



**АНАЛИЗА РИЗИКА ПО БЕЗБЕДНОСТ РАДНИКА КОЈИ РАДЕ НА ОДРЖАВАЊУ
ДИСТРИБУТИВНОГ НАДЗЕМНОГ ВОДА УСЛЕД ПОЈАВЕ ИНДУКОВАНЕ
ЕЛЕКТРОМОТОРНЕ СИЛЕ**

**RISK ANALYSIS FOR THE SAFETY OF WORKERS WORKING ON THE MAINTENANCE OF
OVERHEAD DISTRIBUTION POWER LINE DUE TO INDUCED ELECTROMOTIVE FORCE**

Александар ПАВЛОВИЋ*, Електротехнички институт „Никола Тесла“, Република Србија
Маја ГРБИЋ, Електротехнички институт „Никола Тесла“, Република Србија
Ранко ЈАСИКА, Електротехнички институт „Никола Тесла“, Република Србија
Стефан ОБРАДОВИЋ, Електротехнички институт „Никола Тесла“, Република Србија

КРАТАК САДРЖАЈ

У раду је анализиран ризик по безбедност радника који раде на одржавању дистрибутивног надземног вода, услед појаве индуковане електромоторне силе. Дистрибутивни надземни вод напонског нивоа 35 kV води се паралелно са преносним надземним водом напонског нивоа 400 kV. Током извођења радова дистрибутивни вод је искључен и уземљен на месту рада, као и у крајњим трансформаторским станицама, док је преносни вод оптерећен и на њему долази до појаве једнофазног земљоспоја. Прорачуни су спроведени моделовањем надземних водова у одговарајућем софтверском пакету. У раду је анализиран утицај различитих фактора, као што су дужина паралелног вођења, вредност струје квара и хоризонтално растојање водова, на вредности индуковане електромоторне силе. На основу добијених резултата графички су представљене криве зависности кључних фактора. Такође, одређене су и граничне вредности дужине паралелног вођења у функцији струје квара за које су вредности напона додира и корака у границама дозвољених.

Кључне речи: дистрибутивни надземни вод, индукована електромоторна сила, напон додира, напон корака.

ABSTRACT

The paper analyzes the risk to the safety of workers working on the maintenance of overhead distribution power line, due to induced electromotive force. The 35 kV overhead distribution line runs in parallel with the 400 kV overhead transmission line. During the works, the distribution line is out of operation and grounded at the place of work as well as in the transformer stations, while there is a single-phase earth fault on the transmission line. The calculations were performed by modeling overhead lines in an appropriate software tool. The paper analyzes the influence of various factors such as the length of the section where the lines run in parallel, the value of fault current and the horizontal distance between the lines on the values of induced electromotive force. Based on the obtained results, the curves representing dependence of key factors are graphically presented. Limit values for the length of the section where the lines run in parallel as a function of fault current have also been determined, for which the values of touch and step voltage are within the allowed limits.

Keywords: induced electromotive force, overhead distribution power line, step voltage, touch voltage.

* aleksandar.pavlovic@ieent.org

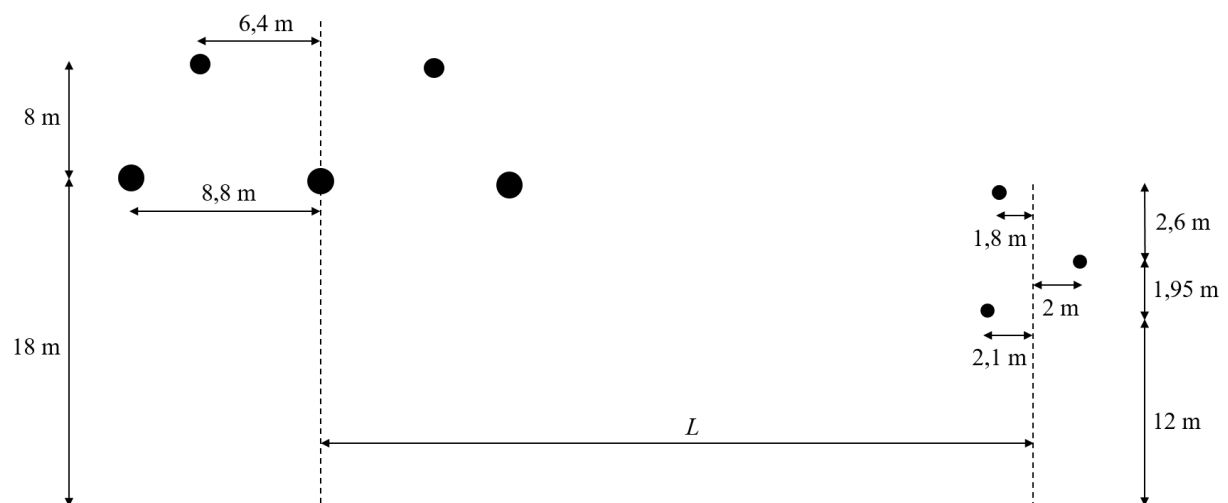
1. УВОД

Као последица електромагнетне индукције услед појаве земљоспоја на надземном воду напонског нивоа 400 kV у проводницима дистрибутивног вода напонског нивоа 35 kV који се налази у његовој близини јавља се електромоторна сила. Како је вод напонског нивоа 35 kV уземљен на месту рада и у крајњим трансформаторским станицама, кроз тако формирану петљу протиче струја која је ограничена импедансом петље коју чине импеданса дистрибутивног вода и отпори уземљења на крајевима петље. Пошто се фазни проводници вода напонског нивоа 35 kV на месту рада повезују на стуб не постоји опасност од успостављања директног контакта радника са неуземљеним фазним проводником, али постоји могућност појаве опасних напона додира и корака у околини стуба услед протичања струје кроз уземљивач стуба.

2. МОДЕЛОВАЊЕ

За израчунавање расподеле потенцијала, напона додира и напона корака у околини стуба, неопходно је одредити вредност струје која се одводи са уземљивача стуба, која се јавља као последица индукованих електромоторних сила. За израчунавање вредности струје која се одводи са уземљивача стуба коришћен је модел надземних водова формиран у одговарајућем софтверском пакету [1]–[4]. Овај софтверски пакет је намењен за нумеричке симулације електромагнетних и електромеханичких прелазних процеса, као и прелазних процеса у систему аутоматског управљања. Надземни водови напонских нивоа 400 kV и 35 kV су представљени PI моделом вода. Електрични параметри надземног вода за примену PI модела одређени су на основу геометријског распореда проводника вода и карактеристика самих проводника. Подаци коришћени приликом моделовања водова дати су на слици 1 и у табели 1. Ознака L на слици 1 представља растојање између оса водова.

Анализиране су различите ситуације индуковања електромоторне силе у проводницима дистрибутивног надземног вода напонског нивоа 35 kV која се јавља као последица протичања струје земљоспоја на преносном надземном воду напонског нивоа 400 kV, при чему је претпостављено да струја квара тече фазним проводником који је најближи дистрибутивном воду.



Слика 1 – Ситуација

Табела 1 – Подаци о проводницима надземних водова 400 kV и 35 kV

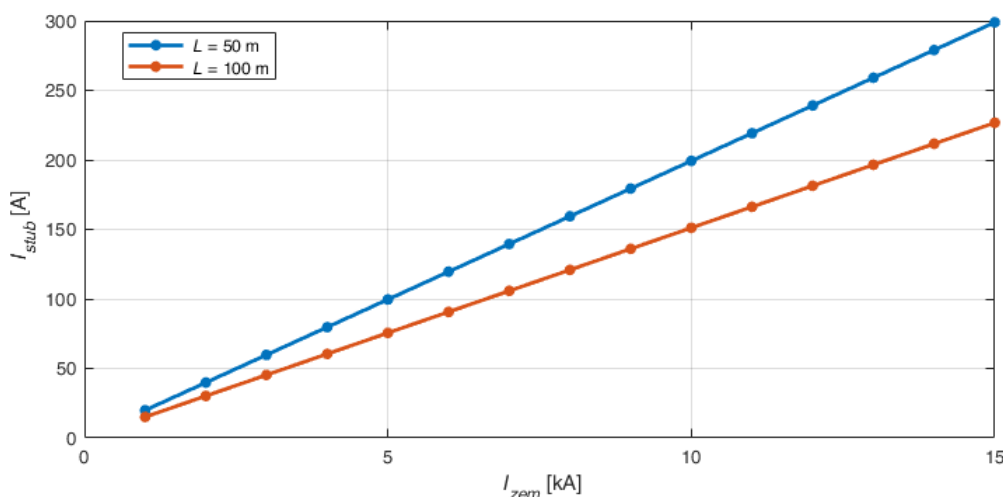
Надземни вод	Фазни проводник				Заштитно уже			
	Тип	Унутрашњи пречник [mm]	Спољашњи пречник [mm]	Подужни отпор [Ω /km]	Тип	Унутрашњи пречник [mm]	Спољашњи пречник [mm]	Подужни отпор [Ω /km]
400 kV	Al/Џе 490/65	10,2	30,6	0,05896	OPGW	5	15	0,37
	-	-	-	-	Џе 50	0	9	2,88
35 kV	Al/Џе 95/15	4,37	13,6	0,3058	-	-	-	-

3. РЕЗУЛТАТИ ПРОРАЧУНА

3.1 Анализа утицаја дужине паралелног вођења и вредности струје квара

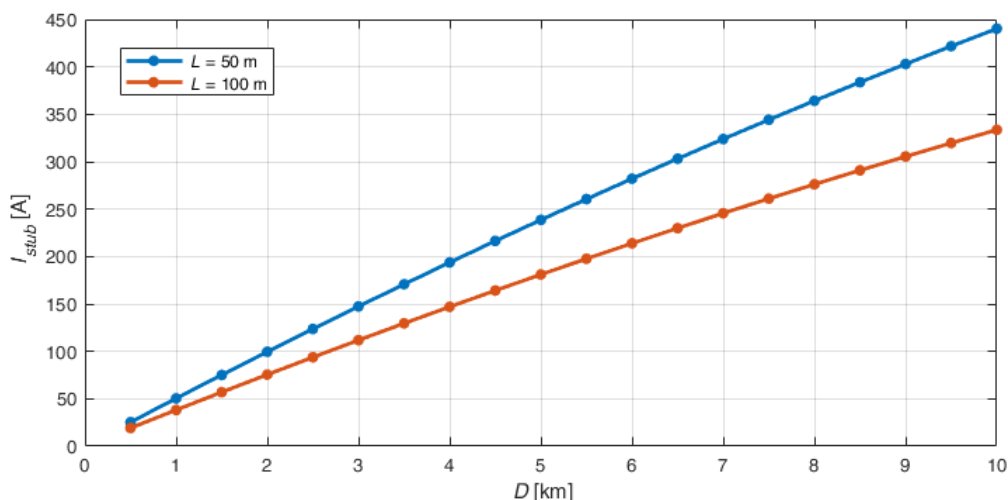
Анализиран је утицај дужине паралелног вођења водова 35 kV и 400 kV (D) као и вредности струје квара на воду 400 kV (I_{zem}) на интензитет индуковане електромоторне силе, односно струју која се затвара кроз уземљивач стуба на коме се спроводе радови (I_{stubb}). Усвојена је отпорност уземљења трансформаторских станица од 0,5 Ω , специфична отпорност тла 100 Ωm и отпор уземљивача стуба од 12,83 Ω .

У првом кораку је за фиксну дужину паралелног вођења од 2 km варирана вредност струје квара у опсегу од 1 kA до 15 kA, при чему је рачуната струја кроз уземљивач стуба. Разматрани су случајеви када хоризонтално растојање између оса водова износи 50 m и када износи 100 m. Резултати су графички приказани на слици 2, одакле се може јасно уочити да постоји линеарна зависност струје кроз уземљивач стуба вода 35 kV од струје квара вода 400 kV.



Слика 2 – Зависност струје која отиче са уземљивача стуба надземног вода 35 kV од струје квара надземног вода 400 kV

У следећем кораку је за фиксну вредност струје квара (5 kA) варирана дужина паралелног вођења у опсегу од 0,5 km до 10 km, при чему је рачуната струја кроз уземљивач стуба. Разматрана су два случаја, када хоризонтално растојање између оса водова износи 50 m и када износи 100 m. Резултати симулација су графички приказани на слици 3, одакле се може уочити да је зависност струје кроз уземљивач стуба дистрибутивног надземног вода од дужине паралелног вођења, на датом опсегу, приближно линеарна. Усвајањем линеарне зависности добијају се резултати који су на страни сигурности.

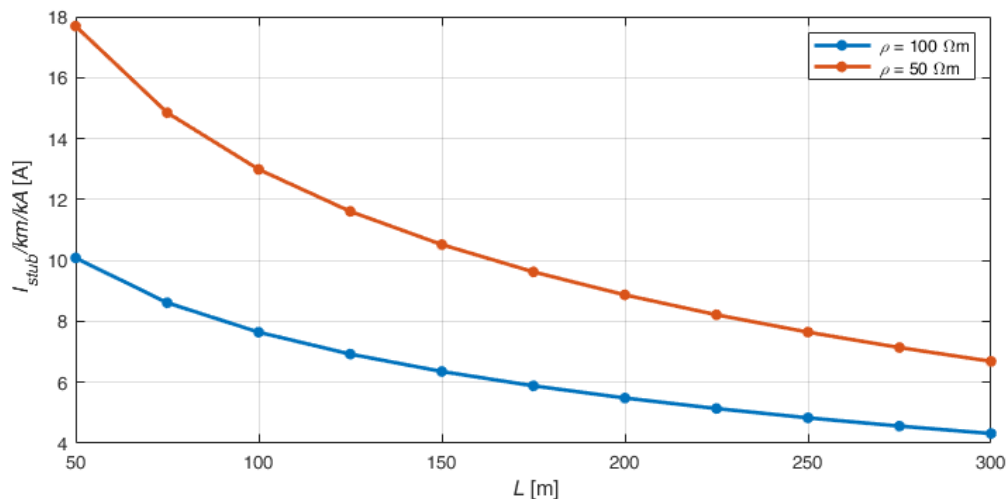


Слика 3 – Зависност струје која отиче са уземљивача стуба надземног вода 35 kV од дужине паралелног вођења

3.2 Процена rizika od napona dodira i koraka u okolini stuba

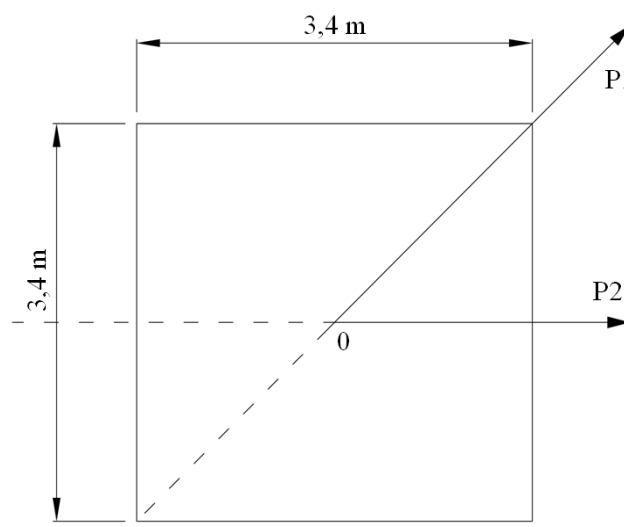
Анализа приказана у претходном поглављу је показала да вредности струје која отиче кроз уземљивач стуба, а самим тим и напони додира и корака, приближно линеарно зависе од дужине паралелног вођења и интензитета струје квара, због чега у даљој анализи нису варирана два наведена параметра већ су све величине дате по километру паралелног вођења и по килоамперу струје квара (/km/kA).

Да би се сагледао утицај хоризонталног растојања између оса надземних водова на вредности струје кроз уземљивач стуба, односно напоне додира и корака, хоризонтално растојање је варирано у опсегу од 50 m до 300 m. Прорачун је спроведен за две вредности специфичне отпорности тла од 50 Ωm и 100 Ωm , којима одговарају вредности отпора стуба од 6,42 Ω и 12,83 Ω . Резултати прорачуна су графички приказани на слици 4.



Слика 4 – Зависност струје која отиче са уземљивача стуба надземног вода 35 kV од хоризонталног растојања између оса надземних водова

За добијене вредности струја које се затварају кроз уземљивач стуба прорачунате су одговарајуће вредности напона додира и корака у околини стуба. Прорачун напона додира и напона корака у околини стуба спроведен је применом комерцијалног софтверског пакета [5], [6]. Вредности напона додира и корака зависе од конфигурације уземљивача, али и од специфичне електричне отпорности тла у које се уземљивач полаже. Прорачуни су спроведени за две вредности специфичне електричне отпорности тла (50 Ωm и 100 Ωm). Уземљивач стуба моделован је квадратном контуром странице 3,4 m, изведеном од поцинкованог гвожђа пречника 10 mm. Уземљивач је положен хоризонтално у тло, на дубини од 0,7 m. Модел уземљивача стуба приказан је на слици 5. На слици су означени карактеристични правци P1 и P2 дуж којих се врши прорачун. У наставку рада су приказани резултати који се односе на правец P1, пошто се дуж овог правца добијају веће вредности напона додира и корака.



Слика 5 – Уземљивач стуба дистрибутивног надземног вода

На основу модела уземљивача стуба и струје која се одводи са уземљивача, применом софтверског пакета [5], [6] могуће је одредити расподелу потенцијала на површини тла око стуба. Из расподеле потенцијала на неком правцу одређују се вредности потенцијалних разлика додира и корака, а из њих и вредности напона додира и корака.

Напон додира (U_d) се израчунава применом следећег израза:

$$U_d = \frac{E_d}{1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{pov}} \quad (1)$$

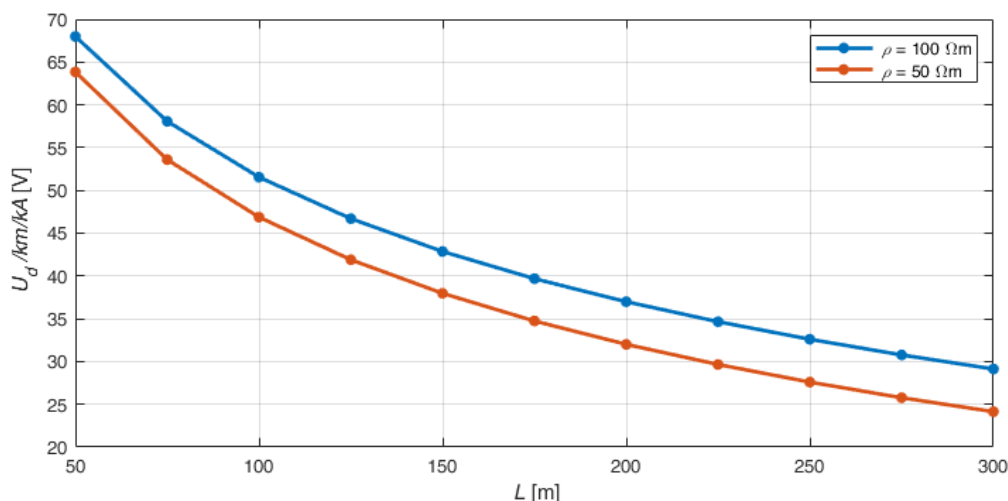
где је E_d потенцијална разлика додира, која се одређује из расподеле потенцијала око стуба, а ρ_{pov} специфична електрична отпорност површинског слоја тла. Приликом израчунавања вредности напона додира стајна тачка се налази на растојању од 1 m од уземљивача стуба.

Напон корака (U_k) се израчунава применом следећег израза:

$$U_k = \frac{E_k}{1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{pov}} \quad (2)$$

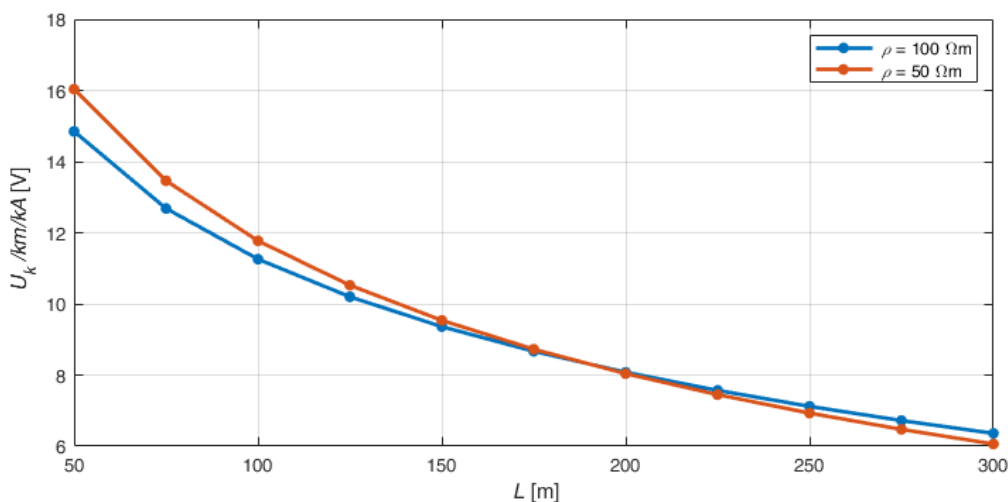
где је E_k потенцијална разлика која се на тлу око стуба може премостити кораком дужине 1 m. Напон корака се израчунава дуж разматраних праваца, при чему се као резултат за даљу анализу користи највећа добијена вредност напона корака дуж датог правца.

На слици 6 приказана је зависност напона додира од растојања између оса надземних водова.



Слика 6 – Зависност напона додира од хоризонталног растојања између оса надземних водова

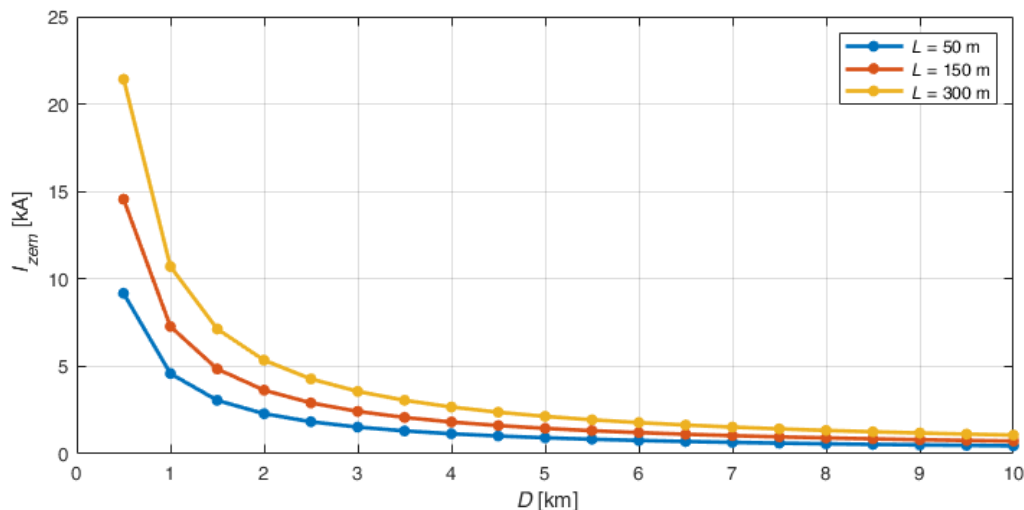
На слици 7 приказана је зависност највећих вредности напона корака на правцу P1 од растојања између оса надземних водова.



Слика 7 – Зависност напона корака од хоризонталног растојања између оса надземних водова

Потребно је да прорачунати напони додира и корака буду мањи од максималних дозвољених вредности напона којима човек сме бити изложен. За усвојено време искључења квара од $t_k = 0,4$ s дозвољена вредност напона додира и корака, према стандарду [7], износи U_{doz} (V) = 312 V.

На основу претходно изложених резултата одређене су граничне вредности струја квара и дужине паралелног вођења за које су напони додира мањи од дозвољених вредности. Разматране су вредности напона додира, пошто су оне знатно критичније од напона корака. Посматран је критичнији случај када специфична отпорност тла износи 100 Ω m. Прорачун је урађен за три хоризонтална растојања између оса водова која износе 50 m, 150 m и 300 m. Резултати су графички приказани на слици 8.



Слика 8 – Граничне вредности струја квара и дужине паралелног вођења за које је напон додира једнак дозвољеној вредности ($U_{doz} = 312$ V)

4. ЗАКЉУЧАК

У раду су анализирани безбедносни ризици током извођења радова на одржавању дистрибутивног надземног вода напонског нивоа 35 kV, услед изложености радника напонима додира и корака који настају услед индуктивног утицаја приликом земљоспоја на паралелно вођеном преносном надземном воду напонског нивоа 400 kV. Критеријум за оцену испуњености услова безбедности је дозвољени ниво напона додира и напона корака који директно зависи од времена трајања земљоспоја. Анализиран је и квантификован утицај кључних параметара – јачине струје квара, растојања између оса надземних водова, дужине паралелног вођења и специфичне отпорности тла.

Израчунате су граничне вредности струја квара и дужине паралелног вођења чија комбинација доводи до прекорачења дозвољених нивоа напона додира.

За моделовање су коришћени реални параметри надземних водова и анализирани су ситуације које су могуће у пракси, па се закључује да постоје безбедносни ризици који захтевају примену мера заштите и циљане обуке за безбедан рад извођача радова.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ATP – EMTP: Bonneville Power Administration (BPA) Electro Magnetic Transient Program (EMTP) and ATPDraw – Alternative Transient Program (ATP) graphical pre-processor Copyright. (e-mail: canam@emtp.org), (www.eeug.org).
- [2] H. W. Dommel, Electromagnetic Transients Program, Reference Manual (EMTP Theory Book), Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
- [3] W. Scott Meyer, T. H. Liu, Alternative Transients Program (ATP) Rule Book, Canadian/American EMTP User Group, 1997.
- [4] H. K. Hoidalen, L. Prikler, F. Penalzoza (2019) ATPDRAW Version 7.0 for Windows Users' Manual.
- [5] XGSLab User's Guide, Release 9.4.1 – 03/20, SINT Ingegneria Srl, March 2020.
- [6] XGSLab Tutorial XGSA_FD, Release 9.4.1 – 03/20, SINT Ingegneria Srl, March 2020.
- [7] SRPS EN 50522:2017 „Уземљење енергетских постројења наизменичног напона преко 1 kV”.