

Branko Posedel, dipl. ing. el.
HEP – ODS d.o.o., Elektroistra Pula
branko.posedel@hep.hr

dr. sc. Petra Posedel, dipl. ing. mat.
Sveučilište u Zagrebu, Ekonomski fakultet
pposedel@efzg.hr

PRORAČUN ELEKTROMAGNETSKIH POLJA ZRAČNIH DISTRIBUTIVNIH VODOVA

SAŽETAK

Rad analizira vrijednosti električnog i magnetskog polja u okolici prostora sigurnosnih udaljenosti vodiča od nekog objekta. Potrebno je utvrditi da li vrijednosti EM polja pogonske frekvencije 50 Hz prelaze vrijednosti dopuštene Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja u daljnjem tekstu "Pravilnik". Zbog sve veće izgradnje stambenih i drugih objekata u prigradskim i ruralnim sredinama dolazi do približavanja tih objekata distributivnim vodovima koji se već nalaze na tim prostorima. Prilikom izdavanja elektroenergetskih suglasnosti mnogo je upita investitora vezano za „elektromagnetsko zračenje“ u blizini tih zračnih vodova odnosno dali su „zračenja“ u dozvoljenim granicama.

Iz tog razloga je izrađen relativno jednostavan matematički model za računanje električnih i magnetskih polja. Proračun je izvršen matematičkim programom MATCAD kojim se utvrđuju vrijednosti EM polja u prostoru. Točnost rezultata proračuna provjerena je mjerenjem električnog i magnetskog polja ispod dalekovoda 10(20) i 35 kV sa poznatim rasporedom vodiča.

Ključne riječi: elektromagnetsko polje, matematički model, pravilnik, sigurnosna udaljenost, granične vrijednosti

CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN OVERHEAD DISTRIBUTION NETWORKS

SUMMARY

The paper analyses values of electric and magnetic fields in the surroundings of the safe-distance area between the conductor and an object. It is necessary to establish if the values of an EM field of 50 Hz power frequency exceed those defined by the Regulations for protection from Electromagnetic Fields. As a result of an increased building activity, housing estates and other facilities in suburban and rural areas are getting closer to the existing distribution lines. While applying for obtaining electrical energy permits, developers increasingly enquire about the “electromagnetic field” in the vicinity of overhead lines, in other words, whether “radiation” is kept within the allowed values.

A relatively simple mathematical model has therefore been made to calculate electric and magnetic fields. The calculation is performed using the MATCAD mathematical program which establishes EM values in space. The accuracy of the results has been checked by measuring the electric and magnetic fields below a 10(20) kV and 35 kV primary feeder with a known position of conductors.

Key words: electromagnetic field, mathematical model, regulations, safe distance area, allowed values

1. UVOD

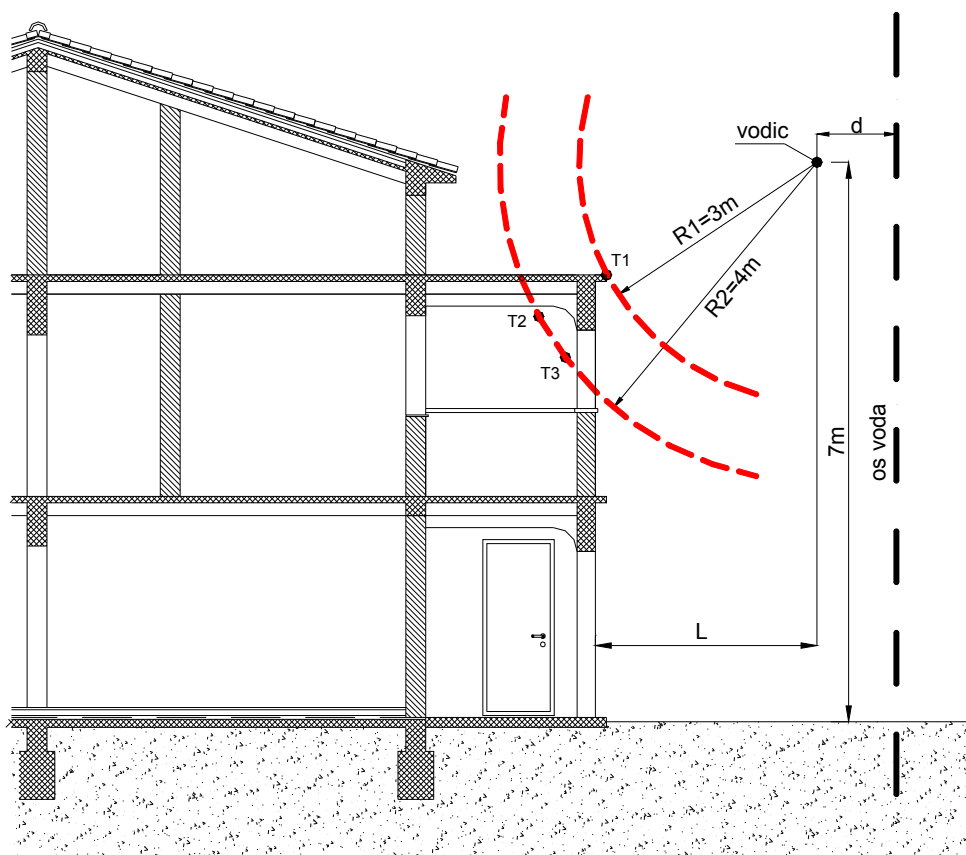
Kod distributivnih vodova, umjesto izraza «elektromagnetsko zračenje» upotrebljavamo izraz električno i magnetsko polje. Naime kada je udaljenost između promatrača i izvora EM polja manja od valne duljine elektromagnetskog vala (λ) tada učinci električnog i magnetskog polja djeluju na promatrača međusobno neovisno. Kod izvora EM polja mrežne frekvencije 50Hz, valna duljina je 6000 km, dok učinke polja promatramo na udaljenosti od nekoliko desetaka metara, pa se zbog toga električno i magnetsko polje te njegovi učinci računaju, mjere i iskazuju zasebno.

Granične razine referentnih veličina električnog i magnetskog polja i područja izloženosti definirane su Pravilnikom (Tablica I.).

Tablica I. Granične razine EM polja i područja izloženosti

	Magnetsko polje B (μT)		Električno polje E (kV/m)	
	I. područje	II. područje	I. područje	II. područje
novi objekti	40	100	2	5
postojeći objekti	100	100	5	5

Na slici 1. prikazano je vođenje dalekovoda preko zgrade koja služi za stalan boravak ljudi, sa prikazom sigurnosnih udaljenosti, visine vodiča, udaljenosti horizontalne projekcije najbližeg vodiča od zgrade (L) i točke u kojima se vrši proračun EM polja. Smatra se da vod prelazi preko zgrade i kad je udaljenost horizontalne projekcije (L) najbližeg vodiča u neotklonjenom položaju manja od 3,0 m za vodove nazivnog napona do uključivo 20 kV, a za vodove nazivnog napona većeg od 20 kV manja od 5,0 m. Proračuni se odnose samo na stambene zone koje spadaju u područja povećane osjetljivosti (I područje) u kojima se osobe mogu zadržavati 24 sata. Za vodove u naseljenim mjestima sigurnosna visina iznosi 7 m.



Slika 1. Prikaz sigurnosnih udaljenosti vodiča od objekta

2. PRORAČUNI

2.1. Magnetsko djelovanje u poluprostoru

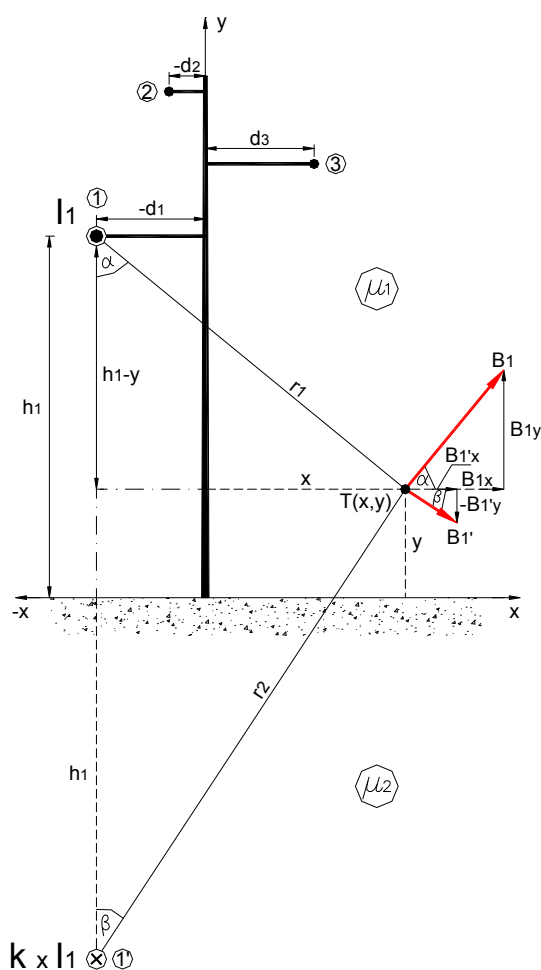
Površina zemlje dijeli prostor na dva poluprostora. Jedan poluprostor je zrak koji ima permeabilnost μ_1 a drugi poluprostor je zemlja koja ima permeabilnost μ_2 . U zraku je smješten vodič (modeliran kao beskonačno dug) na visini h_1 kroz koji prolazi struja I_1 . Ukoliko je permeabilnost zraka μ_1 veća od permeabilnosti zemlje μ_2 , tada je odslikana struja suprotnog smjera a njezin iznos je određen relacijom:

$$I_2 = -\frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \cdot I_1 \quad (1)$$

Izračunate krivulje gustoće magnetskog toka najbolje aproksimiraju izmjerene vrijednosti (Slike 6,8 i 10) kada struja u odslikanom vodiču iznosi $-0,2 \cdot I_1$. Na osnovu toga iz relacije (1) i iz poznate permeabilnosti zraka ($\mu_1 \approx 1,4$) određena je relativna permeabilnost zemlje μ_2 koja iznosi cca. 0,93. Zemlja se u magnetskom polju uzrokovanom strujom I_1 ponaša kao diamagnetna tvar.

2.2. Proračun magnetskog polja

Magnetsku indukciju B u određenoj točki prostora dobijemo superpozicijom struje u vodiču I_1 i odslikane struje $k \cdot I_1$. Raspored vodiča, visina iznad zemlje i komponente magnetske indukcije prikazane su na slici 2.



Slika 2. Prikaz modela za proračun

Struja (I_1) koja poteče kroz vodič beskonačne dužine proizvodi magnetsko polje. Linije magnetskog polja su koncentrični krugovi u ravnini x-y koja je okomita na os vodiča. Vektor gustoće magnetskog toka je tangenta na krivulji polja i ima isti intenzitet u svim točkama te krivulje. Jačina gustoće magnetskog toka je obrnuto proporcionalna udaljenosti "r" od vodiča i određena je poznatim Amperovim zakonom:

$$\oint_c B dl = B \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \mu_0 \cdot I \quad (2)$$

te je:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (3)$$

Izraz (3) predstavlja dobro poznat Biot-Savartov zakon, gdje je:

B - gustoća magnetskog toka (magnetska indukcija) (T)

μ_0 - magnetska permeabilnost vakuumu ($1.257 \cdot 10^{-6} H / m$)

I - struja u vodiču (A)

r - udaljenost vodiča do točke proračuna (m)

Amplitude magnetske indukcije koje proizvode struje I_1 i $k \cdot I_1$ u točki T (x, y) iznose:

a) magnetska indukcija u osi – x:

$$B_{1x} = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot r_1} \cdot \cos(\alpha) \quad B_{1'x} = \frac{\mu_0 \cdot k \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot r_2} \cdot \cos(-\beta) \quad (4)$$

b) magnetska indukcija u osi – y:

$$B_{1y} = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot r_1} \cdot \sin(\alpha) \quad B_{1'y} = \frac{\mu_0 \cdot k \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot r_2} \cdot \sin(-\beta) \quad (5)$$

$$r_1 = \sqrt{(x - d_1)^2 + (h_1 - y)^2} \quad r_2 = \sqrt{(x - d_1)^2 + (h_1 + y)^2}$$

Na isti način određujemo komponente magnetske indukcije za preostale vodiče te se uz pretpostavku simetričnog sistema struja ($I_1 = I_2 = I_3 = I$) mogu napisati amplitude doprinosa svakog pojedinog vodiča magnetskoj indukciji u točki T (x, y):

$$B_{ix} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{h_i - y}{(x - d_i)^2 + (h_i - y)^2} + \frac{k \cdot (h_i + y)}{(x - d_i)^2 + (h_i + y)^2} \right) \quad (6)$$

$$B_{iy} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{x - d_i}{(x - d_i)^2 + (h_i - y)^2} - \frac{k \cdot (x - d_i)}{(x - d_i)^2 + (h_i + y)^2} \right) \quad (7)$$

gdje je:

i - broj vodiča (1, 2, 3)

k - faktor koji ovisi o permeabilnosti zemlje i iznosi 0,2

Obzirom da su u trofaznom sustavu struje sinusnog oblika i međusobno pomaknute za kut φ_i koji iznosi $120 \cdot \frac{\pi}{180} rad$, amplitudama B_{ix} i B_{iy} dajemo izmjenični oblik:

$$b_{ix} = B_{ix} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_i) \quad (8)$$

$$b_{iy} = B_{iy} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_i) \quad (9)$$

Ako primijenimo adicijski teorem za funkciju:

$$\cos(\omega \cdot t + \varphi_i) = \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos(\varphi_i) - \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\varphi_i) \quad (10)$$

tada možemo definirati konstante:

$$a_i = B_{ix} \cdot \cos(\varphi_i) \quad a = \sum_{i=1}^3 a_i \quad b_i = -B_{ix} \cdot \sin(\varphi_i) \quad b = \sum_{i=1}^3 b_i \quad (11)$$

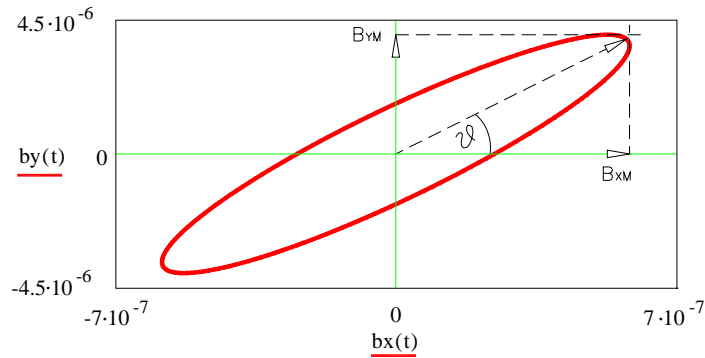
$$c_i = B_{iy} \cdot \cos(\varphi_i) \quad c = \sum_{i=1}^3 c_i \quad d_i = -B_{iy} \cdot \sin(\varphi_i) \quad d = \sum_{i=1}^3 d_i \quad (12)$$

Ukupne vrijednosti komponenti magnetske indukcije u točki T (x,y) nastale utjecajem tri vodiča iznose:

$$bx = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (13)$$

$$by = c \cdot \cos(\omega \cdot t) + d \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (14)$$

Izrazi (13) i (14) predstavljaju jednadžbu elipse u parametarskom obliku, čija je velika os pomaknuta za kut ϑ u odnosu na X-os. Zbog prostornog rasporeda vodiča i vremenskog pomaka struja za kut φ_i u svakoj točki prostora nastaje eliptički polarizirano rotaciono magnetsko polje, koje je prikazano na slici 3.



Slika 3. Eliptički polarizirano rotacijsko magnetsko polje DV 10 kV (bačva) u točki (-5.3, 4.5)

Iz izraza (13) i (14) dobijemo maksimalne vrijednosti magnetske indukcije u x i y smjeru

$$B_{xM} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (15)$$

$$B_{yM} = \sqrt{c^2 + d^2} \quad (16)$$

Točke na elipsi (slika 3.) predstavljaju kvadrat magnetske indukcije pa vremenska funkcija $B^2(\omega \cdot t)$ ima izraz:

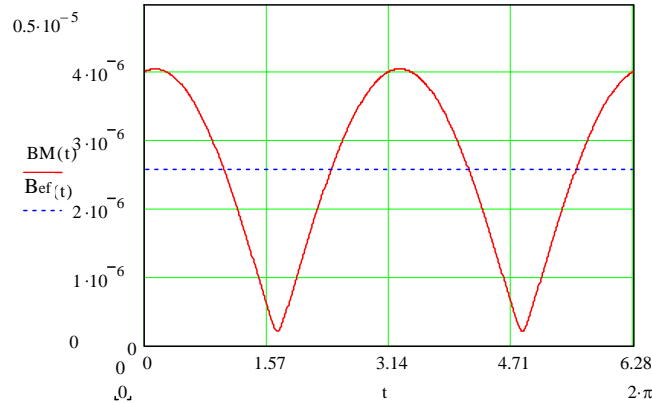
$$B^2(\omega \cdot t) = bx^2 + by^2 \quad (17)$$

$$B^2(\omega \cdot t) = (a^2 + c^2) \cdot \cos^2(\omega \cdot t) + (b^2 + d^2) \cdot \sin^2(\omega \cdot t) + (a \cdot b + c \cdot d) \cdot \sin(2\omega \cdot t) \quad (17a)$$

Efektivna vrijednost magnetske indukcije u točki T (x, y) dana je izrazom:

$$B_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} B^2 \cdot d(\omega \cdot t)} = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}{2}} \quad (18)$$

Na slici 4. vidimo da funkcija efektivnih vrijednosti magnetske indukcije nema nulte točke (vrijednost nula) nego oscilira oko srednje vrijednosti dvostrukom frekvencijom (100 Hz).



Slika 4. Funkcija magnetske indukcije DV 10kV (bačva) u točki T (-5.3, 4.5)

Srednja vrijednost magnetske indukcije iznosi:

$$B_{sr} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} B^2 \cdot d(\omega t) \quad (19)$$

Deriviranjem jednadžbe (17a) po kutu ωt i izjednačavanjem sa nulom, dobijemo vrijednost kuta ωt kod kojeg ima kvadrat magnetske indukcije ekstrem tj. maksimalnu vrijednost. Vrijednost kuta iznosi:

$$\omega t = \pm \vartheta = \arccos \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\sqrt{\frac{A + a^2 \cdot \sqrt{A} - b^2 \cdot \sqrt{A} - d^2 \cdot \sqrt{A} + c^2 \cdot \sqrt{A}}{A}} \right) \right] \quad (20)$$

$$A = [(a + d)^2 + (b - c)^2] \cdot [(a - d)^2 + (b + c)^2] \quad (21)$$

Maksimalnu vrijednost magnetske indukcije u točki T (x, y) dobijemo korjenovanjem (17a) i uvrštenjem ϑ umjesto $\omega \cdot t$:

$$B_{\max} = \sqrt{(a^2 + c^2) \cdot \cos^2(\vartheta) + (b^2 + d^2) \cdot \sin^2(\vartheta) + (a \cdot b + c \cdot d) \cdot \sin(2 \cdot \vartheta)} \quad (22)$$

2.3. Proračun električnog polja

Količina i polaritet odslikanog naboja q_2 zbog prisutnosti linijskog naboja q_1 na vodiču koji se nalazi na visini h_1 od zemlje ovisi o dielektričnoj konstanti zemlje (ε_2) i to:

$$q_2 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot q_1 \quad (23)$$

gdje je: ε_1 - relativna dielektrična konstanta zraka koja iznosi približno 1

ε_2 - relativna dielektrična konstanta zemlje

Zemlja se zbog svoje velike površine (presjeka) ponaša u električnom polju kao vodič sa velikom električnom vodljivošću (λ) pa ima veliku relativnu dielektričnu konstantu (mnogo veću od ε_1). Uvrštenjem izraza $\varepsilon_2 \gg \varepsilon_1$ u (23) dobijemo iznos odslikanog naboja q_2 , koji je isti kao q_1 , samo suprotnog predznaka. Električno polje bi također mogli izračunati superpozicijom dva naboja, međutim mnogo je elegantnija metoda pomoću parcijalne derivacije električnog potencijala koji u točki T (x, y) iznosi:

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (24)$$

gdje je:

ε_0 - dielektrična konstanta vakuuma koja iznosi $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$

r_1 i r_2 - su definirani kod proračuna magnetske indukcije (Slika 1.)

q_1 - linijski naboj na vodiču 1 (C)

Položaj vodiča i geometrija prostora ista je kao i kod proračuna magnetske indukcije (Slika 2.). Parcijalnom derivacijom električnog potencijala (24) i zamjenom linijskog naboja q_i sa produktom:

$$Co_i \cdot U_{\max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{2 \cdot h_i}{R}\right)} \cdot U_{\max} \quad (24a)$$

gdje je:

Co_i - uzdužna (dozemna) kapacitivnost pojedinog vodiča bez utjecaja ostalih vodiča (F/m)

U_{\max} - maksimalna vrijednost potencijala vodiča i zemlje (V)

R - polumjer vodiča (m)

dobivamo statične komponente vrijednosti električnog polja u x i y smjeru:

$$E_{ix} = -\frac{d\varphi_i}{dx} = \frac{U_{\max}}{\ln\left(\frac{2 \cdot h_i}{R}\right)} \left(\frac{x - d_i}{(x - d_i)^2 + (h_i - y)^2} - \frac{(x - d_i)}{(x - d_i)^2 + (h_i + y)^2} \right) \quad (25)$$

$$E_{iy} = -\frac{d\varphi_i}{dy} = -\frac{U_{\max}}{\ln\left(\frac{2 \cdot h_i}{R}\right)} \left(\frac{h_i - y}{(x - d_i)^2 + (h_i - y)^2} + \frac{h_i + y}{(x - d_i)^2 + (h_i + y)^2} \right) \quad (26)$$

Kod srednjenaponskih vodova zbog malih razmaka između vodiča i visina iznad zemlje, znatan je međusobni utjecaj linijskih naboja na kapacitivnost pojedinog vodiča Co_i . Da bi proračuni bili korektni moramo umjesto Co_i računati sa stvarnim pogonskim kapacitetima Cp , pa (25) i (26) množimo sa korekcijskim faktorima α_i koji iznose:

$$\alpha_i = \frac{Cp}{Co_i} \quad (27)$$

gdje je Cp pogonska kapacitivnost pojedinog vodiča (F/m)

Sredjenaponske vodove, zbog relativno malih razlika u visinama pojedinih vodiča prema zemlji i malih međusobnih razmaka, možemo smatrati simetričnim pa su onda i pogonski kapaciteti pojedinih vodiča približno jednaki i iznose:

$$C_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln\left(2 \cdot \frac{\sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}}{R}\right) - \ln\left(\sqrt[3]{\frac{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}}\right)} \quad (28)$$

gdje je: h_1, h_2, h_3 - visine pojedinih vodiča iznad zemlje
 d_{12}, d_{23}, d_{31} - razmaci između vodiča i njihovih zrcalnih slika
 D_{12}, D_{23}, D_{31} - razmaci između vodiča na glavi stupa

Pogonski kapaciteti su kod dvostrukih vodova uglavnom za 1.5 do 5% manji nego kod jednostrukih vodova. Za dvostruki vod s bačvastim rasporedom vodiča, izračunati pogonski kapacitet je umanjen za 2%. U Tablici II. prikazane su izračunate vrijednost pogonskih kapaciteta C_p i koeficijenta α_i za izmjerene visine i razmake među vodičima. Visine vodiča od zemlje i njihov međusobni razmak izmjeren je geodetskom mjernom stanicom (elektrooptičkim daljinomjerom).

Tablica II. Vrijednosti C_p i α_i

Vod	i	Izmjerene koordinate vodiča $d_i; h_i$ (m)	$\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}$ (m)	$\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$ (m)	Pogonski kapacitet C_p (nF/m)	α_i
35 kV (jela)	1	(-2,3 ; 13)	30,14	4,33	8,5	1,276
	2	(-1,5 ; 17)				1,317
	3	(2,1 ; 15)				1,298
10(20)kV (delta)	1	(-1,2 ; 7,44)	15,63	2,01	8,945	1,32
	2	(0 ; 8,74)				1,318
	3	(1,2 ; 7,25)				1,348
10(20)kV (bačva)	1	(-1,2 ; 8,61)	20,394	2,16	9,513	1,329
	2	(-1,45 ; 10,08)				1,356
	3	(-1,2 ; 11,97)				1,384
	4	(1,2 ; 8,8)				1,329
	5	(1,45 ; 10,5)				1,356
	6	(1,2 ; 11,54)				1,384

Nakon izračunatih korekcijskih koeficijenata (α_i), vrijednosti statičnih komponenata električnog polja iznose:

$$E_{ix}^* = \alpha_i \cdot E_{ix} \quad (29)$$

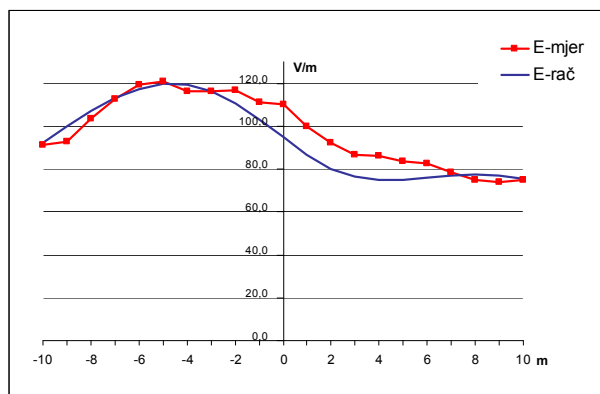
$$E_{iy}^* = \alpha_i \cdot E_{iy} \quad (29a)$$

Daljnji postupak za dobivanje izmjeničnih komponenti električnog polja je isti onom opisanom za proračun magnetskog polja pa se mogu koristiti izrazi od (8) do (22).

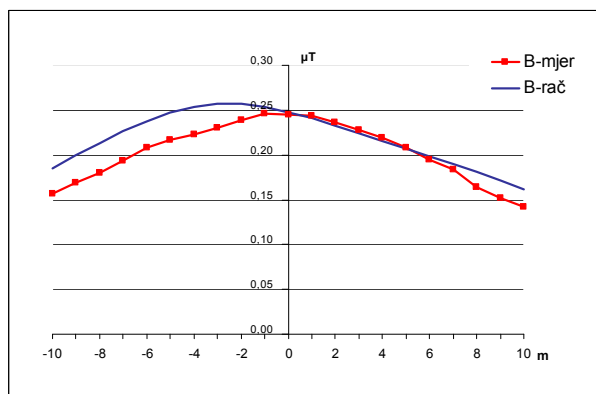
2.4. Provjera matematičkog modela

Da bi mogli usporediti rezultate proračuna sa stvarnim izmjerenim vrijednostima, izvršeno je mjerenje električnog i magnetskog polja na dalekovodima 10(20) i 35 kV sa parametrima voda iz Tablice II. i to na visini 1.5 m iznad zemlje. Kako bi rezultati mjerenja bili što točniji, geodetskom mjernom stanicom (elektrooptičkim daljinomjerom) izmjerene su visine vodiča iznad zemlje (h_i), simetrala stupa (ishodište koordinatnog sistema), okomitost simetrale stupa (y-os) i pravca mjerenja (x-os), te nulte kote terena. Prilikom mjerenja vršena su očitavanja struje i napona u vodnom polju. Izmjerene i izračunate vrijednosti magnetske indukcije i električnog polja na visini 1,5 m iznad zemlje, prikazane su na Slikama 5, 6, 7, 8, 9 i 10. Iz prikazanih slika vidi se da

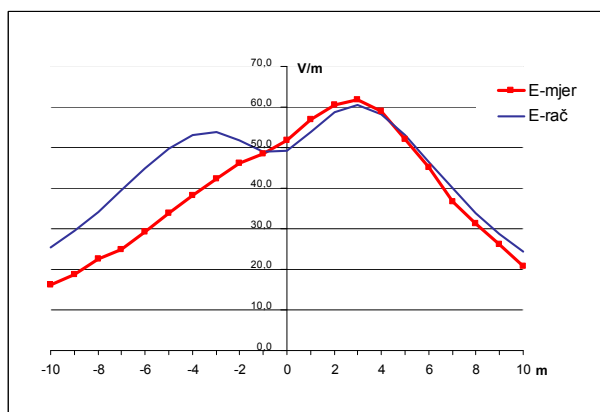
matematički model dobro aproksimira izmjerene vrijednosti, te ga možemo pouzdano koristiti za proračun električnog i magnetskog polja zračnih dalekovoda srednjeg napona.



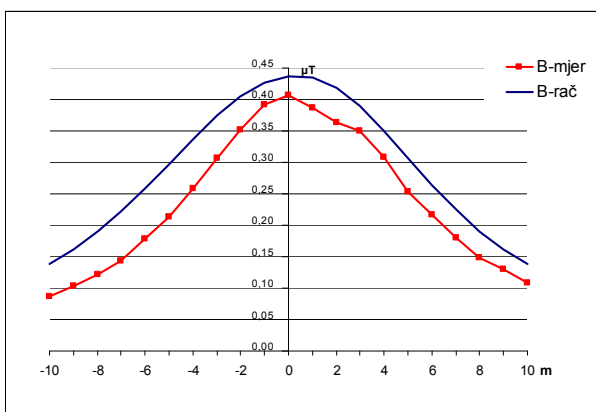
Slika 5. Izmjerene i izračunate vrijednosti električnog polja na DV 35 kV "jela" ($U=35,6\text{kV}$)



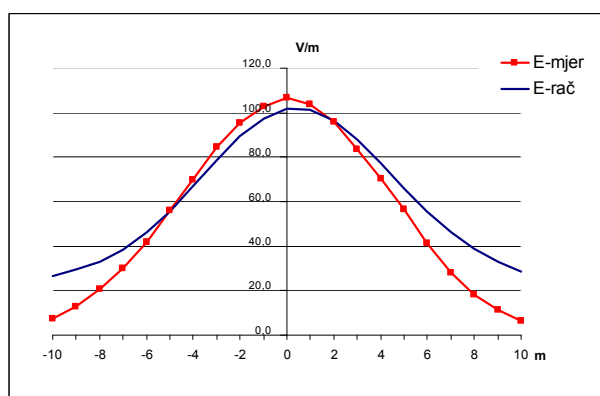
Slika 6. Izmjerene i izračunate vrijednosti magnetske indukcije na DV 35 kV "jela" ($I=43\text{A}$)



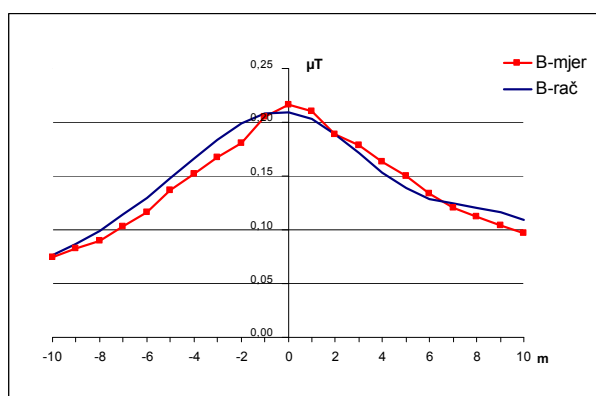
Slika 7. Izmjerene i izračunate vrijednosti električnog polja na DV 10 kV "delta" ($U=10,2\text{kV}$)



Slika 8. Izmjerene i izračunate vrijednosti magnetske indukcije na DV 10(20) kV "delta" ($I=38\text{A}$)



Slika 9. Izmjerene i izračunate vrijednosti električnog polja na DV 10 kV "bačva" ($U=10,3\text{kV}$)



Slika 10. Izmjerene i izračunate vrijednosti magnetske indukcije na DV 10(20) kV "bačva" ($I_1=8\text{A}$; $I_2=23\text{A}$)

2.5. Izračun magnetskog i električnog polja u blizini sigurnosnih udaljenosti

Vrijednosti magnetskog i električnog polja izračunate su u prostoru sigurnosnih udaljenosti tj. u točkama T1, T2 i T3 koje su prikazane na Slici 1. Parametri vodova za proračun prikazani su u Tablici III.

Tablica III. Podaci za proračun

Vod	i	Koordinate vodiča ($d_i; h_i$) (m)	S (mm ²)	f_i (rad)	U_{max} (kV)	I_{op} (A)	I_n (A)	$0,8 \times I_n$ (A)
DV 35 kV (jela)	1	(-2.3 ; 7)	120	0	28,57	120	410	328
	2	(-1.5 ; 11)		-2,09				
	3	(2.1 ; 9)		2,09				
DV 20 kV (delta)	1	(-1.2 ; 7)	50	0	16,33	50	170	136
	2	(0 ; 8,2)		-2,09				
	3	(1.2 ; 7)		2,09				
DV 20 kV (bačva)	1	(-1.2 ; 7)	120	0	16,33	120	410	328
	2	(-1.45 ; 8.7)		-2,09				
	3	(-1.2 ; 10.4)		2,09				
	4	(1.2 ; 7)		0				
	5	(1.45 ; 8.7)		2,09				
	6	(1.2 ; 10.4)		-2,09				
DV 10 kV (delta)	1	(-1.2 ; 7)	50	0	8,16	50	170	136
	2	(0 ; 8,2)		-2,09				
	3	(1.2 ; 7)		2,09				

Za svaki tip glave stupa izvršen je proračun magnetske indukcije za tri karakteristična opterećenja i to:

- optimalan iznos struje u vodu (I_{op})
- 80% vrijednosti maksimalno dopuštene struje u trajnom pogonu ($0.8 \times I_n$)
- maksimalno dopuštena struja u trajnom pogonu (I_n)

Već dugo je poznato da se za Al/Fe vodiče dalekovoda optimalna gustoća struje kreće oko 1A/mm². U zapadnim zemljama sa skupljom električnom energijom (Francuska) uzimaju se nešto niže vrijednosti [5]. Maksimalan iznos struje u trajnom pogonu preuzet je iz Kaisarovog elektrotehničkog priručnika. Izračunate vrijednosti magnetskog i električnog polja u okolici sigurnosnih udaljenosti prikazane su u Tablici IV.

Tablica IV. Rezultati proračuna EM polja

Vod	Koordinate ($x_i; y_i$) (m)	$B_{ef}(I_{op})$ (μT)	$B_{ef}(0,8 \times I_n)$ (μT)	$B_{ef}(I_n)$ (μT)	E_{ef} (V)	E_{max} (V)	S (mm ²)
DV 35 kV (jela)	T ₁ (-4.8 ; 5.5)	5,6	15,3	19,1	726	950	120
	T ₂ (-5.8 ; 5)	3,6	9,8	12,4	470	560	
	T ₃ (-5.3 ; 4.5)	3,8	10,3	12,9	500	606	
DV 20 kV (delta)	T ₁ (-4.8 ; 5.5)	1,4	3,8	4,8	199	200	50
	T ₂ (-5.8 ; 5)	0,96	2,1	3,3	136	117	
	T ₃ (-5.3 ; 4.5)	1	2,8	3,5	149	139	
DV 20 kV (bačva)	T ₁ (-4.8 ; 5.5)	6,9	10,4	12,8	433	547	120
	T ₂ (-5.8 ; 5)	6,7	7,5	8,9	325	429	
	T ₃ (-5.3 ; 4.5)	7	8,5	10	309	384	
DV 10 kV (delta)	T ₁ (-4.8 ; 5.5)	1,4	3,8	4,8	99,5	99,8	50
	T ₂ (-5.8 ; 5)	0,96	2,1	3,3	68	58,6	
	T ₃ (-5.3 ; 4.5)	1	2,8	3,5	74,5	69,7	

3. ZAKLJUČAK

Predloženi matematički model može se pouzdano koristiti za izračun magnetskog i električnog polja u prostoru sigurnosnih udaljenosti srednjenaponskih vodova.

Iz izračunatih vrijednosti referentnih veličina električnog i magnetskog polja u prostoru sigurnosnih udaljenosti prikazanih u Tablici III. možemo zaključiti slijedeće:

- a) električno i magnetsko polje jednostrukih dalekovoda 10 i 20 kV je manje od graničnih razina za područja povećane i profesionalne izloženosti, te ne predstavljaju značajan izvor EM polja (10% graničnih vrijednosti)
- b) električna i magnetska polja dvostrukih dalekovoda 20 kV su manja od graničnih razina za područja povećane i profesionalne izloženosti, međutim EM polja novih vodova su veća od 10% graničnih vrijednosti.
- c) električna i magnetska polja jednostrukih dalekovoda 35 kV su manja od graničnih razina za područja povećane i profesionalne izloženosti, međutim postojeći i novi vodovi predstavljaju značajan izvor EM polja za oba područja izloženosti.

Na osnovu rezultata proračuna vidimo da su vrijednosti električnog i magnetskog polja u okolici prostora sigurnosnih udaljenosti manje od graničnih vrijednosti definiranih «Pravilnikom» za sva tri srednjenaponska nivoa. Ukoliko usvojimo kriterij da nam referentne veličine EM polja budu manja od 10% iznosa graničnih razina onda nam dvostruki 20 kV dalekovodi i dalekovodi 35 kV ne zadovoljavaju taj kriterij, te bi bilo uputno razmotriti povećanje sigurnosnih udaljenosti navedenih u čl. 104. i čl. 105. Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV.

LITERATURA

- [1] T. Bosanac, "Teoretska elektrotehnika 1", Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb 1970.
- [2] J. Surutka, "Elektromagnetika", Univerzitet u Beogradu, Beograd 1975.
- [3] D. Sabolić, "Procjena uvjeta elektromagnetske izloženosti živih bića u blizini 400 kV dalekovoda", Energija 5, Zagreb, listopad 1996.
- [4] D. Sabolić, "Procjena uvjeta elektromagnetske izloženosti živih bića u blizini različitih dalekovoda", Energija 6, Zagreb, prosinac 1996.
- [5] M. Plaper, "Principi optimalnosti u mrežama za prenos i distribuciju električne energije", Zajednica Jugoslavenske elektroprivrede - Beograd, Elektroinštitut "Milan Vidmar", Ljubljana 1980.