



DOI: 10.46793/CIGRE36.1529C

Ц4 05

KOMPARATIVNA ANALIZA METODA ZA PRORAČUN MAGNETSKOG POLJA U BLIZINI NADZEMNIH VODOVA

Stefan ČUBONOVIC, Aleksandar RANKOVIC*, Vladica MIJAILOVIC
Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku

ČAČAK

REPUBLIKA SRBIJA

Kratak sadržaj – Ugib provodnika ima veliki uticaj na raspodelu magnetskog polja u blizini nadzemnih vodova. Cilj rada je da se izvrši analiza proračuna magnetskog polja u blizini nadzemnih vodova, sa uvažnim ugibom provodnika i povratnog puta struje kroz zemlju, primenom različitih numeričkih metoda i analitičke aproksimativne metode. Komparativna analiza je urađena pri proračunu magnetskog polja 400 kV nadzemnog voda na različitim visinama od tla, za različite rasporede faznih provodnika, pri različitim dužinama raspona. Dobijene vrednosti su upoređene sa vrednostima dobijenim primenom jednostavnog dvodimenzionalnog modela sa beskonačnim pravim provodnicima.

Ključne reči – Magnetsko polje – Nadzemni vod – Ugib provodnika.

1 UVOD

Nadzemni elektroenergetski vodovi su jedan od osnovnih elemenata u sistemu prenosa električne energije. U okolini ovakvih vodova, kroz koje protiče vremenski promenljiva električna struja, javlja se vremenski promenljivo magnetsko polje $\vec{H}$, dok se u preporukama i standardima [1], [2] koji se između ostalog odnose i na magnetske pojave, koristi druga fizička veličina za opisivanje polja – vektor magnetske indukcije $\vec{B}$. Iako je u pitanju vektorska veličina za potrebe analize uticaja značajan je samo njen intenzitet. U ovom radu će se pomoću tri metode, čiji je računski deo isprogramiran u softverskom paketu MATLAB, ispitati uticaj magnetskog polja, na visini od 1,8 m od tla, u okolini provodnika uvažavajući ugib i povratni put struje kroz zemlju. Tačna vrednost intenziteta vektora magnetske indukcije

* Svetog Save 65, 32000 Čačak; E-mail: aleksandar.rankovic@ftn.kg.ac.rs;

može se odrediti primenom Bio-Savarovog zakona [3]. Međutim, ovaj način pokazuje određena ograničenja kada je u pitanju proračun magnetske indukcije složenih geometrijskih oblika, kao u slučaju dalekovodnih provodnika oblika lančanice, tj. kriva predstavljenih kosinus hiperboličnom funkcijom. Zbog toga su za ovu potrebu razvijene aproksimativne metode čija će analiza biti sprovedena u narednim poglavljima. Rezultati će biti upoređeni sa vrednostima dobijenim primenom jednostavnog dvodimenzionalnog modela sa beskonačnim pravim provodnicima, kod koga je zanemaren ugib provodnika.

Visokonaponski dalekovodi koriste trofazni sistem za prenos električne energije, sa naizmeničnim sinusoidnim naponima od 50 Hz i jednakom amplitudom. Ovaj rad se oslanja na analizu maksimalnog magnetskog polja [4] ispod nadzemnih provodnika.

Prva metoda [5] koja se primenjuje za određivanje intenziteta vektora magnetske indukcije uzima u obzir matematičku formulaciju jednačine lančanice, koja po obliku odgovara obliku nadzemnog provodnika sa uticajem ugiba. Kao što je prethodno navedeno, usled ograničenja koja postoje u analitičkom određivanju magnetske indukcije primenom Bio-Savarovog zakona, rešenje se dobija primenom postojeće funkcije za numeričko rešavanje integrala u softverskom paketu MATLAB. Samim tim predstavlja najtačnije rešenje za proračun vektora magnetske indukcije u nekoj tački.

Druga metoda [6] podrazumeva modelovanje lančanice konačnim brojem pravih segmenata. Za svaki pravi segment se računa uticaj magnetske indukcije u posmatranoj tački. Superpozicija magnetskih indukcija svih segmenata daće resultantnu vrednost magnetske indukcije u posmatranoj tački.

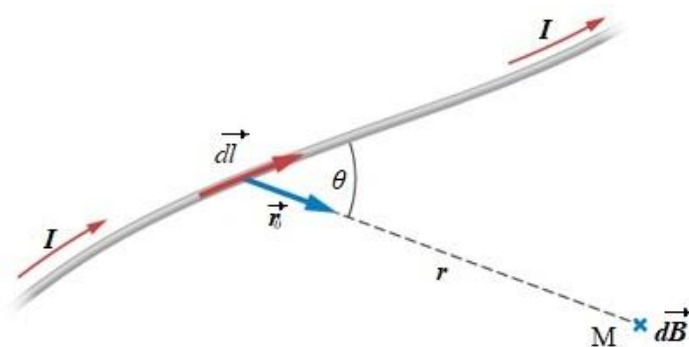
Treća metoda [7] predstavlja uprošćeni model sa aproksimacijom provodnika. U ovaj metodi se za proračun vrednosti magnetske indukcije provodnici aproksimiraju beskonačno dugim, paralelnim površini zemlje, ali se visina provodnika menja u zavisnosti od mesta proračuna i vrednosti ugiba provodnika, vertikalno od mesta proračuna.

Uticaj magnetskog polja na okolinu je tema koja sve više dobija na značaju. U elektroenergetskom sistemu Republike Srbije se ukupna dužina dalekovoda povećava iz godine u godinu [8], pri čemu je uticaj magnetskog polja 400 kV voda najveći. To je razlog zašto su analize pomenutih metoda urađene upravo za taj naponski nivo. Analizom će biti obuhvaćeni jednostruki i dvostruki 400 kV vodovi. Na osnovu dobijenih rezultata mogu se ispitati dozvoljene granice u pogledu elektromagnetskog zračenja definisane propisima i standardima.

2 DEFINISANJE OPŠTIH ZAKONA

Vektor magnetske indukcije $\vec{B}$, koju stvara provodnik proizvoljnog oblika kroz koji protiče struja intenziteta I (Slika 1) u tački M, koja se nalazi na visini 1,8 m od zemlje, može se izračunati na osnovu Bio-Savarovog zakona:

$$\vec{B}_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_l \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_l \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}, \quad (1)$$



Slika 1. Magnetska indukcija koju element struje $I d\vec{l}$ stvara u tački M

gde su:

- μ_o – magnetna permeabilnost vazduha;
- l – dužina posmatranog provodnika;
- I – jačina struje koja protiče kroz provodnik;
- $d\vec{l}$ – elementarna dužina posmatranog provodnika;
- $\vec{r}_o$ – jedinični vektor usmeren od strujnog elementa $d\vec{l}$ ka tački u kojoj određujemo polje;
- r – rastojanje od strujnog elementa $d\vec{l}$ ka tački u kojoj određujemo polje, tačka M ;
- θ – ugao između elementarne dužine posmatranog provodnika $d\vec{l}$ i jediničnog vektora $\vec{r}_o$.

Matematički oblik Bio-Savarovog zakona iz jednačine (1) nije pogodan za model provodnika kakav se sreće u realnim slučajevima, već predstavlja idejni korak za realizaciju metoda čiji će se rezultati porediti u ovom radu.

Pri proučavanju ponašanja provodnika dalekovoda u gravitacionom polju zemlje smatra se da su oni idealno gipki i da se zanemaruje uticaj uklještenja u tačkama vešanja. Uz gornje pretpostavke i polazeći od rezultata teorijske mehanike jedan raspon dalekovoda može se opisati jednačinom lančanice [7]:

$$y_i = k \cdot ch \frac{x_i - c_1}{k} + c_2. \quad (2)$$

Koeficijent k se može odrediti iz uprošćenog izraza za proračun maksimalnog ugiba dalekovoda, koji se koristiti za dužinu raspona $a \leq 500$ m, pri čemu je:

$$k \approx \frac{a^2}{8f_m}. \quad (3)$$

Koeficijenti c_1 i c_2 određuju se iz jednačine (2), za poznate vrednosti koordinata tački vešanja lančanice.

Rastojanje povratnog puta struje kroz zemlju je:

$$D_e = \sqrt{2} \cdot 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} e^{-j\frac{\pi}{4}}, \quad (9)$$

gde su:

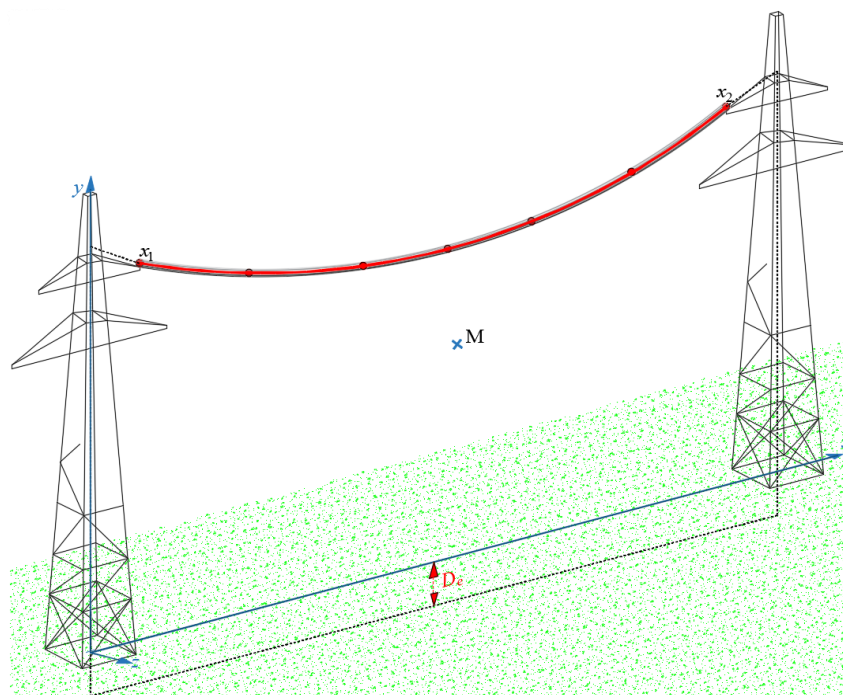
- ρ – specifična otpornost tla [Ωm];
- f – učestanost struje izvora [Hz].

3 METODE ZA PRORAČUN MAGNETSKOG POLJA U OKOLINI NADZEMNIH VODOVA

Cilj rada je određivanje intenziteta vektora magnetske indukcije provodnika nadzemnih vodova, modelovanih jednačinom lančanice (jednačina (2)). Imajući u vidu da se za ovaj geometrijski oblik provodnika ne može odrediti analitičko rešenje vektora magnetske indukcije, analizirane su tri približne metode (dve numeričke i jedna aproksimativna analitička) za određivanje magnetske indukcije. Sve metode biće detaljnije objašnjene u nastavku poglavlja.

3.1 Metoda 1

U ovoj metodi koristi numeričko određivanje magnetske indukcije u tački M uvažavajući efekat ugiba i prolaznog puta struje kroz zemlju (Slika 2). Prednost ove metode ogleda se u tome, što za razliku od ostalih koje ćemo pominjati u ovom radu, uzima u obzir realan oblik celog voda sa uvaženim ugibom. Matematički oblik takvog voda može je opisan jednačinom (2).



Slika 2. Modelovanje raspona u x-y ravni

Za jednačinu lančanice iz jednačine (2) elementarna dužina provodnika je:

$$d\vec{l} = dx_i\vec{i} + dy_i\vec{j} = dx_i\vec{i} + sh \frac{x_i - c_1}{k} dx_i\vec{j}, \quad (4)$$

a rastojanje od strujnog elementa dl ka tački u kojoj određujemo indukciju:

$$r = [(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2 + (z_M - z_i)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

Vektorski proizvod $d\vec{l} \times \vec{r}$ može odrediti kao:

$$d\vec{l} \times \vec{r} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ dx_i & sh\left(\frac{x_i - c_1}{k}\right) dx_i & 0 \\ x_M - x_i & y_M - y_i & z_M - z_i \end{vmatrix}, \quad (6)$$

odnosno:

$$\begin{aligned} d\vec{l} \times \vec{r} = & (z_M - z_i) sh\left(\frac{x_i - c_1}{k}\right) dx_i dx_i \cdot \vec{i} - \\ & -(z_M - z_i) dx_i \cdot \vec{j} + \\ & + \left[(y_M - y_i) - (x_M - x_i) sh\left(\frac{x_i - c_1}{k}\right) \right] dx_i \cdot \vec{k}. \end{aligned} \quad (7)$$

Zamenom jednačina (5) i (7) u jednačinu (1), i razdvajanjem vektora magnetske indukcije na skalarne komponente u pravci, x, y, z - ose, dobija se da je:

$$\begin{aligned} B_{i,x} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(z_M - z_i) sh\left(\frac{x_i - c_1}{k}\right)}{[(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2 + (z_M - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}} dx_i, \\ B_{i,y} &= -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(z_M - z_i)}{[(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2 + (z_M - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}} dx_i, \\ B_{i,z} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(y_M - y_i) - (x_M - x_i) sh\left(\frac{x_i - c_1}{k}\right)}{[(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2 + (z_M - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}} dx_i. \end{aligned} \quad (8)$$

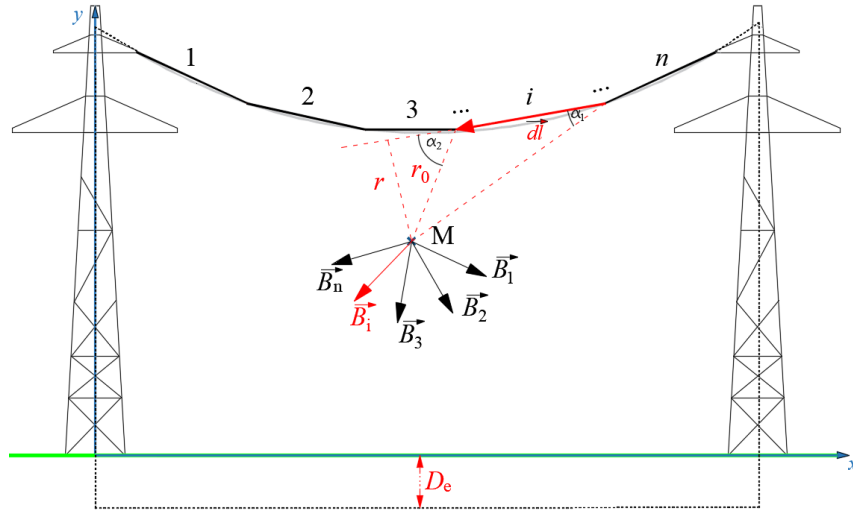
gde su:

- x_i, y_i, z_i – koordinate provodnika ili lika provodnika;
- x_M, y_M, z_M – koordinate tačke u kojoj određujemo magnetsku indukciju;
- $(x_1 - x_2)$ – dužina raspona.

Integrali u jednačinama (8) nemaju analitičko rešenje, pa se rešavaju primenom postojeće funkcije za numeričko rešavanje integrala u softverskom paketu MATLAB ('integral'). Analiza rezultata je prikazana u poglavlju 4.

3.2 Metoda 2

U slučaju kada nije moguće odrediti analitičko rešenje integrala u jednačinama (8), ukupna vrednost magnetske indukcije može se izračunati primenom principa superpozicije. Za određivanje jačine magnetske indukcije u tački M (Slika 3), treba podeliti lančanicu na konačan broj pravih segmenata, izračunati uticaj magnetske indukcije svakog segmenta kao i magnetske indukcije povratnog puta struja kroz zemlju (na rastojanju D_e). Zbir svih magnetskih indukcija pojedinačnih segmenata daće rezultatnu vrednost u tački M.



Slika 3. Modelovanje lančaniće konačnim brojem pravih segmenata

Posmatrajmo segment i . Magnetska indukcija u tački M na rastojanju r od elementa dl može se dobiti polazeći od jednačine (1), pomoću elementarnih geometrijskih odnosa, koristeći uglove α_{1i} (α_{2i}) koje formira rastojanje od početka (kraja) elementa dl do tačke M , pri čemu je:

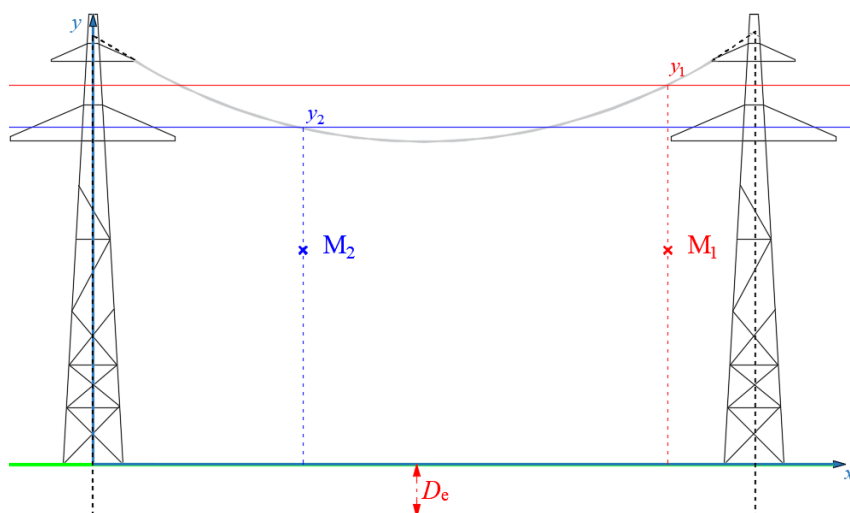
$$B_i = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_i} (\cos \alpha_{1i} - \cos \alpha_{2i}). \quad (9)$$

Rezultantna vrednost magnetske indukcije u tački M računa se kao superpozicija magnetskih indukcija svih segmenata i povratnog puta struja kroz zemlju:

$$B_M = \sum_{i=1}^n (B_i + B_{iDe}). \quad (10)$$

3.3 Metoda 3

Specifičnost ove metode je aproksimacija lančaniće beskonačnim pravim provodnikom, paralelnim površini zemlje. Da bi se smanjila greška u proračunu, vrednost visine pravih provodnika se prilagođava promeni koordinate x (duž raspona) tačke u kojoj se vrši proračun magnetskog polja [7]. Na Slici 4, na primeru dve tačke M_1 i M_2 , u kojima se proračunava magnetska indukcija, prikazano je kako se određuje visina beskonačnih provodnika. Visina beskonačnih pravih provodnika y_1 (y_2), određuje se iz jednačine (2), za vrednost koordinate x_{M1} (x_{M2}) tačke M_1 (M_2) u kojoj se proračunava magnetska indukcija.



Slika 4. Aproksimacija lančanice pravim provodnicima za Metodu 3

Polazeći od jednačine (1), magnetska indukcija beskonačnog pravog provodnika u tački M ima sledeće komponente:

$$B_{M,x} = 0;$$

$$B_{M,y} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{z_M - z_i}{(z_M - z_i)^2 + (y_M - y_i)^2} - \frac{z_M - z_i}{(z_M - z_i)^2 + (y_M + D_e)^2} \right); \quad (11)$$

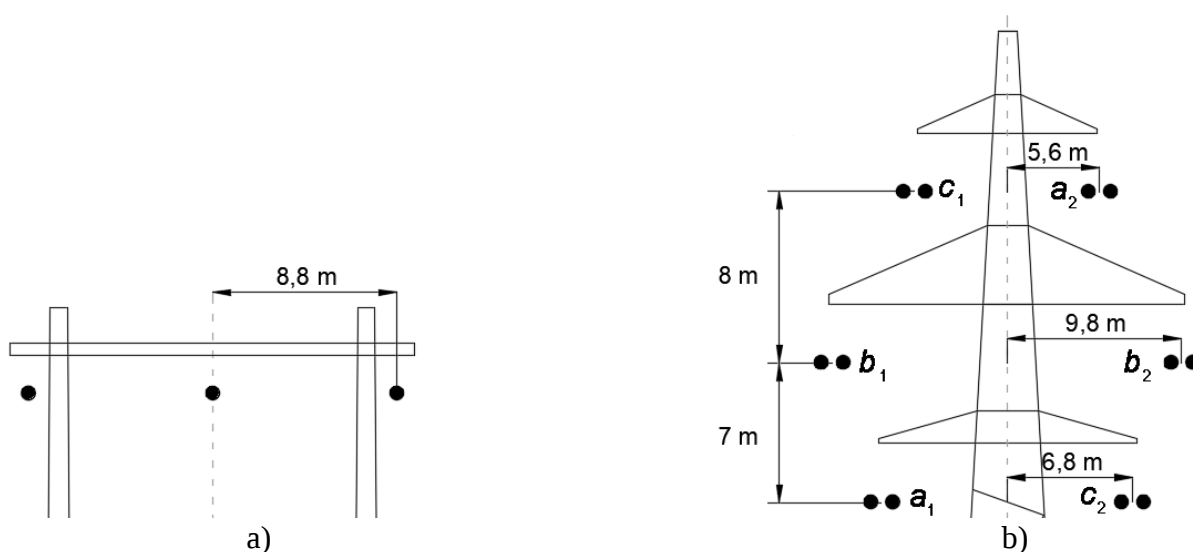
$$B_{M,z} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{y_M - y_i}{(z_M - z_i)^2 + (y_M - y_i)^2} + \frac{y_M + D_e}{(z_M - z_i)^2 + (y_M + D_e)^2} \right).$$

Rezultantna vrednost magnetske indukcije u tački M računa se kao:

$$B_M = \sqrt{B_{M,x}^2 + B_{M,y}^2 + B_{M,z}^2}. \quad (12)$$

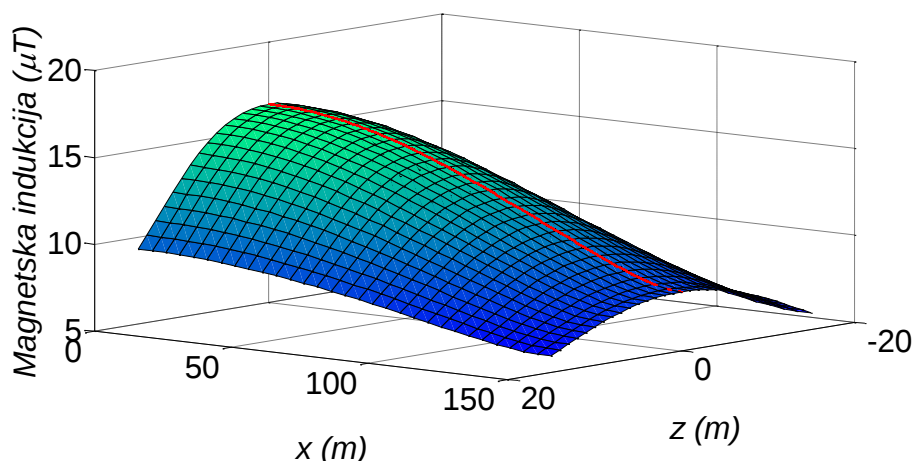
4 REZULTATI

Komparativna analiza je sprovedena za jednostruke i dvostruke 400 kV vodove, prikazane na Slici 5.



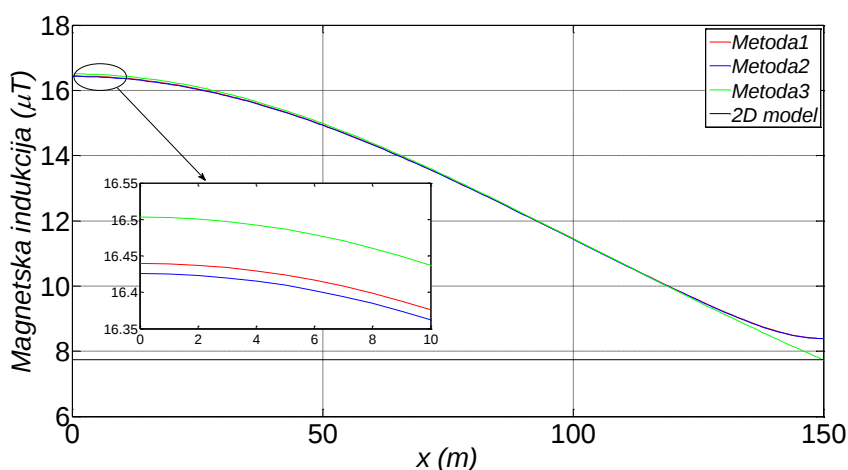
Slika 5. 400 kV stub a) Portalni i b) dvostruki sa „bure“ rasporedom provodnika

Raspodela magnetske indukcije u prostoru, primenom Metode 1 za jednostruki 400 kV vod, čiji su fazni provodnici u horizontalnoj ravni na međusobnom rastojanju od 8,8 m, visine tački vešanja provodnika 20 m i kroz koje protiče jačina struje od 1 kA prikazana je na Slici 6. Zbog simetrije magnetskog polja prikazana je samo jedna polovina raspona. Uočavamo da je jačina magnetske indukcije najjača na sredini raspona i duž ose koja spaja stubove voda. Pravac u kome je maksimalna vrednost magnetske indukcije označen je crvenom linijom na Slici 6.



Slika 5. Prostorna raspodela magnetske indukcije 400 kV voda na visini 1,8 m od zemlje, za dužinu raspona 300 m i visine tački vešanja faznih provodnika 20 m

Za pravac u kome je maksimalna vrednost magnetske indukcije izvršena je komparativna analiza primenom sve tri predložene metode i upoređena sa rezultatima dobijenim primenom jednostavnog dvodimenzionalnog modela sa beskonačnim pravim provodnicima koji su na visini tački vešanja faznih provodnika (2D model). Dobijeni rezultati prikazani su na Slici 7.



Slika 7. Raspodela magnetske indukcije duž ose jednostrukog 400 kV voda na visini 1,8 m od zemlje, za dužinu raspona 300 m i visine tački vešanja faznih provodnika 20 m, primenom različitih metoda

Sa Slike 7 vidi se da zanemarivanjem ugiba, primenom jednostavnog dvodimenzionalnog modela sa beskonačnim pravim provodnicima, greška proračuna povećava se od tačke proračuna ispod mesta vešanja provodnika (gde je greška 7,1%) do tačke proračuna na mestu ispod maksimalnog ugiba (gde je greška 52,6%).

Dodatna analiza urađena je variranjem parametara voda. Varirani parametri su: raspon voda (300 m, 200 m i 100 m) i odgovarajući maksimalni ugib faznog provodnika (7 m, 4,5 m i 1,5 m), kao i visine tački vešanja provodnika od zemlje (15 m, 20 m i 25 m). Proračun je izvršen u četiri karakteristične tačke na visini 1,8 m od tla duž prethodno izabranog pravca u kome je maksimalna vrednost magnetske indukcije (od tačke proračuna na mestu ispod maksimalnog ugiba gde je $x = 0$ m, do tačke proračuna ispod mesta vešanja provodnika gde je $x = 150$ m). Rezultati proračuna prikazani su u Tabeli I.

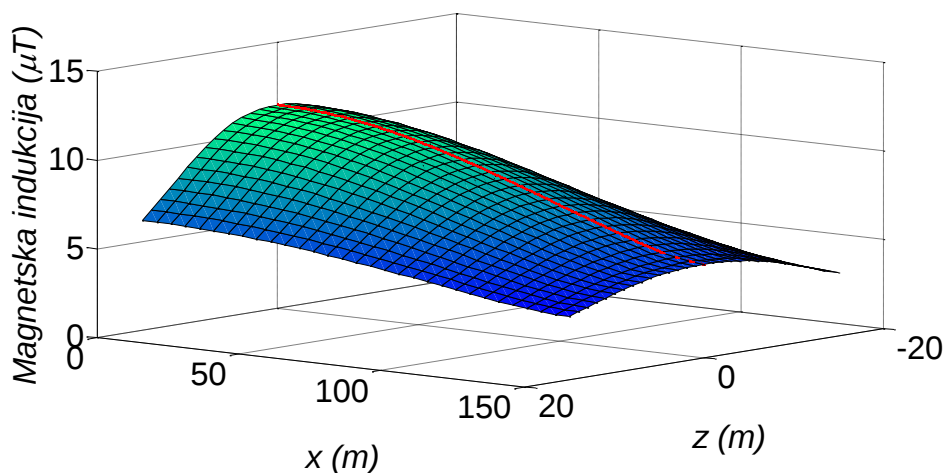
Tabela I. Komparativna analiza – promena raspona, ugiba i visine tački vešanja provodnika.

$I=1$ kA; $a_{\text{raspon}}=300$ m; $f_m=7$ m, međusobno rastojanje između faza 8,8 m.												
H [m]	B_{0m} [μ T]			B_{50m} [μ T]			B_{100m} [μ T]			B_{150m} [μ T]		
15	33,95	33,92	34,04	29,85	29,82	29,90	21,15	21,13	21,15	14,04	14,03	12,96
20	16,44	16,42	16,50	14,94	14,93	14,98	11,44	11,44	11,45	8,39	8,39	7,73
25	9,35	9,34	9,40	8,66	8,65	8,69	6,98	6,98	6,99	5,49	5,49	5,06
Metoda	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$I=1$ kA; $a_{\text{raspon}}=200$ m; $f_m=4,5$ m; međusobno rastojanje između faza 8,8 m.												
H [m]	B_{0m} [μ T]			B_{33m} [μ T]			B_{67m} [μ T]			B_{100m} [μ T]		
15	22,94	22,92	23,06	21,42	21,4	21,5	17,49	17,47	17,52	13,96	13,95	12,95
20	12,17	12,16	12,26	11,53	11,52	11,6	9,83	9,82	9,86	8,33	8,33	7,73
25	7,32	7,31	7,39	7,01	7,00	7,07	6,16	6,16	6,18	5,45	5,44	5,06
Metoda	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$I=1$ kA; $a_{\text{raspon}}=100$ m; $f_m=1,5$ m; međusobno rastojanje između faza 8,8 m.												
H [m]	B_{0m} [μ T]			B_{17m} [μ T]			B_{34m} [μ T]			B_{50m} [μ T]		
15	15,33	15,32	15,50	15,02	15,04	15,16	14,17	14,21	14,23	13,5	13,48	12,95
20	8,80	8,79	8,94	8,65	8,65	8,79	8,28	8,27	8,34	8,01	8,01	7,73
25	5,58	5,58	5,70	5,51	5,51	5,62	5,33	5,34	5,39	5,21	5,20	5,06
Metoda	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3

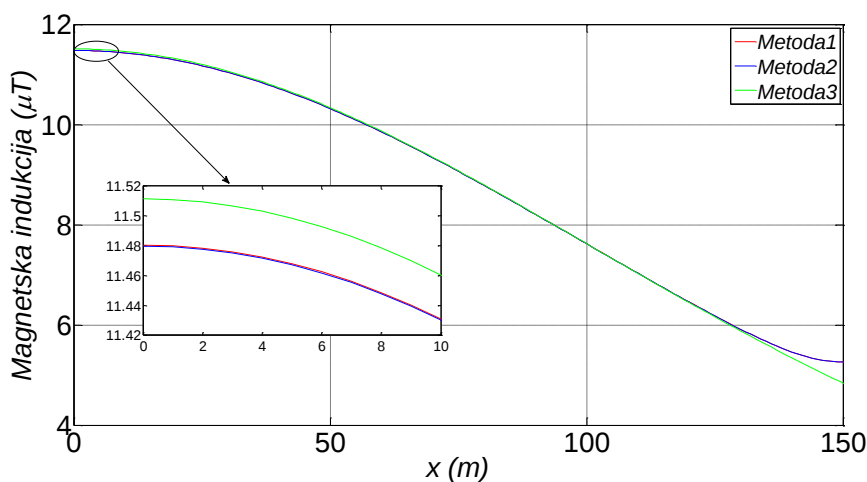
U tački proračuna na mestu ispod maksimalnog ugiba ($x = 0$ m) Metode 1 i 2 daju približno iste rezultate (maksimalna greška je manja od 0,1%), dok je odstupanje Metode 3 u tom delu voda, u zavisnosti od visina tački vešanja provodnika, od 0,27% do 0,53% za raspon 300 m, od 0,52% do 0,96 % za raspon 200 m i od 1,1% do 2,15% za raspon od 100 m. U tački ispod mesta vešanja provodnika to odstupanje je značajnije i iznosi maksimalno 7,9% za raspon od 300 m ($\Delta B_{150m,M3-M1} = 0,663 \mu\text{T}$).

Ista analiza izvedena je za raspodelu magnetske indukcije duž ose dvostrukog 400 kV voda i „bure“ raspored provodnika, sa dimenzijama i rastojanjima kao na Slici 5b. Usvojen fazni redosled provodnika ($a_1 b_1 c_1$ $c_2 b_2 a_2$) i visine tački vešanja najnižih provodnika (a_1 i c_2) od zemlje 20 m.

Prostorna raspodele magnetske indukcije, dobijena primenom Metode 1, prikazana je na Slici 8. Duž pravca u kome je maksimalna vrednost magnetske indukcije (označena crvenom bojom na Slici 8) izvršen je proračun magnetske indukcije primenom sve tri metode, što je prikazano na Slici 9.



Slika 8. Prostorna raspodela magnetske indukcije dvostrukog 400 kV voda sa Slike 5b na visini 1,8 m od zemlje, za dužinu raspona 300 m



Slika 9. Raspodela magnetske indukcije duž ose dvostrukog 400 kV voda sa Slike 5b, na visini 1,8 m od zemlje, za dužinu raspona 300 m, primenom različitih metoda

Kao i u slučaju jednostrukog voda minimalno odstupanje Metode 3 je na mestu proračuna ispod tačke maksimalnog ugiba (manje od 0,3%), a najveća greška u tački proračuna ispod mesta vešanja provodnika (gde je greška manja od 2,5%)

5 ZAKLJUČAK

U ovom radu je izvršena komparativna analiza tri metode za proračuna magnetskog polja u blizini nadzemnih vodova, sa uvaženim ugibom provodnika i povratnog puta struje kroz zemlju. Analiza je urađena za slučajeve jednostrukih i dvostrukih 400 kV vodova, sa različitim dužinama raspona i ugibima provodnika. Primenjene su dve numeričke metode: jedna u kojoj je iskorišćena postojeća funkcija za numeričko rešavanje integrala u softverskom paketu MATLAB i druga u kojoj je provodnik modelovan jednačinom lančaniće izdellen na konačan broj pravih segmenata, a rezultujuća vrednost magnetske indukcije dobijena primenom principa superpozicije, kao i jedna analitička metoda sa aproksimacijom lančaniće beskonačnim pravim provodnikom uz uvažavanje ugiba provodnika. Rezultati proračuna dobijeni primenom dve numeričke metode pokazuju izuzetno poklapanje rezultat u svim tačkama proračuna, pri čemu je maksimalna greška manja od 0,1%. Aproksimativna

analitička metoda, u poređenju sa numeričkim metodama, pravi veću grešku, koja raste i do 3% u tačkama proračuna koje su ispod mesta vešanja provodnika.

Uvažavajući jednostavnost i brzinu proračuna primenom aproksimativne analitičke metode, može se pokazati opravdanost njene upotrebe u slučajevima kada treba odrediti maksimalne vrednosti magnetske indukcije u tačkama proračuna koje su na sredini raspona (mesto maksimalnog ugiba).

Poređenjem predloženih metoda sa dvodimenzionalnog modela sa beskonačnim pravim provodnicima, gde je zanemaren uticaj ugiba, pokazano je da je pri proračunu magnetskog polja uticaj ugiba značajan i da se ne može zanemariti.

LITERATURA

- [1] *Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima*, Službeni glasnik RS, br. 104/09.
- [2] SRPS EN 50413: „Osnovni standard za procedure merenja i izračunavanja izlaganja ljudi električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (od 0 Hz do 300 Hz)”, 2010.
- [3] S. J. Ling, W. Moebs, J. Sanny „University Physics Volume 2“, OpenStax, 2016.
- [4] X. Liu, K. H. Lam, K. Zhu, C. Zheng, X. Li, Y. Du, C. Liu i P. W. T. Pong „Overview of Spintronic Sensors With Internet of Things for Smart Living“, IEEE Transactions on Magnetics PP(99), 2019.
- [5] J. R. Riba Ruiz i A. Garcia Espinosa „Magnetic Field Generated by Sagging Conductors of Overhead Power Lines“, Wiley Periodicals (2009), 787-794.
- [6] K. Deželak, F. Jakl i G. Štumberger „Arrangements Of Overhead Power Line Phase Conductors Obtained By Differential Evolution“, Electric Power Systems Research 81 (2011), 2164-2170.
- [7] V. Mamishev, R. D. Nevels, i B. D. Russell „Effects Of Conductor Sag On Spatial Distribution Of Power Line Magnetic Field“, IEEE Trans Power Deliv 11 (1996), 1571-1576.
- [8] „Plan Razvoja Prenosnog Sistema Republike Srbije Za Period 2020-2029“, 2020.
- [9] M. Đurić „Elementi EES-a“, AGM knjiga, 2017.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD CALCULATION METHODS NEAR OVERHEAD POWER LINE

Stefan ČUBONVIĆ, Aleksandar RANKOVIĆ*, Vladica MIJAILOVIĆ
University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak

Čačak

REPUBLIC OF SERBIA

Abstract – The sag of the conductor has a great influence on the magnetic field distribution in the vicinity of the overhead lines. The aim of the paper is to analyze the calculation of the magnetic field in the vicinity of overhead power lines, taking into account the conductor sag and the effects of the presence of a conducting ground, using various numerical methods and an analytical approximation method. A comparative analysis was performed in calculating the magnetic field of the 400 kV overhead line at different heights from the ground, for different arrangements of phase conductors and for different spans. The obtained values were compared with the values obtained using a simple two-dimensional model with infinite straight conductors.

Key words – Magnetic field – Overhead power line – Sag of a conductor.

KOMPARATIVNA ANALIZA METODA ZA PRORAČUN MAGNETSKOG POLJA U BLIZINI NADZEMNIH VODOVA

COMPARATIVE ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD CALCULATION METHODS NEAR OVERHEAD POWER LINE

Stefan ČUBONVIĆ, Aleksandar RANKOVIĆ*, Vladica MIJAILOVIĆ
University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak

Čačak

REPUBLIC OF SERBIA

Kratak sadržaj -

Ugib provodnika ima veliki uticaj na raspodelu magnetskog polja u blizini nadzemnih vodova. Cilj rada je da se izvrši analiza proračuna magnetskog polja u blizini nadzemnih vodova, sa uvažnim ugibom provodnika i povratnog puta struje kroz zemlju, primenom različitih numeričkih metoda i analitičke aproksimativne metode. Prva metoda za određivanje intenziteta vektora magnetske indukcije uzima u obzir matematičku formulu jednačine lančanice, koja po obliku odgovara obliku nadzemnog provodnika sa uticajem ugiba. Rešenje će biti određeno primenom postojeće funkcije za numeričko rešavanje integrala u softverskom paketu MATLAB. U drugoj metodi lančanice će biti aproksimirana konačnim brojem pravih segmenata. Za svaki pravi segment se računa vrednost magnetske indukcije u posmatranoj tački. Superpozicijom magnetskih indukcija svih segmenata dobiće se rezultatnu vrednost magnetske indukcije. U trećoj metodi se za proračun vrednosti magnetske indukcije provodnici se aproksimiraju beskonačno dugim, paralelnim površini zemlje, ali se visina provodnika menja u zavisnosti od mesta proračuna i vrednosti ugiba provodnika.

Komparativna analiza je urađena pri proračunu magnetskog polja 400 kV nadzemnog voda na različitim visinama od tla, za različite rasporede faznih provodnika, pri različitim dužinama raspona. Analiza je sprovedena za jednostruke i dvostruke 400 kV vodove. Dobijene vrednosti su upoređene sa vrednostima dobijenim primenom jednostavnog dvodimenzionalnog modela sa beskonačnim pravim provodnicima.

Ključne reči – Magnetsko polje – Nadzemni vod – Ugib provodnika.