

Uticaj stubova mešovitog električnog voda na raspodelu magnetskog polja

Karolina Kasaš-Lažetić, Teodora Gavrilov, Gorana Mijatović, Kristian Haška,

Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, R. Srbija

kkasas@uns.ac.rs, teodora.gavrilov@uns.ac.rs,
gorana86@uns.ac.rs, kristian.haska@uns.ac.rs

Miroslav Prša, penzionisan sa

Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, R. Srbija

prsa@uns.ac.rs

Sažetak—U radu je izvršena uporedna analiza magnetskog polja u okolini mešovitog trofaznog nadzemnog voda, postavljenog na čelično rešetkaste i armirano betonske stubove. U proračunima je uzet u obzir uticaj promene faznog stava jačina struja, kako u srednjenaponskom, tako i u niskonaponskom sistemu mešovitog voda. Akcenat je stavljen na ispitivanje uticaja na raspodelu magnetskog polja struja indukovanih u feromagnetskim, provodnim delovima stubova. Proračun je izvršen numerički, koristeći programski paket Comsol Multiphysics, koji se bazira na primeni metoda konačnih elemenata, na dvodimenzionalnom modelu mešovitog voda. Rezultati ukazuju na to, da se usled indukovanih struja u feromagnetskim provodnim delovima stubova, intenzitet vektora magnetske indukcije smanjio u oblasti oko stubova. Pojava je izrazitija kod čelično rešetkastih stubova, a nešto manje izrazita kod armirano betonskih stubova.

Glavne riječi—*ključna riječ 1; armirano betonski stub 2; čelično rešetkasti stub 3; magnetsko polje; 4. mešoviti vod; 5. elektromagnetska indukcija, (key words – reinforced concrete tower; steel lattice tower; magnetic field; mixed power system; electromagnetic induction)*

I. UVOD

Elektroenergetski sistemi predstavljaju složenu mrežu za proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije i imaju za zadatak da obezbede pouzdano, ekonomično i kvalitetno napajanje potrošača. Prenos električne energije se vrši vodovima, u širokom diapazonu naponskih nivoa [1].

Nadzemni vodovi su najviše prisutni u prenosnim i distributivnim mrežama, pogotovo u vangerskim područjima. U urbanim sredinama, bezbednost ljudi i smanjeni prostorni kapaciteti opravdavaju postavljanje kablovskih vodova i pored mnogo većih investicionih troškova. U mnogim ruralnim i suburbanim sredinama, radi ekonomičnije distribucije električne energije, distribucija električne energije se vrši korišćenjem mešovitih nadzemnih vodova.

Elektromagnetsko polje (EM) koje stvaraju provodnici trofaznih nadzemnih vodova i podzemnih kablova industrijske učestanosti je duži niz godina predmet intenzivne analize i praćenja, prvenstveno zbog uticaja tih polja na biološke sisteme i interferenciju. Svetska zdravstvena organizacija (WHO –

World Health Organisation) ulaže značajne napore i sredstva da utvrdi uzročnu posledičnu vezu između dejstva EM polja i potencijalnih obolenja kod osoba koji žive ili trajno borave u oblastima oko elektroenergetskih postrojenja.

Rukovodeći se činjenicom, da su mešoviti nadzemni vodovi sve vreme u intenzivnoj upotrebi u Republici Srbiji, ideja da se izvrši analiza raspodele EM polja u njihovoj okolini se logično nametnula. Iako intenzitet EM polja relativno brzo opada sa rastojanjem, stalno prisustvo tih vodova u zonama povećane osetljivosti [2] iziskuje njihovu predikciju i praćenje.

EM polja industrijske učestanosti spadaju u oblast nejonizujućeg zračenja niskih frekvencija. Referentni granični nivoi izloženosti stanovništva, određeni Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima [2] su strožiji od referentnih graničnih nivoa koje predlaže ICNIRP [3]. U mnogim zemljama Evropske Unije se takođe koriste niži granični nivoi [4] od onih datih u [3]. Referentni granični nivoi izloženosti stanovništva električnom i magnetskom polju, koje predlaže ICNIRP i Pravilnik u Republici Srbiji, pri učestanosti 50 Hz, dati su u Tabeli I.

TABELA I. REFERENTNI GRANIČNI NIVOI IZLOŽENOSTI STANOVNIŠTVA NA UČESTANOSTI 50 HZ

	E [V/m]	H [A/m]	B [μ T]
Republika Srbija	2000	32	40
ICNIRP	5000	160	200

Cilj ovog rada je da se izvrši analiza raspodele magnetskog polja u okolini čelično rešetkastog i armirano betonskog stuba mešovitih nadzemnih sistema za distribuciju električne energije, pri najvećim dozvoljenim intenzitetima struja i najmanjim dozvoljenim visinama faznih provodnika. Ispitan je uticaj rasporeda faznih stavova i prisustva feromagnetskih, provodnih delova stubova na raspodelu magnetskog polja.

Proračuni su izvršeni numerički, korišćenjem programskog paketa Comsol Multiphysics [5], posmatrajući pojednostavljen, dvodimenzionalan model sistema. Rezultati su prikazani grafički, predstavljajući intenziteta vektora magnetske indukcije na standardom definisanoj visini, 1 m iznad tla u

simetričnoj oblasti oko stuba. Dobijeni rezultati su pokazali, da prisustvo feromagnetskih delova stuba utiču na raspodelu magnetskog polja, smanjujući ga.

II. NADZEMNI MEŠOVIT VOD

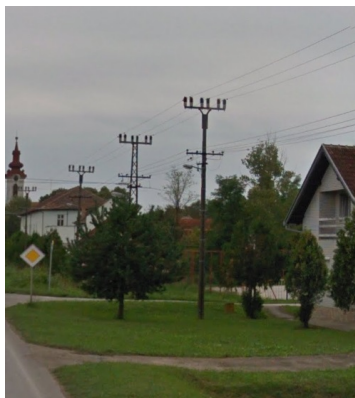
Stub je sastavni deo svakog nadzemnog voda i služi za vazdušno vođenje provodnika. Stubovi nadzemnih vodova se najčešće izrađuju od armiranog betona ili kao čelično rešetkaste konstrukcije. U današnje vreme, drveni stubovi su sve manje u upotrebi. Izbor stuba zavisi od naponskog nivoa, njihove funkcije, mehaničkih sila i klimatskih uslova. Mešoviti vodovi se uvek postavljaju na čelično rešetkaste ili armirano betonske stubove.

Postoje neka zajednička pravila u formiranju mešovitog voda, nezavisno od vrste stuba. Niskonaponski (NN) vod se uvek postavlja na horizontalnu konzolu i ispod srednje-naponskog (SN) voda. Neutralni vod se nalazi uz provodnike NN voda. SN trofazni provodnici mogu da se vode iznad NN voda u istoj ravni ili u dve, paralelne ravni formirajući trougao, kada su dva donja provodnika u jednoj ravni, a treći iznad njih, na vrhu stuba.

Za SN vodove se uvek koriste neizolovani alučel provodnici, dok se za NN vodove mogu koristiti alučel provodnici ili samonoseći kablovski snopovi (SKS).

U Srbiji se mešoviti vod formira na naponskim nivoima 20 kV/ 0,4 kV koristeći alučel užadi istog nazivnog preseka 50/8 mm² za provodnike oba sistema. Provodnici se mekanom žicom pričvršćuju za potpome izolatore koji su različitog oblika i dimenzija za NN i SN sistem vodova. Pri korišćenju SKS-a, snop izolovanih užadi se pomoću odgovarajućih stezaljki pričvršćuje na stub.

Na slici 1 je prikazan mešoviti vod koji je postavljen na armirano betonske i rešetkaste stubove u okviru iste trase.



Slika 1. Konfiguracija faznih provodnika mešovitog nadzemnog voda.

A. Čelično rešetkasti stub

Čelično rešetkasti stubovi se koriste na svim naponskim nivoima, najčešće u prenosnim i sub-prenosnim mrežama, ali se javljaju i u distribuciji. Najčešće su četvoronožni, povezani sa tlom pomoću betonskog temelja koji treba da bude viši od okolnog terena iz bezbedonosnih razloga. Čelično rešetkasti stubovi korišćeni u mešovitim vodovima su visine 10,5 m.

Treba napomenuti, da se pri korišćenju čelično rešetkastog stuba uvek koriste horizontalne čelične konzole za prihvatanje i NN i SN vodova. Dimenzije čeličnih konzola su date na slici 2.

B. Armirano betonski stub

Armirano betonski stubovi imaju najduži vek trajanja i ne zahtevaju posebno održavanje. Koriste se u NN, SN i mešovitim sistemima. Armirano betonski stub u mešovitim nadzemnim sistemima je standardom propisane visine od 12 m, od čega je nadzemni deo visine 10 m.

Na stubove se postavljaju vršne konzole, koje mogu biti od armiranog betona ili su metalne konstrukcije. Vodovi SN sistema mogu da se postave u horizontalnu ravan kao i u dve paralelne ravni, formirajući trougaonu konfiguraciju vodova. U Srbiji se najčešće koriste stubovi sa oznakom MNL-12 [6].

III. TEORIJSKA POSTAVKA PROBLEMA

Kada se u neposrednoj blizini vodova nađu provodna tela, usled elektromagnetske indukcije dolazi do pojave indukovano električnog polja, koje se superponira električnom polju prouzrokovanom provodnicima sistema. Osim toga, obzirom da su tela provodna, indukovano električno polje stvara indukovane struje, koje stvaraju dodatno magnetsko polje, tako da su oba polja, i električno i magnetsko, posledica delovanja polja provodnika, ali i indukovanih naelektrisanja i struja.

Kako je u pitanju sistem za prenos električne energije niskih učestanosti, elektromagnetsko polje može da se smatra kvazistatičkim, pa električno i magnetsko polje mogu da se posmatraju odvojeno; njihov međusobni uticaj je zanemarljiv, osim preko elektromagnetske indukcije.

Sredina (vazduh) u kojoj se nalazi mešoviti vod je linearna i može da se smatra homogenom. U neposrednoj blizini sistema, kao i u provodnicima sistema, često se nalaze čelični, feromagnetski, provodni materijali; rešetkasti stubovi sa odgovarajućim konzolama, armature betonskih stubova i konzole za prihvatanje provodnika na njima, kao i jezgra Alučel užadi, koja se skoro uvek koriste kao provodnici SN nivoa mešovitih vodova.

Magnetsko polje koje stvaraju struje u provodnicima mešovitog voda je relativno malog intenziteta, tako da sigurno ne dovodi do zasićenja obližnje feromagnetske delove. Kod većine feromagnetskih materijala, zasićenje nastupa na oko 0,6 - 0,8 T, što je reda veličine 10⁴ - 10⁵ puta veća vrednost od vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije u feromagnetskim delovima stubova. Zbog toga nije neophodno uzimati u obzir nelinearnost tih materijala, odnosno, ti materijali mogu da se tretiraju kao homogeni, konstantne permeabilnosti.

Kako se vremenske promene napona i jačina struja prostoperiodične, za proračun raspodele električnog i magnetskog polja u okolini mešovitih vodova je moguće korišćenje kompleksne notacije.

Da bi se odredila raspodela električnog i magnetskog polja, najjednostavnije je kompleksni vektor jačine električnog polja i kompleksni vektor magnetske indukcije, definisati preko električnog skalar i magnetskog vektor potencijala [7],

$$\begin{aligned}\vec{E} &= -\text{grad}V - j\omega\vec{A}, \\ \vec{B} &= \text{rot}\vec{A}.\end{aligned}\quad (1)$$

Pošto u posmatranom prostoru ne postoje zapreminski raspoređena naelektrisanja, kompleksni električni skalar potencijal zadovoljava Laplasovu diferencijalnu jednačinu u kompleksnom domenu,

$$\Delta V = 0. \quad (2)$$

Naelektrisanja koja se indukuju u zemlji se prikazuju pomoću likova, pri čemu se zemlja obično tretira kao savršeno provodna, što u velikoj meri olakšava proračune. Naelektrisanja koja se indukuju u prisutnim provodnim konfiguracijama se uzimaju u obzir već prilikom definisanja kompleksnih parcijalnih diferencijalnih jednačina za potencijale.

Kompleksni magnetski vektor potencijal je rešenje kompleksne parcijalne diferencijalne jednačine [7],

$$\Delta \vec{A} - j\omega\mu\sigma\vec{A} = -\mu\vec{J}. \quad (3)$$

Za rešavanje (2) i (3), neophodno je definisati granične uslove i odabrati referentnu tačku kompleksnog električnog skalar potencijala. Bez obzira na činjenicu da je, izborom da se problem tretira kao 2D, pretpostavljeno da je vod beskonačno dug i da, time, ima konačna naelektrisanja i u beskonačnosti, referentna tačka kompleksnog električnog skalar potencijala može da se izabere u beskonačnosti u ravni posmatranja voda. Primenom približnih metoda za rešavanje Laplasove diferencijalne jednačine, to znači pretpostavku da polje iščezava dovoljno daleko od samog voda, što opet znači da ni električno ni magnetsko polje ne postoje dovoljno daleko od samog voda.

Kompleksni vektor gustine indukovanih struja je posledica indukovanoeg električnog polja,

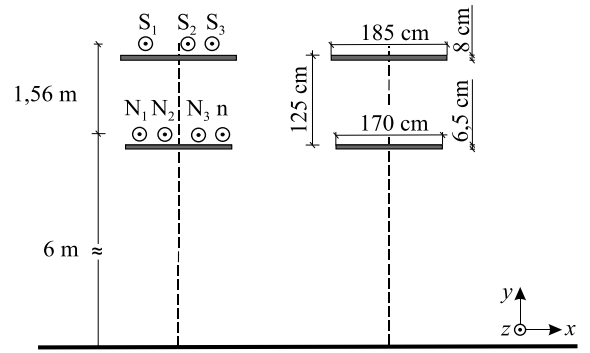
$$\vec{J}_{\text{ind}} = \sigma\vec{E}_{\text{ind}} = -j\omega\sigma\vec{A}. \quad (4)$$

Prilikom proračuna magnetskog polja, magnetsko polje indukovanih struja se superponira magnetskom polju struja u provodnicima, tako da je rezultantno magnetsko polje vektorski zbir ta dva polja.

IV. ANALIZIRAN MODEL

U radu je izvršena uporedna analiza mešovitih vodova postavljenih a) na armirano-betonski i b) čelično rešetkasti stub. U oba slučaja su konzole SN voda za prihvat izolatora u jednoj ravni, iz razloga što se, u skladu sa [8], na rešetkastom stubu mogu koristiti samo horizontalne konzole. Poprečni presek analiziranog sistema, sa dimenzijama korišćenih čeličnih konzola, je prikazan na slici 2. SN vod je označen sa S_1, S_2 i S_3 , NN vod sa N_1, N_2 i N_3 , dok neutralni vod nosi oznaku n.

Pošto se u radu posmatra ekološki aspekt uticaja magnet-skog polja mešovitog voda, svi proračuni su izvršeni za najnepovoljniju konfiguraciju; pri najnižim dozvoljenim visinama



Slika 2. Konfiguracija faznih provodnika mešovitog nadzemnog voda.

provodnika. U skladu sa tim, NN vod je postavljen na sigurnosnu visinu od 6 m, a SN vod na $6\text{ m} + 1,56\text{ m} = 7,56\text{ m}$, pridržavajući se propisanih dozvoljenih rastojanja između NN i SN voda [8]. Visine prihvatnih izolatora iznose 5,1 cm za NN vod i 36,2 cm za SN vod.

Umesto realnih alužel užadi, u radu su korišćeni njihovi uprošćeni modeli. Prva aproksimacija je omogućila da se realno uže zameni modelom u vidu dva, koncentrično postavljena sloja, odgovarajućih, ekvivalentnih poluprečnika [9]. Na osnovu druge aproksimacije, alužel uže može da se posmatra kao provodnik načinjen od aluminijuma kroz ceo ekvivalentan poprečni presek, jer su varijacije u raspodeli EM polja zbog prisustva feromagnetskog jezgra neznatne [10].

Armatura, rešetkasti stub i noseće konzole su napravljeni od čelika Č24.B1, prema SRPS C.BO.500.

Električne i magnetske osobine materijala od kojih su načinjeni elementi modela iznose:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{Al}} &= 3,55 \cdot 10^7 \text{ S/m}, \\ \sigma_{\text{čeStub}} &= 0,467 \cdot 10^7 \text{ S/m}, \quad \sigma_{\text{čeArmature}} = 0,559 \cdot 10^7 \text{ S/m}, \\ \epsilon_{\text{rAl}} &= \epsilon_{\text{rče}} = 1, \\ \mu_{\text{rAl}} &= 1, \quad \mu_{\text{rče}} = 850.\end{aligned}$$

Usvojeno je, da su vodovi opterećeni najvećom dozvoljenom efektivnom vrednošću nominalne jačine struje, $I_N = 170\text{ A}$. Zbog korišćenja alužel užeta istog, nominalnog preseka $50/8\text{ mm}^2$, kompleksne maksimalne vrednosti jačina struja trofaznih provodnika u oba sistema su jednake, i iznose,

$$\begin{aligned}I_0^{20\text{ kV}} &= I_0^{0,4\text{ kV}} = 170\sqrt{2}e^{j0^\circ} [\text{A}], \\ I_4^{20\text{ kV}} &= I_4^{0,4\text{ kV}} = 170\sqrt{2}e^{-j120^\circ} [\text{A}], \\ I_8^{20\text{ kV}} &= I_8^{0,4\text{ kV}} = 170\sqrt{2}e^{-j240^\circ} [\text{A}].\end{aligned}\quad (5)$$

Dvodimenzionalni modeli sistema se sastoje od čelično-rešetkastog i armirano betonskog stuba, preuzetih iz AutoCad-a u COMSOL Multiphysics i postavljenih na modelovanu površ zemlje. Zemlja i vazduh su predstavljeni pravougaonim oblastima dovoljno velikih dimenzija u odnosu na stubove (vazduh $60\text{ m} \times 30\text{ m}$, zemlja $60\text{ m} \times 20\text{ m}$), da bi na granicama oblasti važio granični uslov, da je intenzitet magnetskog vektor potencijala jednak nuli ($A = 0$). Parametri sredine iznose

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{rv}} &= \epsilon_{\text{rz}} = 1, \quad \mu_{\text{rv}} = \mu_{\text{rz}} = 1, \\ \sigma_{\text{v}} &= 10^{-6} \text{ S/m}, \quad \sigma_{\text{z}} = 1/50 \text{ S/m}.\end{aligned}$$

Pretpostavljeno je da je površ tla ravna, da su provodnici unutar jednog sistema (NN i SN) među sobom paralelni i postavljeni na istu visinu, kao što je prikazano na slici 2.

Mreža konačnih elemenata pri proračunu bila je sastavljena od trouglova nejednakih dimenzija da bi proračun bio što tačniji. U oblastima oko provodnika i samih stubova mreža je bila najgušća, dok je postajala ređa približavajući se ivicama domena. Na taj način formirana mreža je najbolje pokrila oblasti u kojima se javljaju najintenzivnije promene magnetikog vektor potencijala. Numeričkim postupkom su rešavane jednačine (2) i (3), nakon čega je izvršeno grafičko predstavljanje veličina od interesa; u ovom radu, raspodele intenziteta vektora magnetske indukcije, u ravni normalnoj na pravac prostiranja voda koja sadrži sam stub, na visini 1 m iznad tla, u oblasti ± 30 m od ose stuba.

Pojednostavljen 2D model sistema može da pruži zadovoljavajuću aproksimaciju raspodele magnetikog polja u okolini posmatrane konfiguracije u slučaju da posmatran sistem nema značajnijih specifičnosti, kao što su promene u konfiguraciji terena, promene ugiba provodnika, potrebe za posmatranjem realnog modela stuba i/ili međusobnog položaja provodnika. Kada se navedene karakteristike sistema menjaju duž trase, poželjno je da se analize izvrše posmatrajući realan 3D model sistema. Proračuni u tom slučaju zahtevaju mnogo veće računarske resurse i traju mnogo duže, ali se njihova tačnost takođe povećava. Dobijeni rezultati tada vernije oslikavaju raspodelu magnetikog polja u okolini sistema nego u slučaju 2D modela.

V. REZULTATIPRORAČUNA

U cilju da se dobiju kvantitativni pokazatelji uticaja na raspodelu magnetikog polja faznih stavova jačina struja, kao i prisustva stubova koji u sebi sadrže provodne feromagnetske delove, ispraćen je sledeći scenario.

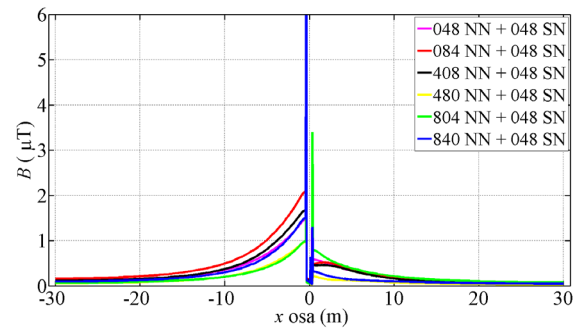
Prvo je ispitan uticaj rasporeda faza SN voda na raspodelu magnetikog polja u odsustvu NN voda i samog stuba. U sledećoj fazi proračuna, u kolo je, pored SN sistema, uključen i NN vod, i dalje u odsustvu stuba.

Nakon što su se odredili fazni stavovi u oba sistema koji daju najveće vrednosti intenziteta vektora magnetikog polja, postupak je ponovljen u prisustvu stuba. Na kraju su upoređeni dobijeni rezultati, posmatrajući grafike intenziteta vektora magnetikog polja najnepovoljnijih faznih stavova, sa stanovišta ekologije, bez stuba i u prisustvu stuba i doneti su odgovarajući zaključci.

A. Uticaj prisustva čelično rešetkastog stuba

Proračuni su pokazali, da su odstupanja intenziteta vektora magnetikog polja pri promeni faznog stava struja u SN sistemu, u odsustvu NN sistema i stuba, zanemarljivo mala, tako da je u daljem proračunu korišćen proizvoljno izabran fazni stav SN 048 ($S_1 - I_0$, $S_2 - I_4$ i $S_3 - I_8$) [11].

Utvrđeno je, da na raspodelu magnetikog polja utiče i fazni stav NN voda. Na slici 3 je prikazan uticaj faznih stavova NN voda na raspodelu intenziteta vektora magnetikog polja u prisustvu čelično rešetkastog stuba, pri faznom stavu SN 048.



Slika 3. Intenzitet vektora magnetikog polja u prisustvu čelično rešetkastog stuba – različiti fazni stavovi NN voda (SN 048)

Sa slike 3 se vidi, da su najveće vrednosti intenziteta vektora magnetikog polja u prostoru van stuba dobijene pri rasporedu faza SN 048 + NN 048. U samom stubu su vrednosti intenziteta vektora magnetikog polja, zbog velike razlike u permeabilnosti čelika i vazduha, mnogo veće nego u okolnom prostoru.

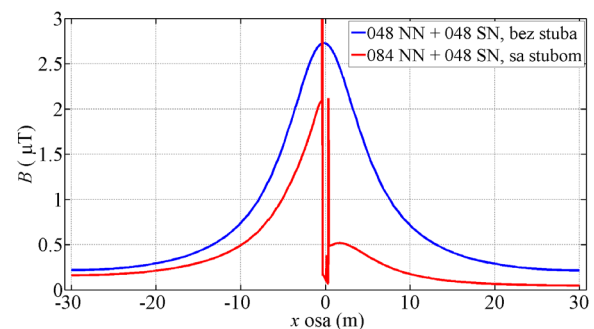
Da bi se jasnije uočio uticaj faznih stavova na raspodelu intenziteta vektora magnetikog polja, na grafiku su veštački odsečene vrednosti intenziteta vektora magnetikog polja koje se javljaju u armaturi stuba (B_{max} u stubu = 10,5 μT).

Uticaj prisustva čelično rešetkastog stuba na raspodelu intenziteta vektora magnetikog polja, predstavljen je na slici 4, na kojoj se vidi uporedni grafik "najgorih" faznih stavova za sistem bez stuba i u prisustvu čelično rešetkastog stuba, u samoj ravni stuba.

Zanemarujući značajan skok vrednosti intenziteta vektora magnetikog polja u čeličnom stubu, sa slike 4 može još bolje da se uoči, da prisustvo rešetkastog stuba unosi značajne izmene u raspodelu intenziteta vektora magnetikog polja u oblasti levo i desno od stuba.

Prisustvo stuba stvara asimetričnu raspodelu u okolini stuba, što se pripisuje asimetričnom položaju NN vodova. Dva fazna provodnika su sa leve strane stuba, dok se na desnoj strani nalazi samo jedan fazni vod, sa neutralnim vodom, kroz koji se pri simetričnom opterećenju, ne uspostavlja struja.

Još je značajnije, da su vrednosti intenziteta vektora magnetikog polja niže u prisustvu stuba nego bez stuba.



Slika 4. Raspodela intenziteta vektora magnetikog polja bez i u prisustvu čelično rešetkastog stuba

Smanjenje intenziteta vektora magnetske indukcije je rezultat dejstva indukovanih struja u čeličnom stubu i prihvatnim konzolama nosećih izolatora, čije se polje superponira na magnetsko polje struja u faznim provodnicima mešovitog voda. Asimetrično postavljene NN vodove prouzrokuju neravnomernu raspodelu indukovanih struja u nosećim konzolama i stubu, usled čega je, kao što se vidi na slici 4, asimetrija izražena samo u prisustvu stuba.

B. Uticaj prisustva armirano betonskog stuba

Pri analizi uticaja armirano betonskog stuba na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije, ponovljeni su koraci iz prethodnog razmatranja, kada je mešoviti vod bio postavljen na čelično rešetkasti stub. U skladu sa opisanim nizom postupaka, na slici 5 je prikazan uticaj faznih stavova struja NN voda na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije u prisustvu armirano betonskog stuba.

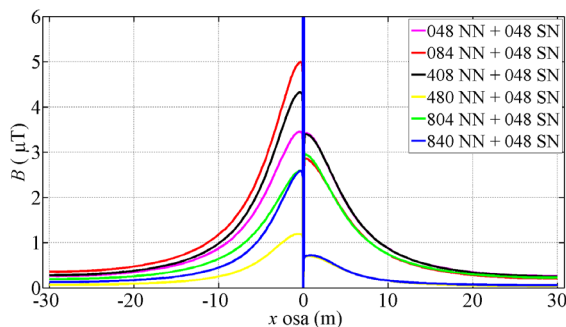
Kao i u slučaju čelično rešetkastog stuba, promena rasporeda faza SN sistema ni u ovom slučaju nije znatno uticala na intenzitet vektora magnetske indukcije, tako da su dalji proračuni izvršeni za raspored faza SN voda, SN 048.

Posmatrajući sliku 5, slični zaključci mogu da se izvedu kao i u slučaju mešovitog voda postavljenog na čelično rešetkasti stub. U armaturi stuba se, zbog velike permeabilnosti čelika, javljaju mnogo veće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, nego u okolnom prostoru u vazduhu. Zbog jasnijeg prikaza promena intenziteta vektora magnetske indukcije u vazduhu, vrednosti po ordinati su, i u ovom slučaju, ograničene na opseg do $6 \mu\text{T}$.

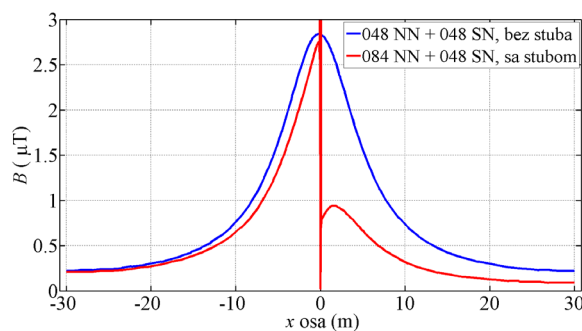
Uticaj prisustva armirano betonskog stuba na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije, prikazan je na slici 6. Na grafiku je dat prikaz "najgorih" faznih stavova za sisteme bez i u prisustvu armirano betonskog stuba, u ravni stuba.

Sa slike 6 se vidi, da prisustvo armirano betonskog stuba unosi nesimetriju u raspodelu magnetskog polja u okolini stuba, i smanjuje vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, kao što je bio slučaj kada je mešoviti vod bio postavljen na čelično rešetkasti stub.

Upoređujući grafike sa slikom 4 i 6, može da se zaključi da je prisustvo rešetkastog stuba značajnije smanjilo intenzitet vektora magnetske indukcije u prostoru oko stuba nego armirano betonski stub.



Slika 5. Intenzitet vektora magnetske indukcije u prisustvu armirano betonskog stuba – različiti fazni stavovi NN voda (SN 048)



Slika 6. Raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije bez i u prisustvu armirano betonskog stuba

VI. ZAKLJUČAK

Analizirajući raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog nadzemnog voda 20 kV/ 0,4 kV, postavljenog na čelično rešetkasti, kao i armirano betonski stub, koji se koriste u ruralnim i suburbanim sredinama u Srbiji, zaključuje se da prisustvo feromagnetskih delova stubova, dejstvom elektromagnetske indukcije, smanjuju intenzitet vektora magnetske indukcije u prostoru oko stubova.

Uticaj čelično rešetkastog stuba na smanjenje magnetskog polja je nešto izrazitiji u odnosu na prisustvo armirano betonskog stuba, pri čemu su sve dobijene vrednosti mnogo ispod graničnih referentnih vrednosti, predloženih domaćom regulativom (B_{max} u okolini stuba $< 3 \mu\text{T} < B_{\text{dozvoljeno}} = 40 \mu\text{T}$).

Analize izvršene u radu navode na zaključak, da se prilikom merenja intenziteta vektora magnetske indukcije, kada se posmatraju najnepovoljniji uslovi, merenja treba da se izvode što dalje od stubova, u prostoru na polovini rastojanja između njih. U tom prostoru se očekuje najmanji uticaj smanjenja magnetskog polja zbog prisustva stubova i time simuliraju "najgori" uslovi, sa aspekta očuvanja životne sredine.

LITERATURA

- [1] V. Strezoski, Osnovi elektroenergetike, Univerzitet u Novom Sadu, FTN, 2015.
- [2] "Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima", "Sl. Glasnik RS", br. 104/2009, str. 7.
- [3] International Commission on Non-ionizing Radiation Protection: "ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 100 kHz)," Health Physics, vol. 99(6), pp. 818-836, June 2010.
- [4] "Council Recommendation on the Limitation of exposure of General Public to Electromagnetic Fields (0 to 300 GHz)," Official Journal of the European Communities, 1999, L199/59.
- [5] COMSOL Multiphysics, documentation, 2008.
- [6] T. Gavrilov, K. Kasaš-Lažetić, K. Haška i M. Prša, "Uticaj armirano betonskog stuba na raspodelu magnetskog polja mešovitog voda," neobjavljen.
- [7] B. D. Popović, *Elektromagnetika*, Građevinska knjiga, Beograd, 2000.
- [8] 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.
- [9] Prša M, Kasaš-Lažetić K and Đurić N, "Determination of Frequency dependent Radiuses of Steel Cored Aluminum Conductors," In

Proceedings of 2nd International Conference on EMF-ELF, Paris, France, 2011, Paper No A-P-05, pp. 117-123.

- [10] D. Vidrić, Analiza raspodele magnetnog polja u okolini mešovityh vodova, diplomski rad, FTN Novi Sad, 2018.
- [11] A. Višnjic, Uticaj rešetkastog stuba na raspodelu magnetskog polja mešovityg voda, diplomski rad, FTN Novi Sad, 2019.

ABSTRACT

The paper presents a comparative analysis of magnetic field distribution in vicinity of overhead mixed power line, suspended by steel lattice and reinforced concrete towers. The calculation was carried out taking into account the influence of three phase currents' phase arrangements on both, low and middle voltage levels. The main goal of the paper is to examine the effect of induced currents in ferromagnetic, conductive parts of towers on magnetic field distribution. The whole

calculation was carried out applying COMSOL Multiphysics program package, based on finite element method, on 2D model of mixed power system. The calculated results show that due to induced currents in all ferromagnetic, conductive parts of the towers, the magnitude of magnetic flux density decreases around the towers. The event is more significant in vicinity of steel lattice towers and less significant around reinforced concrete towers.

INFLUENCE OF MIXED POWER LINE TOWERS ON MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION

Karolina Kasaš-Lažetić, Teodora Gavrilov,
Gorana Mijatović, Kristian Haška i Miroslav Prša