

Elektromagnetno polje atmosferskog pražnjenja u okolini žičanih struktura

Vesna Javor, Predrag D. Rančić, *Member, IEEE*

Sadržaj — U radu su prikazani rezultati za elektromagnetno (EM) polje atmosferskog pražnjenja (AP) iznad savršeno provodne zemlje dobijeni u vremenskom domenu korišćenjem aproksimacije kanala AP tankom žičanom antenom, jednačina teorije EM polja, inženjerskog modela kanala povratnog udara i nove funkcije za aproksimaciju struje u bazi kanala. Predložen je i novi metod za približni proračun visine kanala AP na osnovu procenjene brzine povratnog udara i talasnih oblika električnog i magnetnog polja u različitim tačkama na površini zemlje.

Za proračun EM polja AP u okolini žičanih struktura iznad poluprovodne zemlje u frekventnom domenu korišćena je nova aproksimacija Sommerfeld-ovog integralnog jezgra sa dva lika, elektromagnetni model kanala povratnog udara i Sistem integralnih jednačina dva potencijala (SIJ-DP) za određivanje struja duž antenske strukture kojom je modelovan sistem kanala AP i gromobrinski stubova. Realizovan je i računarski program za proračun polja usamljenog AP ili pražnjenja u okolini proizvoljno postavljenih gromobrinskih stubova, određivanje indukovanih struja duž antenskog sistema, ulazne impedanse i impedanse uzemljenja.

Ključne reči — atmosfersko pražnjenje, elektromagnetno polje, gromobrinski stub, impedansa uzemljenja.

I. UVOD

ATMOSFERSKO pražnjenje (AP) definiše se kao kratkotrajno električno pražnjenje jake struje čija se putanja može meriti kilometrima (Uman [1]), a dešava se u atmosferi. Elektromagnetno (EM) polje AP u provodnim strukturama indukuje struje i naponu u širokom frekventnom spektru. Indukovane struje i naponi na udaljenim objektima i uređajima su najčešće zanemarljivi i bezopasni, ali u blizini mesta AP ugroženi su i ljudi i životinje, a moguća su i oštećenja elektronske opreme, uređaja i instalacija. Neophodno je teorijski približno odrediti EM polje obližnjeg AP zbog predviđanja mogućih vrednosti indukovanih struja i napona, kao i mera zaštite uređaja i opreme, ali i zbog elektromagnetne kompatibilnosti (EMC) i korišćenja merne opreme prilikom eksperimenata.

U Poglavlju II dat je pregled osnovnih karakteristika AP i modela kanala povratnog udara AP.

U Poglavlju III.A prikazan je proračun EM polja AP iznad savršeno provodne zemlje u vremenskom domenu primenom teorije EM polja, uz aproksimaciju kanala tan-

kom žičanom antenom. Struja u bazi kanala AP aproksimirana je novom funkcijom, datom u Poglavlju III.B, čiji su parametri detaljno ispitani, a koja daje dobre rezultate za električno i magnetno polje na površini zemlje na različitim rastojanjima od baze kanala i može aproksimirati različite oblike impulsne funkcije struje u bazi kanala AP. Zatim su prikazani rezultati za EM polje dobijeni korišćenjem inženjerskog modela kanala povratnog udara. U Poglavlju III.C prikazane su relacije koje povezuju visinu kanala AP, brzinu povratnog udara i vremenski interval pojavljivanja diskontinuiteta u talasnim oblicima električnog i magnetnog polja na površini zemlje na različitim rastojanjima od baze kanala. Dobijene relacije mogu se iskoristiti za približni proračun jednog od ovih parametara, ako se preostala dva procene ili eksperimentalno odrede.

U Poglavlju IV prikazani su rezultati dobijeni u frekventnom domenu korišćenjem elektromagnetnog modela kanala povratnog udara AP iznad poluprovodne zemlje. Raspodela struje određena je primenom Sistema integralnih jednačina dva potencijala (SIJ-DP) tipa EFIE (integrodiferencijalne jednačine sa zadovoljenjem uslova za tangencijalnu komponentu električnog polja), prikazanom u Poglavlju IV.A, polinomske aproksimacije za struju duž antenske strukture kojom se modeluju kanal AP i gromobrinski stubovi, i nove aproksimacije Sommerfeld-ovog integralnog jezgra sa dva lika (Poglavlje IV.B), čija je tačnost ispitana za različite visine dipola od baze kanala AP i različita rastojanja od ose strujnog dipola. U Poglavlju IV.C prikazani su rezultati za ulaznu impedansu, impedansu uzemljenja, a u poglavlju IV.D za EM polje u okolini žičane strukture na površini poluprovodne zemlje.

II. MODELI POV RATNOG UDARA AP

Atmosferska pražnjenja mogu biti od oblaka ka zemlji, između oblaka, unutar oblaka, od oblaka prema vazduhu u atmosferi, a i u samom vazduhu. Pražnjenje se dešava kada električno polje nagomilanog elektriciteta u lokalnom regionu postane toliko veliko da prouzrokuje jonizaciju i proboj kroz vazduh. AP čine mnoge komponente pražnjenja različitog individualnog trajanja, označene kao udari, međusobno vremenski odvojene. Udar iniciraju manja pražnjenja, tzv. vodeća (leader) pražnjenja. Proboj kanala pri pražnjenju oblak-zemlja, koji prethodi povratnom udaru (return stroke), označava se kao stepenasto vodeće pražnjenje (stepped leader). Trajanje tipičnog pražnjenja varira od nekoliko desetih delova ms, za jedan udar, do 0.5 s i više za AP sa po dvadesetak i više sekvenci vodećih i povratnih udara. Neka pražnjenja uključuju udare sa slabijom dugotrajnijom strujom koja može da produži

V. Javor, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529136; faks: 381-18-588399; e-mail: vesna.javor@elfak.ni.ac.rs).

P. D. Rančić, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529305; faks: 381-18-588399; e-mail: predrag.rancic@elfak.ni.ac.rs).

trajanje na više od 1 s. Za prosečnu količinu elektriciteta koja se prenosi udarom AP procenjena je vrednost od oko 140 C do 250 C. Pražnjenje oblak-zemlja, sa više udara, može dovesti do 25 C u zemlju, po svakom udaru, pa se tako može isprazniti i oko 625 C za minut, u jakoj oluji sa 25 udara u minutu.

Sekvence AP se razlikuju po pravcu prostiranja i vremenu trajanja, kao i vremenskim intervalima između pojavljivanja. Češća su pražnjenja unutar oblaka nego pražnjenja oblak-zemlja, a njihov odnos zavisi od geografske širine i veći je u krajevima sa tipovima klime tropskog pojasa nego umerenih pojaseva. Od ukupnog broja pražnjenja oblak-zemlja pražnjenja negativnog elektriciteta inicirana negativnim leader-om naniže dešavaju se verovatno u oko 90% slučajeva u svetu, a pozitivna pražnjenja oblak-zemlja sa pozitivnim leader-om naniže u oko 10% slučajeva.

Jačina struje AP u prvom povratnom udaru uvek je veća nego kod narednih povratnih udara. Temene vrednosti struje AP za prvi povratni udar variraju od nekoliko stotina A do oko 200 kA. U svetu je zabeležen slučaj AP sa jačinom struje oko 460 kA. Polovina svih atmosferskih pražnjenja praćena je strujama do 20 kA, a retka su AP sa strujama jačim od 80 kA. Ima i dosta pražnjenja sa strujama od nekoliko kA, ali se ona ne tretiraju kao tipična. Bez obzira na način i sistem zaštite, nijedan objekat nije 100% zaštićen od AP, jer nije bitna samo jačina struje, već i njena strmina, kao i druge karakteristike AP, ali i karakteristike objekta.

Problem određivanja EM polja koje potiče od prvog povratnog udara prilikom AP, kada je struja i najjača, kao i problem distorzije prilikom prostiranja iznad površine realne zemlje, proučavali su mnogi autori: Uman i dr. (1975), Hamelin i dr. (1979), Lin i dr. (1980), Leteinturier (1980), Master i dr. (1981), Gardner (1981), Wait (1985), Zeddman i dr. (1986), itd. U literaturi ima mnogo različitih predloženih modela AP, od kojih nijedan, naravno, ne može u potpunosti odgovarati događaju AP u prirodi, koji je previše složena pojava da bi se mogla predvideti u celosti.

Od svih modela najjednostavniji je model koji pretpostavlja da se struja povratnog udara, kratkotrajna impulsna struja AP, prostire po pravoj žičanoj anteni, upravno na savršeno provodnu zemlju, brzinom prostiranja koja je konstantna duž kanala [1]. Model AP može biti definisan kao matematička konstrukcija, interpretirana rečima, numerički ili grafički, koja može reprezentovati posmatrane karakteristike povratnog udara AP. Da bi model bio zadovoljavajući, potrebno je da uz što manji broj podesivih parametara teorijski obezbedi neke od eksperimentalno dobijenih podataka kao što su: struja u bazi kanala, varijacija osvetljenosti sa visinom, brzina prostiranja svetlosnog fronta i EM polje na različitim rastojanjima od kanala.

Matematički model je neophodan kako bi se: 1) iz izmerenih vrednosti EM polja izveo izraz za struju povratnog udara AP, 2) predvidele vrednosti električnog i magnetnog polja na veoma bliskim rastojanjima na kojima je praktično nemoguće izvršiti merenja polja i 3) bolje razumela priroda AP i pratećih fenomena. Neki autori [2] dele "matematičke" modele na dve grupe: a) modele kod

kojih se zemlja ponaša kao impulsni strujni generator i određuje količinu elektriciteta koja se ubacuje u kanal u određenom vremenskom intervalu dok traje AP, i b) modele kod kojih se naelektrisanje duž kanala prazni u zemlju od početka povratnog udara određujući struju baze povratnog udara u proizvoljnom vremenskom trenutku. U modele a) grupe spadaju: Dennis-Pierce model, Bruce-Golde (BG) model, Lundholm-Wagner model, Norinder-Dahle model, Uman-McLain-ov Transmission line model (TLM) i modifikovani TL model (MTL), a u modele b) grupe: Wagner model, Master-Uman-Lin-Standler model (MULS), Heidler-ov Travelling current source model (TCS), Cooray model, Deindorfer-Uman (DU) model i dr.

Drugi autori [3] dele "matematičke" modele u četiri kategorije, prema tipu jednačina koje određuju modele: 1) fizički modeli (gas-dinamički), 2) elektromagnetni modeli, 3) modeli sa korišćenjem kola sa raspodeljenim parametrima i 4) inženjerski modeli. Većina modela može se svrstati u jednu, a ponekad i dve od ovih klasa. Prvu klasu predstavljaju fizički ili gas-dinamički modeli koji se bave prvenstveno stvaranjem udarnog talasa kratkog segmenta kanala AP i njegovim prostiranjem u radialnom pravcu na osnovu zakona fizike.

Druga klasa modela su elektromagnetni modeli koji se baziraju na aproksimaciji kanala AP tankom žičanom antenom sa gubicima, sa pobudom strujnim ili ekvivalentnim naponskim generatorom u bazi kanala i uključuju numeričko rešavanje Maxwell-ovih jednačina, kako bi se odredila raspodela struje duž kanala iz koje se zatim mogu odrediti električno i magnetno polje. Treća klasa su RLC modeli, pomoću kola sa raspodeljenim parametrima, koji se mogu smatrati aproksimacijom EM modela, a koji AP predstavljaju kao prostiranje po vertikalnom vodu podužnih parametara R' , L' i C' . Modeli pomoću vodova mogu se koristiti za proračun EM polja u dalekoj zoni. Neki od navedenih modela uključuju i korišćenje gas-dinamičkih modela za određivanje podužne impedanse kanala AP. Četvrta klasa su inženjerski modeli kod kojih je prostorna i vremenska raspodela struje duž kanala (ili prostorna i vremenska raspodela količine elektriciteta) određena na osnovu karakteristika struje u bazi kanala, brzine prostiranja talasnog fronta struje i osvetljenosti kanala, a zatim je provereno slaganje EM polja predviđenog modelom sa eksperimentalnim rezultatima na rastojanjima od nekoliko desetina metara do nekoliko stotina km.

Karakteristika inženjerskih modela je mali broj parametara koji se podešavaju, obično nekoliko, osim merene ili pretpostavljene struje u bazi kanala AP. Inženjerski model povratnog udara definisan je jednačinom koja povezuje struju duž kanala na proizvoljnoj visini z' u bilo kom trenutku, $i(z', t)$, i struju $i(0, t)$ u bazi kanala ($z'=0$).

Većina inženjerskih modela može se predstaviti sledećom relacijom:

$$i(z', t) = u(t - z'/v_f)P(z', t)i(0, t - z'/v), \quad (1)$$

gde je $u(t - z'/v_f)$ Heaviside-ova funkcija (čija je vrednost jednaka jedinici za $t \geq z'/v_f$, inače je nula), v_f je brzina prostiranja talasnog fronta struje, koja se često ozna-

čava i kao brzina povratnog udara, v je brzina propagacije impulsa struje duž kanala AP, a $P(z', t)$ funkcija slabljenja struje duž kanala [4], koja zavisi od visine z' i trenutka t .

U inženjerske modele spadaju BG, TCS, TL, MTL model i njegove modifikacije. U Tabeli 1 prikazani su neki inženjerski modeli, njihove funkcije slabljenja, posebno za MTL modele, kao i brzine propagacije impulsa struje.

TL model pretpostavlja da se impuls struje prostire duž kanala kao duž voda, $i(z', t) = i(0, t - z'/v)$, gde je v brzina propagacije impulsa struje duž kanala AP i najčešće se u modelima smatra konstantnom [5]. Za njenu vrednost usvaja se od oko trećine do oko polovine brzine prostiranja EM talasa u slobodnom prostoru. Za kanal se pretpostavlja da je vertikalan, prav i bez grananja na bilo kojoj visini, mada to u prirodi nije slučaj. Visina kanala bira se u proračunima od 2600m do 7000m, i zanemaruje refleksija od kraja kanala. Modifikovani TL model može biti: MTLL model (sa linearnim opadanjem vršne vrednosti struje sa visinom), MTLE model (sa eksponencijalnim opadanjem sa visinom, pri čemu se za konstantu koja određuje opadanje struje može izabrati visina kanala H ili druga vrednost λ) i MTL model (modifikovani model sa distorzijom struje duž kanala).

U ovom radu je izabrana $P(z') = \exp(-z'/\lambda)$ kao funkcija koja zavisi samo od visine z' , gde je λ konstanta za koju je u [6] i [7] izabrana vrednost $\lambda=2000$ m na osnovu eksperimentalnih rezultata. Na osnovu dobijenih rezultata za EM polje na različitim rastojanjima od baze kanala pokazano je u radu [8] da se za MTLE model dobijaju bolji rezultati ako se za λ izabere veća vrednost, npr. $\lambda=4500$ m.

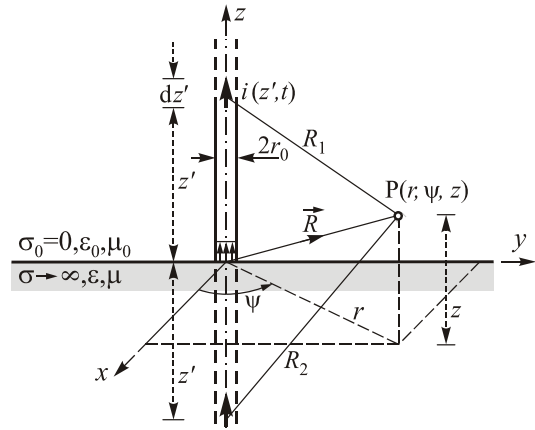
TABELA 1: INŽENJERSKI MODELI POVROTNOG UDARA AP, FUNKCIJE SLABLJENJA I BRZINE PROPAGACIJE IMPULSA STRUJE.

Model AP	$P(z', t)$	$I(z', t)$	v
BG	1	$I(0, t)$	∞
TL	1	$I(0, t - z'/v)$	v_f
TCS	1	$I(0, t + z'/c)$	$-c$
MTL	$P(z', t)$	$I(0, t - z'/v) \cdot P(z', t)$	v_f
MTLL	$1 - z'/H$		
MTLE	$\exp(-z'/H)$,	$\exp(-z'/\lambda)$	
MTLD	$\left[1 - \exp\left(-\frac{t - z'/v_f}{\tau} \frac{\lambda_p}{z'}\right)\right] \left(1 - \frac{z'}{H}\right)$		
i neki	$(1 - z'/H)^2$,	$[1 - \exp(z'/H)]^n$,	
drugi	$A_1 \exp(-z'/\lambda_1) + A_2 \exp(-z'/\lambda_2)$,		
MTL modeli	$\left[\exp\left(-\frac{H}{\mu}\right) - \exp\left(-\frac{z'}{\mu}\right)\right] \left[\exp\left(-\frac{H}{\mu}\right) - 1\right]^{-1}$		

III. PRORAČUN EM POLJA AP U VREMENSKOM DOMENU

A. Električno i magnetno polje iznad savršeno provodne zemlje

Model kanala AP iznad savršeno provodne zemlje prikazan je na Sl. 1 kao vertikalna tanka antena visine H i poluprečnika r_0 .



Sl. 1. Model kanala AP iznad savršeno provodne zemlje.

Za električno i magnetno polje koje potiče od struje duž kanala AP dobijaju se na osnovu jednačina teorije polja u proizvoljnoj tački prostora $P(r, \psi, z)$ sledeće relacije u cilindričnom koordinatnom sistemu:

$$E_z(\vec{R}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-H}^H \left[\frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5} \int_{\tau=0}^{\tau=t} i\left(z', \tau - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{2(z-z')^2 - r^2}{cR^4} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) - \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] dz', \quad (2)$$

$$E_r(\vec{R}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-H}^H \left[\frac{3r(z-z')}{R^5} \int_{\tau=0}^{\tau=t} i\left(z', \tau - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{3r(z-z')}{cR^4} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) + \frac{r(z-z')}{c^2 R^3} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] dz', \quad (3)$$

$$H_\psi(\vec{R}, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{-H}^H \left[\frac{r}{R^3} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) + \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] dz', \quad (4)$$

gde je E_z vertikalno električno polje, E_r radijalno električno polje, H_ψ azimutalno magnetno polje, ϵ_0 je dielektrična konstanta vakuuma, μ_0 magnetna permeabilnost vakuuma, $c = (\epsilon_0\mu_0)^{-1/2}$ brzina prostiranja EM talasa u vakuumu jednaka brzini svetlosti, $R = \sqrt{r^2 + (z-z')^2}$ rastojanje od strujnog elementa ili od njegovog lika u ravnom ogledalu do tačke u polju $P(r, \psi, z)$. Za tačke na površini savršeno provodne zemlje je $E_r = 0$.

B. Nova funkcija struje u bazi kanala

Struja povratnog udara AP u bazi kanala može se aproksimirati CBC funkcijom, prikazanom na Sl. 2,

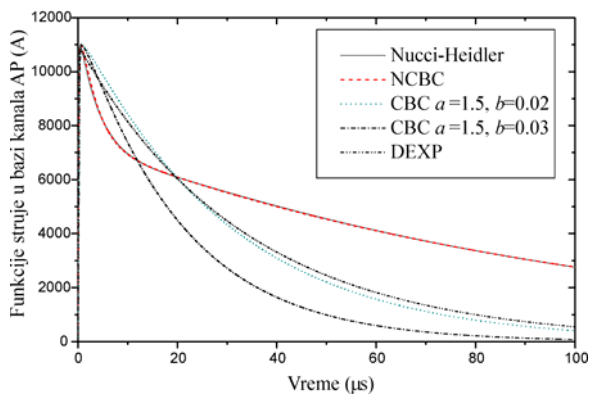
$$i(t) = \begin{cases} I_m [\tau e^{(1-\tau)}]^a, & 0 \leq \tau \leq 1 \\ I_m [\tau e^{(1-\tau)}]^b, & 1 \leq \tau < \infty \end{cases} \quad (5)$$

gde su a i b parametri funkcije, a $\tau = t/t_m$ promenljiva

normalizovana na vreme uspona t_m do maksimalne vrednosti struje I_m . Pogodnim izborom parametara CBC funkcije [9] mogu se dobiti tražene karakteristike impulsa: strmina struje (izvod funkcije struje), konkavni/konveksni oblik funkcije u usponskom delu ($0 \leq \tau \leq 1$), vreme opadanja do polovine vršne vrednosti, količina elektriciteta određena kao integral funkcije struje, itd.

Prvi izvod funkcije struje može se odrediti analitički i neprekidna je funkcija za sve vrednosti promenljive t , dok su viši izvodi kontinualni u svim tačkama izuzev u tački maksimuma struje i mogu se jednostavno dobiti analitički.

Parametar a određuje strminu struje, odnosno prvi izvod u usponskom delu. U usponskom delu, za $0 < t < t_m$, ako se izabere $0 < a < 1$ dobija se konveksna funkcija, za $a=1$ linearna, a za $a > 1$ konkavno-konveksna funkcija sa jednom prevojnou tačkom u usponskom delu.



Sl. 2. Funkcije struje u bazi kanala AP.

Parametar b određuje izgled opadajućeg dela funkcije (za $t > t_m$), kao i vreme opadanja do polovine vršne vrednosti i količinu elektriciteta, dobijenu kao integral funkcije struje u bazi kanala prema relaciji

$$q = \int_0^t i(t) dt = \begin{cases} \frac{Q_0 e^a}{a^{a+1}} \gamma(a+1, a \frac{t}{t_m}), & 0 \leq t \leq t_m, \\ \frac{Q_0 e^a}{a^{a+1}} \gamma(a+1, a) + \frac{Q_0 e^b}{b^{b+1}} \left[\gamma(b+1, b \frac{t}{t_m}) - \gamma(b+1, b) \right], & t_m \leq t \leq \infty, \end{cases} \quad (6)$$

gde je $Q_0 = I_m t_m$, a $\gamma(a+1, x) = \int_0^x t^a e^{-t} dt$ nekompletna

γ -funkcija (Euler-ova funkcija druge vrste).

CBC funkcija parametara $I_m = 11 \text{ kA}$, $t_m = 0.5826 \mu\text{s}$, $a = 1.5$ i $b = 0.02$ aproksimira struju u bazi kanala AP kao ranije često korišćena biexponencijalna ili Double exponential (DEXP) funkcija $i(t) = I_m (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, Sl. 2, koju su predložili Bruce i Golde [10], za parametre $I_m = 11 \text{ kA}$, $\alpha = 3 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ i $\beta = 10^7 \text{ s}^{-1}$, a približno i kao Heidler-ova funkcija [11], [12], jer daje rezultate za EM polje (Sl. 3-7) koji pokazuju dobro slaganje sa [3], [7] i [12]. CBC funkcija pokazala je nedostatak pri aproksimaciji u opadajućem delu, jer je opadanje CBC funkcije u prvih $20 \mu\text{s}$ je sporije, a zatim brže nego kod funkcije [11], što je još više

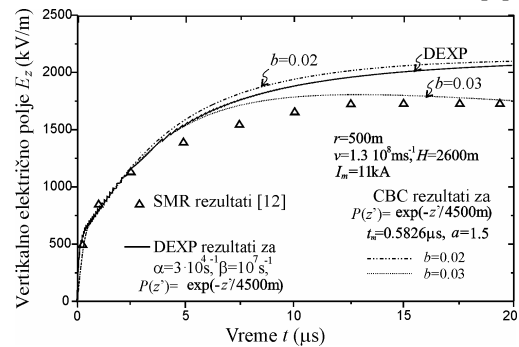
izraženo u dužem vremenskom intervalu. Funkcija kojom se može rešiti ovaj problem je NCBC predložena u [13].

NCBC funkcija kojom se mogu uspešno aproksimirati veoma različiti oblici i rastućeg i opadajućeg dela funkcije struje u bazi kanala data je izrazom

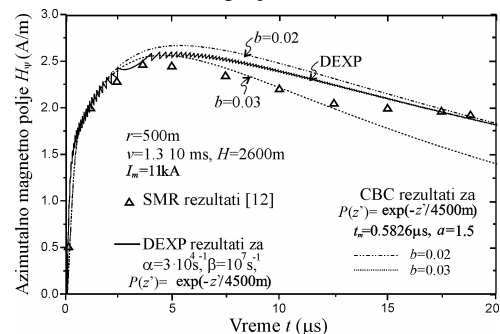
$$i(t) = \begin{cases} I_m [\tau e^{(1-\tau)}]^a, & 0 \leq \tau \leq 1 \\ I_m \sum_{i=1}^n c_i [\tau e^{(1-\tau)}]^{b_i}, & 1 \leq \tau < \infty \end{cases} \quad (7)$$

gde su c_i težinski koeficijenti, a parametar funkcije u usponskom delu, b_i parametri u opadajućem delu, a n broj članova sume u opadajućem delu, izabran prema željenoj tačnosti u opsegu aproksimacije [14]. Funkcija korišćena u [3] i [12] označena je na Sl.2 kao Nucci-Heidler funkcija za koju je izabrana maksimalna vrednost struje $I_m \cong 11 \text{ kA}$ i predstavlja sumu Heidler-ove funkcije parametara $I_{01} = 9.9 \text{ kA}$, $\tau_1 = 0.072 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 5 \mu\text{s}$, $\eta = 0.845$ i $n=2$, i DEXP parametara $I_{02} = 7.5 \text{ kA}$, $\tau_3 = 100 \mu\text{s}$ i $\tau_4 = 6 \mu\text{s}$, na osnovu kojih se dobijaju $I_m = 10.95 \text{ kA}$ i $t_m = 0.472 \mu\text{s}$. Kako bi se dobro aproksimirao isti oblik struje u bazi za NCBC funkciju treba odabrati $I_m = 11 \text{ kA}$ i $t_m = 0.472 \mu\text{s}$, kao i sledeće parametre: $n=2$, $a=1.1$, $b_1 = 0.16$, $c_1 = 0.34$, $b_2 = 0.0047$ i $c_2 = 0.66$, čime se dobijaju znatno bolji rezultati aproksimacije nego korišćenjem CBC funkcije.

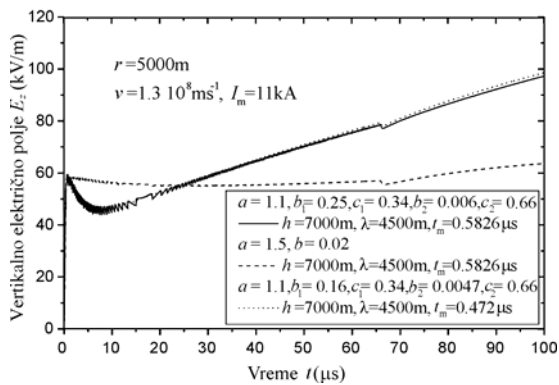
Za NCBC funkciju mogu se jednostavno odrediti analitički izvod i integral, Fourier-ova i Laplace-ova transformacija, a može se izabrati maksimalna struja bez korekcionog faktora i vreme porasta do maksimalne vrednosti, što su prednosti u odnosu na ostale funkcije. Ova funkcija zbog jednostavnijeg izbora i manjeg broja parametara daje dobre mogućnosti analize uticaja različitih karakteristika struje u bazi kanala na talasne oblike i vrednosti električnog i magnetnog polja na različitim rastojanjima od baze kanala, kao i analize različitih modela kanala AP [8].



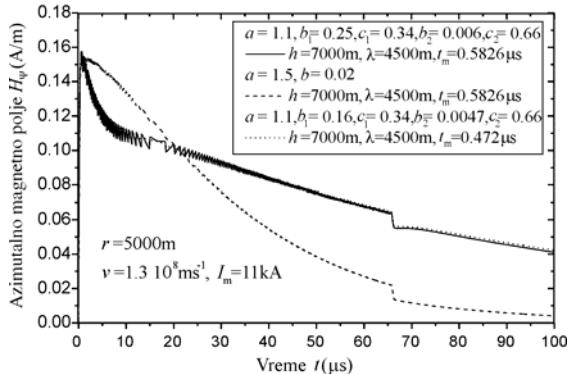
Sl.3. Vertikalno električno polje na $r=500 \text{ m}$ od baze kanala.



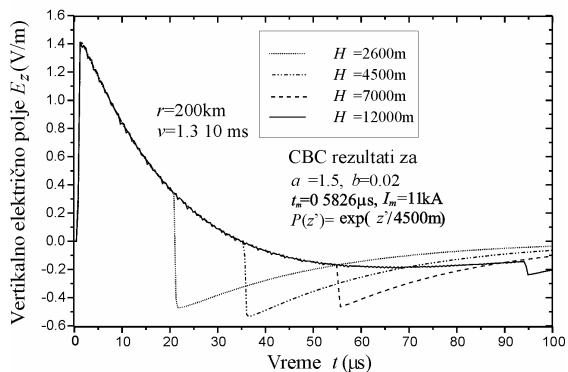
Sl.4. Azimutalno magnetno polje na $r=500 \text{ m}$ od baze kanala.



Sl. 5. Vertikalno električno polje na $r=5\text{km}$ od baze kanala.



Sl. 6. Azimutalno magnetno polje na $r=5\text{km}$ od baze kanala.



Sl. 7. Vertikalno električno polje na $r=200\text{km}$ od baze kanala.

C. Metoda za približni proračun visine kanala AP

Na osnovu proračuna izveden je izraz pomoću koga se može odrediti vreme pojavljivanja diskontinuiteta t_d posle trenutka pojavljivanja impulsa polja u datoj tački $t_0 = r/c$. Ukoliko je poznata visina kanala atmosferskog pražnjenja H i brzina prostiranja talasa struje duž kanala struje atmosferskog pražnjenja v , tada se t_d može izračunati iz izraza

$$t_d = \frac{H}{v} + \frac{\sqrt{H^2 + r^2} - r}{c} \quad (8)$$

Za $H=2600\text{m}$, $v=1.3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ i $r=500\text{m}$, iz ovog izraza dobije se $t_d \cong 27.16\mu\text{s}$ za vreme pojavljivanja diskontinuiteta, za $r=1000\text{m}$ je $t_d \cong 25.95\mu\text{s}$, za $r=5000\text{m}$ je $t_d \cong 22.12\mu\text{s}$, za $r=200\text{km}$ je $t_d \cong 20.06\mu\text{s}$, kao što je prikazano u Tabeli 2, a uočljivo na Sl. 5-7. Ukoliko se iz eksperimentalnih rezultata utvrdi t_d i pretpostavi brzina v prostiranja talasa struje duž kanala atmosferskog pražnjenja, tada se visina kanala može proceniti na osnovu izraza

$$H = \frac{ct_d + r - \sqrt{r^2 + v^2 t_d^2} + 2 \frac{v^2 r t_d}{c}}{\frac{c}{v} - \frac{v}{c}} \quad (9)$$

Na osnovu visine kanala H i vremena t_d , koji se eksperimentalno odrede, može se približno odrediti prosečna brzina prostiranja talasa struje v na osnovu izraza

$$v = \frac{H}{t_d + \frac{r}{c} - \frac{\sqrt{H^2 + r^2}}{c}} \quad (10)$$

Rezultati istraživanja prikazani u [15] pokazuju kako se eksperimentalno dobijeni rezultati merenja EM polja na različitim rastojanjima od baze kanala mogu iskoristiti za procenu visine kanala AP.

TABELA 2: VREME POJAVLJIVANJA DISKONTINUITETA t_d (μs).

Rastojanje od baze (m)	Visina kanala H (m)			
	2600	4500	7000	12000
500	27.16	48.04	75.57	130.68
1000	25.95	46.65	74.08	129.11
5000	22.12	40.37	65.85	118.97
200000	20.06	34.78	54.25	93.51

IV. PRORAČUN EM POLJA AP U FREKVENTNOM DOMENU

A. SIJ-DP

U frekventnom domenu za pobudu je izabran δ -generator napona U i frekvencije f , lociran u podnožju stubne antene. Nepoznata raspodela struje duž antene je aproksimirana polinomom [16] i određena korišćenjem Sistema integralnih jednačina dva potencijala (SIJ-DP) [17], koji je numerički rešen Metodom podešavanja u tačkama [18].

Na Sl. 8 prikazana je antena kojom je modelovan kanal AP visine h , koja se može podeliti na N segmenata dužine l_k , poluprečnika a , pod uslovom da je $a \ll l_k$ i $a \ll \lambda_0$, a λ_0 talasna dužina u vazduhu. Ukupan broj segmenata antenskog modela je $n=1,2,\dots,N+N_J$, gde je N_J zbirni broj segmenata duž gromobraskih stubova $J=1,\dots,p$.

Realna zemlja aproksimirana je modelom linearne homogene poluprovodne sredine električnih parametara σ_1 , $\epsilon_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r1}$ i $\mu_1 = \mu_0$. Za gornji ($i=0$) i donji poluprostor ($i=1$) kompleksna specifična provodnost je $\underline{\sigma}_i = \sigma_i + j\omega \epsilon_i$, konstanta prostiranja $\underline{\gamma}_i = \alpha_i + j\beta_i = \sqrt{j\omega \mu_i \underline{\sigma}_i}$ i koeficijent refrakcije $\underline{n}_{10} = \underline{\gamma}_1 / \underline{\gamma}_0$.

Nepoznata raspodela struje $I_k(s_k') = \sum_{m=0}^{m=n_k} B_{mk}(s_k' / l_k)^m$, duž s_k' -ose k -tog segmenta ($x_k', y_k' = 0, 0 \leq s_k' \leq l_k$) aproksimirana je polinomom stepena n_k , $k=1,2,\dots,N+N_J$.

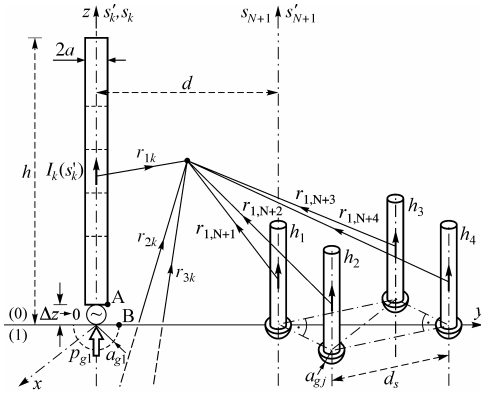
Hertz-ovim dipolom momenta $p_{gj} = I_j(0) \cdot a_{gj}$, postavljenim neposredno ispod površine zemlje može se modelovati polusferični uzemljivač poluprečnika a_{gj} ($a_{gj} \ll \lambda_0$) za segmente koji dodiruju površinu zemlje $j=1,2,\dots,J+1$.

Rezultujuća tangencijalna komponenta Hertz-ovog vektora u vazduhu u tački $P(x, y, z)$ i električni skalar potencijal koji zadovoljavaju SIJ-DP su dati sledećim izrazima:

$$\Pi_{z0}(s) = \frac{1}{4\pi\sigma_0} \sum_{k=1}^{N+N_j} \left\{ \int_{s'_k=0}^{l_k} I_k(s'_k) [K_0(r_{1k}) + S_{00}^v(r_{2k})] ds'_k + (\delta_{1k} + \sum_{j=1}^J \delta_{j+1,k}) p_{gk} S_{01}^v(r_{2k}, s'_k=0) \right\} \Big|_{z=s} \quad (11)$$

$$\varphi_0(s) = \frac{1}{4\pi\sigma_0} \sum_{k=1}^{N+N_j} \left\{ \int_{s'_k=0}^{l_k} I_k(s'_k) \frac{\partial}{\partial s'_k} [K_0(r_{1k}) - S_{00}^v(r_{2k})] ds'_k - (\delta_{1k} + \sum_{j=1}^J \delta_{j+1,k}) p_{gk} \frac{\partial}{\partial z} S_{01}^v(r_{2k}, s'_k=0) \right\} \Big|_{z=s} \quad (12)$$

gde su $K_0(r_{1k}) = \exp(-\gamma_0 r_{1k})/r_{1k}$ standardno jezgro potencijala u vazduhu; $\delta_{1k}, \delta_{j+1,k}$ Kronecker-ovi simboli; $S_{00}^v(r_{2k})$ Sommerfeld-ovo integralno jezgro od strujnog elementa; $S_{01}^v(r_{2k}, s'_k=0) = \underline{n}_{10}^{-2} [K_0(r_{2k}) + S_{00}^v(r_{2k})] \Big|_{s'_k=0}$ Sommerfeld-ovo integralno jezgro Hertz-ovog dipola uzemljivača; r_{1k} i r_{2k} – rastojanja od k -tog strujnog elementa i njegovog lika, respektivno, a r_{3k} – od drugog lika do tačke u polju.



Sl. 8. Model kanala AP i vertikalnih gromobranskih stubova na površini poluprovodne zemlje.

B. TIA

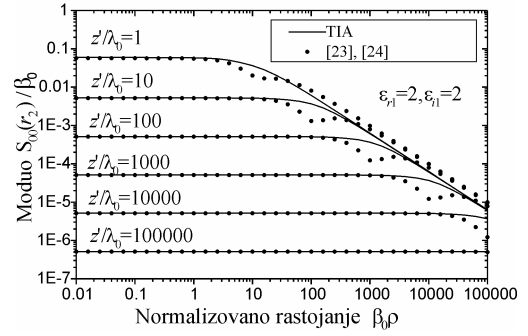
Uticaj realne zemlje, izražen Sommerfeld-ovim integralnim jezgrom [19], koje se pojavljuje u SIJ-DP, modelovan je novom aproksimacijom sa dva lika Two-image approximation (TIA) [20], [21], datom izrazom

$$S_{00}^v(r_{2k}) \cong R_\infty K_0(r_{2k}) + (R_0 - R_\infty) \exp(\gamma_0 d) K_0(r_{3k}), \quad (13)$$

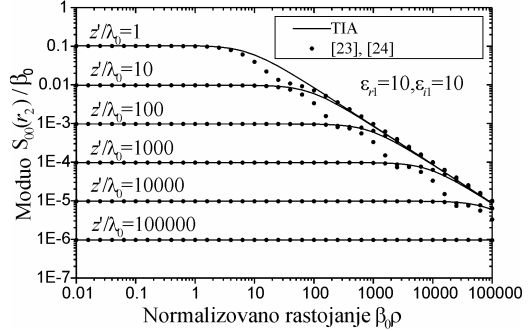
gde su $R_\infty = (\underline{n}_{10}^2 - 1)/(\underline{n}_{10}^2 + 1)$, $R_0 = (\underline{n}_{10} - 1)/(\underline{n}_{10} + 1)$,

$$r_{3k} = \sqrt{\rho^2 + (z + s'_k + d_{im})^2}, \quad d_{im} = |d_0| = \left| \gamma_0^{-1} (1 + \underline{n}_{10}^{-2}) \right|,$$

$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$. Ova aproksimacija, za različite električne parametre zemlje, daje dobre rezultate i u bliskoj i u dalekoj zoni antene, što je ilustrovano na Sl. 9 i 10. Rezultati za moduo Sommerfeld-ovog kernela dobijeni korišćenjem TIA upoređeni su sa rezultatima dobijenim na osnovu aproksimacije [22], kao i rezultatima [23] i [24]. Poređenje pokazuje da TIA daje bolje rezultate za sve vrednosti električnih parametara zemlje i visine električnog dipola.



Sl. 9. Moduo normalizovanog Sommerfeld-ovog kernela, kao funkcija rastojanja $\beta_0 \rho$, za $\epsilon_{r1} = 2$ i $\epsilon_{i1} = 2$.



Sl. 10. Moduo normalizovanog Sommerfeld-ovog kernela, kao funkcija rastojanja $\beta_0 \rho$, za $\epsilon_{r1} = 10$ i $\epsilon_{i1} = 10$.

C. Rezultati za ulaznu impedansu sistema kojim je modelovano AP u okolini gromobranskih stubova

Nakon dobijanja numeričkog rešenja za raspodelu struje duž kanala AP mogu se odrediti vrednosti ulazne impedanse antene Z_a , koja se definiše u odnosu na potencijal tačke A (Sl. 8), iz izraza

$$Z_a = R_a + jX_a = \frac{\varphi_0(s_1=0^+)}{I_1(s_1=0)} \quad (14)$$

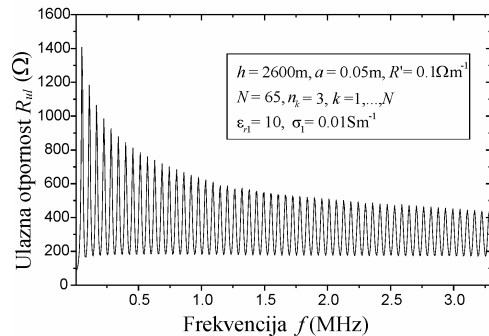
Impedansa uzemljenja određena je iz

$$Z_g = R_g + jX_g = -\frac{\varphi_B}{I_1(s_1=0)} = -Z_a \frac{\varphi_B}{\varphi_A}, \quad (15)$$

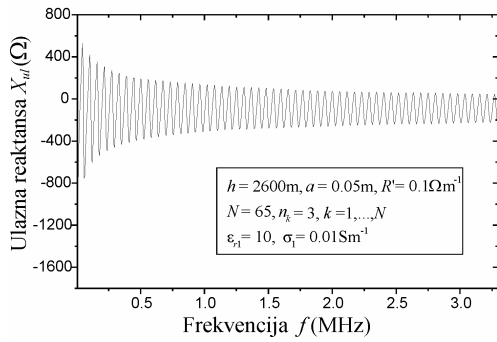
a ulazna impedansa antenskog sistema u odnosu na napon $U = \varphi_A - \varphi_B$, gde je φ_B potencijal tačke B (Sl. 8), iz izraza

$$Z_{ul} = R_{ul} + jX_{ul} = Z_a + Z_g = \frac{U}{I_1(s_1=0)} = Z_a \left(1 - \frac{\varphi_B}{\varphi_A}\right). \quad (16)$$

Rezultati za ulaznu impedansu antene visine $h=2600$ m, poluprečnika a i podužne otpornosti R' iznad poluprovodne zemlje (σ_1, ϵ_1 i $\mu_1 = \mu_0$) dati su na Sl. 11 i Sl. 12.



Sl. 11. Ulazna otpornost kanala visine $h=2600$ m iznad poluprovodne zemlje, kao funkcija frekvencije.



Sl. 12. Ulazna reaktansa kanala visine $h=2600\text{m}$ iznad poluprovodne zemlje, kao funkcija frekvencije.

D. Rezultati za EM polje AP u okolini vertikalnih gromobranskih stubova u frekventnom domenu

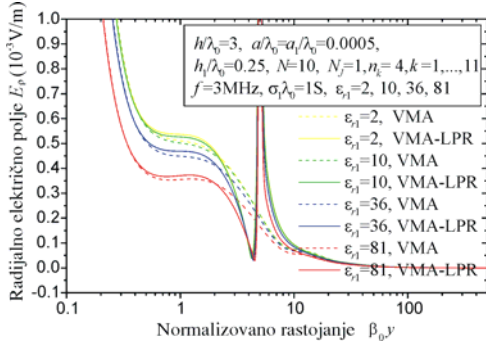
Električno polje se može odrediti iz definicionog izraza $\vec{E}_0 = -\text{grad } \varphi_0 - \gamma_0^2 \vec{\Pi}_0 = E_\rho \hat{\rho} + E_z \hat{z}$, a magnetno polje iz

$$\vec{H}_0 = \frac{\gamma_0^2}{j\omega\mu_0} \text{rot } \vec{\Pi}_0.$$

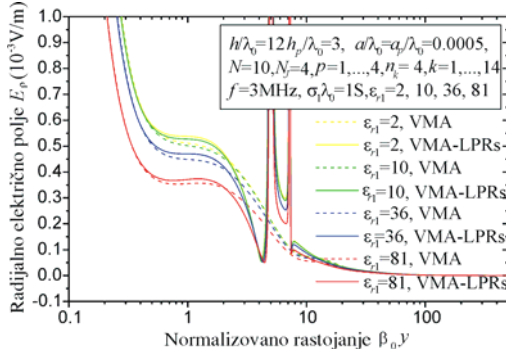
Rezultati za sistem koji se sastoji od usamljene antene (VMA) visine h ili antene u okolini jednog stuba visine h_1 , ili četiri antenska stuba (LPR) visina h_p , $p=1,2,3,4$, za različite parametre zemlje, prikazani su na Sl. 13-20, za $f=3\text{MHz}$. Veći broj numeričkih rezultata za ulaznu impedansu, impedansu uzemljenja, kao i EM polje AP prikazan je u [25] i [26].

V. ZAKLJUČAK

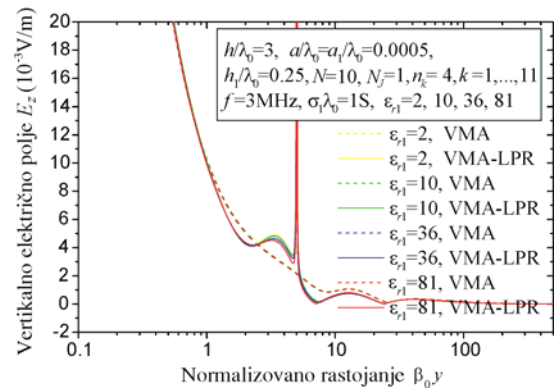
Prikazani rezultati omogućavaju preduzimanje mera zaštite i procenu ugroženosti uređaja, instalacija i elektronske opreme koji se nalaze u EM polju obližnjeg AP ili u prostoru šticeonom gromobranskim stubovima.



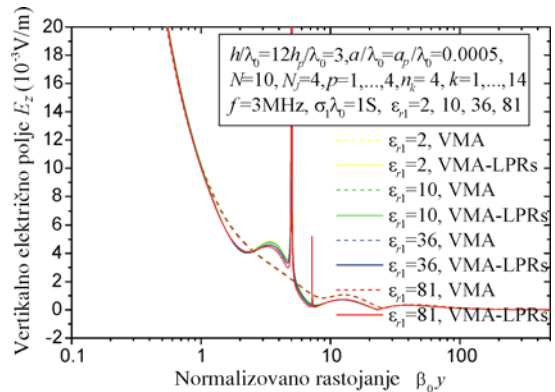
Sl. 13. Radijalno električno polje za $h = 3\lambda_0$ i $h_1 = 0.25\lambda_0$ (na rastojanju $\beta_0 d = 5$), kao funkcija $\beta_0 y$.



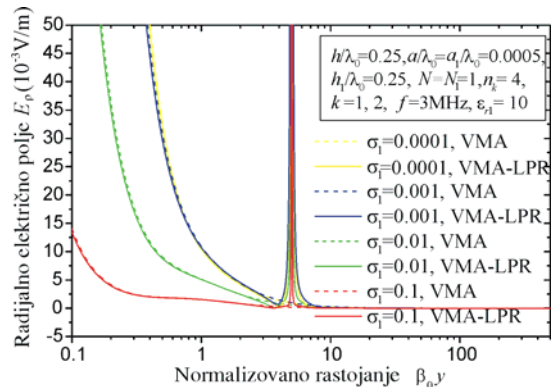
Sl. 14. Radijalno električno polje za $h = 3\lambda_0$ i $h_p = 0.25\lambda_0$, $p=1,2,3,4$, ($p=1$ na $\beta_0 d = 5$), kao funkcija rastojanja $\beta_0 y$.



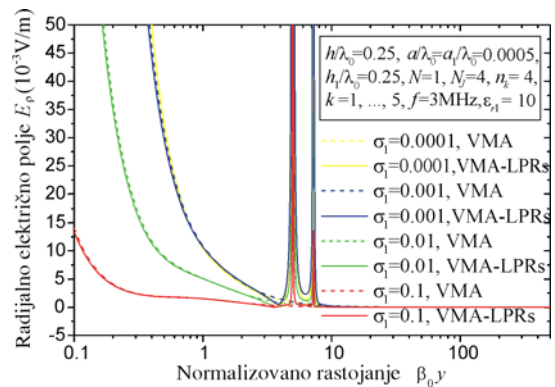
Sl. 15. Vertikalno električno polje za $h = 3\lambda_0$ i $h_1 = 0.25\lambda_0$ (na rastojanju $\beta_0 d = 5$), kao funkcija $\beta_0 y$.



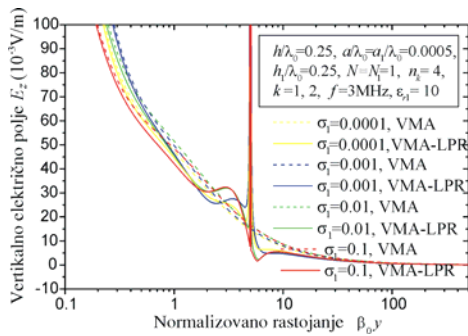
Sl. 16. Vertikalno električno polje za $h = 3\lambda_0$ i $h_p = 0.25\lambda_0$, $p=1,2,3,4$, ($p=1$ na $\beta_0 d = 5$), kao funkcija rastojanja $\beta_0 y$.



Sl. 17. Radijalno električno polje za $h = 0.25\lambda_0$ i $h_1 = 0.25\lambda_0$ (na rastojanju $\beta_0 d = 5$), kao funkcija $\beta_0 y$.

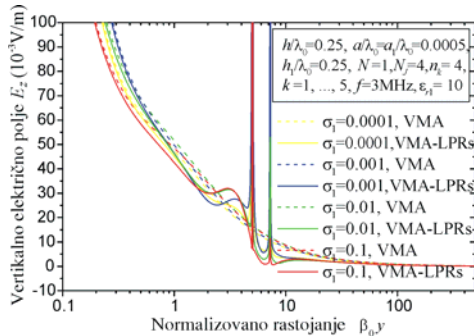


Sl. 18. Radijalno električno polje za $h = 0.25\lambda_0$ i $h_p = 0.25\lambda_0$, $p=1,2,3,4$, ($p=1$ na $\beta_0 d = 5$), kao funkcija rastojanja $\beta_0 y$.



Sl. 19. Vertikalno električno polje za $h = 0.25\lambda_0$ i

$h_1 = 0.25\lambda_0$ (na rastojanju $\beta_0 d = 5$), kao funkcija $\beta_0 y$.



Sl. 20. Vertikalno električno polje za $h = 0.25\lambda_0$ i

$h_p = 0.25\lambda_0$, $p=1,2,3,4$, ($p=1$ na $\beta_0 d = 5$),

kao funkcija rastojanja $\beta_0 y$.

LITERATURA

- [1] M. A. Uman and D. K. McLain, "Magnetic field of the lightning return stroke," *J. Geophys. Res.*, vol. 74, pp. 6899-6910, 1969.
- [2] C. Gomes and V. Cooray, "Concepts of lightning return strokes," *IEEE Trans. on EMC*, vol. 42, no. 1, pp. 82-96, Feb. 2000.
- [3] V. A. Rakov and M. A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 4, pp. 403-426, Nov. 1998.
- [4] V. A. Rakov and A. A. Dulzon, "Calculated electromagnetic fields of lightning return stroke," *Tekh. Elektrodinam.*, no. 1, pp. 87-89, 1987.
- [5] V. A. Rakov, "Lightning electromagnetic fields: Modeling and measurements," in *Proc. 12th Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat.*, Zurich, Switzerland, pp. 59-64, Feb. 1997.
- [6] C. A. Nucci and F. Rachidi, "Experimental validation of a modification to the transmission line model for LEMP calculations," in *Proc. 8th Int. Zurich Symp. EMC*, Zurich, Switzerland, Mar. 1989.
- [7] C. A. Nucci, G. Diendorfer, M. A. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz, and C. Mazzetti, "Lightning return stroke current models with specified channel base current: A review and comparison," *J. Geophys. Res.*, vol. 95, pp. 20395-20408, Nov. 1999.
- [8] V. Javor and P. D. Rancic, "On the Choice of the Lightning Channel Current Decay Constant in the Modified Transmission Line Model with Exponential Decay" *Int. Symposium on Environmental EMC SoftCOM 2009*, Sep. 2009, (submitted for publication), Split, 2009.
- [9] V. Javor and P. D. Rancic, "Application of one suitable lightning return-stroke current model," *Proceedings of full papers*, Int. Symposium on EMC Europe, pp. 941-946, Barcelona, Sep. 2006.
- [10] Golde, R. H., "Lightning currents and related parameters," in *Lightning*, vol. 1, *Physics of Lightning*, R. H. Golde, Ed. London: Academic press, pp. 309-350, 1977.
- [11] F. Heidler, "Traveling current source model for LEMP calculation," in *Proc. 6th Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat.*, Zurich, Switzerland, pp. 157-162, Mar. 1985.
- [12] A. Shoory, R. Moini, H. Sadeghi, and V. A. Rakov, "Analysis of lightning-radiated electromagnetic fields in the vicinity of lossy ground," *IEEE Trans. on EMC*, vol. 47, no. 1, pp. 131-145, Feb. 2005.

- [13] V. Javor, "Approximating decaying part of the lightning return stroke channel-base current," in *Int. Symp. Lightning Physics and Effects*, COST P-18, Vienna, pp. 26, Apr. 2008.
- [14] V. Javor, P. D. Rancic, "One Model for Calculating the Lightning Generated Electromagnetic Field above Real Ground," *Proc. of papers, 51st Int. Wissenschaftliches Kolloquium IWK 2006*, pp. 113-114, paper 8 pages at CD Proceedings, Ilmenau, Germany, 2006.
- [15] V. Javor, P. D. Rancic, "The effect of lightning return stroke channel height on electric and magnetic field waveforms," *29th Int. Conference on Lightning Protection ICLP 2008*, CD Proc. of Papers 3a.7.1-10, Uppsala, Sweden, 2008.
- [16] B. D. Popovic, "Polynomial approximation of current along thin symmetrical cylindrical dipoles," *Proceedings of IEEE*, vol. 117, no. 5, pp. 873-878, May 1970.
- [17] P. D. Rancic, "Contribution to linear antennas analysis by new forms of integral equations of two potentials," in *Proc. of 10th Conf. COMPUMAG'95*, Berlin, pp. 328-329, July 1995.
- [18] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, New York: Macmillan, New York, 1968, Sec. 6.2.
- [19] A. N. Sommerfeld, "Über die Ausbreitung der Wellen in der Drahtlosen Telegraphie," *Ann. der Physik*, vol. 28, pp. 665-736, 1909.
- [20] M. P. Rancic and P. D. Rancic, "Vertical dipole antenna above a lossy half space: Efficient and accurate two-image approximation for the Sommerfeld's integral," in *CD Proc. EuCAP 2006*, paper No.121 (Ref. No. 362128), Nice, Nov. 2006.
- [21] V. Javor and P. D. Rancic, "Vertical monopole antenna model of the lightning discharge current: Two-image approximation of Sommerfeld's integral kernel," in *CD Proceedings of the 16th Conf. COMPUMAG 2007*, Aachen, June 2007.
- [22] C. Yang and B. Zhou, "Calculation methods of electromagnetic fields very close to lightning," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 1, pp. 133-141, Feb. 2004.
- [23] V. V. Petrovic, *Electrotechnical Faculty of Belgrade, Department of Theoretical Electrical Engineering*, private communication, 2005.
- [24] A. R. Djordjevic, M. B. Bazzdar, V. V. Petrovic, D. I. Olcan, T. K. Sarkar, and R. F. Harrington, "AWAS for Windows, Version 2.0, Analysis of wire antennas and scatterers - Software and User's manual," Artech House, 2002.
- [25] V. Javor, "Elektromagnetno polje atmosferskog praznjenja prodrlo u objekte," (in Serbian), Ph.D. dissertation, Dept. Theoretical Electrical Eng., Faculty of Electronic Eng., University of Nis, 2009.
- [26] V. Javor, P. D. Rancic, "Electromagnetic Field in the Vicinity of Lightning Protection Rods at a Lossy Ground," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol.51, No.2, pp.320-330, May 2009.

ABSTRACT

In this paper the results are presented for the lightning electromagnetic field (LEMF) obtained in time domain by the thin wire approximation of the lightning discharge channel, relations of the theory of electromagnetic fields, an engineering model of the return stroke channel and the new function for the approximation of the lightning channel-base current. The new method for the approximate calculation of the lightning channel height on the basis of estimated return stroke speed and the electric and magnetic field wavelshapes at different points at the ground surface. For the computation of LEMF in the surroundings of wire structures above semi-conducting ground in frequency domain the new Two-image approximation of Sommerfeld integral kernel is used, as well as an electromagnetic model of the return stroke channel and the System of integral equations of two potentials (SIE-TP) for determining currents along the antenna structure modelling the system of the lightning discharge channel and lightning protection rods. The computer program is realized for the calculation of LEMF or the lightning discharge in the surroundings of arbitrarily positioned lightning protection rods, determining induced currents along the antenna structure, input impedance and grounding impedance.

LIGHTNING ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE SURROUNDINGS OF WIRE STRUCTURES

Vesna Javor, Predrag D. Rančić