

ELEKTRIČNO POLJE V OKOLICI NADZEMNEGA VODA PUAC 2150/495/65 ZA 400 KV

Žiga VORŠIČ, Jože PIHLER, Jože VORŠIČ

POVZETEK

Zaradi zunanjšega plašča polizolirani vodniki niso tako ranljivi, kadar se vodniki med seboj dotikajo, ali pa ob stiku z drevesi. To omogoča, da se razmik med faznimi vodniki voda s polizoliranimi vodniki zmanjša samo na tretjino razmika med faznimi vodniki nadzemnega voda z neizoliranimi vodniki.

ABSTRACT

Covered conductors are not so vulnerable, because of the outer coat. This fact allows it to reduce the space between the phase conductors of covered conductor to only third of the space, which is the case by uninsulated conductors.

1. UVOD

Z električnim poljem imamo opravka v okolici električno nabitih teles, na primer v okolici energetskih električnih daljnovodov, oddajnih anten telekomunikacijskih naprav Električna polja so povsod, kjer je prisoten električni naboj. Vsak električni prevodnik, ki je pod napetostjo, okoli sebe ustvarja električno polje. To obstaja, tudi ko električni tok ne teče, torej tudi, ko na primer daljnovod ni obremenjen s porabniki. Višja napetost pomeni večje polje. Električna polja so najmočnejša tik ob viru, z razdaljo pa se zelo hitro zmanjšujejo. Kovina jih dobro zaslanja, slabijo pa jih tudi drugi materiali. Jakost električnih polj daljnovodov tako močno zmanjšajo zidovi, stavbe in drevesa. Tudi električno polje energetskih kablov, položenih v zemlji, je na površini zelo zmanjšano.

2. VREDNOTENJE ELEKTROMAGNETNIH POLJ V SLOVENSKI ZAKONODAJI

Vlada Republike Slovenije je leta 1996 sprejela Uredbo o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju [1], ki natančno določa največje dovoljene mejne vrednosti. Mejne vrednosti pri omrežni frekvenci 50 Hz, ki jih določa Uredba, so za I. območje varstva pred EMS 500 V/m in 10 μ T, za II. območje pa 10000 V/m in 100 μ T. V *Zakonu o varstvu pri delu RS* [2] je del zakona namenjen obravnavanju elektromagnetnim sevanjem. Ta

zakonodaja med drugim obravnava tudi vplive elektroenergetskih naprav na okolje in postavlja pogoje za njihovo obratovanje glede na emisijo elektromagnetnih polj, ki jih te naprave lahko povzročajo v naravnem in življenjskem prostoru. To zakonodajo sestavljata dva podzakonska akta:

- *Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju* [1];
- *Pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu za vire elektromagnetnega sevanja ter pogoji za njihovo izvajanje* [3].

Mejne vrednosti veličin s katerimi opišemo elektromagnetno sevanje vodov

Pod elektromagnetno sevanje frekvence 50 Hz, kot ga imenuje slovenska *Uredba* (2. člen, 2. odstavek), spada elektromagnetno polje razdelilnih transformatorskih postaj, nadzemnih in podzemnih elektroenergetskih vodov, visokonapetostnih transformatorjev itd. Pri tej frekvenci ločimo obravnavo polja na:

- električno polje, ki ga opišemo z efektivno vrednostjo električne poljske jakosti E [V/m], ki je odvisna od napetosti vira sevanja oziroma elementa;
- magnetno polje, ki ga opišemo z efektivno vrednostjo gostote magnetnega pretoka B [T], ki je odvisna od toka vira sevanja oziroma elementa.

3. ELEKTRIČNA POLJSKA JAKOST PREMEGA, NESKONČNO DOLGEGA VODNIKA

Električno polje je posledica prisotnosti električnih nabojev na vodnikih in na zemlji. Pri električnih vodnikih pa je posredno povezano z električnimi napetostmi vodnikov do zemlje, čim višje so napetosti, tem močnejše je električno polje.

Za premi neskončno dolgi vodnik predpostavimo, da ima po vsej površini konstantno porazdeljen električni naboj. Naboj na takšnem vodniku lahko opišemo s premo elektrino, ki v splošni točki $T(x,y)$ (slika 1) povzroča naslednji vektor električne poljske jakosti:

$$\vec{E} = \vec{1}_r \cdot \frac{q_+}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{|\vec{r}_+|} \quad (1)$$

pri tem je:

- $\vec{1}_r$ enotski vektor razdalje,
- q_+ pozitivna vrednost premega naboja,
- $|\vec{r}_+|$ absolutna vrednost vektorja razdalje med elektrino in točko opazovanja,
- ϵ_0 dielektričnost praznega prostora.

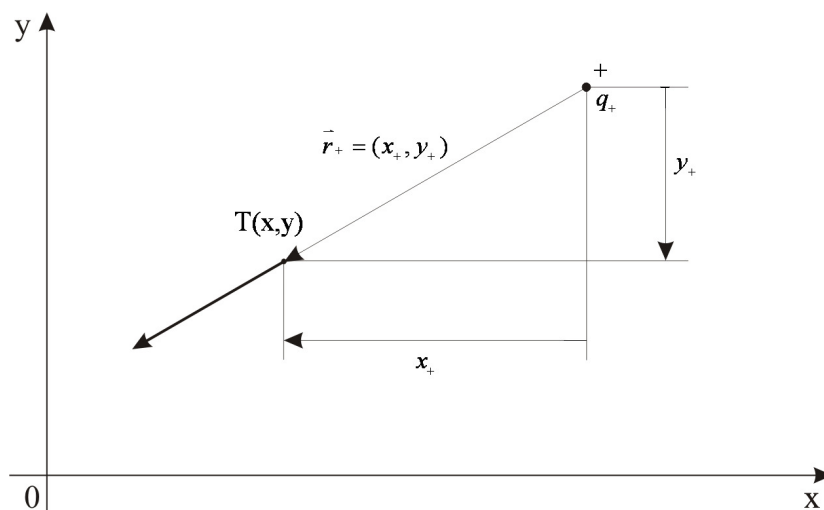
Za izračun električne poljske jakosti vodnika nad prevodno podlago uporabimo metodo ekvivalentnih nabojev. Njena glavna ideja je, da površinski naboj na bližnji prevodni podlagi (v našem primeru zemlji) zamenjamo z zrcalnimi površinskimi naboji nasprotnega predznaka, preslikanimi preko prevodne podlage.

$$[q_+] = [C] \cdot [V], \quad (2)$$

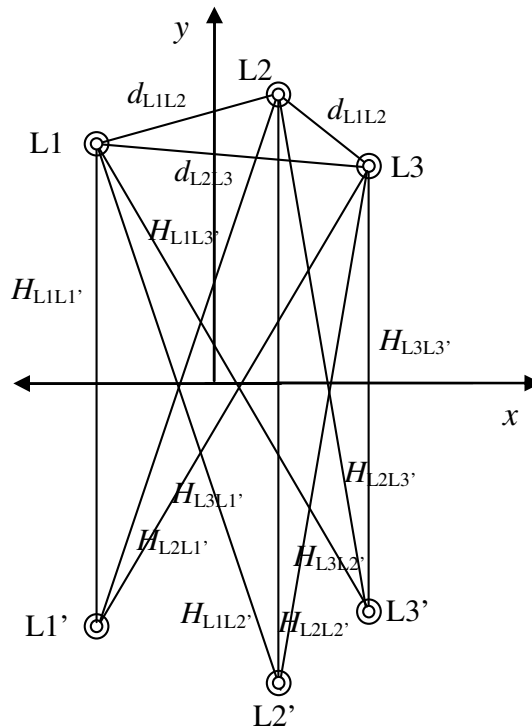
pri tem pomenijo:

- $[q_+]$ stolpčni vektor pozitivnih nabojev,
- $[V]$ stolpčni vektor potencialov vodnikov,
- $[C]$ kvadratna matrika kapacitivnosti.

Matriko $[C]$ dobimo tako, da najprej določimo elemente matrike potencialnih koeficientov voda $[p]$. [4]:



Slika 1: Električno polje preme elektrine



Slika 2: Zrcaljenje vodnikov preko prevodne podlage

Oznake d pomenijo razdalje med vodniki, razdalje H pa razdalje med vodniki in zrcalnimi slikami. Vodniki so označeni z L , zrcalne slike pa z L' .

Tako določene razdalje veljajo za gole vodnike (preme elektrine) v zraku s konstantno dielektričnostjo s konstanto ϵ_0 . V našem primeru, ko imamo opravka z izolacijo okoli vodnikov, se naboj nabere na robu izolacije in moramo upoštevati za debelino izolacije zmanjšane razdalje. To smo upoštevali pri izračunih z računalniškim programom Matlab. Zaradi enostavnosti so enačbe v nadaljevanju pisane kakor da gre tudi pri polizoliranih vodnikih za preme elektrine.

$$p_{ii} = 18 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{H_{ii}}{r} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{F}} \right] \quad (3)$$

$$p_{ij} = 18 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{H_{ij}}{d_{ij}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{F}} \right], \quad (4)$$

kjer so:

- p_{ii} lastni potencialni koeficienti,
- p_{ij} medsebojni potencialni koeficienti,
- ϵ_0 dielektričnost praznega prostora,
- d_{ij} razdalje med faznimi vodniki,

H_{ii} razdalje med faznimi vodniki in njihovimi zrcalnimi slikami,
 H_{ij} razdalje med faznimi vodniki in zrcalnimi slikami drugih faznih vodnikov.

Opravka imamo s tremi potenciali vodnikov, šestimi premimi elektrinami in devetimi potencialnimi koeficienti, ki jih lahko združimo v matrični zapis

$$\begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L2} \\ V_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{L1L1} & p_{L1L2} & p_{L1L3} \\ p_{L2L1} & p_{L2L2} & p_{L2L3} \\ p_{L3L1} & p_{L3L2} & p_{L3L3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{L1} \\ q_{L2} \\ q_{L3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Iz tega sledi:

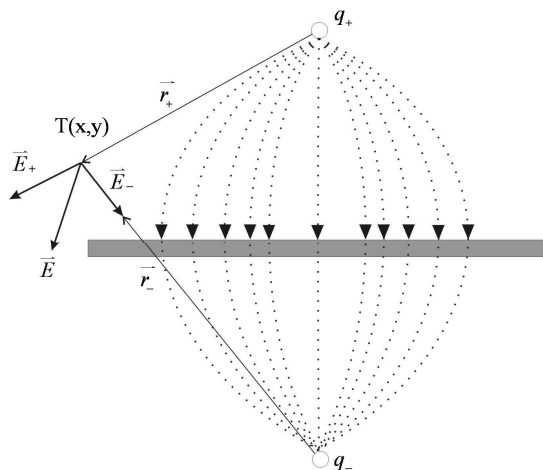
$$[C] = [p]^{-1} \quad (6)$$

Vektor električne poljske jakosti pozitivne preme elektrine q_+ nad prevodno podlago (slika 3) lahko izrazimo z enačbo [5]:

$$\vec{E} = \frac{q_+}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left(\frac{\vec{r}_+}{|\vec{r}_+|^2} - \frac{\vec{r}_-}{|\vec{r}_-|^2} \right), \quad (7)$$

kjer pomenijo:

- q_+ pozitivna vrednost premega naboja,
- \vec{r}_+ vektor razdalje od pozitivnega naboja do opazovane točke,
- \vec{r}_- vektor razdalje od zrcalne slike premega naboja do opazovane točke,
- $|\vec{r}_+|$ velikost vektorja razdalje od pozitivnega premega naboja do opazovane točke,
- $|\vec{r}_-|$ velikost vektorja razdalje od negativnega premega naboja do opazovane točke,
- ϵ_0 dielektričnost praznega prostora,



Slika 3: Električno polje elektrine nad prevodno podlago

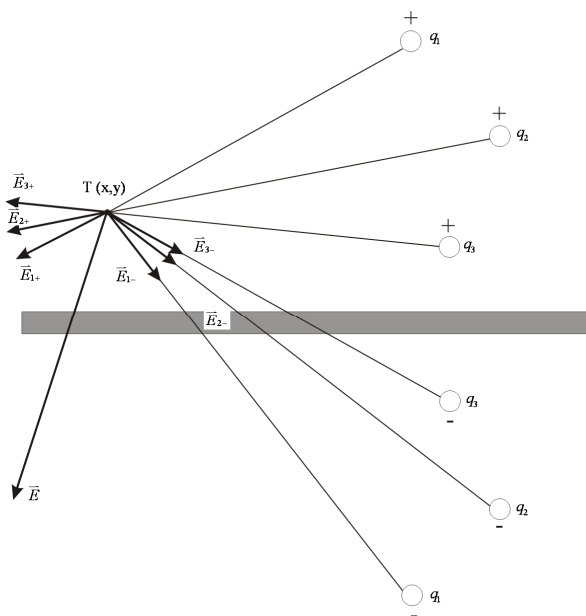
- \vec{E}_+ električna poljska jakost, ki jo proizvaja pozitiven premi naboj
 \vec{E}_- električna poljska jakost, ki jo proizvaja zrcalni premi naboj
 $T(x,y)$ opazovana točka

Pri sistemu z več vodniki preidemo na opis obravnavanega prostora z več naboji nad prevodno podlago. Pri izračunu takšnega električnega polja je najlažje obravnavati pare elektrin (slika 4). Tako enostavno dobimo enačbe za izračun vektorja električne poljske jakosti sistema z več vodniki v izbrani točki opazovanja:

$$\vec{E} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \sum_{j=1}^n q_j \left(\frac{\vec{r}_{+j}}{|\vec{r}_{+j}|^2} - \frac{\vec{r}_{-j}}{|\vec{r}_{-j}|^2} \right), \quad (8)$$

kjer pomenijo:

- n število vodnikov
 q_j j-ti premi naboj
 \vec{r}_{+j} vektor razdalje od j-tega premega naboja do opazovane točke
 \vec{r}_{-j} vektor razdalje od j-tega zrcalnega naboja do opazovane točke
 $|\vec{r}_{+j}|$ velikost vektorja razdalje od j-tega premega naboja do opazovane točke,
 $|\vec{r}_{-j}|$ velikost vektorja razdalje od j-tega negativnega premega naboja do opazovane točke.



Slika 4: Električno polje treh premih elektrin nad prevodno podlago

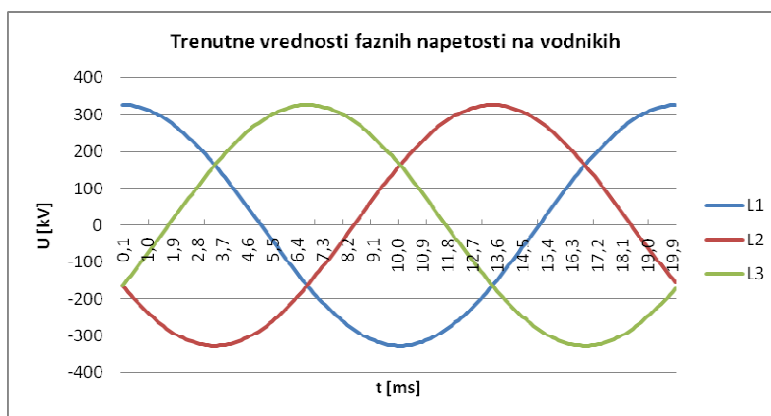
Te enačbe veljajo za vodnike nad prevodno podlago, v našem primeru za nadzemne vode.

4. ELEKTRIČNA POLJSKA JAKOST V OKOLICI NADZEMNEGA VODA

Glede na običajno označevanje vodnikov smo vodnik poimenovali PUAC 2150/495/65 mm². Pri tem je 2150 mm² prerez poliuretanskega plašča, 495 mm² prerez aluminija in 65 mm² prerez jedra iz karbonskih vlaken. Izračune smo naredili z računalniškim programom v matlabu.

Napetosti na vodnikih

Za določitev električne poljske jakosti moramo določiti naboje na faznih vodnikih. Te dobimo iz trenutnih vrednosti napetosti ob upoštevanju kapacitivnosti. Na sliki 5 so narisane trenutne vrednosti napetosti na vodnikih 400 kV daljnovoda.



Slika 5: Trenutne vrednosti faznih napetosti na vodnikih

Potencialni koeficienti

Napetost na dvoslojni izolaciji se razdeli obratnosorazmerno relativni dielektričnosti. Ob upoštevanju izolacije vodnikov so:

»lastni« potencialni koeficienti

$$p_{ii} = \frac{\frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{H_{ii}}{r_2}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \quad (9)$$

oziroma »medsebojni«

$$p_{ij} = \frac{\frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{H_{ij}}{d}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \quad (10)$$

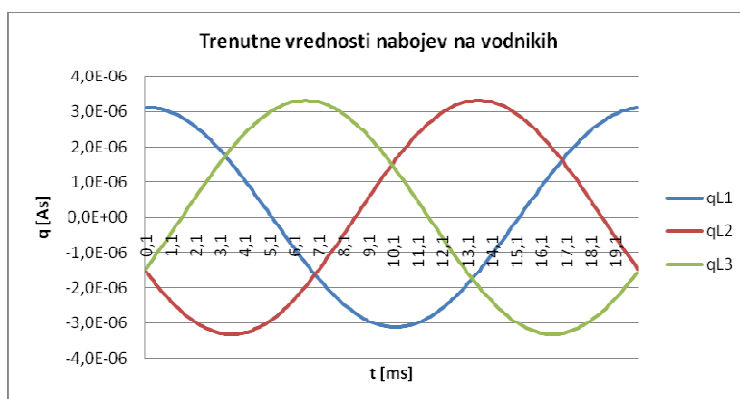
Za 400 kV glavo stebra (dejansko glavo stebra 220 kV nadzemnega voda) so potencialni koeficienti:

$$[p] = \begin{bmatrix} 1,3671 & 0,3531 & 0,3052 \\ 0,3531 & 1,3878 & 0,4091 \\ 0,3052 & 0,4091 & 1,3437 \end{bmatrix} \cdot 10^{11} \text{ V / As}$$

Naboji na vodnikih

Naboje na vodnikih (ki so edini realni za računanje električne poljske jakosti) izračunamo kot produkt potencialnih koeficientov in trenutnih vrednosti napetosti. Pri tem smo privzeli, da je vodnik idealna premica na višini obešališča minus poves. Izračunani naboji so tako večji kot dejanski, iščemo pa najbolj neugoden rezultat – tudi dejanske vrednosti električne poljske jakosti bodo manjše.

$$[q] = [p]^{-1} \cdot [U] \quad (11)$$



Slika 6: Trenutne vrednosti nabojev na vodnikih

Električna poljska jakost

S trenutnimi vrednostmi nabojev na vodnikih smo izračunali komponente električne poljske jakosti zaradi nabojev na vseh treh fazah v želeni točki.

Največjo električno poljsko jakost v snovi 2 dobimo na polmeru r_2 :

$$E_{2\max} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r2}} \cdot \frac{1}{r_2} = \frac{U \cdot \frac{1}{r_2}}{\epsilon_{r2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_{r1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \right)}, \quad (12)$$

Električno poljsko jakost smo računali v več točkah prostora v okolici nadzemnega voda. Točke smo izbrali na robu izolacije (na polmeru r_2) faznih vodnikov tako, da je bila razdalja do sosednjih faznih vodnikov najmanjša. Za vodnik faze L1 je to točka (-4,6785; 27,9785), za vodnik faze L2 točka (3,9215; 30,9785) in za vodnik faze L3 točka (5,4785; 25,0215). Električno poljsko jakost na robu izolacije posameznih faznih vodnikov (slika 7, slika 8, slika 9) smo dobili z vektorskim seštevanjem prispevkov vseh nabojev (enačba 8). Geometrijska vsota trenutnih vrednosti (trenutna vrednost električne poljske jakosti) je periodična veličina, ni pa sinusna.

Efektivno vrednost električne poljske jakosti izračunamo s seštevanjem po celi periodi. Po definiciji je efektivna vrednost periodične veličine tista vrednost, ki naredi enak učinek kot ustrezna enosmerna veličina. V našem primeru je tako efektivna vrednost električne poljske jakosti enaka

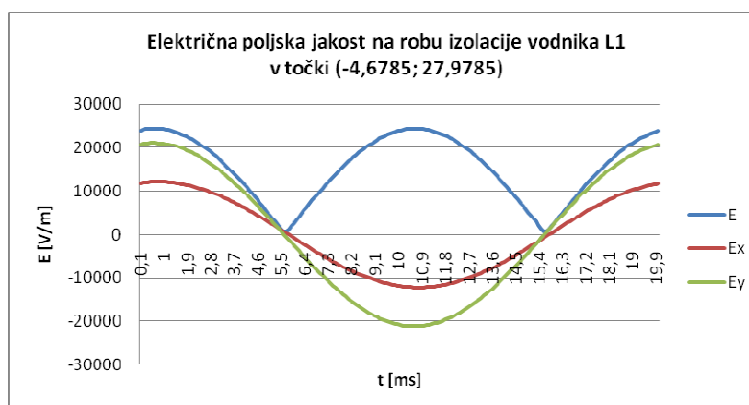
$$E_{ef} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E^2(t) \cdot dt \quad (13)$$

kjer so

- E_{ef} efektivna vrednost električne poljske jakosti
- T perioda
- E vektorska vsota prispevkov vseh nabojev

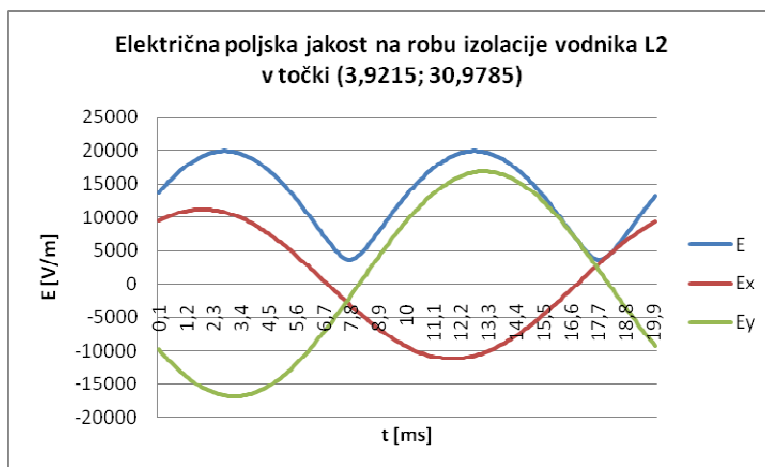
Efektivne vrednosti na robu izolacije faznih vodnikov so podane pod slikami.

Električna poljska jakost na robu izolacije



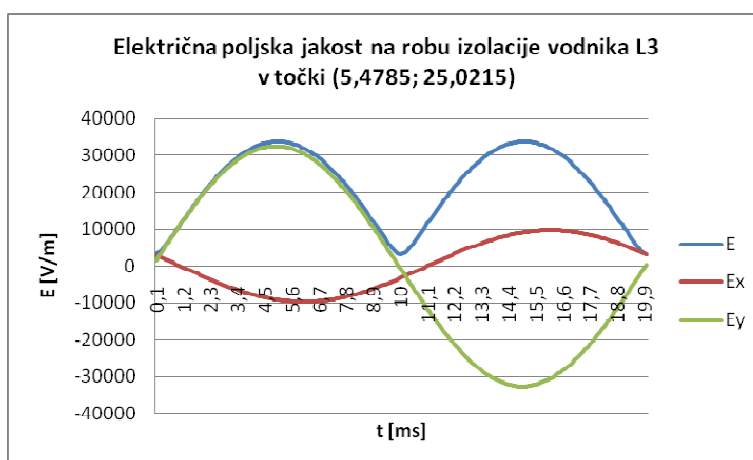
Slika 7: Električna poljska jakost na robu izolacije vodnika L1

Največja trenutna vrednost električne poljske jakosti v točki (-4,6785 ; 27,9785) – na robu izolacije vodnika L1 je 24,366e+003 V/m, efektivna vrednost pa 17,235e+003 V/m.



Slika 8: Električna poljska jakost na robu izolacije vodnika L2

Največja trenutna vrednost električne poljske jakosti v točki (3,9215 ; 30,9785) – na robu izolacije vodnika L2 je $19,865e+003$ V/m, efektivna vrednost pa $14,287e+003$ V/m.



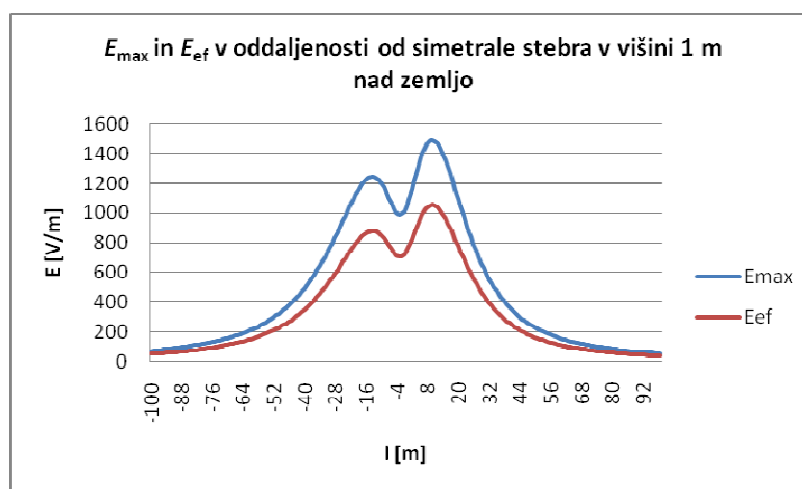
Slika 9: Električna poljska jakost na robu izolacije vodnika L3

Največja trenutna vrednost električne poljske jakosti v točki (5,4785 ; 25,0215) – na robu izolacije vodnika L3 je $33,813e+003$ V/m, efektivna vrednost pa $24,023e+003$ V/m.

Električna poljska jakost pravokotno na simetralo razpetine v točki največjega povesa

Za konec smo preverili še skladnost nadzemnega voda za 400 kV s predlaganimi polizoliranimi vodniki z Uredbo [1]. Preverili smo električno poljsko jakost pravokotno na

simetrano razpetino v točki največjega povesa 1 m nad zemljo. Na enak način, kot smo določali električno poljsko jakost na robu izolacije posameznega faznega vodnika, smo v vsaki točki vektorsko sešteli prispevke vseh faznih vodnikov in njihovih zrcalnih slik. V vsaki točki smo zabeležili največjo vrednost električne poljske jakosti v času ene periode. Efektivno vrednost smo določili skladno z enačbo (13). Točke smo računali v razdalji 100 m levo in desno od simetrane nadzemnega voda s korakom po 1 m. Rezultati so grafično podani na sliki 10. Tabelarično so vrednosti podane v preglednici 1.



Slika 10: Električna poljska jakost pravokotno na simetrano razpetino v točki največjega povesa

Električna poljska jakost pade pod z Uredbo [1] dovoljeno mejo na razdalji 30 m od simetrane voda.

Preglednica 1: Električna poljska jakost v odvisnosti od oddaljenosti od simetrane voda

l [m]	E_{\max} [V/m]	E_{ef} [V/m]			l [m]	E_{\max} [V/m]	E_{ef} [V/m]			l [m]	E_{\max} [V/m]	E_{ef} [V/m]
-100	70,4	49,8			-33	671,0	474,5			34	500,5	354,0
-99	72,0	50,9			-32	701,6	496,2			35	473,8	335,2
-98	73,7	52,1			-31	733,5	518,7			36	449,0	317,6
-97	75,4	53,3			-30	766,5	542,0			37	425,8	301,2
-96	77,2	54,6			-29	800,5	566,1			38	404,1	285,8
-95	79,0	55,9			-28	835,6	590,9			39	383,7	271,4
-94	80,9	57,2			-27	871,5	616,3			40	364,7	258,0
-93	82,9	58,6			-26	908,0	642,1			41	347,0	245,5
-92	85,0	60,1			-25	944,9	668,2			42	330,4	233,7
-91	87,1	61,6			-24	981,9	694,4			43	314,8	222,7
-90	89,3	63,1			-23	1018,7	720,4			44	300,2	212,4
-89	91,6	64,8			-22	1054,7	746,0			45	286,6	202,7
-88	93,9	66,4			-21	1089,7	770,7			46	273,7	193,6
-87	96,4	68,2			-20	1122,8	794,1			47	261,7	185,1
-86	98,9	70,0			-19	1153,7	815,9			48	250,3	177,1
-85	101,6	71,8			-18	1181,3	835,5			49	239,7	169,5
-84	104,3	73,8			-17	1205,1	852,4			50	229,7	162,4
-83	107,2	75,8			-16	1224,4	866,1			51	220,2	155,8
-82	110,1	77,9			-15	1238,1	875,8			52	211,3	149,5
-81	113,2	80,1			-14	1245,7	881,3			53	202,9	143,5
-80	116,4	82,3			-13	1246,4	881,9			54	195,0	137,9
-79	119,7	84,7			-12	1239,7	877,4			55	187,5	132,6
-78	123,2	87,1			-11	1225,5	867,6			56	180,3	127,6
-77	126,8	89,7			-10	1203,8	852,6			57	173,6	122,8
-76	130,6	92,3			-9	1175,5	832,9			58	167,3	118,3
-75	134,5	95,1			-8	1141,4	809,6			59	161,2	114,0
-74	138,6	98,0			-7	1104,1	783,9			60	155,5	110,0
-73	142,9	101,0			-6	1066,2	758,0			61	150,1	106,1
-72	147,3	104,2			-5	1031,4	734,6			62	144,9	102,5
-71	151,9	107,5			-4	1004,4	716,6			63	140,0	99,0
-70	156,8	110,9			-3	989,7	707,2			64	135,3	95,7
-69	161,9	114,5			-2	991,2	708,7			65	130,9	92,6
-68	167,2	118,2			-1	1010,7	722,3			66	126,6	89,6
-67	172,7	122,1			0	1047,3	747,5			67	122,6	86,7
-66	178,5	126,2			1	1098,1	782,3			68	118,7	84,0
-65	184,6	130,5			2	1158,2	823,9			69	115,1	81,4
-64	191,0	135,0			3	1223,0	868,6			70	111,5	78,9
-63	197,6	139,7			4	1287,2	913,2			71	108,2	76,5
-62	204,6	144,7			5	1347,1	954,9			72	105,0	74,2
-61	211,9	149,8			6	1399,1	991,1			73	101,9	72,1
-60	219,6	155,3			7	1440,8	1020,3			74	99,0	70,0
-59	227,6	161,0			8	1470,8	1041,3			75	96,2	68,0
-58	236,1	166,9			9	1488,4	1053,5			76	93,5	66,1
-57	245,0	173,2			10	1493,6	1057,0			77	90,9	64,3
-56	254,3	179,8			11	1486,7	1052,0			78	88,4	62,5
-55	264,1	186,7			12	1468,8	1039,4			79	86,0	60,8
-54	274,4	194,0			13	1441,4	1019,9			80	83,7	59,2
-53	285,2	201,7			14	1405,7	994,6			81	81,5	57,6
-52	296,6	209,7			15	1363,3	964,5			82	79,4	56,2
-51	308,6	218,2			16	1315,6	930,8			83	77,4	54,7
-50	321,2	227,2			17	1264,0	894,3			84	75,4	53,3
-49	334,5	236,5			18	1210,0	856,1			85	73,5	52,0
-48	348,5	246,4			19	1154,5	816,8			86	71,7	50,7
-47	363,2	256,9			20	1098,7	777,3			87	70,0	49,5
-46	378,7	267,8			21	1043,2	738,0			88	68,3	48,3
-45	395,1	279,4			22	988,7	699,5			89	66,7	47,1
-44	412,3	291,6			23	935,8	662,0			90	65,1	46,0
-43	430,4	304,4			24	884,7	625,9			91	63,6	45,0
-42	449,5	317,9			25	835,8	591,3			92	62,1	43,9
-41	469,6	332,1			26	789,2	558,3			93	60,7	42,9
-40	490,7	347,0			27	744,9	527,0			94	59,4	42,0
-39	512,9	362,7			28	703,1	497,4			95	58,0	41,0
-38	536,3	379,2			29	663,8	469,6			96	56,8	40,1
-37	560,7	396,6			30	626,7	443,4			97	55,5	39,3
-36	586,5	414,7			31	592,0	418,8			98	54,4	38,4
-35	613,4	433,8			32	559,4	395,7			99	53,2	37,6
-34	641,5	453,7			33	529,0	374,2					

5. SKLEP

Iz izračunov in slik (7, 8 in 9) vidimo, da električna poljska jakost na robu izolacije nobenega vodnika ne presega kritične električne poljske jakosti za preboj v zraku.

Prav tako tudi pri izračunih električne poljske jakosti pravokotno na simetralo razpetine, v točki največjega povesa, električna poljska jakost pade pod z Uredbo [1] dovoljeno mejo na razdalji 30 m od simetrale voda (slika 10).

6. VIRI, LITERATURA

- [1] Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju, Uradni list RS, št. 70/1996
- [2] Zakon o varstvu in zdravju pri delu, Uradni list RS, št. 56/1999 in 64/2001
- [3] Pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu za vire elektromagnetnega sevanja ter pogoji za njihovo izvajanje, Uradni list RS, št. 70/1996
- [4] Igor TIČAR, Tine ZORIČ, *Osnove elektrotehnike 1. zvezek Elektrostatična in tokovna polja*, Univerza v Mariboru, FERI, Maribor 2003
- [5] Sašo ŠKORJANC: *Izračun elektromagnetnega polja vodnikov*, diplomsko delo, UM FERI, Maribor 2005

NASLOV AVTORJEV

mag. Žiga Voršič¹

red. prof. dr. Jože Pihler²

red. prof. dr. Jože Voršič²

¹ SODO sistemski operater distribucijskega omrežja z električno energijo, d.o.o.
Minařikova ulica 5, 2000 Maribor, Slovenija

² Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija