

Uticaj armirano betonskog stuba na raspodelu magnetskog polja mešovitog voda

Impact of reinforced concrete tower on the magnetic field distribution of mixed power line

Teodora Gavrilov *, Karolina Kasaš-Lažetić *, Kristian Haška *, Miroslav Prša **

* Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija

** penzionisan sa Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija

Sažetak- U radu je izvršena analiza raspodele magnetskog polja sistema mešovitog nadzemnog voda (20 kV/0,4 kV), postavljenog na armirano betonske stubove tipa MNL-12. Ispitan je uticaj prisustva feromagnetskih, provodnih delova stuba (armaturnih šipki, uzengija kao i konzola za prihvat provodnika) na raspodelu magnetskog polja. Ceo proračun je izveden numerički, pomoću COMSOL Multiphysics računarskog programskog paketa na pojednostavljenom 2D modelu, sa ciljem da se utvrdi uticaj vrtložnih struja, indukovanih u feromagnetskim, provodnim delovima na magnetsko polje koje stvaraju struje u provodnicima sistema. Rezultati proračuna su prikazani grafički, pomoću dijagrama zavisnosti intenziteta vektora magnetske indukcije u ravni koja sadrži stub i normalna je na pravac prostiranja vodova. Rezultati su pokazali, da magnetsko polje indukovanih struja smanjuje magnetsko polje struja nadzemnog voda.

Ključne reči- Armirano betonski stub, indukovane struje, magnetsko polje, mešoviti vod.

Abstract- In this paper, the analysis of magnetic field distribution of overhead mixed power line (20 kV/0.4 kV) supported by reinforced concrete towers, named MNL-12 is presented. The impact of ferromagnetic, conductive parts of the pylons (reinforcing bars, billets and cross arm beams) on magnetic field distribution is investigated. The numerical calculations were performed in COMSOL Multiphysics program package on simplified 2D model. The main goal of the calculations was to examine the impact of currents induced in ferromagnetic conductive parts on magnetic field produced by currents in the power system's conductors. The calculation results are presented graphically, as the diagrams of the magnetic flux density magnitude distribution in the tower plan, normal to the system's axe. The calculation results demonstrated that the magnetic field of induced currents decreases the magnetic field produced by the currents of overhead power system.

Key words- reinforced concrete tower, induced currents, magnetic field, mixed power line.

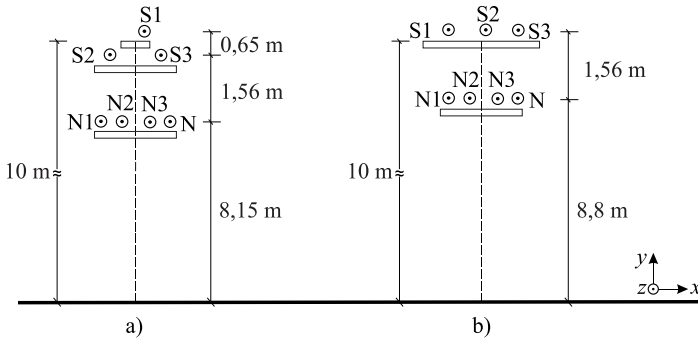
I. UVOD

Elektroenergetski sistem sačinjen je od četiri podsistema: E_{proizvodnje}, prenosa, distribucije i neposredne potrošnje električne energije. Prenos i distribucija električne energije izvode se pomoću elektroenergetskih vodova [1]. U okolini tih vodova, stvara se električno i magnetsko polje, a živi svet, koji se nalazi u tom okruženju, je neprestano izložen uticaju ovih polja. Upravo zbog toga, poznavanje raspodele magnetskog polja, koje stvaraju provodnici mešovitih vodova postavljenih na armirano betonske stubove, su od velikog značaja.

U gradskim sredinama se danas sve više koriste podzemni kablovi, dok se nadzemni vodovi, još uvek uglavnom koriste u seoskim i nenaseljenim delovima. Između razdvojenih ruralnih oblasti, a nekad i unutar njih, u mnogim slučajevima se koriste nadzemni, takozvani višesistemski ili mešoviti vodovi [2]. Mešoviti nadzemni vodovi predstavljaju kombinaciju kako niskonaponskog tako i srednjenaponskog trofaznog voda koji su vođeni duž istih trasa na zajedničkim stubovima.

Za srednjenaponske vodove se danas najčešće koriste neizolovani alučel provodnici. U ovom radu je posmatrana situacija kada su i NN vodovi načinjeni od neizolovanih alučel provodnika, iako se umesto njih sve više koriste samonoseći kablovski snopovi.

Elementi nadzemnog voda koji služe za nošenje vodova neizolovanih provodnika, kao i samonosećih kablovskih snopova na propisanoj visini, nazivaju se stubovi [3]. Predviđeni su da izdrže sva opterećenja koja nastaju zbog mehaničkih karakteristika vodova i spoljašnjih klimatskih uticaja. Betonski stubovi se smatraju najtrajnijim (vek trajanja im je oko 50 godina), i veoma su laki za održavanje. Koriste se za SN i NN vodove, samim tim i za mešovite vodove. Moguće konfiguracije vodova na armirano-betonskim stubovima prikazane su na slici 1. Srednjenaponski vodovi (S1 S2 S3) mogu da se postave u obliku trougla (slika 1a) ili u istoj ravni (slika 1b), dok se niskonaponski vodovi (N1 N2 N3) zajedno sa nultim vodom, uvek postavljaju na horizontalnu konzolu, i uvek postavljaju ispod srednjenaponskih vodova [4].



Slika 1 – Konfiguracija NN i SN voda mešovitog sistema armirano betonskog stuba: a) trougaona, b) horizontalna.

U okviru ovog rada je izvršena analiza raspodele magnetskog polja u okolini mešovitog voda, postavljenog na armirano betonski stub, sa razmeštajem faznih provodnika prikazanim na slici 1. Ispitan je uticaj rasporeda faznih provodnika oba sistema (kada je SN vod postavljen u obliku trougla, kao i kada je postavljen u horizontalnu ravan) sa ciljem da se pronađe najgora moguća konfiguracija sa ekološkog aspekta, ona koja daje magnetsko polje najvećeg intenziteta na standardom definisanoj ispitnoj visini od 1 m od tla.

II. TEORIJSKA OSNOVA RADA

Nadzemni vodovi stvaraju elektromagnetska polja mrežne učestanosti koja na ovim prostorima iznosi 50 Hz. S obzirom da takva polja spadaju u vremenski sporopromenljiva polja, analiza vremenski sporopromenljivog magnetskog polja može da se izvrši nezavisno od vremenski sporopromenljivog električnog polja.

Pošto su u pitanju vremenski promenljive struje, u provodnicima dolazi do površinskog efekta, tj. dolazi do neravnomerne raspodele struje po poprečnom preseku provodnika. Stoga, mnogo manji deo struje će se rasporediti po čeličnom jezgru alučel užeta. Usled toga, jezgro iako napravljeno od nelinearnog materijala, neće dostići zasićenje, te se može posmatrati kao linearan materijal konstantne permeabilnosti.

Gore spomenute osobine sistema omogućuju da se analiza problema pojednostavi, tj. izvrši u kompleksnom domenu. Usled geometrije sistema moguće je ceo sistem posmatrati kao dvodimenzionalan, u ravni koja je normalna na pravac prostiranja vodova, te se Dekartov pravougli koordinatni sistem pokazao kao najpogodniji za to. Smer osa korišćenog koordinatnog sistema prikazan je na slici 1.

Kompleksni magnetski vektor potencijal je jedna od najčešće korišćenih veličina za određivanje elektromagnetskog polja u kompleksnom domenu i dobija se rešavanjem sledeće kompleksne parcijalne diferencijalne jednačine [5],

$$\Delta \vec{A} - j\omega\mu\sigma \vec{A} = -\mu \vec{J}. \quad (1)$$

Kompleksni vektor magnetske indukcije dobija se pomoću rešenja (1), kao,

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}. \quad (2)$$

Prilikom rešavanja (1), uzeto je, kao granični uslov, da magnetski vektor potencijal iščezava dovoljno daleko od provodnika. Usled indukovano električnog polja,

$$\vec{E}_i = -j\omega \vec{A}, \quad (3)$$

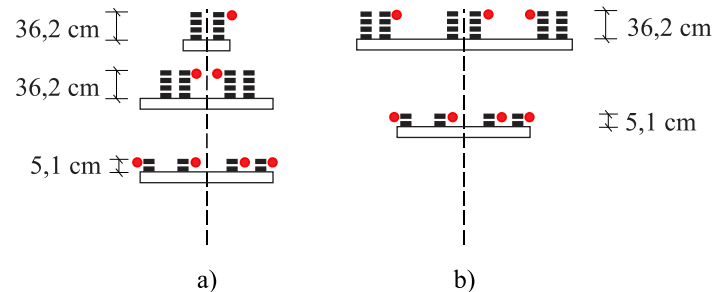
koje prati vremenski promenljivo magnetsko polje, u feromagnetskom, provodnom materijalu se indukuju struje,

$$\vec{J}_i = \sigma \vec{E}_i = -j\omega\sigma \vec{A}, \quad (4)$$

koje su po Lencovom zakonu takvog smera, da teže da spreče promenu fluksa. Magnetsko polje indukovanih struja će prema tome smanjiti magnetsko polje nadzemnog voda.

III. MODEL

Armirano betonski stub MNL-12, ukupne visine 12m, zakopan je 2m u zemlju, te je visina stuba iznad zemlje 10 m. Na armirano betonski stub se postavljaju vršne konzole, na koje su pričvršćeni potporni izolatori za prihvat provodnika. Konzole na kojima se nalaze izolatori SN voda mogu biti načinjeni od armiranog betona ili od čelika. Nosači izolatora NN voda su uvek čelične konzole. Provodnici se vezuju mekom žicom, proizvoljno, sa unutrašnje ili spoljašnje strane na potporni izolator. Prostorna konfiguracija faznih provodnika, tj. da li je provodnik sa unutrašnje ili spoljašnje strane izolatora, ne utiče bitno na raspodelu magnetskog polja [2]. Na slici 2 prikazane su prostorne konfiguracije koje su korišćene u radu, kao i visine izolatora. Visine na kojima se provodnici nalaze, određene su dimenzijom stuba, konfiguracijama konzola i izolatora, kao i visinom izolatora, prikazanim na slici 1. SN neizolovani alučel provodnici su uvek preseka 50/8 mm² [4]. U ovom radu su i NN provodnici uzeti da su istog preseka.



Slika 2 – Prostorni raspored faznih provodnika: a) trougaona konfiguracija, b) horizontalna konfiguracija.

Da bi se proračun raspodele elektromagnetskog polja pojednostavio, realan alučel provodnik je prvo zamenjen uprošćenim modelom, sastavljenim od koaksijalno postavljenih cilindričnih provodnika kružnog poprečnog preseka, unutrašnjeg od čelika, i spoljašnjeg od aluminijuma [6]. U [2] je pokazano da čelično jezgro ne utiče značajno na raspodelu magnetskog polja izvan provodnika, tako da su u ovom radu alučel provodnici modelovani kao provodnici punog poprečnog preseka od aluminijuma.

IV. REŠAVANJE PROBLEMA U COMSOL MULTIPHYSICS PROGRAMSKOM PAKETU

Posmatrajući pojednostavljeni, dvodimenzionalni model mešovitog voda 20 kV/0,4 kV postavljen na armirano betonski stub, proračun raspodele magnetskog polja se vrši numerički, pomoću COMSOL Multiphysics računarskog programskog

paketa, tj. njegovog AC/DC modula i podmodula 2D, Magnetic Fields (mf) – Frequency Domain simulacije.

Za određivanje raspodele magnetskog polja pomoću ovog programskog paketa, potrebno je najpre definisati geometriju modela i materijale korišćene u sistemu. Da bi se problem rešio, potrebno je definisati i najpogodniju mrežu konačnih elemenata. Posmatran sistem čine 6 faznih provodnika i jedan neutralni vod, modelovani pomoću kružnica, 2 pravougaonika pomoću kojih se modeluju vazduh i zemlja, kao i armirano betonski stub, koji se unosi iz AutoCAD fajla [7].

Potrebno je definisati materijale za sve elemente sistema sa njihovim električnim i magnetskim karakteristikama, koje su neophodne COMSOL-u za proračun. Materijali koji su korišćeni, kao i njihove električne i magnetske karakteristike, prikazani su u tabeli 1. Iz razloga koji je već naveden, provodnik je modelovan da je od aluminijuma, dok su armaturne šipke i uzengije u betonskom stubu, kao i konzole od čelika.

Pravougaonik u kome se nalaze provodnici modeluje vazduh, a drugi zemlju. Njihove dimenzije treba da su dovoljno velike, da bi na njihovim granicama magnetsko polje iščezlo. Za ispravan rad programa, vazduh treba da se modeluje kao da ima veoma malu specifičnu provodnost, različitu od nule.

Tabela 1 – Električne i magnetske karakteristike materijala.

	σ [S/m]	ϵ_r	μ_r
Aluminijum	$35,5 \cdot 10^6$	1	1
Čelik	$5,59 \cdot 10^6$	1	850
Vazduh	$1 \cdot 10^{-6}$	1	1
Zemlja	1/50	1	1

Kao ulazni podaci se zadaju kompleksni vektori jačina struja svakog faznog provodnika. Trajno dozvoljena jačina struje u sistemu, za alužel uže nominalnog preseka $50/8 \text{ mm}^2$, prema Pravilniku [4], iznosi 170 A. Shodno tome, za strujno opterećenje faznih provodnika u oba sistema, definisane su jačine struja provodnika, sa faznim kašnjenjem od 120° među faznim jačinama struja:

$$\begin{aligned} \underline{I}_0^{20kV} &= 170\sqrt{2} e^{j0^\circ} \text{ A}, & \underline{I}_0^{0,4kV} &= 170\sqrt{2} e^{j0^\circ} \text{ A}, \\ \underline{I}_4^{20kV} &= 170\sqrt{2} e^{-j120^\circ} \text{ A}, & \underline{I}_4^{0,4kV} &= 170\sqrt{2} e^{-j120^\circ} \text{ A}, \\ \underline{I}_8^{20kV} &= 170\sqrt{2} e^{j120^\circ} \text{ A}, & \underline{I}_8^{0,4kV} &= 170\sqrt{2} e^{j120^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

Da bi se izvršilo modelovanje posmatrane strukture, potrebno je izvršiti diskretizaciju prostora na konačan broj elemenata jednostavnog oblika. Korišćen programski paket deli oblast od interesa na trouglove različitih veličina. Da bi se izbeglo preopterećenje računara ali da bi i dalje bila što veća tačnost pri određivanju raspodele magnetskog polja, formirana je mreža koja je u okolini provodnika gušća, nego u oblasti daleko od njih.

Nakon formiranja mreže, program rešava odgovarajuće kompleksne parcijalne diferencijalne jednačine po nezavisnoj promenljivoj, magnetskom vektor potencijalu, u odgovarajućim tačkama mreže i time omogućuje određivanje veličina od interesa, u ovom slučaju vektora magnetske indukcije.

V. REZULTATI PRORAČUNA

Rezultati dobijeni pomoću računarskog programskog paketa COMSOL Multiphysics, predstavljeni su grafički – prikazana je promena intenziteta vektora magnetske indukcije, u ravni poprečnog preseka sistema na mestu stuba ($x0y$ ravan, slika 1), duž linije koja se proteže u rasponu $\pm 30\text{m}$ od ose stuba, na visini 1m iznad tla.

Prvo su prikazani rezultati kada je SN vod postavljen horizontalno, a zatim kada SN vod obrazuje trougaonu formu. NN vod, kada su načinjeni od neizolovanih alužel provodnika, kao što je u ovom modelu, se uvek postavlja na horizontalne konzole ispod SN voda u skladu sa Pravilnikom [4].

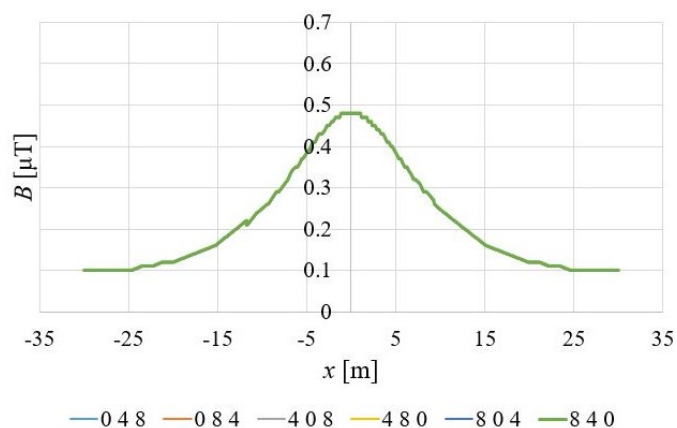
Za oba slučaja, prvo je ispitan uticaj rasporeda faza SN voda na raspodelu magnetskog polja, u okolini mešovito vod, bez prisustva NN voda i armirano betonskog stuba. Zatim su, za onaj raspored faza SN voda koji daje najveće vrednosti magnetskog polja, posmatrane dve situacije: kada je, pored NN voda, izostavljen i armirano betonski stub, i kada je on prisutan.

U sledećem koraku je posmatran sistem, kojem je dodat NN sistem pri onom rasporedu faznih stavova SN voda koji je u odsustvu NN voda dao najveće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije. Izvršena je analiza uticaja rasporeda faza NN voda, da bi se utvrdilo koji raspored daje najveće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini sistema, tj. koji je najnepovoljniji raspored faza sa stanovišta zaštite životne sredine, bez stuba i sa stubom.

Na kraju su upoređene raspodele intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini mešovito vod pri istovremenom prisustvu SN i NN voda, za one fazne stavove koji su dali najveće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, da bi se uporedio i uticaj konfiguracije SN sistema (horizontalan ili trougaoni raspored voda) na raspodelu magnetskog polja. Rezultati su prikazani grafički.

A. SN provodnici postavljeni horizontalno

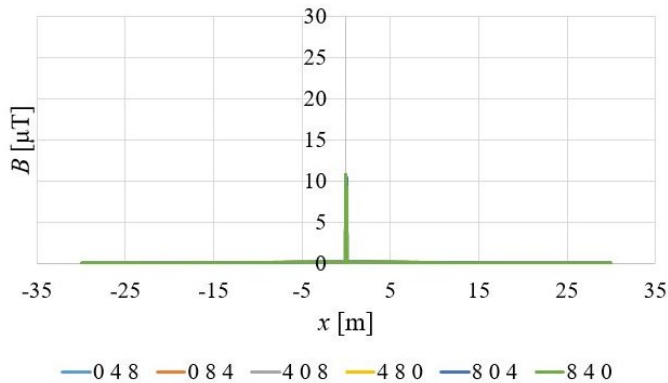
Prvo je analiziran uticaj rasporeda faza SN voda bez prisustva NN voda i armirano betonskog stuba na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije. Dobijena zavisnost prikazana je na slici 3.



Slika 3 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda (1m iznad tla; -30m, +30m; bez NN voda; bez stuba).

Raspored faza SN voda horizontalne konfiguracije ne utiče na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije kada se iz analize izostave NN vod i armirano betonski stub, kao što se vidi sa slike 3.

U sledećem koraku je posmatran SN vod postavljen na armirano betonski stub, ponovo bez NN voda. Raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije za datu konfiguraciju je prikazana na slici 4.



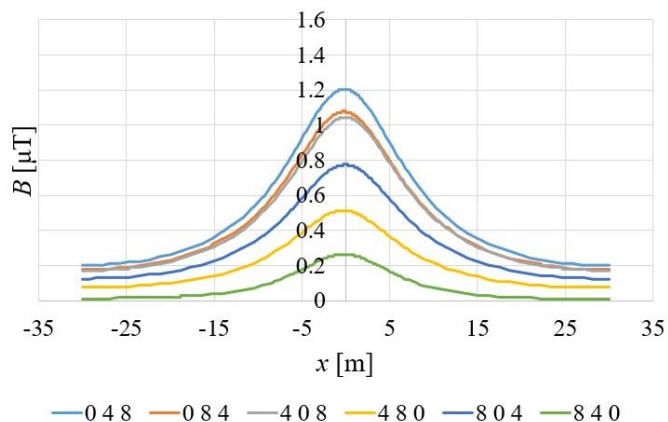
Slika 4 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda u horizontali (1m iznad tla; -30,+30; bez NN voda; sa stubom).

Utvrđeno je da na na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije ni u ovom slučaju ne utiče raspored faza SN voda.

Upoređujući slike 3 i 4 se vidi, da dolazi do značajne razlike u raspodeli intenziteta vektora magnetske indukcije, prvenstveno u oblasti gde se nalazi armirano betonski stub. Nagli porast intenziteta vektora magnetske indukcije na mestu stuba dolazi usled velike razlike u permeabilnosti armature i okolne sredine.

S obzirom da je pokazano da raspored faza SN voda ne utiče na raspodelu magnetskog polja, dalje analize rađene su pri rasporedu faza 048. Dodavanjem NN voda, istih nominalnih jačina struja kao u SN vodovima, kompletiran je mešoviti vod.

Ispitan je uticaj rasporeda faza NN voda mešovitog voda na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije, najpre bez prisustva armirano betonskog stuba. Dobijena raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije je prikazana na slici 5.

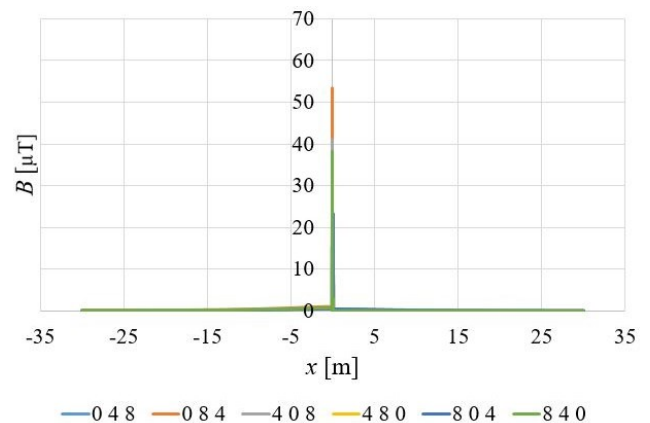


Slika 5 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda u horizontali (1m iznad tla; -30m,+30m; sa NN vodom; bez stuba).

Na osnovu slike se vidi da raspored faza NN voda menja intenzitet vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog voda. Najnepovoljnija raspodela polja se dobija za fazni stav 048, pri kojem se javlja najveći intenzitet vektora magnetske indukcije $B_{048} = 1,2 \mu\text{T}$. U sistemu bez NN voda, najveći intenzitet vektora magnetske indukcije je $B = 0,48 \mu\text{T}$.

Upoređivanjem ovih vrednosti može da se zaključi da je najveći intenzitet vektora magnetske indukcije 2,5 puta veći u kompletiranom mešovitom vodu (SN+NN) u odsustvu stuba.

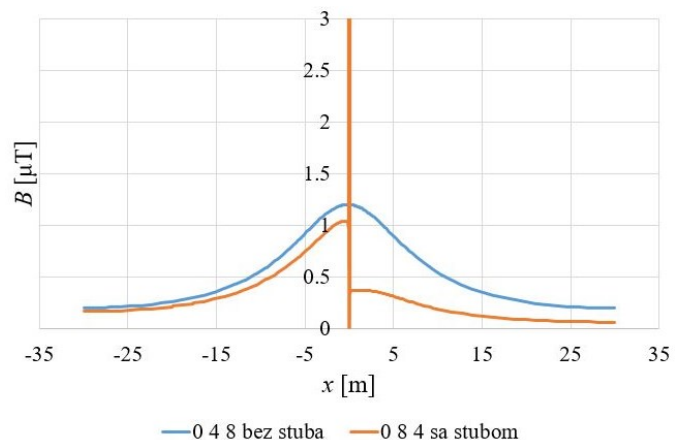
Isti postupak, pod istim uslovima, je ponovljen i za sistem koji je postavljen na armirano betonski stub, a dobijeni rezultati su prikazani na slici 6.



Slika 6 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda u horizontali (1m iznad tla; -30m,+30m; sa NN vodom; sa stubom).

Raspored faza NN voda, koji je postavljen na armirano betonski stub, takođe menja raspodelu polja u okolini stuba (slika 6). Značajan porast intenziteta vektora magnetske indukcije u oblasti armirano betonskog stuba i neznan ali najveći porast u okolini stuba, daje raspored faza 084 NN voda. Ta konfiguracija je različita od one koja daje najveći intenzitet kada je stub izostavljen (048).

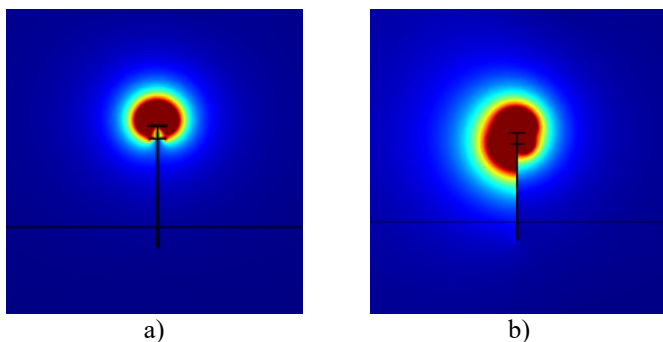
Na slici 7 je predstavljena raspodela magnetskog polja za najnepovoljnije fazne stavove u oba sistema, sa i bez stuba.



Slika 7 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za najnepovoljniji raspored faza u oba sistema (1m iznad tla; -30m,+30m; sa NN vodom; sa i bez stuba).

Upoređujući grafike na slici 7, zaključuje se da je u oblasti izvan stuba veći intenzitet magnetskog polja u slučaju kada je armirano betonski stub izostavljen iz analize, tj. da prisustvo stuba smanjuje magnetsko polje u njegovoj okolini. Do pojave smanjenja intenziteta vektora magnetske indukcije u prisustvu armirano betonskog stuba dolazi, kao što je u teorijskom razmatranju rada napomenuto, usled dejstva indukovanih struja u čeličnim armaturama betonskog stuba. Te struje daju dodatnu komponentu magnetskog polja koja se superponira na magnetsko polje nadzemnog voda. Da bi se na slici bolje uočila razlika u raspodelama magnetskog polja sa i bez stuba, intenzitet vektora magnetske indukcije u samom stubu je predstavljen samo do vrednosti $3 \mu\text{T}$.

Prostorna raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog voda $20 \text{ kV}/0,4 \text{ kV}$ postavljenog na armirano betonske stubove, za neke od faznih stavova SN voda prikazana je na slici 8.



Slika 8 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za raspored faza: a) SN 840 bez NN, b) SN 048 + NN 084 (sa stubom).

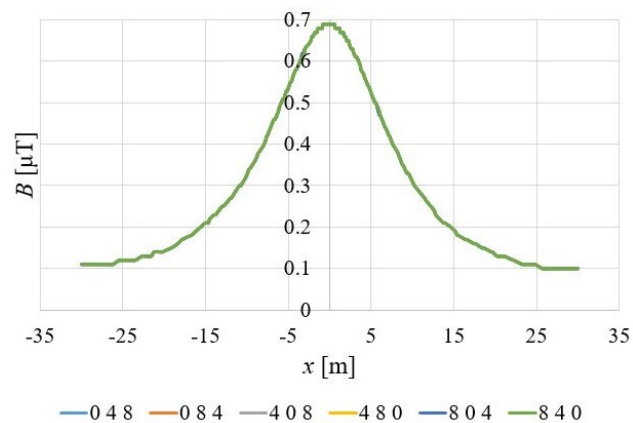
Sa slike 8 se vidi, da na dodatno povećanje intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog nadzemnog voda postavljenog na armirano betonski stub utiču struje NN provodnika. Sa slike 8 takođe može da se uoči nesimetrija u raspodeli magnetskog polja u okolini nadzemnih vodova, koja se pripisuje nesimetričnom položaju provodnika NN voda u odnosu na stub. Iako su vizuelno sva 4 provodnika (3 NN + neutralni vod) simetrično postavljena na NN konzoli (slika 1) - u neutralnom vodu, koji je po-stavljen na desnom kraju NN konzole se ne uspostavlja struja (simetrični trofazni vod u primenjenom modelu), te je ukupna prostorna raspodela magnetskog polja faznih provodnika nesi-metrična i manjeg intenziteta oko desnog kraja NN konzole.

B. SN provodnici postavljeni u trougao

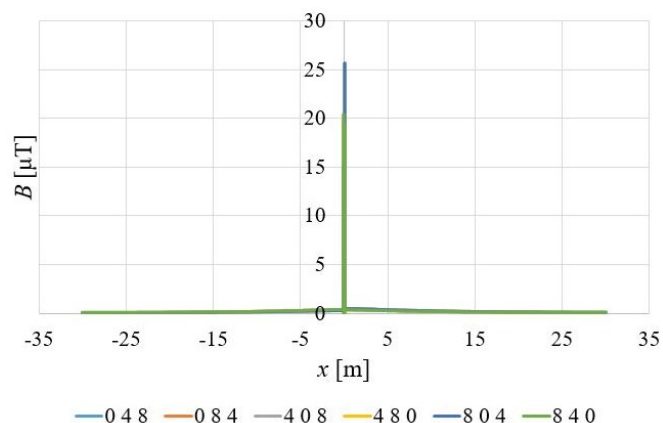
Analiza je, i u ovom slučaju, započeta ispitivanjem uticaja rasporeda faza struja SN voda bez prisustva NN voda i armirano betonskog stuba na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije. Dobijena zavisnost prikazana je na slici 9.

Sa slike 9 može da se uoči, da raspored faza SN voda kada provodnici voda formiraju trougao ne utiče na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije kada se iz proračuna izostave NN vod i armirano betonski stub.

U sledećoj fazi analize, u sistem je dodat i armirano betonski stub, pri čemu je i dalje izostavljen NN vod. Dobijena raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije bez prisustva NN voda prikazana je na slici 10.



Slika 9 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda u trouglu (1m iznad tla; -30m, +30m; bez NN voda; bez stuba).



Slika 10 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda u trouglu (1m iznad tla; -30m, +30m; bez NN voda; sa stubom).

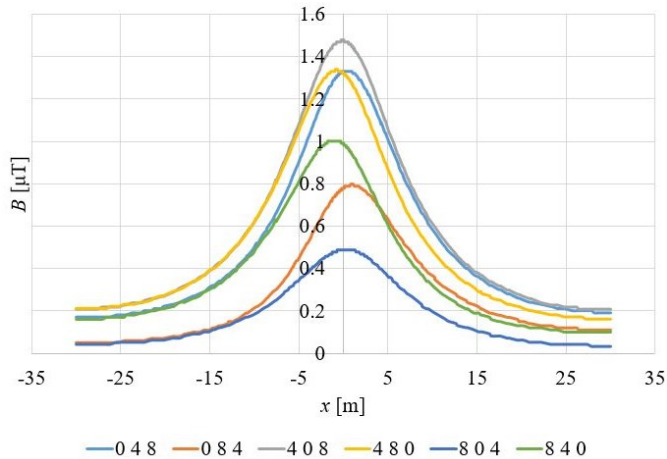
Na osnovu prikazanog grafika, ponovo se može zaključiti da na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije ni u ovom slučaju ne utiče raspored faza SN voda.

Velika razlika u raspodeli intenziteta vektora magnetske indukcije i za trougaonu konfiguraciju SN voda uočava se prvenstveno u oblasti gde se nalazi armirano betonski stub, što se može videti kada se uporede dobijeni grafici, prikazani na slikama 9 i 10. Izvan stuba je razlika u raspodeli zanemarljiva te je za dalje analize uzet raspored faza 048 SN voda.

Analogno analizi kada je SN vod bio u horizontalnoj konfiguraciji, u sistem je priključen i NN vod, ponovo istih nominalnih jačina struja kao u SN vodu i ispitano je koji raspored faza NN voda daje najnepovoljniju raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije.

Na slici 11 su prikazani rezultati dobijeni za mešoviti vod bez prisustva armiranog stuba.

U prisustvu SN i NN voda, raspored faza NN voda menja intenzitet vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog voda (slika 11). Najnepovoljnija raspodela magnetskog polja se dobija za fazni stav 408, pri kojem se javlja najveći intenzitet vektora magnetske indukcije $B_{408} = 1,48 \mu\text{T}$.



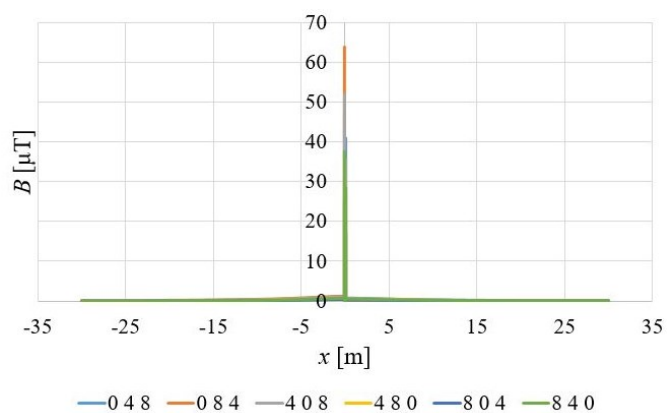
Slika 11 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za različite rasporede faza SN i NN voda u trouglu (1m iznad tla; -30m, +30m; bez stuba).

U sistemu bez priključenog NN voda, najveći intenzitet vektora magnetske indukcije je bio $B = 0,69 \mu\text{T}$. Dodavanjem NN voda, najveći intenzitet vektora magnetske indukcije povećao se 2,15 puta.

Upoređujući sve dosadašnje rezultate se vidi, da se veći intenzitet vektora magnetske indukcije (i bez i sa NN vodom) dobija u slučaju kada su SN vodovi u trougaonoj konfiguraciji, te vidimo da je horizontalna konfiguracija povoljnija sa aspekta očuvanja zaštite životne sredine.

Veći intenzitet vektora magnetske indukcije u slučaju trougaone konfiguracije se javlja iz razloga što su kod trougaone konfiguracije NN provodnici i SN provodnici S2 i S3 (slika 1), na manjem rastojanju od tla u odnosu na iste te provodnike u horizontalnoj konfiguraciji.

Isti postupak je ponovljen za sistem koji je postavljen na armirano betonski stub, a rezultati su prikazani na slici 12.

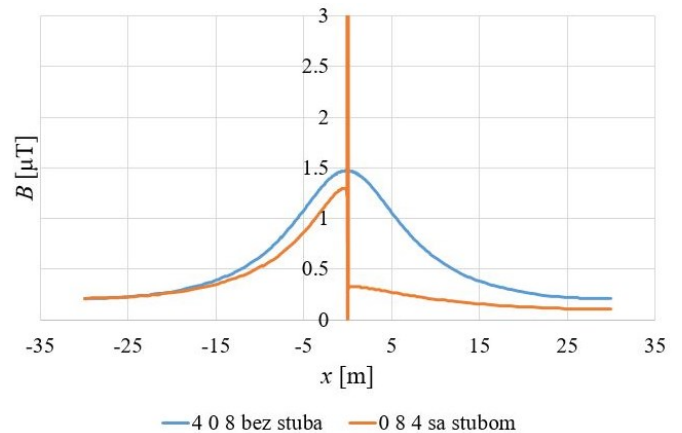


Slika 12 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda i NN voda u trouglu (1m iznad tla; -30m, +30m; sa stubom).

Na osnovu slike 12 se vidi, da raspored faza NN voda, koji je postavljen na armirano betonski stub, takođe menja raspodelu magnetskog polja u okolini stuba. Raspored faza 084 daje značajan porast intenziteta vektora magnetske indukcije u oblasti oko armirano betonskog stuba u njegovoj neposrednoj blizini, pri

čemu je taj porast evidentan i u odnosu na horizontalnu konfiguraciju SN sistema.

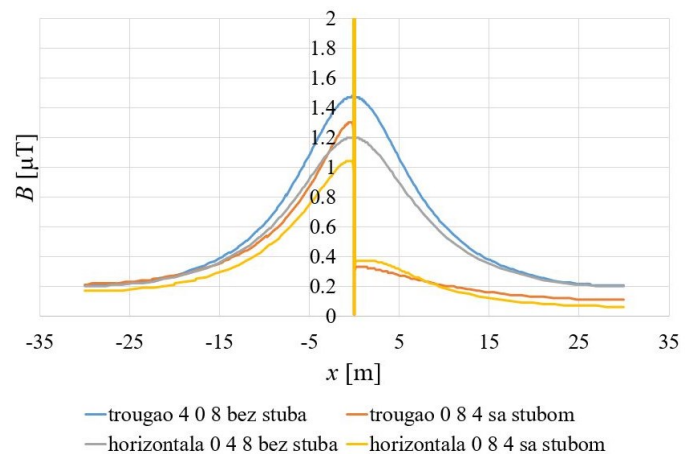
U narednom koraku, upoređene su vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije za fazne stavove u oba sistema (sa i bez stuba) koji daju najveće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, a dobijeni uporedni grafik je prikazan na slici 13.



Slika 13 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za najnepovoljniji raspored faza u oba sistema (1m iznad tla; -30m, +30m; sa NN vodom; sa i bez stuba).

Sa slike 13 ponovo može da se uoči, da struje u NN provodnicima utiču na povećanje intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini armirano betonskog stuba.

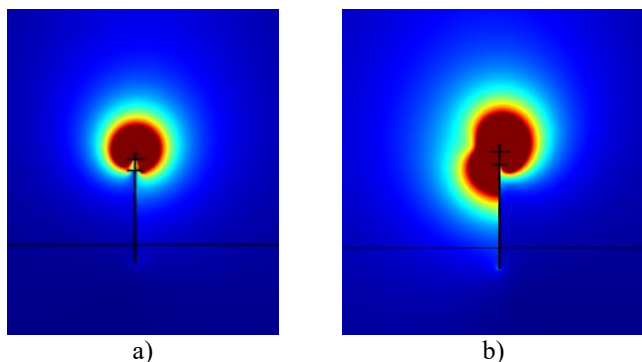
Na slici 14 su prikazani grafici intenziteta vektora magnetske indukcije za najnepovoljnije rasporede faza mešoviteg voda 20 kV/0,4 kV sa ekološkog aspekta za slučaj kada SN vodovi obrazuju trougaonu konfiguraciju, kao i za slučaj kada SN vodovi obrazuju horizontalnu konfiguraciju. Upoređeni su grafici kada se mešoviti vod nalazi na stubu, kao i kada je stub izostavljen.



Slika 14 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za najnepovoljniji raspored faza u oba sistema (1m iznad tla; -30m, +30m; sa i bez stuba).

Na slici 14 se vidi da je trougaona konfiguracija SN voda nepovoljnija u odnosu na horizontalnu u oba slučaja (sa i bez stuba) pošto daje veće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije. To znači da se, posmatrano sa ekološkog aspekta, preporučuje horizontalna konfiguracija SN voda.

Na slici 15 su predstavljene prostorne raspodele intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog voda postavljenog na armirano betonski stub, za neke od faznih stavova SN voda.



Slika 15 - Intenzitet vektora magnetske indukcije za raspored faza: a) SN 804 bez NN, b) SN 048 + NN 084 (sa stubom).

Kao što se sa slike 15 vidi, prisustvo stuba unosi nesimetriju u raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije i smanjuje vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini stuba iz istih razloga kao što je objašnjeno uz sliku 8.

VI. ZAKLJUČAK

Posmatrajući rezultate izvršenih proračuna za obe konfiguracije, pokazano je da se veći intenzitet vektora magnetske indukcije dobija u slučaju kada su SN vodovi u trougaonoj konfiguraciji, zbog visine na kojoj se NN i SN provodnici nalaze – kod trougaone konfiguracije su manje udaljeni od tla.

Sumirajući prethodne proračune, dolazi se do zaključka da armirano betonski stub smanjuje magnetsko polje u neposrednoj okolini stuba, usled indukovanih struja čije se magnetsko polje superponira magnetskom polju provodnika. Dobijene vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije za obe posmatrane konfiguracije u oblasti van stuba su mnogo manje od Pravilnikom [8] propisane granice, $B_{\max} = 40 \mu\text{T}$.

ZAHVALNICA

Rad predstavlja deo istraživanja na projektu broj TR32055, finansiranom od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije, 2011-2020.

LITERATURA

- [1] V. C. Strezoski, *Osnovi elektroenergetike*. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2015.
- [2] D. Vidrić, *Analiza raspodele magnetskog polja u okolini mešovitih vodova*, diplomski rad, FTN, Novi Sad, 2018.
- [3] Miroslav D. Nimrihter, *Elektrodistributivni sistemi*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2009.
- [4] *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV*, Sl. List SFRJ, br. 65/88 i Sl. List SRJ, br. 18/92.
- [5] B. D. Popović, *Elektromagnetika*, Građevinska knjiga, Beograd, 2000.
- [6] M. Prša, K. Kasaš-Lažetić, D. Herceg, N. Đurić, "Determination of Frequency Dependent Radiuses of Steel Cored Aluminium Conductors," in Proceedings of 2nd International Conference on EMF-ELF, Paris, France, 2011.
- [7] A. Višnjic, *Uticao rešetkastog stuba na raspodelu magnetskog polja mešovitog voda*, diplomski rad, FTN, Novi Sad, 2019.
- [8] *Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima*, "Sl. Glasnik RS", br. 104/2009, str. 7.

AUTORI

Prvi autor– Teodora Gavrilov, asistent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, teodora.gavrilov@uns.ac.rs.

Drugi autor– Karolina Kasaš-Lažetić, docent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, kkasas@uns.ac.rs.

Treći autor– Kristian Haška, asistent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, kristian.haska@uns.ac.rs.

Četvrti autor– Miroslav Prša, vanredni profesor u penziji, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, prsa@uns.ac.rs.

Autor za korespondenciju – Teodora Gavrilov, teodora.gavrilov@uns.ac.rs, 064/588-3207.