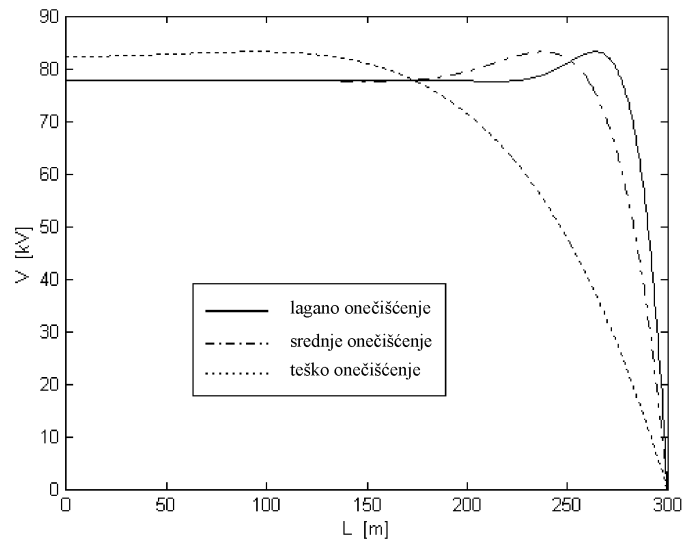
Fazni naponi vodiča su:

$$\begin{aligned} V_a &= 242 \angle 0^\circ & (\text{kV}) \\ V_b &= 242 \angle 240^\circ & (\text{kV}) \\ V_c &= 242 \angle 120^\circ & (\text{kV}) \end{aligned} \quad (20)$$

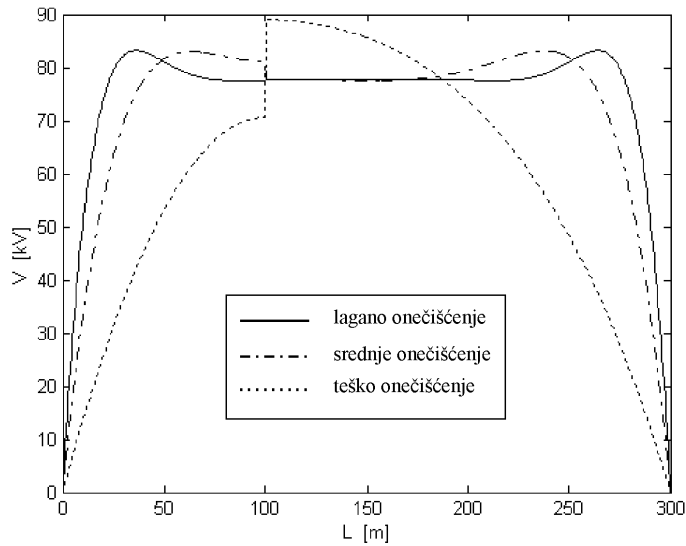
Analizirane su naponske prilike kod tri razine onečišćenja plašta optičkog kabela ( lagano ( 3 (MΩ/m)), srednje ( 1 (MΩ/m)) i teško ( 0.1 (MΩ/m))). Pritom su razmatrana tri slučaja: onečišćenje je kontinuirano - bez suhe zone (slika 7), suha zona je na početku raspona (slika 8) i suha zona je na prvoj trećini raspona (slika 9). Budući da je ukupni radni otpor prema referentnoj osi znemarivo malen u usporedbi s uzdužnim u ovom primjeru je uzeto da je:  $R_{z1} = 0$  (Ω) i  $R_{z2} = 0$  (Ω). U skladu s tim analiza naponskih prilika uzduž ukupne dužine voda se svodi na analizu naponskih prilika u jednom rasponu.



Slika 7 Raspodjela napona duž onečišćenog plašta optičkog kabela - bez suhe zone



Slika 8 Raspodjela napona duž onečišćenog plašta optičkog kabela - suha zona je na početku raspona



Slika 9 Raspodjela napona duž onečišćenog plašta optičkog kabela - suha zona je na prvoj trećini raspona

Analizirajući prethodne grafove uočava se da je u ovom primjeru najveći porast napona na krajevima raspona, te na mjestima suhih zona.

#### 4. ZAKLJUČAK

Razvijeni matematički model omogućava proračun naponskih prilika uzduž onečišćenog plašta samonosivog optičkog kabela bez metalnih dijelova koji je ovješena na stupove viskonaponskog voda. Analiza naponskih prilika u funkciji intenziteta zagađenja, te o mjestu nastanka i veličini suhih zona je relativno jednostavna. Na temelju ovih analiza može se zaključiti o vjerojatnostima pojave parcijalnih preskoka.

#### LITERATURA

- [1] IEC T. C. 33: Guide for the selection of insulators in respect of polluted condition, Geneve, 1983.
- [2] Karady G., Devarajan S., Tuominen M.: Novel Technique to Predict Dry-Band Arcing Failure of Fiber-Optic Cables Installed on High Voltage Lines, IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, 1999.
- [3] George G. Karady, Gyula Besztercey, Monty W. Tuominen: Corona Caused Deterioration of ADSS Fiber-optic Cables on High Voltage Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No.4, October 1999.
- [4] DeWitt W., Neogi S., Risch B. G., Coat P., Ammons D., Karady G. and Madrid J.: High Voltage ADSS Reliability Modeling: Environmental and Climatological Effects on Advanced Jacket Material Selection, Proceedings of the 49<sup>th</sup> IEEE International Wire and Cable Symposium.
- [5] Ožegović M., Ožegović K.: Električne energetske mreže I, Sveučilište u Splitu, ISBN: 953-6114-09-7, Split, 1996.
- [6] Ožegović M., Ožegović K.: Električne energetske mreže II, Sveučilište u Splitu, ISBN: 953-6114-11-9, Split, 1997.

Naslov pisaca:

Prof. dr. sc. Mislav Majstrovic, dipl. ing.  
Energetski institut "Hrvoje Požar"  
Savska 163, 10000 Zagreb, Hrvatska

Petar Sarajčev, dipl. ing.  
Kaštelanska cesta 105  
21212 Kaštel Sućurac, Hrvatska