

КОМЕНТАР
ТЕХНИЧКЕ ПРЕПОРУКЕ бр.7:

**ИЗВОЂЕЊЕ УЗЕМЉЕЊА У ДИСТРИБУТИВНИМ
ТРАНСФОРМАТОРСКИМ СТАНИЦАМА
35/10 kV, 35/20 kV, 10/0,4 kV, 20/0,4 kV и 35/0,4 kV**

са примерима прорачуна система уземљења дистрибутивних ТС

V издање
мај 2013.

ОБРАДИЛИ:

Томислав Бојковић
др Миладин Танасковић

V.-о издање Коментара ТП-7 се разликује од IV.-ег издања од децембра 2004. по томе што је допуњен Увод (детаљније се коментаришу савремене европске норме из области уземљења и врши поређење са нашим прописима), пример 3 је измењен и допуњен (дају се прецизнији подаци о редуционом фактору кабла 110 kV итд.), а унете су и одређене измене и допуне у примерима 7 и 8.

мај 2013.

Аутори

ИЗДАВАЧ: **ЈП ЕПС ДИРЕКЦИЈА ЗА ДИСТРИБУЦИЈУ
ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ СРБИЈЕ
БЕОГРАД, Војводе Степе 412**

Техничко уређење: Томислав Бојковић

Коректура: Томислав Бојковић

1 УВОД

Студијска истраживања др Јована Нахмана, обављени многобројни прорачуни и мерења покренули су решавање многих проблема везаних за димензионисање система уземљења у електроенергетским постројењима, НН мрежи и инсталацијама потрошача. Као резултат тога, на нивоу ЕД Србије урађена је одговарајућа техничка препорука, а затим на нивоу (претходне) Југославије и Правилник (технички пропис) у који су унете многе новине и извршен осетно либералнији приступ при третирању проблематике уземљења, као: могућност паралелног рада "нулованих" и заштитно уземљених објеката (TN и TT систем напајања), обавеза примене темељних уземљивача и мера изједначења потенцијала у објектима (зградама), коришћење проводних плаштова и електричних заштита каблова у систему уземљења, избацавање изолационих тепиха из постројења, изостављање третирања напона корака итд.

Ипак, у време када су донети цитирани документи (1977/1978 година) није било могуће реализовати радикалнији приступ третирању дозвољених напона додира, па су задржане старе "криве опасности" преузете из претходних немачких прописа и наших тада важећих прописа за електроенергетска постројења изнад 1000 V. Овим кривама се одређују дозвољени напони додира U_{doz} у зависности од времена искључења земљоспоја, при чему је трајан дозвољени напон додира износио 125 V у постројењу и 65 V изван постројења.

Уместо "кривих опасности", наш сада важећи Правилник [1] предвиђа да се **дозвољени напони додира U_{doz} [V]** рачунају према изразу:

$$U_{doz} = \frac{75}{t} \tag{1}$$

где је t време трајања земљоспоја у секундама [s], уз ограничења да дозвољени напон додира не може да буде већи од 1000 V, нити мањи од 65 V.

Да би се видело о каквој либерализацији је реч, у табели 1 дате су упоредне вредности дозвољених напона додира изван постројења према старом пропису и према Правилнику [1]. У исту табелу су унете и вредности дозвољених напона додира према хармонизационом документу Европског комитета за електротехничку стандардизацију HD 637/1999, са којим су идентични DIN VDE 0101/1999 [9] и DIN VDE 0141/2000.

Табела 1: Упоредни преглед дозвољених напона додира

Време [s] ⇒	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	5	> 5				
U_{doz} [V], стари пропис ³⁾	150	125	105	90	80	65	65					
U_{doz} [V], важећи пропис [1] ¹⁾	750	375	250	187	150	75	65					
Индекс: ^{1) / 3)}	5	3	2,4	2,1	1,9	1,15	1					
U_{doz} [V]	HD 637/99 [9] ²⁾		DIN VDE 0101/99 [9] ²⁾		660	500	380	290	220	110	80	75
Индекс: ^{2) / 1)}	0,88	1,33	1,52	1,55	1,47	1,23	1,15					

Види се да Правилник [1] при краћим временима искључења земљоспоја дозвољава осетно веће напоне додира у односу на старе прописе. На пример: овај однос је 5:1 за време $t = 0,1$ s, док је 1,87:1 за $t = 0,5$ s ($t = 0,5$ s је уобичајено време искључења земљоспоја у мрежи 10 kV или 20 kV, односно другог степена дистантне заштите при земљоспоју на сабирницама 110 kV). Из табеле се такође види да су нове **европске норме осетно либералније и од наших сада важећих прописа** - за карактеристичне вредности времена искључења земљоспоја: $t = 0,5$ s и $t = 1$ s **разлика износи 47%, а померена је и граница "трајно" дозвољеног напона додира са 65 V на 75 V.**

Испуњење услова безбедности у и изван постројења могуће је на два начина: мерењем доказати да је напон додира мањи од дозвољеног, или извести уземљење ТС

тако да укупна отпорност (импеданса) система уземљења ТС има вредност којом се гарантује да је напон додира мањи од дозвољеног. Како је мерење напона додира веома компликовано, посебно изван ТС, **услови безбедности се гарантују ако укупна отпорност (импеданса) система уземљења ТС не прелази одређену прорачунату вредност, која се доказује мерењем.**

При земљоспоју на вишенaponsкој страни ТС, на систему уземљења ТС ће се појавити напон:

$$U_u = I_z \cdot Z_u = r \cdot I_k \cdot Z_u \quad (2)$$

где је:

U_u - напон на систему уземљењу ТС, у [V];

I_z - компонента струје земљоспоја кроз систем уземљења ТС, у [A];

Z_u - укупна отпорност (импеданса) система уземљења ТС, у [Ω];

r - редукциони фактор напојног високонапонског вода;

I_k - укупна струја земљоспоја, у [A].

Напон додира U_d [V] је део напона уземљења који може да се премости на месту додира:

$$U_d = k \cdot U_u = \frac{1}{k_d} \cdot U_u = \frac{r \cdot I_k \cdot Z_u}{k_d} \quad (3)$$

Сачинилац k показује колики део напона уземљења U_u се премештава додиром, док реципрочна вредност k_d сачиниоца k , која се користи у нашим прописима [1], [2], одређује **однос напона уземљења ТС и напона додира на месту додира.**

Критеријум заштите од напона додира је испуњен ако се при земљоспоју у ТС не сме да појави напон додира U_d који је по вредности већи од дозвољеног напона додира U_{doz} :

$$U_d \leq U_{doz} \quad (4)$$

Тако се на крају добија: **критеријум заштите од напона додира је испуњен ако укупна отпорност (импеданса) Z_u [Ω] система уземљења ТС има вредност**

$$Z_u = \frac{U_u}{k \cdot r \cdot I_k} \leq k_d \cdot \frac{U_{doz}}{r \cdot I_k} \quad (5)$$

Сачинилац k , односно k_d , одређује се из израза:

$$k = \frac{1}{k_d} = k_{ip} \cdot f_{op} \cdot k_{po}$$

где су:

k_{ip} - сачинилац смањења напона додира којим се обухвата пад напона на металном делу који износи потенцијал из ТС X kV/ 0,4 kV до места додира овог металног дела - **релативна вредност изнетог потенцијала из изворне ТС;**

f_{op} - сачинилац смањења напона додира који представља релативни део изнетог потенцијала (према референтној земљи) који може да се премости додиром с обзиром на **обликовање или изједначеност потенцијала на месту додира;**

k_{po} - сачинилац смањења напона додира којим се обухвата **прелазна отпорност човечјих стопала и обуће.**

Сачинилац k , односно k_d има различите вредности у зависности од тога како се успоставља додир: ако је **додир "рука - рука"** тада пресудну улогу има изједначеност потенцијала металних делова који се премештају додиром (карактеристичан случај у купатилу и у кухињи), док ако је **додир "рука - нога"** доминира прелазна отпорност човечје стопало - тло и распоред (геометрија) уземљивача (карактеристичан случај код спољашњих зидова и ограда ТС, код стубова, НН разводних ормана, КПК итд.).

Многи пројектанти дистрибутивних ТС X/0,4 kV су, због сигурности, усвајали $k = 1$, из страха да се целокупан напон уземљења ТС преко неутралног проводника не пренесе у НН мрежу и инсталације потрошача и тамо појави као напон додира. Међутим, многобројна мерења су показала [3] да у новим стамбеним зградама, код којих је примењен ТН систем напајања ("нуловање"), сачинилац k је мањи од 0,1 ($k_d > 10$), а и у неповољним условима када у згради није наменски изведена мера изједначења потенцијала ("стара градња") овај сачинилац је мањи од 0,4 ($k_d > 2,5$), што се објашњава чињеницом да свако домаћинство поседује бојлер, а често и проточни бојлер мале снаге у кухињи, па се преко прикључка за ове бојлере неутрални проводник (а то значи и изложени проводни делови свих електричних уређаја) и водоводна инсталација у стану доводе на исти потенцијал. Зато **усвајање: $k_d = 2$ за стамбене зграде**, где је и највећа вероватноћа коинциденције појаве квара и оствареног додира, **садржи резерву на страни сигурности**.

И за експониране металне објекте НН мреже, као: КПК, разводне ормане, стубове, канделабре итд. може да се усвоји: $k_d = 2$ из више разлога. Пре свега, треба узети у обзир прелазну отпорност обуће и површинског слоја тла на месту додира - у просечним условима само **прелазна отпорност обуће обезбеђује: $k_d = 2$** . Даље треба узети у обзир малу вероватноћу коинциденције појаве квара и оствареног додира са објектом, смањење потенцијалних разлика додира код објекта због подизања потенцијала околног земљишта, као и чињеницу да, због природе оствареног додира, време трајања земљо-споја обично је дуже од времена у коме је особа изложена напону додира због рефлексног одвајања погођене особе од објекта (на пример: земљоспој у металној КПК која ради у ТТ систему могао би да траје сатима, али би евентуални случајан додир поклопца КПК трајао веома кратко јер би се погођена особа рефлексно одвојила од КПК). **Изузетак су метални објекти** који се налазе **на теренима где борави много људи без обуће**, као што су: купалишта, кампови, дечја игралишта итд., али тада је **обавезна примена додатних заштитних мера** обликовањем потенцијала или изоловањем стајалишта (ТП-9).

Код двоконтурних уземљивача ТС 35/10(20) kV (прва контура је темељни уземљивач, а друга контура је на удаљењу најмање 1 m од спољашњег зида ТС), прорачуни и мерења су доказала да сачинилац обликовања потенцијала око спољашњег зида и/или ограде ТС износи: $k \leq 0,3$, односно **$k_d \geq 3$** , што **важи и за ТС X/0,4 kV за напоне додира код ТС**.

На основу претходне анализе и одредби Правилника [1], [2] **утврђују се следеће вредности сачиниоца k_d , без обавезе доказивања** прорачуном или мерењем:

- $k_d = 2$ у свим случајевима када се трајање земљоспоја ограничава на $t \leq 3$ s;
- $k_d = 3$ у свим случајевима димензионисања ТС 35/10(20) kV. Иста вредност би могла, уз посебан доказ, да се користи и при димензионисању ТС X/0,4 kV, али у ТП-7 ово није коришћено због сигурности;
- $k_d = 1$ ако је трајање земљоспоја изнад 3 s, али не сме да пређе 2 h због вероватноће појаве двоструког земљоспоја. У условима рада дистрибутивних мрежа у Србији ово је изузетак који се још увек понегде примењује у изолованим мрежама 10 kV чија укупна капацитивна струја земљоспоја не прелази 10 A, а на изводима 10 kV се не користи усмерена земљоспојна заштита (тачка 4.1.2 у ТП-4a1).

Претходне **вредности сачиниоца k_d су у добром складу са европским нормама**, што се види из наредне Табеле 6 (5*) - број Табеле преузет је из оригиналних докумената.

Види се: **нормална вредност за X је 2**, где је X сачинилац који одговара сачиниоцу k_d у нашим прописима [1], [2], израз (5), али **уз посебан доказ може да има вредност до 5**, што је либералније него у нашим прописима.

Вредност X = 1 ($k_d = 1$) важи само за неку ТС СН/НН код које се PEN проводник уземљује једино преко уземљивача те ТС, али таквих случајева код нас нема јер

према нашим прописима [2] PEN проводник НН мреже треба обавезно уземљити код напојне трафостанице и на више места у НН мрежи.

Табела 6 (5*): Захтеви за заједничко (здружено) уземљење у дистрибутивној

ТС СН/НН, према HD 637/99, DIN VDE 0101/99 и IEC 61936-1/02*

Систем напајања	Трајање земљоспоја	Захтеви за здружено уземљење	
		напон додира	напонско напрезање
TT	$t_F \leq 5 \text{ s}$		$U_E \leq 1200 \text{ V}$
	$t_F > 5 \text{ s}$		$U_E \leq 250 \text{ V}$
TN		$U_E \leq U_{TP}^{6)}$	
		$U_E \leq X \cdot U_{TP}^{7)}$	
<i>Нормална вредност: $X = 2$. Уз обавезу доказивања, прихватљива је вредност: $2 < X \leq 5$.</i>			
<i>U_{TP} - дозвољени напон додира према кривој опасности, сл.9.1 у [9];</i>			
<i>U_E - напон система уземљења ТС;</i>			
<i>⁶⁾ - PEN проводник НН мреже је уземљен само у ТС, $X = 1$;</i>			
<i>⁷⁾ - PEN проводник НН мреже је уземљен у ТС и у више тачака НН мреже.</i>			

Да наш Правилник [1], а посебно савремене европске норме, радикално мењају третман проблематике уземљења илустроваћемо на примеру анализе опасности од изношења потенцијала из ТС 110/10 kV у ТС 10/0,4 kV и даље у НН мрежу и инсталације потрошача при земљоспоју на сабирницама 110 kV. У овом случају трајање земљоспоја је ограничено на 0,5 s деловањем другог степена дистантне заштите. Према старим прописима, за $t = 0,5 \text{ s}$ дозвољени напон додира износио је $U_{doz} = 80 \text{ V}$. Како сачинилац k_d није имао утврђену вредност, у пракси је усвајано: $k_d = 1$, па се изводио закључак да су опасни сви потенцијали који у ТС 10/0,4 kV прелазе 80 V. Према изразу (1) Правилника [1] је $U_{doz} = 150 \text{ V}$, док је $k_d = 2$, што значи да су опасни потенцијали који у ТС 10/0,4 kV прелазе $150 \cdot 2 = 300 \text{ V}$ (тачка 7.3 ТП-7), што је скоро 4 пута већа дозвољена вредност изнетог потенцијала у односу на претходну праксу. У истим условима, према европским нормама опасни потенцијали би били тек преко 440 V ($U_{doz} = 220 \text{ V}$; $k_d = 2$).

На крају ћемо да укажемо на још једну специфичност. У Правилнику [1] се каже да се вредности дозвољених напона додира, израз (1), односе не само на постројења, већ и на НН мрежу и инсталације потрошача ако се у њих уноси потенцијал из постројења. То значи да се као трајан дозвољени напон додира узима 65 V, а не 50 V како прописују стандарди о електричним инсталацијама ниског напона. Иако на први поглед то делује као нелогичност, за то постоји ваљано техничко објашњење. Наиме, наше искуство са трајно дозвољеним напоном додира од 65 V на свим напонским нивоима је позитивно и нема разлога да се поштрава, а свакако треба размотрити и могућност повећања трајно дозвољених напона додира на 75 V, по угледу на савремене европске норме. Строжа (нижа) вредност трајно дозвољеног напона додира због кварова у електричним инсталацијама ниског напона може да се прихвати због чињенице да се кварови у тим инсталацијама обично искључују деловањем непрецизних заштитних уређаја (осигурачи, често "крпљени" од нестручних лица), са великим расипањем у односу на струју и време деловања. На пример: инсталациони осигурач: $I_n = 10 \text{ A}$ прекида струју квара од 25 A у времену: најмање 0,3 s, до највише 8,5 s (распон: 1 : 28), па је потребна резерва због разлике између очекиваних и остварених напона додира. Са друге стране, земљоспојеви у високонапонској мрежи искључују се деловањем веома прецизних и поузданих заштитних уређаја, па нема разлике између очекиваних и остварених напона додира.

2 ПРИМЕРИ ПРОРАЧУНА СИСТЕМА УЗЕМЉЕЊА И ИЗНОШЕЊА ПОТЕНЦИЈАЛА ИЗ ДИСТРИБУТИВНИХ ТС

Пример 1:

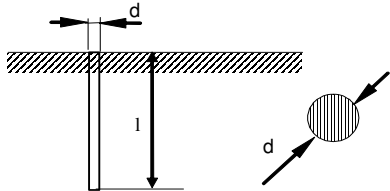
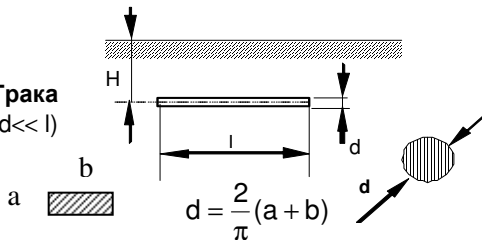
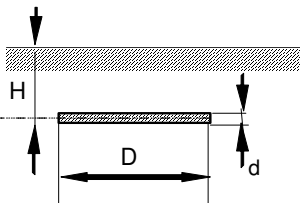
Дати изразе за прорачун отпорности распростирања појединачних уземљивача и сложенијих облика уземљивача који се користе у дистрибутивној мрежи.

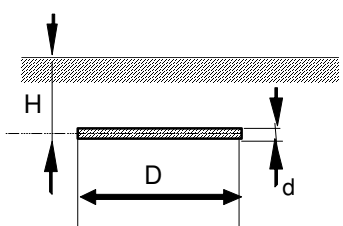
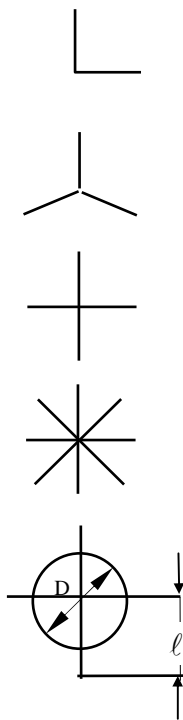
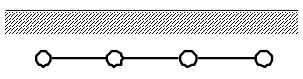
Решење:

Изрази за отпорности распростирања дати су у табели 2.

У табели 3 дате су средње вредности специфичне електричне отпорности тла (ρ).

Табела 2: Отпорности распростирања карактеристичних уземљивача

Уземљивач	Отпорност распростирања
<p>Штап $d \ll l$</p> 	$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4 \cdot l}{d}$
<p>Трака ($d \ll l$)</p>  <p>$d = \frac{2}{\pi} (a + b)$</p>	$\frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2 \cdot l}{d} \text{ за } H = 0$ $\frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{d \cdot H}} \text{ за } H > 0$
<p>Кружна плоча</p> 	$\frac{\rho}{2 \cdot D} \text{ за } H = 0$ $\frac{\rho}{4 \cdot D} \left(1 + \frac{2}{\pi} \cdot \text{artg} \frac{D}{4 \cdot H} \right) \text{ за } H > 0$

<p>Прстен</p> 	$\frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot D}{d}$ <p>за $H = 0$</p> $\frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{4 \cdot D}{\sqrt{d \cdot H}}$ <p>за $H > 0$</p>
<p>Зракасти хоризонтални уземљивачи</p>  <p>$A = 0,48$</p> <p>$A = 0,87$</p> <p>$A = 2,13$</p> <p>$A = 5,27$</p> <p>$A = 7,2$ за $\frac{\ell}{D} = 1,5$</p>	$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot (\ln \frac{L^2}{d \cdot H} + A)$ <p>L - укупна дужина проводника [m]</p> <p>H - дубина полагања [m]</p> <p>A - коефицијент облика</p> <p>ρ - специфична електрична отпорност тла [Ωm]</p> <p>ℓ - дужина крака [m]</p> <p>D - пречник прстена [m]</p> <p>d – пречник проводника уземљивача [m]</p>
<p>Мрежа</p> 	$\frac{0,44 \cdot \rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L}$ <p>S - површина коју захвата мрежа [m²]</p> <p>L - укупна дужина проводника мреже [m]</p>

Табела 3: Вредности специфичне електричне отпорности тла (ρ)

Врста тла	ρ [Ωm]
тресет или хумус	20
баштенска земља или иловача	40
глинаста земља	100
пескуља	300
песак	500
кречњак	700
шљунковита земља	3000
каменито тло	10000

Пример 2: Параметри “типског” уземљивача ТС X/0,4 kV

Дати вредности отпорности распростирања “типског” уземљивача R [Ω] ТС X/0,4 kV у зависности од специфичне електричне отпорности тла ρ :

$$R = f(\rho)$$

- за уземљивач који је изведен са две четвороугаоне контуре и вертикалним уземљивачима (сондама) дужине 3 m у теменима спољашње контуре;
 - за уземљивач који је изведен у виду троугла, са вертикалним уземљивачима (сондама) дужине 3 m у теменима троугла.
- а) Одредити димензије спољашње контуре двокоонтурног уземљивача да би се при $\rho = 70 \Omega\text{m}$ постигла отпорност распростирања уземљивача заштитног уземљења од $R_z = 4 \Omega$
- а.1) за случај да је спољашња контура у облику квадрата;
- а.2) за случај да је спољашња контура у облику правоугаоника, при чему, због ограниченог простора, дужина једне странице износи 4 m;
- а.3) за случај да се изоставе вертикални уземљивачи?
- б) Колики треба да буде размак b [m] између вертикалних уземљивача троугластог уземљивача да би се при $\rho = 70 \Omega\text{m}$ постигла отпорност распростирања уземљивача радног уземљења од $R_r = 5 \Omega$?

Решење:

Отпорност распростирања R “типског” уземљивача ТС X/0,4 kV рачуна се према изразу:

$$R = r_r \cdot \rho$$

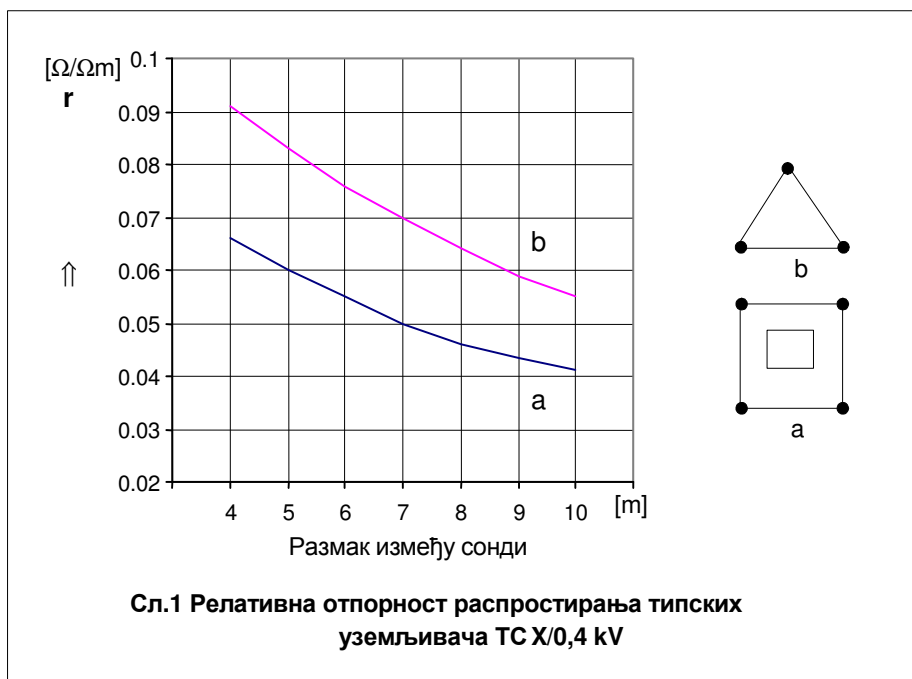
где је:

ρ - специфична електрична отпорност тла, у [Ωm];

r_r - релативна отпорност распростирања која, у зависности од размака између вертикалних уземљивача, има вредности које се добијају са дијаграма на сл.1, при чему се **крива “а”** односи на двокоонтурни четвороугаони уземљивач, а **крива “б”** на троугласти уземљивач, у [$\Omega/\Omega\text{m}$].

а.1) $R_z = r_r \cdot \rho \quad \Rightarrow \quad r_r = \frac{R_z}{\rho} = \frac{4}{70} = 0,057 \Omega/\Omega\text{m}.$

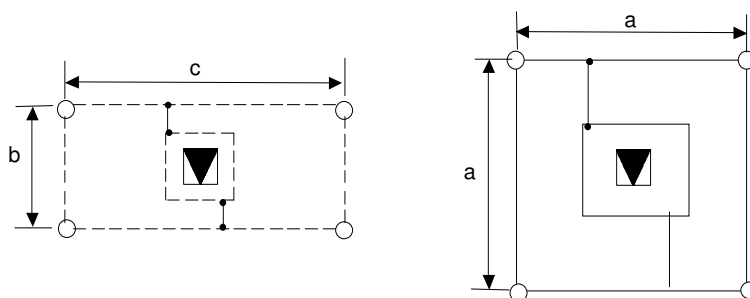
Са дијаграма на сл.1, крива “а”, добија се да задовољава: $a \geq 5,5 \text{ m}.$



a.2) На сл.2 дат је изглед уземљивача са две правоугоне контуре са страницама **b** и **c**. Дужина странице **a** квадратног уземљивача који има еквивалентну отпорност распрострања добија се из једнакости:

$$2 \cdot b + 2 \cdot c = 4 \cdot a$$

Како је према а.1: $r_r = 0,057$ и $a = 5,5$ m, добија се: $22 = 8 + 2 \cdot c \Rightarrow c = 7$ m.



Сл.2 Отпорност распрострања двоконтурног правоугаоног уземљивача

a.3) На вредност отпорности распрострања ”типског” двоконтурног уземљивача доминантан утицај имају димензије спољашње контуре уземљивача, док унутрашња контура има првенствено улогу обликовања потенцијала око ТС.

За уобичајене димензије уземљивача ТС X/0,4 kV које су обухваћене кривом ”а” на сл.1, у практичним прорачунима могу да се користе следећи односи:

- **изостављање вертикалних уземљивача** из темена спољашње контуре, на пример због врсте тла (камен и сл.) или због опасности од оштећења подземних инсталација, **повећава вредност отпорности распрострања уземљивача за**

око 25%. Или: да би се постигла одређена вредност отпорности распростирања уземљивача, треба повећати димензије спољашње контуре (површину) за око 25% у односу на димензије добијене према кривој "а" на сл.1.

- **унутрашња контура утиче на отпорност распростирања двоконтурног уземљивача са мање од 5%, али смањује потенцијалне разлике додира код ТС за више од 50%.**

$$\text{б) } R_r = r_r \cdot \rho \quad \Rightarrow \quad r_r = \frac{R_r}{\rho} = \frac{5}{70} = 0,07.$$

Са дијаграма на сл.1, крива "b", добија се да задовољава: $b \geq 7 \text{ m}$.

Пример 3: Кабл са непроводним плаштом у систему уземљења ТС

- а) Прорачунати редуccionи фактор кабла типа ХНЕ 49-А и СН СКС ХНЕ 48/О-А.
 б) Анализирати ефекте СН кабла са непроводним плаштом у систему уземљења ТС.
 в) Димензионисати систем уземљења ТС 20/0,4 kV која се напаја из ТС 110/20 kV:
 в.1) Случај градског конзума: ТС је у склопу разгранате мреже изведене кабловима 20 kV типа ХНЕ 49-А пресека $3 \times 1 \times (150/16) \text{ mm}^2 \text{ AlCu}$ - просечна дужина деоница између суседних ТС износи: $L_k = 350 \text{ m}$;
 в.2) Случај приградског конзума: две ТС 20/0,4 kV су повезане међусобно и прикључене на ТС помоћу СН СКС-а типа ХНЕ 48/О-А пресека $3 \times 1 \times (70/16) \text{ mm}^2 \text{ AlCu} + 50 \text{ mm}^2 \text{ \u0177}$ (сл.3.в2). Дужина кабловске деонице између ТС 110/20 kV и ТС1 износи: $L_{k1} = 350 \text{ m}$, а између ТС1 и ТС2: $L_{k2} = 500 \text{ m}$.

Просечна вредност специфичне електричне отпорности тла износи: $\rho = 50 \text{ \u03a9m}$ у градском конзуму и $\rho = 100 \text{ \u03a9m}$ у приградском конзуму.

Свака ТС 20/0,4 kV има наменски изведен уземљивач заштитног уземљења, као типски двоконтурни уземљивач димензија 5 m x 5 m у градском конзуму и 6 m x 6 m у приградском конзуму, и сондама дужине 3 m у теменима.

Импеданса система уземљења ТС 110/20 kV износи: $Z_{20} \approx 0,1 \text{ \u03a9}$.

Решење:

а) Редуccionи фактор снопа три једножилна кабла типа ХНЕ 49-А и ХНЕ 48/О-А

По нашим прописима о уземљењима [1], редуccionи фактор r_{kv} кабловског вода се дефинише као количник струје уземљења I_u и укупне струје земљоспоја I_{zu} , којим се **обухвата утицај магнетне спреге фазних проводника и електричне заштите** (код NPO кабла: металног плашта) **кабловског вода**:

$$r_{kv} = \frac{I_u}{I_{zu}} = 1 - \frac{Z_m}{Z_{ez}} = \frac{Z_{ez} - Z_m}{Z_{ez}} = \frac{Z_{ez} \cdot L - Z_m \cdot L}{Z_{ez} \cdot L} \tag{6}$$

Према [3] је: $Z_{ez} = r_{ez} + r_z + j \cdot X_{ez}$ и $Z_m = r_z + j \cdot X_{ez}$, па је $Z_{ez} - Z_m = r_{ez}$, тако да се добија:

$$r_{kv} = \frac{r_{ez}}{\sqrt{(r_{ez} + r_z)^2 + (X_{ez})^2}} \tag{7}$$

где је:

Z_m - међусобна импеданса фазног проводника и електричне заштите, у [\u03a9/km];

Z_{ez} - сопствена подужна импеданса електричне заштите, у [\u03a9/km];

r_{ez} - сопствена подужна активна отпорност електричне заштите, у [\u03a9/km];

X_{ez} - сопствена подужна реактанса електричне заштите, у [\u03a9/km];

L - дужина кабла, у [km];

r_z - подужна електрична отпорност земље, која приближно износи: $r_z \approx 0,05 \text{ \u03a9/km}$.

Израз (7) се према [3], [4], [7] користи за прорачун редукционог фактора једножилног кабла или трожилног кабла са заједничком електричном заштитом ("појасни" кабл), и њиме нису обухваћене отпорности уземљења постројења на крајевима кабловског вода. Међутим, електрична заштита кабла галвански повезује уземљивачке системе трансформаторских станица на крајевима, па се тако и кабл са изолованим плаштом индиректно јавља као уземљивач.

Радукциони фактор три једножилна кабла положена у троугластом снопу, какав је случај са кабловима типа ХНЕ 49-А чије се електричне заштите жила међусобно кратко спајају и на оба краја прикључују на системе уземљења ТС које повезује вод, **рачуна се преко еквивалентног једножилног кабла чији је пресек електричне заштите раван збиру три пресека електричних заштита једножилног кабла и чији је полупречник електричне заштите раван средњем геометријском полупречнику три жиле.**

Ако је r_{ez1} активна отпорност електричне заштите једне жиле кабловског снопа, **активна отпорност еквивалентног једножилног кабла r_{ez}** би у изразу (7) износила: $r_{ez} = r_{ez1} / 3$.

Подужна сопствена реактанса електричне заштите еквивалентног једножилног кабла x_{ez} у изразу (7) рачуна се према изразу [3]:

$$x_{ez} \approx 0,1445 \cdot \log \frac{93,1 \cdot \sqrt{\rho}}{r_{pez} \cdot 10^{-3}} \quad (8)$$

где је ρ [Ωm] специфична отпорност тла, а r_{pez} [mm] **полупречник електричне заштите еквивалентног једножилног кабла**, који се рачуна преко средњег геометријског полупречника три жиле:

$$r_{pez} = \sqrt[3]{r_{pez1} \cdot 2 \cdot (r_{pez1} + d_{pl1}) \cdot 2 \cdot (r_{pez1} + d_{pl1})} \quad (9)$$

где је r_{pez1} полупречник електричне заштите једне жиле, а d_{pl1} дебљина спољашњег полиетиленског (РЕ) плашта једне жиле у кабловском снопу.

Из документације произвођача једножилног кабла 12/20 kV ХНЕ 49-А 3x1x(150/16) mm² Al/Cu се добија:

$$r_{pez1} = 17 \text{ mm}; d_{pl1} \approx 2 \text{ mm}; r_{ez1} = 1,15 \text{ } \Omega/\text{km} \Rightarrow r_{ez} = 1/3 \cdot r_{ez1} = 0,383 \text{ } \Omega/\text{km}.$$

Средњи геометријски полупречник три жиле према изразу (9) износи:

$$r_{pez} = \sqrt[3]{17 \cdot 2 \cdot (17 + 2) \cdot 2 \cdot (17 + 2)} \approx 29 \text{ mm}.$$

Реактанса електричне заштите еквивалентног једножилног кабла x_{ez} према изразу (8) за $\rho = 50 \text{ } \Omega m$ износи:

$$x_{ez} \approx 0,1445 \cdot \log \frac{93,1 \cdot \sqrt{\rho}}{r_{pez}} = 0,1445 \cdot \log \frac{93,1 \cdot \sqrt{50}}{29 \cdot 10^{-3}} \approx 0,63 \text{ } \Omega / \text{km},$$

тако да се на крају према изразу (7) добија да **вредност редукционог фактора снопа три једножилна кабла за пресек електричне заштите кабла 16 mm² Cu** износи:

$$r_{kv} = \frac{r_{ez}}{\sqrt{(r_{ez} + r_z)^2 + (x_{ez})^2}} = \frac{0,383}{\sqrt{(0,383 + 0,05)^2 + (0,63)^2}} \approx 0,5.$$

Модуо јединичне подужне импеданса три паралелно везане и уземљене електричне заштите кабловског вода износи:

$$Z_{ez} = (r_{ez} + j \cdot x_{ez}) = (0,383 + j \cdot 0,63) \Rightarrow |Z_{ez}| = \sqrt{r_{ez}^2 + x_{ez}^2} \approx 0,74 \text{ } \Omega / \text{km}.$$

Типски пресек електричне заштите сваке жиле **СН СКС ХНЕ 48/О-А** износи **16 mm² Cu**, док присуство челичног носећег ужета мало утиче на расподелу струје земљоспоја у

систему уземљења ТС и смањење вредности редукионог фактора [11], па за рутинске прорачуне и за **СН СКС** може да се усвоји: $r_{kv} \approx 0,5$.

За пресек електричне заштите једножилног кабла $25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$, што је карактеристично за прве деонице магисталних водова пресека фазних водова $240 \text{ mm}^2 \text{ Al}$, за $\rho = 50 \text{ }\Omega\text{m}$ добија се ($r_{pez1} = 18,5 \text{ mm}$; $r_{pez} = 31,3 \text{ mm}$; $x_{ez} = 0,624 \text{ }\Omega/\text{km}$; $z_{ez} = 0,69 \text{ }\Omega/\text{km}$) да **вредност редукионог фактора износи: $r_{kv} \approx 0,35$** .

У [7] је показано да и релативно велика промена полупречника електричне заштите мало утиче на промену вредности реактансе x_{ez} , јер је у изразу (8) овај параметар "под логаритмом". Још мањи је овај утицај на промену вредности редукионог фактора (испод 3%), због доминантног утицаја активне отпорности r_{ez} у односу на реактансу x_{ez} .

На основу посебно развијеног корисничког програма, у табели 5 су дати резултати прорачуна редукионог фактора r_{kv} кабловских водова 10 kV до 110 kV, који чине три кабла у "троугластом" снопу, за карактеристичне пресеке фазних проводника и уобичајене пресеке електричних заштита (плаштова).

Табела 5: Редукиони фактор снопа три једножилна кабла назначеног напона 6/10 kV, 12/20 kV, 20/35 и 64/110 kV

Редукиони фактор r_{kv} снопа три једножилна ХРЕ кабла 10 kV, 20 kV и 35 kV							
$\rho = 50 \text{ }\Omega\text{m}$		$r_{kv} \downarrow$					
Називни напон мреже		10 kV		20 kV		35 kV	
Пресек ел. заштите [mm ² Cu]		16 mm ²	25 mm ²	16 mm ²	25 mm ²	16 mm ²	25 mm ²
Пресек фаз. проводника [mm ² Al]	95	0,494	0,342	0,498	0,346	0,504	0,351
	150	0,496	0,344	0,502	0,349	0,506	0,353
	240	0,501	0,349	0,505	0,352	0,509	0,355
Редукиони фактор r_{kv} снопа три једножилна кабла 110 kV							
$\rho = 20 \text{ }\Omega\text{m}$		$r_{kv} \downarrow$					
Материјал ел. заштите (плашта)		Cu			Pb	Al	
Пресек ел. заштите (плашта) [mm ²]		50	70	95	331	144	
Пресек фазних проводника	500 mm ² Cu	0,217	0,153	0,111	0,344	0,114	
	800 mm ² Al	0,225	0,159	0,115	0,355	0,118	
	1000 mm ² Al						

У [4] за редукиони фактор три једножилна кабла у троугластом снопу r_{kvs} се изводи израз:

$$r_{kvs} = \frac{r_{ez1}}{2 \cdot z_{m12} + z_{ez1}} \Rightarrow r_{kvs} = \frac{r_{ez1}}{(r_{ez1} + 3 \cdot r_z) + j \cdot (2 \cdot x_{ez12} + x_{ez1})} \quad (10)$$

где индекс "1" означава параметар који се односи на једну жилу кабловског снопа, z_{m12} је међусобна импеданса фазног проводника жиле у земљоспоју и електричне заштите друге жиле, док је z_{ez1} сопствена импеданса електричне заштите једне жиле. Пошто су електричне заштите каблова у "троугластом" снопу веома близу, за практичне прорачуне може да се узме да је $z_{m12} \approx z_{m1} \approx r_z + j \cdot x_{ez1}$. Ако се ово уврсти у израз (10) добија се да су изрази (7) и (10) идентични, па се и према овој методи добијају приближно исте вредности редукионих фактора.

Код третирања редукионог фактора ХРЕ кабла треба водити рачуна да се изведена анализа и прорачун односи на сноп три једножилна кабла чије су електричне заштите међусобно спојене и уземљене на оба краја. Редукиони фактор неких конструкција трожилних каблова са непроводним плаштом, који имају за све три жиле једну електричну заштиту пресека као за једножилни кабл, имају редукиони фактор реда 0,6 до 0,7.

Међутим, у дистрибутивним мрежама Србије извршена је **општа типизација једно-жилних конструкција ХРЕ каблова** за напонске нивое 10 kV до 110 kV (ТП-3/2012), из следећих разлога: лако се полажу, израђују се у већим дужинама па треба мањи број спојница, тежина (а то значи и цена) трожилног кабла је за преко 30% већа од тежине три једножилна кабла исте конструкције и истих пресека проводника и електричне заштите. Зато се трожилне конструкције ХРЕ каблова даље не третирају.

Редукциони фактор кабловског вода може да има знатно мање вредности ако се у израз (6) укључе и отпорности уземљења на крајевима кабла. Међутим, овако прорачунати фактор не би био редукциони фактор у смислу важећих прописа [1], већ би могао да се назове "фактор расподеле струје земљоспоја" или, према [6], "фактор транспозиције". Али, у овом случају, при прорачуну импедансе система уземљења ТС не сме да се узме у рачун ефекат кабла као уземљивача према изворној ТС због галванске везе уземљивача преко електричне заштите, јер је овај ефекат већ урачунат.

У даљим примерима **редукциони фактор се рачуна искључиво преко индуктивне спреге фазних проводника и електричне заштите, док се импеданса система уземљења ТС рачуна као паралелна веза уземљивача ТС и импедансе уземљења каблова у свим правцима где делују као уземљивачи.**

б) Ефекат СН кабла са непроводним плаштом у систему уземљења ТС

Каблови са непроводним плаштом типа ХНЕ 49-А, као и СН СКС типа ХНЕ 48/О-А, **посредно делују као уземљивачи** јер помоћу електричне заштите повезују уземљиваче суседних ТС и тако смањују импедансу система уземљења ТС. Ако ТС ради у разгранатој СН мрежи (градски конзум), свака ТС повезана је бар у једном правцу са две или више ТС, па су преко електричних заштита паралелно повезани уземљивачи суседних ТС.

Вредност отпорности уземљења R_k [Ω] коју напојној ТС X/10(20) kV преко електричне заштите СН каблова "доносе" уземљивачи више суседних ТС X/0,4 kV према [8] приближно износи:

$$R_k = \frac{|z_{ez}| \cdot L_k}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{4 \cdot \frac{R_z}{|z_{ez}| \cdot L_k} + 1} \right) \quad (11)$$

где је:

$|z_{ez}|$ - модуо јединичне подужне импеданса електричне заштите кабла између суседних ТС, у [Ω /km];

L_k - просечна дужина кабловских деоница између суседних ТС, у [km];

R_z - отпорност распростирања уземљивача суседних ТС, у [Ω].

Израз (11) теоретски важи за случај да се преко неког кабловског вода напаја веома велики број ТС X/0,4 kV - градски конзум. **Исти израз може да се користи и за процену доприноса уземљивача суседних ТС на систем уземљења ТС X/0,4 kV.**

Међутим, како је низ ТС X/0,4 kV помоћу електричне заштите бар на једном, а у условима "густе градње" често и на оба краја, повезан и са уземљивачима ТС 110/10(20) kV и/или ТС 35/10 kV са веома малим вредностима импеданси система уземљења тих ТС, у практичним прорачунима **израз (11) може да се примени за све случајеве када је нека ТС X/0,4 kV повезана са две или више ТС** (овај пример под в.2).

У овом примеру под а) смо за типски пресек кабла ХНЕ 49-А: 3x(1x150/16 mm² Al/Cu), прорачунали модуо јединичне подужне импеданса три паралелно везане и уземљене електричне заштите кабловског вода: $|z_{ez}| \approx 0,74 \Omega / km$.

Просечна дужина деонице кабловског вода између две суседне ТС износи: $L_k \approx 0,3 km$ до $L_k \approx 0,5 km$ - мање вредности одговарају градском конзуму када се користе каблови типа

ХНЕ 49-А, док су веће вредности типичне за приградска насеља када се користи СН СКС типа ХНЕ 48/О-А (ТП-3 и ТП-8).

На основу ових параметара, у табели 4 дате су приближне вредности отпорности (импедансе) уземљења $R_k [\Omega]$ које некој изворној ТС X/10(20) kV преко електричне заштите "доноси" низ уземљивача ТС 10(20)/0,4 kV (претпоставља се да кабловски вод није повезан са неком другом ТС X/10(20) kV) у зависности од отпорности распрострања уземљивача $R_z [\Omega]$ тих ТС и просечних дужина $L_k [km]$ између суседних ТС. За практичне прорачуне може да се рачуна са просечном дужином појединих кабловских деоница: $l_k \approx 0,35 \text{ km}$ у градском конзуму, док је за приградски конзум реалније рачунати са применом СН СКС-а типа ХНЕ 48/О-А и дужинама до 0,5 km.

Табела 4: Отпорност уземљења $R_k [\Omega]$ кабла са непроводним плаштом

$R_z [\Omega] \Rightarrow$		0,5	1	2	3	4	5
$R_k [\Omega]$	$L_k = 300 \text{ m}$	0,47	0,61	0,80	0,95	1,08	1,19
	$L_k = 350 \text{ m}$	0,51	0,65	0,86	1,02	1,16	1,27
	$L_k = 400 \text{ m}$	0,57	0,72	0,94	1,11	1,26	1,38
	$L_k = 500 \text{ m}$	0,65	0,82	1,06	1,25	1,40 *	1,63 *

L_k - просечна дужина деоница вода између две ТС;
R_z - просечна вредност отпорности уземљења једне од ТС у низу;
R_k - просечна вредност отпорности уземљења СН кабла са непроводним плаштом;
 * - типична вредност отпорности уземљења СН СКС-а типа ХНЕ 48/О-А.

Отпорност распрострања наменски изведеног двоконтурног уземљивача слободно-стојеће ТС X/0,4 kV у градским условима обично износи $R_z = 2 \Omega$ до $R_z = 4 \Omega$, па се за практичне прорачуне према табели 4 може да усвоји да свакој ТС X/0,4 kV, преко електричне заштите, уземљивачи суседних ТС "доносе" приближно $R_k \approx 1 \Omega$, што се и даје у тачки 3.10 ТП-7. Ако се ТС X/0,4 kV налази на подручју "густе градње", где се преко електричне заштите каблова и паралелно прикљученог неутралноог проводника НН мреже између суседних ТС повезују темељни уземљивачи објеката (зграда), цевоводи и други природни уземљивачи, може да усвоји: $R_k \approx 0,5 \Omega$.

в) Димензионисање система уземљења ТС 20/0,4 kV

в.1) Димензионисање система уземљења ТС 20/0,4 kV - градски конзум

У градском конзуму у ТС се користи здружено уземљење. Наменски се изводи уземљивач заштитног уземљења на који се прикључује неутрални проводник НН мреже.

Систем уземљења треба да задовољи услове за струју земљоспоја: $I_k = 300 \text{ A}$.

Уобичајено време искључења земљоспоја за услове рада у мрежи 20 kV са уземљеном неутралном тачком износи 0,5 s до 1 s. За прорачун се узима строжији захтев: $t = 1 \text{ s}$. Том времену према изразу (1) одговара дозвољени напон додир: $U_{doz} = 75 \text{ V}$.

Редукциони фактор кабла са електричном заштитом $16 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ по жили износи: $r = 0,5$.

Сачинилац k_d у изразу (5) има вредност: $k_d = 2$.

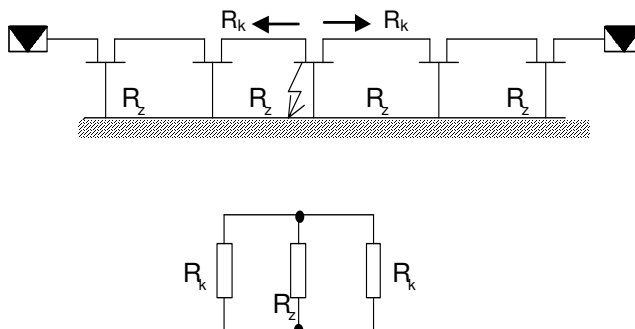
Уношењем усвојених вредности у израз (5) добија се да **дозвољена вредност отпорности (импеданса) здруженог уземљења R_{zdrd}** сваке ТС 20/0,4 kV треба да износи:

$$R_{zdrd} \leq \frac{k_d \cdot U_{doz}}{r \cdot I_k} = \frac{2 \cdot 75}{0,5 \cdot 300} \leq 1 \Omega$$

што се и захтева у тачки 5.6.2 ТП-7.

Здружено уземљење ТС R_{zdr} се састоји од паралелне везе уземљивача заштитног уземљења R_z ТС и уземљивача заштитних уземљења који су везани преко електричних заштита каблова 20 kV. Како је напајање по принципу "улаз-излаз", и како се редукциони

фактор кабловског вода рачуна са занемаривањем отпорности уземљења ТС на крајевима кабловског вода, **ефекат уземљивача суседних ТС се остварује у два правца** (сл.3.в1), при чему није битно да ли је сваки кабл под напоном.



Сл.3.в1 Ефекат уземљења кабла са непроводним плаштом - градски конзум

Типски двоконтурни уземљивач ТС 20/0,4 kV димензија 5 m x 5 m при $\rho = 50 \Omega\text{m}$ (градски конзум) има отпорност распростирања R_z (сл.1, крива "а"):

$$R_z = 0,06 \cdot 50 = 3 \Omega.$$

Овде није узето у обзир да се у градским условима преко неутралног проводника у систем уземљења ТС укључују темељни уземљивачи, цевоводи и други природни уземљивачи објеката (зграда), тако да се при мерењу реално могу очекивати много ниже вредности отпорности уземљења од ових добијених прорачуном.

Просечна дужина деонице између суседних ТС у градским условима износи: $L_k \approx 0,35 \text{ km}$, па према изразу (11) **допринос уземљивача суседних ТС систему уземљења ТС у којој је квар**, у једном правцу, износи:

$$R_k = \frac{|z_{ez}| \cdot L_k}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{4 \cdot \frac{R_z}{|z_{ez}| \cdot L_k} + 1} \right) = \frac{0,74 \cdot 0,35}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{4 \cdot \frac{3}{0,74 \cdot 0,35} + 1} \right) \approx 1 \Omega.$$

У претходном изразу је занемарен утицај веома ниске вредности импедансе уземљења напојне ТС 110/20 kV (на једном, или на оба краја као на сл.3.в1) - што ће бити много јасније кроз анализу изведену у овом примеру под 3.в2.

На крају, према сл.3.в1 добијамо да **отпорност (импеданса) здруженог уземљења ТС 20/0,4 kV на градском конзуму**, са знатном резервом на страни сигурности, износи:

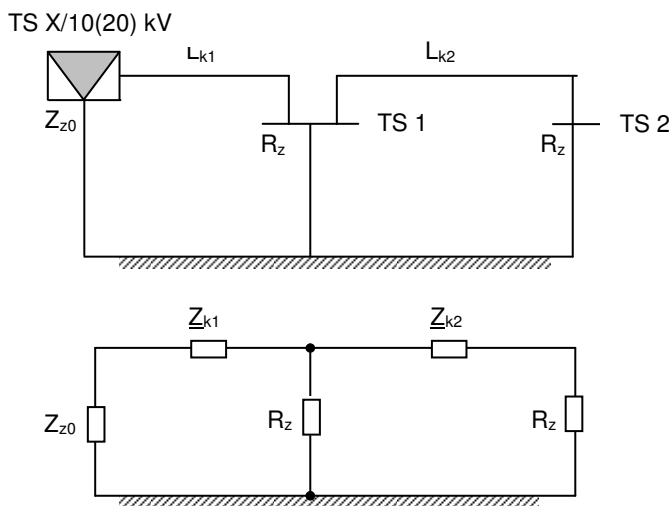
$$R_{zdr} \leq \frac{0,5 \cdot R_k \cdot R_z}{0,5 \cdot R_k + R_z} = \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 3}{0,5 \cdot 1 + 3} = 0,43 \Omega < R_{zdrd}.$$

в.2) Димензионисање система уземљења ТС 20/0,4 kV - приградски конзум

Иако је реч о ванградском конзуму, чињеница да се ТС1 и ТС2 напајају из ТС 110/20 kV СН СКС-ом који се са становишта уземљења може да третира као и подземни кабловски вод ХНЕ 49-А, па у **ТС1 и ТС2 треба користити здружено уземљење**. У ТС се изводи уземљивач заштитног уземљења R_z , који се помоћу електричне заштите СН СКС-а повезује са уземљивачима суседних ТС.

Систем уземљења ТС1 или ТС2 треба да задовољи услове: $I_k = 300 \text{ A}$, $t = 1 \text{ s}$, $U_{doz} = 75 \text{ V}$, $k_d = 2$, $r = 0,5 \Rightarrow R_{zdrd} \leq 1 \Omega$.

У овом примеру ћемо најпре да прорачунамо допринос система уземљења ТС 110/20 kV системима уземљења ТС1 и ТС2 посредством електричних заштита СН СКС-а, а затим ћемо да прорачунамо допринос отпорности уземљења ТС1 и ТС2 систему уземљења ТС 110/20 kV, сл.3.в2.



Сл.3.в2: Прорачун система уземљења ТС X/0,4 kV напајаних СН СКС-ом

Типски двоконтурни уземљивач ТС 20/0,4 kV димензија 6 m x 6 m при $\rho = 100 \Omega\text{m}$ (ванградски конзум) има отпорност распростирања R_z (сл.1, крива "а"):

$$R_z = 0,065 \cdot 100 = 6,5 \Omega.$$

Реактанса електричне заштите еквивалентног једножилног кабла x_{ez} према изразу (8) за $\rho = 100 \Omega\text{m}$ износи: $x_{ez} = 0,65 \Omega/\text{km}$, па **подужна јединична импеданса z_{ez} електричне заштите СН СКС-а** износи: **$z_{ez} \approx 0,76 \Omega/\text{km}$** .

Подужна импеданса електричне заштите Z_{k1} за деоницу дужине L_{k1} износи:

$$Z_{k1} = z_{ez} \cdot L_{k1} = 0,76 \cdot 0,35 = 0,27 \Omega.$$

Подужна импеданса електричне заштите Z_{k2} за деоницу дужине L_{k2} износи:

$$Z_{k2} = z_{ez} \cdot L_{k2} = 0,76 \cdot 0,5 = 0,38 \Omega.$$

1 Еквивалентна импеданса система уземљења R_{zdr1} за ТС1, са уважавањем доприноса уземљења R_{z0} система уземљења ТС 110/20 kV и R_z суседне ТС2:

1.а Паралелна веза уземљивача у ТС1 и ТС2, означимо је са Z'_{u1} , према сл. 3.в2 износи:

$$Z'_{u1} = \frac{(Z_{k2} + R_z) \cdot R_z}{(Z_{k2} + R_z) + R_z} = \frac{(0,38 + 6,5) \cdot 6,5}{(0,38 + 6,5) + 6,5} = \frac{44,7}{13,38} = 3,3 \Omega.$$

1.6 Паралелна веза импедансе Z'_{u1} са уземљивачем изворне ТС 110/20 kV, што је уједно **импеданса система уземљења ТС1 и ТС2 - здружено уземљење Z_{zdr}** , износи:

$$Z_{zdr} = \frac{(Z_{k1} + Z_{z0}) \cdot Z'_{u1}}{(Z_{k2} + R_z) + Z'_{u1}} = \frac{(0,27 + 0,1) \cdot 3,3}{(0,27 + 0,1) + 3,3} = \frac{1,22}{6,67} \approx 0,33 \ \Omega < R_{zdr}$$

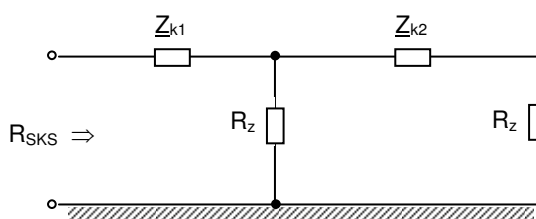
Добијена ниска вредност импедансе система уземљења ТС1 и ТС2 показује велики утицај блиске ТС 110/20 kV са сопственом импедансом уземљења реда 0,1 Ω .

2 Утицај система уземљења ТС1 и ТС2 на систем уземљења у ТС 110/20 kV:

У овом случају због малог броја ТС 20/0,4 kV на изводу не можемо да користимо израз (11), већ отпорност распростирања R_{SKS} коју систему уземљења ТС 110/20 kV "доносе" две ТС 20/0,4 kV чији уземљивачи су повезани електричним зашитама СН СКС-а пресека 16 mm² по жили рачунамо према сл.3.в3:

$$R_{SKS} = Z_{k1} + Z'_{u1} = 0,27 + 3,3 \approx 3,6 \ \Omega$$

где је са: $Z'_{u1} = 3,3 \ \Omega$ означена паралелна веза уземљивача R_z у ТС1 и ТС2 и прорачунали смо је у овом примеру под 1.а.



Сл.3.в3 Еквивалентна шема уземљивачког система

Еквивалентна импеданса система уземљења ТС 110/20 kV - означимо је са Z_u , са уважавањем утицаја две ТС 20/0,4 kV износи:

$$Z_u = \frac{Z_{z0} \cdot R_{SKS}}{Z_{z0} + R_{SKS}} = \frac{0,1 \cdot 3,6}{0,1 + 3,6} = \frac{0,36}{3,7} \approx 0,097 \ \Omega.$$

што значи да је у овом случају утицај уземљивача ТС1 и ТС2 на систем уземљења ТС 110/20 kV занемарљиво мали.

Пример 4: Кабл са проводним плаштом у систему уземљења ТС

- а) *Анализирати ефекте кабла са проводним плаштом у систему уземљења ТС.*
- б) *Прорачунати отпорност распростирања система заштитног уземљења слободностојеће монтажне бетонске ТС која је помоћу кабла НРО 13-А прикључена на надземни вод 10 kV. Укупна дужина кабла износи 57 m, док је $\rho = 100 \Omega \text{ m}$. Уземљивач ТС је типски двоконтурни, димензија спољашње контуре 7 m x 7 m.*
- в) *Кабл НРО 13-А дужине $L = 370 \text{ m}$ повезује две ТС 10/0,4 kV. Прорачунати отпорност распростирања кабла као уземљивача ако је $\rho = 200 \Omega \text{ m}$, а отпорност распростирања наменски изведених уземљивача ТС износи 4 Ω .*
- г) *Димензионисати систем уземљења слободностојеће монтажне бетонске ТС 10/0,4 kV која ради на конзуму Новог Београда. Мрежу 10 kV чине каблови типа НРО 13-А. Систем напајања ТС у виду отвореног прстена или повезног вода омогућује двострано напајање ТС.*

Решење:**а) Ефекат кабла са проводним плаштом у систему уземљења ТС**

Кабл типа НРО 13-А (папирна изолација и проводни оловни плашт) има три **позитивне особине са становишта уземљења**:

- мали редуccionи фактор при средњим вредностима струја земљоспоја ($r < 0,25$ при $I_k = 300 \text{ A}$, али $r = 0,4$ при $I_k = 1000 \text{ A}$);
- одличан је уземљивач јер преко плашта директно одводи у тло струју земљоспоја и повезује уземљиваче суседних ТС;
- подиже потенцијал околног тла и тако смањује потенцијалне разлике додира.

“Кратак“ кабл, у смислу уземљења, понаша се као тракасти уземљивач, а у дистрибутивној мрежи се најчешће јавља као надземни прикључак. Дужина до које се кабл понаша као "кратак" може приближно да се одреди према изразу:

$$L_k \approx 10 \cdot \sqrt{\rho} \quad (12)$$

где је L_k дужина у [m], а ρ специфична електрична отпорност тла у [$\Omega \text{ m}$].

Отпорност распростирања кабловског прикључка R_k на надземни вод прорачунава се као паралелна веза отпорности распростирања кабла као тракастог уземљивача (R_{kt}) и отпорности распростирања уземљивача стуба (R_z) на коме се налази кабловска завршница, а најчешће и одводници пренапона, док се подужна отпорност плашта кабла занемарује:

$$R_k = \frac{R_{kt} \cdot R_z}{R_{kt} + R_z}.$$

Отпорност распростирања кабла као тракастог уземљивача R_{kt} [Ω] рачуна се према изразу:

$$R_{kt} = \frac{1}{\pi \cdot L} \cdot \ln \frac{L}{\sqrt{H \cdot D}} \cdot \rho$$

где је:

ρ - специфична електрична отпорност тла, у [$\Omega \text{ m}$];

L - дужина кабла, у [m];

H - дубина укопавања кабла, у [m];

D - спољашњи пречник кабла, у [m].

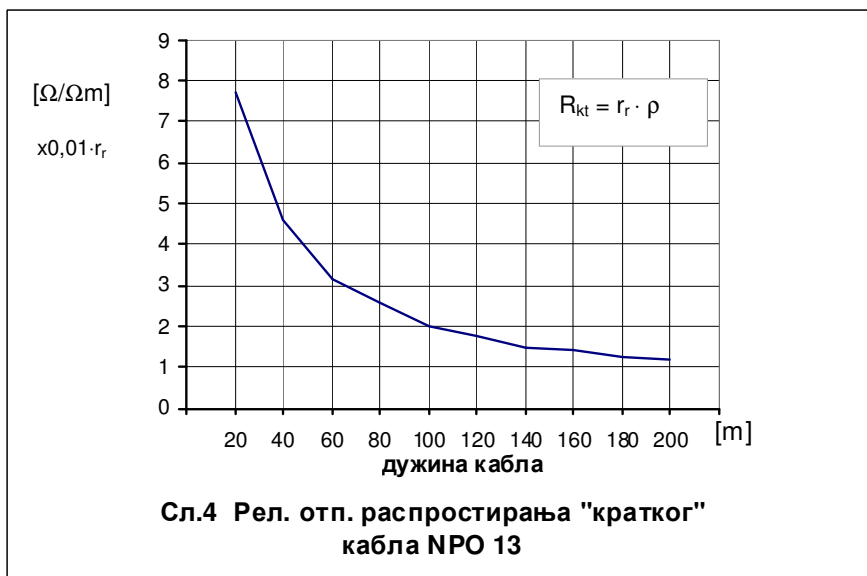
За уобичајене пресеке и дубину укопавања СН каблова (ТП-3) је $D = 0,05 \text{ m}$ и $H = 0,7 \text{ m}$ добија се:

$$R_{kt} \approx 0,318 \cdot \frac{\ln(6 \cdot L)}{L} \cdot \rho = r_r \cdot \rho \quad (13)$$

где је r_r релативна отпорност распростирања кабла као тракастог уземљивача чије су вредности, прорачунате према изразу (13), дате на сл.4 (или на сл.3.9.а у ТП-7).

Прорачун отпорности распростирања кабла чија је дужина већа од "кратког" кабла доста је сложен, јер више не може да се занемари подужна отпорност плашта кабла. Са друге стране, каблови већих дужина по правилу се завршавају у суседној ТС, па треба узети у обзир и утицај отпорности распростирања уземљивача (R_z) те ТС на укупну отпорност (импедансу) кабла. На сл.5 даје се графички приказ вредности отпорности (импедансе) уземљења кабла (R_k) у зависности од виšekратника дужине "кратког" кабла (од $L = 1 \cdot L_k$ до $L = 7 \cdot L_k$), за неке карактеристичне вредности за ρ и уз претпоставку да на крају кабла одговарајућа ТС има отпорност распростирања уземљивача од $R_z = 4 \Omega$ при $\rho \geq 200 \Omega \text{m}$, односно $R_z = 1 \Omega$ при $\rho \leq 100 \Omega \text{m}$, што је реалније за градски конзум.

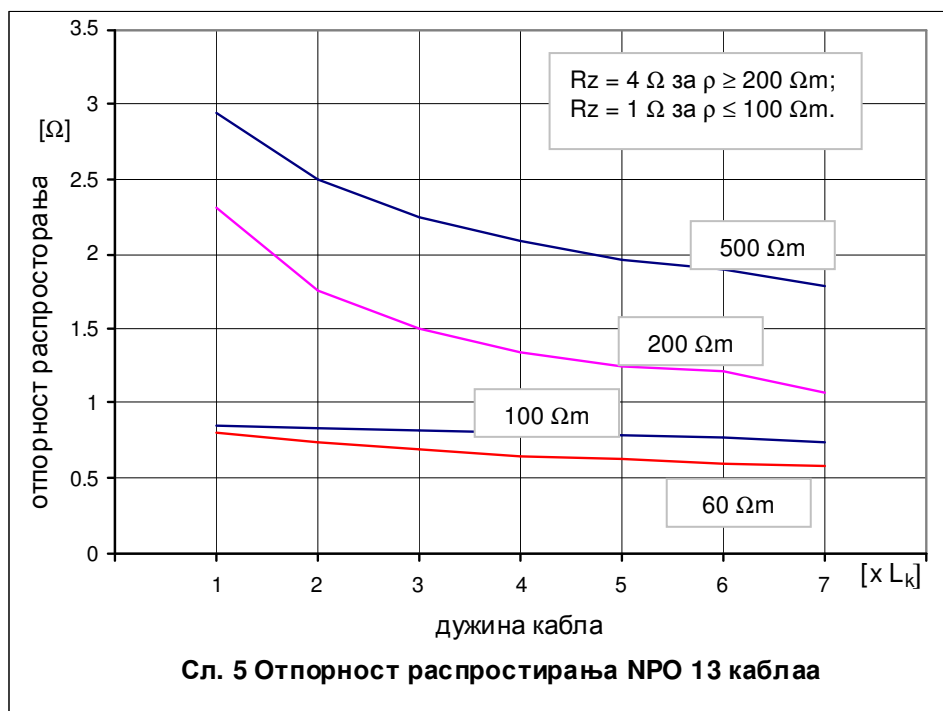
Ако ТС ради у разгранатој кабловској СН мрежи (градски конзум), сваки кабл прикључен на ТС може са становишта уземљења да се третира као "дугачак" (то је дужина кабла до које се у земљи преко плашта пренесе целокупна струја земљоспоја), што значи да је прикључен паралелно уземљивачу ТС и да има сталну вредност импедансе уземљења R_{kd} независно од вредности отпорности распростирања ТС које повезује, и која може приближно да се прорачуна према изразу (провери на сл.5):



$$R_{kd} \approx 0,075 \cdot \sqrt{\rho} \quad (14)$$

Дужина преко које се кабл понаша као "дугачак" може приближно да се прорачуна према изразу:

$$L_d \approx 6 \cdot L_k = 60 \cdot \sqrt{\rho} \quad (15)$$



б) Слободностојећа ТС прикључена на надземну СН мрежу

Од укупне дужине кабловског прикључка, одбијамо део од око 15 m који не учествује као уземљивач: 10 m изван тла до кабловске завршнице на стубу и 5 m од центра ТС до спољашње контуре уземљивача ТС. За $\rho = 100 \Omega m$ дужина до које се кабл рачуна као "кратак" према изразу (12) износи $L_k = 100 m$, што значи да је прикључни кабл у дужини од 42 m понаша као "кратак" са становишта уземљења.

Отпорност распрострањања кабла као тракастог уземљивача према изразу (13) или са сл.4 износи:

$$R_{kt} \approx 0,318 \cdot \frac{\ln(6 \cdot 42)}{42} \cdot 100 = 4,2 \Omega.$$

Према ТП-9 отпорност распрострањања уземљивача стуба не треба да пређе $R_s = 15 \Omega$, па паралелна веза отпорности распрострањања R_{kt} и R_s даје укупну импедансу уземљења "кратког" кабла као уземљивача: $R_k = 3,3 \Omega$.

Двоконтурни уземљивач димензија 7 m x 7 m има отпорност распрострањања (сл.1, крива "а"): $R_z = 0,05 \cdot 100 = 5 \Omega$, па импеданса система уземљења ТС, као паралелна веза отпорности R_k и R_z износи: $Z_u = 2 \Omega$.

в) Ефекат NPO кабла као уземљивача

Дужина "кратког" кабла према изразу (12) износи:

$$L_k \approx 10 \cdot \sqrt{200} = 142 m.$$

Дужина "дугачког" кабла према изразу (15) износи: $L_d \approx 6 \cdot L_k = 852 m$.

Према томе је $L_k < L < L_d$. Одбијајући 20-ак метара кабла на делу унутар спољашњих контура уземљивача ТС који не утиче на отпорност распрострањања, добијамо однос:

$$\frac{L}{L_k} = \frac{350}{142} \approx 2,5$$

Са сл.5 за $L = 2,5 \cdot L_k$ добијамо да ефекат уземљења кабла у обе ТС износи: $R_k \approx 1,6 \Omega$, па укупна отпорност (импеданса) система уземљења ТС износи око $0,9 \Omega$.

г) NPO каблови у систему уземљења ТС 10/0,4 kV

Нови Београд са становишта уземљења карактерише песковито тло. Иако бројне металне подземне инсталације (водовод, гасовод, каблови, темељни уземљивачи зграда итд.) смањују специфичну електричну отпорност тла, за прорачун ћемо узети: $\rho = 500 \Omega \text{m}$ (табела 3).

Сваки земљоспој у уземљеној мрежи 10 kV искључује се најкасније за 1 s, па је $k_d = 2$ и $U_{doz} = 75 \text{ V}$. Тако добијамо да вредност укупне отпорности здруженог уземљења кабловске ДТС треба да износи:

$$R_{zdr} \leq \frac{k_d \cdot U_{doz}}{r \cdot I_k} = \frac{2 \cdot 75}{0,25 \cdot 300} \leq 2 \Omega,$$

што се и захтева у тачки 5.6.1 ТП-7.

Ако ДТС ради у разгранатој кабловској мрежи 10 kV изведеној NPO 13-A кабловима са напајањем на принципу "улаз-излаз", са становишта уземљења може да се узме да се кабл у оба правца понаша као "дугачак", па ефекат обе деонице кабловског вода као уземљивача ТС према изразу (14) износи:

$$R_{ku} = 0,5 \cdot R_{kd} = 0,5 \cdot 0,075 \cdot \sqrt{\rho} = 0,5 \cdot 0,075 \cdot \sqrt{500} = 0,84 \Omega.$$

Овај пример показује да код ДТС која ради у разгранатој мрежи која је изведена кабловима са проводним плаштом (NPO) теоретски гледано није неопходно извођење уземљивача заштитног уземљења ДТС, што се у неким ситуацијама и користи (центар града, тачка 5.4.3 ТП-7). Али, технички је коректно да се за сваку ДТС изведе уземљивач минималних димензија које омогућава локација. За слободностојеће ДТС то би био двоконтурни уземљивач: прва контура је темељни уземљивач (тачка 5.5 у ТП-7), док би се друга контура поставила на удаљењу 1 m од зида. У тим условима нема техничког нити економског оправдања да се постављају вертикални уземљивачи у теменима спољашње контуре.

Пример 5:

Прорачунати систем уземљења приградске слободностојеће или стубне ТС X/0,4 kV која је прикључена на надземну средњенапонску мрежу:

а) ДТС ради у уземљеној мрежи "X" kV;

б) ДТС ради искључиво у изолованој мрежи 10(20) kV.

Решење:

а) ДТС ради у уземљеној СН мрежи:

То су најтежи услови, јер:

- систем уземљења треба димензионисати за укупну струју земљоспоја од $I_k = 300 \text{ A}$ (редукциони фактор надземног вода је: $r = 1$);
- изостаје ефекат каблова као уземљивача;
- мала је вероватноћа да ДТС напаја НН мрежу и инсталације потрошача који на ширем подручју користе TN систем напајања.

Тако се долази до закључка да **услове безбедности треба задовољити само помоћу уземљивача ТС**. Као повољност која се у просечним условима може очекивати је мо-

гућност ефикасног раздвајања радног и заштитног уземљења. Тиме се спречава да се из ТС преко неутралног проводника пренесе потенцијал у НН мрежу и инсталације потрошача.

Отпорност распрострања уземљивача заштитног уземљења R_z димензионише се тако да се на њему не може да појави потенцијал U_z који би могао да угрози изолациони ниво опреме ниског напона у ДТС. Како је изолациони ниво ове опреме 2000 V, уз фактор сигурности 0,6 добија се: $U_z = 1200 \text{ V}$. Да се при тако високом потенцијалу не прекораче вредности дозвољених напона додира према изразу (1), **уземљивач заштитног уземљења се изводи за "тешке услове уземљења"** према тачкама 6.4 и 6.5 ТП-7. Суштина ових мера се састоји у томе да се изједначењем потенцијала у ТС искључи појава напона додира "рука-рука", док се напони додира "рука-нога" код ТС смањују на дозвољене вредности додатним изоловањем стајалишта (асфалтирање) или обликовањем потенцијала помоћу плитко укопаног уземљивача на удаљењу 1 m око ТС - у ТП-7 **препоручује се примена мере обликовања потенцијала око ТС**.

Применом додатних мера у ТС сматра се да је задовољен критеријум заштите од напона додира без доказа мерењем или прорачуном.

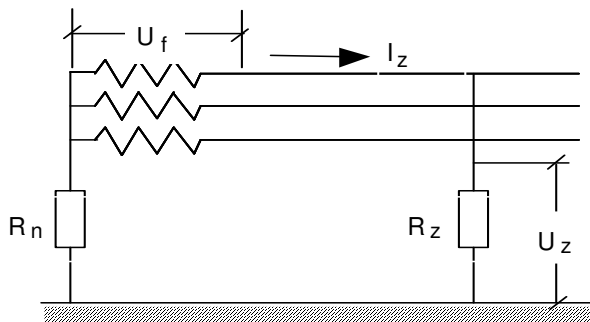
а.1) Случај ефикасног раздвајања уземљивача ДТС

Како вредност отпорности уземљивача заштитног уземљења R_z није занемарљиво мала у односу на отпорност R_n којом се уземљује неутрална тачка мреже, тражену вредност R_z добићемо према сл.6:

$$U_z = R_z \cdot I_z \leq \frac{R_z \cdot U_f}{R_z + R_n}$$

Имајући у виду да напон на уземљивачу U_z заштитног уземљења ТС не сме да пређе 1200 V, добија се:

$$R_z = \frac{U_z \cdot R_n}{U_f - U_z} = \frac{1200 \cdot R_n}{U_f - 1200}$$



Сл.6 Прорачун заштитног уземљења у уземљеној надземној мрежи

Резултати прорачуна дати су у табели 6.

Табела 6: Отпорности заштитног уземљења у уземљеној мрежи код раздвајања уземљивача ДТС

Називни напон мреже U_n [kV]	35	20	10
Фазни напон мреже U_f [V]	20230	11560	5780
Отпорност отпорника за уземљење R_n [Ω]	70	40	20
Отпорност заштитног уземљења R_z [Ω]	4,4	4,6	5,2

У тачки 6.7.2 ТП -7 усвојене су "заокружене" вредности:

- $R_z \leq 5 \Omega$ за ТС 10/0,4 kV;
- $R_z \leq 4,5 \Omega$ за ТС 20/0,4 kV и ТС 35/0,4 kV.

Ако би се применио "типски" двоконтурни уземљивач са вертикалним уземљивачима (сондама) у теменима спољашње контуре (тачка 6.4 или 6.5), просечној вредности специфичне електричне отпорности тла од $\rho \leq 100 \Omega\text{m}$ одговарале би димензије a [m] спољашње контуре уземљивача од (сл.1, крива "а"):

$$a \geq 7 \text{ m за } R_z \leq 5 \Omega \text{ и } a \geq 8 \text{ m за } R_z \leq 4,5 \Omega.$$

Ако би се из "типског" двоконтурног уземљивача избацили вертикални уземљивачи из темена спољашње контуре (на пример: због присуства подземних инсталација, пример 2.а.3), тражену вредност отпорности уземљења добили би ако би повећали димензије спољашње контуре за око 25%, тако да би добили:

$$a \geq 9 \text{ m за } R_z \leq 5 \Omega \text{ и } a \geq 10 \text{ m за } R_z \leq 4,5 \Omega.$$

Отпорност уземљења радног уземљења зависи од примењене заштите од индиректног додира у НН мрежи. **За TN систем напајања**, треба да буде: $R_f \leq 5 \Omega$.

Ако се примени "типски" троугласти уземљивач према тачки 6.7 ТП-7, за $\rho \approx 100 \Omega\text{m}$ размак између вертикалних уземљивача износио би: $b \geq 10 \text{ m}$, или би се троугласти уземљивач комбиновао са појединачним уземљивачима код првих стубова НН мреже.

а.2) Случај коришћења здруженог уземљења

Ако могу да се испуне услови за примену здруженог уземљења, или ако није могуће ефикасно раздвајање радног и заштитног уземљења, примењује се здружено уземљење које се постиже галванским везивањем главног прикључка (сабирнице) за уземљење и сабирнице неутралног проводника у нисконапонском разводном орману ТС.

Вредност отпорности здруженог уземљења добија се из израза (5):

$$R_{zdr} \leq \frac{k_d \cdot U_{doz}}{r \cdot I_k} = \frac{2 \cdot U_{doz}}{1 \cdot 300} = \frac{U_{doz}}{150}.$$

Из претходног израза и израза (1), у Табели 7 дате су вредности здруженог уземљења R_{zdr} ДТС X/0,4 kV за неке карактеристичне вредности времена трајања земљоспоја:

Табела 7: Вредности здруженог уземљења ДТС X/0,4 kV

t [s]	0,25	0,5	0,75	1	> 1,153
U_{doz} [V]	300	150	100	75	65
R_{zdr} [Ω]	2	1	0,66	0,5	0,43

Тражене вредности здруженог уземљења не могу да се постигну на економичан начин само помоћу уземљивача ДТС, осим за веома кратка времена трајања земљоспоја, али тада постоји опасност неселективног деловања земљоспојне заштите. Међутим, ако ДТС напаја НН мрежу и инсталације потрошача у којима је на ширем подручју примењен TN систем напајања, тада се тражени услов за здружено уземљење релативно лако постиже, јер се преко неутралног проводника повезују уземљивачи суседних ДТС, темељни (заштитни) уземљивачи објеката (зграда), водовод и остале металне инсталације које имају функцију природних уземљивача. У овом случају се у фази пројектовања усваја вредност отпорности здруженог уземљења суседне ДТС, док се уземљивачи заштитног и радног уземљења изводе према тачкама 6.4, 6.5 и 6.6 ТП-7, тако да се добије (тачка 6.7.1 у ТП-7): $R_z \leq 5 \Omega$ и $R_f \leq 10 \Omega$.

б) ДТС ради искључиво у изолованој мрежи 10 kV или 20 kV:

Према ТП-6 препоручује се да се неутрална тачка мреже 10(20) kV уземљи када капацитивна струја земљоспоја пређе 20(15) А, а изузетно се толерише и рад са изолованом неутралном тачком до капацитивне струје земљоспоја од 40(30) А. За тако сразмерно мале вредности струја земљоспоја није тешко задовољити услове за здружено уземљење. У ТС се изводи само један уземљивач који се користи и за радно и за заштитно уземљење. У систем радног (здруженог) уземљења укључени су и сви уземљивачи који су прикључени на неутрални проводник НН мреже и у инсталацијама потрошача, као: уземљивачи на крајњим стубовима дужих деоница радијалних НН водова, уземљивачи објеката са TN системом напајања и сл.

Према ТП-4а, ако укупна струја земљоспоја не прелази 10 А, врши се сигнализација земљоспоја, али сваки земљоспој мора да се искључи најкасније за 2 часа. Ако укупна струја земљоспоја прелази 10 А, земљоспој се селективно искључује најкасније за 3 s.

б.1) Укупна капацитивна струја земљоспоја не прелази 10 А:

Како је трајање земљоспоја изнад 3 s, али не изнад 2 h, сачинилац k_d због сигурности има вредност $k_d = 1$. Из израза (1) и (5) се добија:

$$R_{zdr} \leq \frac{k_d \cdot U_{doz}}{r \cdot I_k} = \frac{1 \cdot 65}{1 \cdot 10} \leq 6,5 \Omega.$$

б.2) Укупна капацитивна струја земљоспоја не прелази 20 А:

Трајање земљоспоја је 1 s до 3 s, па сачинилац k_d има вредност $k_d = 2$.

Увршћењем: $I_k = 20$ А, $r = 1$ и $U_{doz} = 65$ V у израз (5) такође добијамо: $R_{zdr} \leq 6,5 \Omega$.

Ако укупна капацитивна струја земљоспоја прелази 20 А, време трајања земљоспоја треба смањити на вредност до 1 s. Ако би се због типизације задржала вредност здруженог уземљења од $R_{zdr} \leq 6,5 \Omega$, при гранично дозвољеној струји земљоспоја за изоловане мреже од $I_k = 40$ А из израза (5) добили би:

$$6,5 = \frac{2 \cdot 75}{40 \cdot t} \Rightarrow t = 0,57 \text{ s},$$

што је коректно техничко решење (уобичајеном времену трајања земљоспоја од 0,5 s одговарала би струја земљоспоја од 46 А).

На основу претходног рачуна, усваја се "типска" вредност отпорности здруженог уземљења: $R_{zdr} \leq 6,5 \Omega$, што се и захтева у тачки 6.8 ТП-7.

За просечну вредност специфичне електричне отпорности тла од $\rho \approx 100 \Omega\text{m}$, димензија a [m] спољашње контуре "типског" двоконтурног уземљивача износи: $a \geq 5$ m.

Ако се у мрежи НН и инсталацијама потрошача користи TN систем напајања, укупна отпорност здруженог уземљења, које има и улогу радног уземљења, треба да износи:

$$R_r = R_{zdr} \leq 5 \Omega.$$

"Типски" уземљивач заштитног уземљења који има отпорност распростирања 6,5 Ω задовољиће по правилу и овај услов, јер се прикључељем неутралног проводника на тај уземљивач прикључују и сви уземљивачи који су међусобно повезани преко неутралног проводника. Ако би се, због резерве, желело да се тражених 5 Ω добије само помоћу уземљивача заштитног уземљења, за $\rho \approx 100 \Omega\text{m}$ добила би се димензија спољашње контуре: $a \geq 7$ m. Ако би се из "типског" двоконтурног уземљивача изоставили вертикални уземљивачи из темена спољашње контуре, тражена вредност отпорности уземљења остварује се ако се повећају димензије спољашње контуре за око 25%, тако да се добија:

$$a \geq 6,5 \text{ m за } R_{zdr} \leq 6,5 \Omega \text{ и } a \geq 9 \text{ m за } R_r = R_{zdr} \leq 5 \Omega.$$

Пример 6: Изношења потенцијала из дистрибутивне ТС 110/10(20) kV

Анализирајте проблем изношења потенцијала из дистрибутивне ТС 110/10(20) kV:

- а) Мрежа 10 kV или 20 kV је изведена кабловима са проводним плаштом (NPO 13-A).
- б) Мрежа 10 kV или 20 kV је изведена кабловима са непроводним плаштом (ХНЕ 49-А или СН СКС ХНЕ 48/О-А).

Решење:

Прорачун система уземљења ТС 110/10(20) kV се по правилу врши на рачунару, и у ту сврху су развијени и у пракси проверени одговарајући програмски пакети. Исто важи и за решавање проблема изношења потенцијала из ТС, који се изразито наметнуо са увођењем директне трансформације 110/10(20) kV. Зато се овде врши само глобално и упрошћено сагледавање овог проблема, како би се стекао бољи увид и осећај за природу и величину проблема и утврдиле основне смернице за његово решавање.

При земљоспоју на 110 kV страни ТС, на систему уземљења изворне ТС 110/10(20) kV ће се према изразу (2) појавити напон U_{ui} :

$$U_{ui} = I_z \cdot Z_u = r \cdot I_k \cdot Z_u$$

Преко плашта или електричне заштите кабла 10 kV или 20 kV, у првој ТС 10/0,4 kV или 20/0,4 kV појавиће се напон U_{u1} :

$$U_{u1} = k_i \cdot U_{ui} = k_i \cdot r \cdot I_k \cdot Z_u \tag{16}$$

где је k_i **коэффициент изношења** (коэффициент излазећег) **потенцијала**.

Нема опасности од изнетог потенцијала ако напон U_{u1} , сагласно изразима (3) и (4), има вредност:

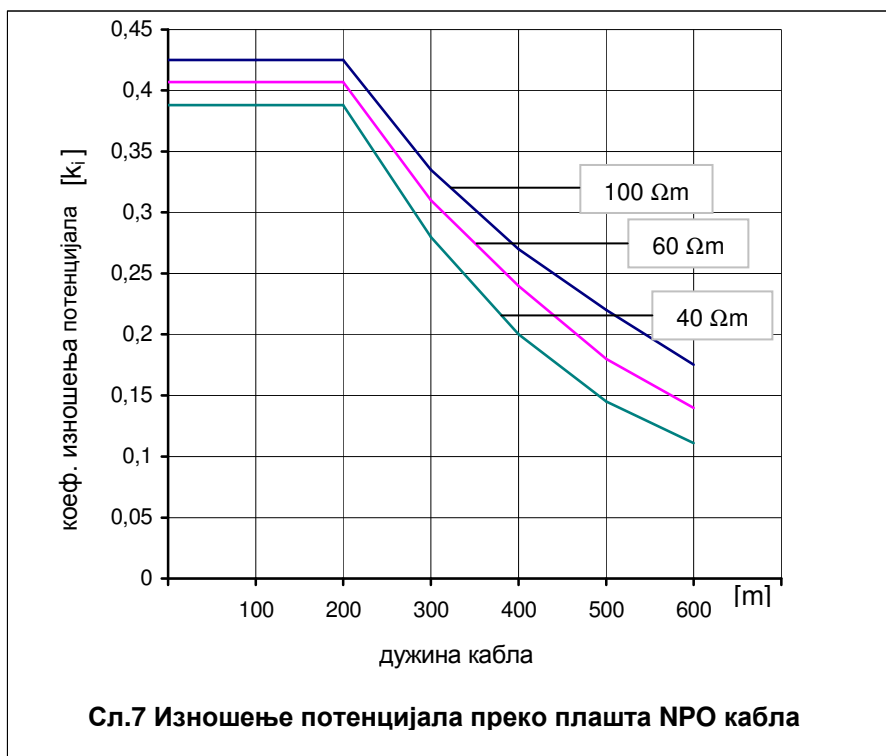
$$U_{u1} \leq k_d \cdot U_{doz} \tag{17}$$

Земљоспој на сабирницама 110 kV искључује се у времену $t = 0,5$ s деловањем другог степена дистантне заштите ТС из које се напаја ТС 110/10(20) kV, односно у времену $t = 0,15$ s ако ТС 110/10(20) kV поседује диференцијалну високоимпедантну заштиту сабирница 110 kV (ТП-4а2). Како сачинилац k_d има вредност $k_d = 2$, из израза (1) и (17) добија се да **нема опасности од изнетог потенцијала ако напон U_{u1} не прелази 300 V, односно 1000 V**, што се и даје у тачки 7.3 ТП-7.

а) Случај СН кабловске мреже са NPO кабловима

Ако се веза ТС 10/0,4 kV или ТС 20/0,4 kV са ТС 110/10(20) kV изводи каблом са проводним плаштом, **коэффициент изношења потенцијала k_i** , у зависности од дужине кабловског вода 10 kV или 20 kV и за неколико вредности специфичне електричне отпорности тла које су карактеристичне за градски конзум, добија се са дијаграма на сл.7 (сл.7.3.а у ТП-7).

Прорачун је изведен на рачунару, уз претпоставку да се на крају кабла налази само једна ТС X/0,4 kV, што иде у прилог сигурности. Са дијаграма се види да коэффициент k_i расте са смањењем растојања између ТС X/0,4 kV и изворне ТС. Иако су деонице вода 10 kV или 20 kV обично дуже од 300 m, може да се деси да ТС X/0,4 kV буде веома близу изворне ТС. Са друге стране, са приближавањем изворној ТС расте густина СН каблова чији метални плаштови при земљоспоју подижу потенцијал тла око ТС и тако смањују потенцијалне разлике додира. Вредновање оба ова фактора, који међусобно делују супротно, веома би компликовало прорачун.



Зато је за практичне прорачуне усвојено да за дужине кабловског вода мање од 200 m коефицијент k_i има вредност као и за дужину 200 m, јер се тада ТС X/0,4 kV практично налази унутар потенцијалног левка изворне ТС 110/10(20) kV, док се за дужине веће од 200 m ефекат подизања потенцијала тла око ТС не узима у обзир.

б) Случај СН мреже са непроводним плаштом

Ако се веза ТС 10/0,4 kV или ТС 20/0,4 kV са ТС 110/10(20) kV изводи каблом 10 kV или 20 kV са непроводним плаштом (тип ХНЕ 49-А), коефицијент k_i у зависности од броја (n_{ts}) ТС X/0,4 kV које су прикључене на исти кабловски вод, у ТС која је најближа изворној ТС има вредности које су дате у табели 8. У табели израз "урбанизовано насеље" подразумева да ТС X/0,4 kV имају релативно мале вредности отпорности уземљења, реда $R_z \approx 0,5 \Omega$ у случају да је на широком простору примењен TN систем напајања, односно $R_z \approx 1 \Omega$ код малих вредности специфичне електричне отпорности тла и сл. Израз "ванградски конзум" обично подразумева да се за напајање користи СН СКС ХНЕ 48/О-А.

Табела 8: Коеф. изношења потенцијала k_i кабла са непроводним плаштом

Број ТС на воду (n_{ts})	1	2	> 2
k_i : урбанизовано насеље, TN систем, $R_z \approx 0,5 \Omega$	0,74	0,49	0,41
k_i : урбанизовано насеље, $R_z \approx 1 \Omega$	0,85	0,65	0,55
k_i : ванградски конзум, $R_z \approx 4 \Omega$	0,95	0,9	0,8

Пример 7: Опасност од изношења потенцијала у кабловској мрежи 110 kV

ТС 110/ X kV ("X" = 10 kV, 20 kV) смештена је у центру града и **ради у кабловској мрежи 110 kV**. Скучен простор омогућава извођење мрежастог уземљивача димензија 40 m x 36 m, укључујући и темељни уземљивач зграде. Струја земљоспоја на сабирницама 110 kV у ТС износи $I_k = 17,6$ kA.

Специфична електрична отпорност тла износи: $\rho = 40 \Omega m$.

Процентни опасност од изношења потенцијала:

- а) ТС напаја разгранату мрежу "X" kV изведену кабловима са проводним плаштом (NPO 13-A);
- б) ТС напаја разгранату мрежу "X" kV изведену кабловима са непроводним плаштом (XHE 49-A).

Решење:

Провера се врши помоћу напона U_{u1} , израз (16), који се преко плашта кабловског вода "X" kV пренесе у прву ТС X/0,4 kV.

У [7] је показано да **каблови 110 kV** са изолацијом од умреженог полиетилена, **типа ХНЕ 49-А**, који ће убудуће да се користе као типско решење у дистрибутивној мрежи 110 kV (ТП-3/2012), **имају мале вредности редукционог фактора** (табела 5): $r \leq 0,2$ због великог пресека електричних заштита снопа три једножилна кабла (70 mm^2 Си или 95 mm^2 Си по жили).

Приближно исту (ниску) вредност редукционог фактора имају и каблови 110 kV са папирном изолацијом и алуминијумским плаштом, док папирни каблови 110 kV са оловним плаштом имају релативно велике вредности редукционог фактора (табела 5): $r \leq 0,35$. Даља анализа се изводи за обе вредности.

Укупна отпорност (импеданса) система уземљења Z_u ТС 110/X kV прорачунава се помоћу израза:

$$\frac{1}{Z_u} = \frac{1}{R_z} + \frac{1}{Z_k} + \frac{1}{Z_v} \tag{18}$$

где је:

R_z - отпорност распрострања уземљивача ТС 110/X kV, у $[\Omega]$;

Z_k - укупна отпорност (импеданса) уземљења каблова "X" kV, у $[\Omega]$;

Z_v - укупна отпорност (импеданса) уземљења заштитних проводника водова 110 kV, у $[\Omega]$.

Отпорност распрострања R_z $[\Omega]$ мрежастог уземљивача ТС 110/X kV прорачунава се помоћу израза (табела 2):

$$R_z = \frac{\rho}{2 \cdot D} + \frac{\rho}{L} = \frac{0,44 \cdot \rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L} \tag{19}$$

где је L [m] укупна дужина елемената уземљивача, а D [m] пречник хоризонталне кружне плоче чија је површина једнака површини S [m²] коју захвата мрежаста уземљивач.

Први члан у изразу (19) представља отпорност распрострања округле плоче на површини тла (табела 2), док се другим чланом обухвата повећање отпорности распрострања због непопуњености мрежастог уземљивача. Међутим, темељни уземљивач ТС, арматура носача апарата и уређаја, присуство других металних инсталација, а посебно густе **сплет каблова са проводним плаштом, омогућавају да се израз (19) претстави само првим чланом**, као кружна плоча на површини тла, Табела 2.

а) СН мрежа изведена кабловима са проводним плаштом (NPO 13-A)

Усваја се најтежи случај да се прва ТС X/0,4 kV налази на око 200 m од изворне ТС, тако да је коефицијент изношења потенцијала: $k_i \approx 0,4$.

У примеру 4 објашњен је поступак прорачуна ефекта кабла "X" kV са проводним плаштом на систем уземљења ТС X/0,4 kV. Много сложенији је проблем прорачуна укупног ефекта свих каблова "X" kV на уземљивачки систем ТС 110/X kV. Наиме, **плашт NPO кабла се понаша као елемент уземљивача ТС, али и повезује уземљиваче ТС X/0,4 kV**. За практичне прорачуне може да се узме да се изван површине коју обухвата наменски изведен мрежаста уземљивач, плашт кабла понаша као тракасти уземљивач у дужини "кратког" кабла L_k , израз (12), Пошто је на ТС прикључен веома велики број каблова који густо прекривају површину око ТС, ефекат свих каблова може да се прикаже тако да се димензије мрежастог уземљивача прошире за L_k у свим правцима [3]. У овом примеру је:

$$L_k \approx 10 \cdot \sqrt{\rho} = 10 \cdot \sqrt{40} = 63 \text{ m},$$

па би еквивалентна површина уземљивача ТС износила:

$$S = (40 + 2 \cdot L_k) \cdot (36 + 2 \cdot L_k) = (40 + 2 \cdot 63) \cdot (36 + 2 \cdot 63) = 26.892 \text{ m}^2.$$

Уношењем ове вредности у израз (19) добија се:

$$R_z \approx \frac{0,44 \cdot \rho}{\sqrt{S}} = \frac{0,44 \cdot 40}{\sqrt{26892}} = 0,107 \text{ } \Omega.$$

Ефекат плашта NPO кабла као уземљивача због повезивања са уземљивачима суседних ТС може да се прикаже тако да се кабл третира као "дугачак". Међутим, због међусобног утицаја ("екранирање") плаштова каблова (полагање више каблова у исти ров и сл.) **на систем уземљења ТС битно утичу каблови који се простиру у различитим правцима**. За практичне прорачуне, због сигурности, узима се да само 4 до 6 каблова утиче на систем уземљења, при чему мањи број одговара малим вредностима специфичне електричне отпорности тла. У нашем примеру за $\rho = 40 \text{ } \Omega\text{m}$ се усваја $n = 4$, па се сагласно изразу (14) добија:

$$Z_k \approx \frac{R_{kd}}{n} = \frac{0,075 \cdot \sqrt{40}}{4} = 0,12 \text{ } \Omega.$$

Кабловски вод 110 kV чини сноп три једножилна кабла са непроводним плаштом типа ХНЕ 49-А. Због великог пресека електричне заштите и чињенице да се на другом крају вода налази ТС Y/110 kV или ТС 110/X kV са веома малом вредношћу импедансе система уземљења, отпорност распростирања кабла 110 kV као уземљивача ТС 110/10(20) kV је такође мала, по правилу: **$Z_v \leq 0,2 \text{ } \Omega$** .

Увршћењем добијених вредности за R_z , Z_k и Z_v у израз (18) добија се да вредност укупне импедансе система уземљења ТС 110/X kV износи: **$Z_u \approx 0,044 \text{ } \Omega$** .

На крају **добија се да се при земљоспоју на сабирницама 110 kV у ТС 110/X kV, у првој ТС X/0,4 kV према изразу (16) појављује напон:**

$$U_{ui} = k_i \cdot r \cdot I_k \cdot Z_u = 0,4 \cdot 0,35 \cdot 17600 \cdot 0,044 = 108 \text{ V} < 300 \text{ V},$$

($U_{u1} \approx 62 \text{ V}$ за $r = 0,2$) што значи: **нема опасности од изнетог потенцијала и нема потребе за предузимањем неких додатних заштитних мера, независно од типа кабловског вода 110 kV**.

Може да се одреди и **гранична вредност струје земљоспоја I_{kg} при којој нема опасности од изнетог потенцијала**, при чему се рачуна да специфична отпорност тла износи: $\rho = 100 \text{ } \Omega\text{m}$, из чега произлази: $R_z = 0,176 \text{ } \Omega$ и $Z_u = 0,063 \text{ } \Omega$:

$$I_{kg} = \frac{U_{u1}}{k_i \cdot r \cdot Z_u} = \frac{300}{0,4 \cdot 0,35 \cdot 0,063} = 34 \text{ kA}, \text{ односно: } I_{kg} = 59,5 \text{ kA за } r = 0,2.$$

То је изнад свих вредности које су реално могуће у дистрибутивној мрежи 110 kV Србије, па се може извести општи закључак: **нема опасности од изношења потенцијала из ТС 110/X kV која ради у кабловској мрежи 110 kV и напаја разгранату СН мрежу изведену кабловима са проводним плаштом**, што се и даје у тачки 7.1 ТП-7.

б) СН мрежа изведена кабловима са непроводним плаштом (ХНЕ 49-А)

У примеру 3 објашњен је поступак прорачуна ефекта кабла са непроводним плаштом у систему уземљења ТС 110/X kV и ТС X/0,4 kV. Ови каблови не учествују као елементи уземљивача ТС, али зато преко електричних заштита повезују уземљиваче ТС. Пошто **код ових каблова практично нема "екранирања"**, у просечним условима се може узети да је **бар 8 каблова ефективно укључено у систем уземљења ТС 110/X kV**. Многи од тих кабловских водова се завршавају у другој ТС 110/X kV. Ако се усвоји да 4 кабла "доносе" приближно по 1 Ω и 4 кабла приближно по 0,5 Ω, добија се **вредност еквивалентне импедансе Z_k каблова "X" kV у систему уземљења ТС 110/X kV**:

$$Z_k = \frac{0,25 \cdot 1 \cdot 0,25 \cdot 0,5}{0,25 \cdot 1 + 0,25 \cdot 0,5} = 0,083 \text{ } \Omega.$$

Отпорност распрострањања R_z мрежастог уземљивача ТС према изразу (19) износи:

$$R_z \approx \frac{0,44 \cdot \rho}{\sqrt{S}} = \frac{0,44 \cdot 40}{\sqrt{40 \cdot 36}} = 0,46 \text{ } \Omega.$$

Како је $Z_v = 0,2 \text{ } \Omega$, уношењем вредности за R_z , Z_k и Z_v у израз (18), добија се **вредност импедансе система уземљења: $Z_u = 0,052 \text{ } \Omega$** .

У овом примеру, преко израза (16) може да се прорачуна коефицијент k_i који одговара претходно прорачунатим параметрима:

$$k_i = \frac{U_{u1}}{r \cdot I_k \cdot Z_u} = \frac{300}{0,35 \cdot 17600 \cdot 0,052} = 0,94$$

па према Табели 8 излази да чак **ни за ванградско подручје нема опасности од изнетог потенцијала и нема потребе за предузимањем додатних заштитних мера**.

Може да се одреди и **гранична вредност струје земљоспоја I_{kg} при којој нема опасности од изнетог потенцијала**, рачунајући са следећим параметрима:

- $\rho = 100 \text{ } \Omega\text{m}$, из чега произлази: $R_z = 1,16 \text{ } \Omega$ и $Z_u = 0,056 \text{ } \Omega$;
- $k_i \approx 0,6$ што би одговарало просечним условима у урбанизованом делу насеља, односно $k_i \approx 0,85$ за случај напајања СН СКС-ом типа ХНЕ 48/О-А;
- струја земљоспоја се искључује у времену $t = 0,5 \text{ s}$ (без заштите сабирница 110 kV):

$$I_{kg} = \frac{U_{u1}}{k_i \cdot r \cdot Z_u} = \frac{300}{0,6 \cdot 0,35 \cdot 0,056} = 25,5 \text{ kA}, \text{ односно } I_{kg} = 18 \text{ kA за } k_i \approx 0,85.$$

Ако је кабловски вод 110 kV типа ХНЕ 49-А који има: $r \approx 0,2$ добија се: $I_{kg} = 44,6 \text{ kA}$ за $k_i \approx 0,6$ и $I_{kg} = 31,5 \text{ kA}$ за $k_i \approx 0,85$.

На основу изведене анализе може да се изведе закључак: **нема опасности од изношења потенцијала из ТС 110/X kV која ради у кабловској мрежи 110 kV и напаја разгранату СН мрежу (градски конзум) изведену кабловима са непроводним плаштом**.

Пример 8: Опасност од изношења потенцијала у надземној мрежи 110 kV

ТС 110/X kV ("X" = 10 kV, 20 kV) **ради у надземној мрежи 110 kV**. Димензије мрежастог уземљивача ТС су 60 m x 40 m. **Одредити граничне вредности струје земљоспоја у мрежи 110 kV при којима нема опасности од изношења потенцијала:**

- a) **ТС напаја разгранату мрежу "X" kV изведену кабловима са проводним плаштом (NPO 13-A);**
- b) **ТС напаја разгранату мрежу "X" kV изведену кабловима са непроводним плаштом (XHE 49-A).**

Решење:

Редукциони фактор надземног вода 110 kV са заштитним проводником од челика износи: $r \approx 0,92$. Залагања појединих аутора да се заштитни проводник на најмање 5-6 распона од ТС изведе од боље проводног материјала (E-AlMgSi0,5 и сл.) или да се стубови повежу уземљивачима није прихваћено.

Отпорност распростирања заштитног проводника надземног вода износи $Z_v \approx 1,5$ до $Z_v \approx 2,5 \Omega$ што је више од десет пута већа вредност од отпорности распростирања коју "доносе" каблови прикључени на ТС 110/X kV. За даљи прорачун се усваја: $Z_v = 2 \Omega$.

a) СН мрежа изведена кабловима са проводним плаштом (NPO 13-A)

У примеру 7.а објашњен је поступак прорачуна ефекта СН каблова са проводним плаштом на систем уземљења ТС 110/X kV.

Гранична вредност струје земљоспоја до које није потребно предузимање додатних мера од изношења потенцијала, за случај да се земљоспој на сабирницама 110 kV искључује у времену $t = 0,5$ s деловањем другог степена дистантне заштите, израз (16), износи:

$$I_k = \frac{U_{u1}}{k_1 \cdot r \cdot Z_u} = \frac{300}{0,4 \cdot 0,92 \cdot Z_u} = \frac{815,2}{Z_u}$$

У Табели 9 дати су резултати прорачуна за неке карактеристичне вредности специфичне електричне отпорности тла, при чему су вредности за R_z и Z_k добијене према поступку из примера 7.а. Отпорност распростирања R_k плаштова каблова добијена је усвајањем броја "дугачких" каблова: $n = 4$ за $\rho < 60 \Omega m$ и $n = 5$ за $\rho \geq 60 \Omega m$.

Табела 9: Граничне вредности струја земљоспоја I_k у мрежи 110 kV

ρ [Ωm]	R_z [Ω]	Z_k [Ω]	Z_v [Ω]	Z_u [Ω]	I_k [A]
20	0,063	0,084	2	0,035	23062
40	0,100	0,119	2	0,053	15431
60	0,129	0,116	2	0,059	13752
80	0,154	0,134	2	0,069	11815
100	0,176	0,150	2	0,078	10474

Како су просечне вредности специфичне електричне отпорности тла на просторима где се лоцирају дистрибутивне ТС 110/10(20) kV у Србији обично мање од 60 Ωm , **тешкоће код третирања проблема изношења потенцијала могу се реално очекивати ако струје земљоспоја прелазе 14 kA до 15 kA**. У том случају треба обавити тачнији прорачун и анализирати могуће опасности од изнетог потенцијала на појединим објектима, посебно на објектима НН мреже који се напајају из првих ТС X/0,4 kV.

Као провера ваљаности изведене анализе и прорачуна служе мерења импедансе система уземљења Z_u ТС 110/10(20) kV, односно мерења напона уземљења U_{u1} код ТС X/0,4 kV које се налазе у близини ТС 110/10(20) kV и упоређење са прорачунатим вредностима. Досадашње **искуство** са таквим мерењима **показује да** у стварним

условима **измерене величине често имају ниже вредности од прорачунатих**, посебно када је реч о потенцијалним разликама додира и импеданси система уземљења. **То је пре свега резултат подизања потенцијала тла због присуства многих металних инсталација и каблова чији ефекат није укључен у прорачун, и песимистичког податка о броју "дугачких" каблова као уземљивача.**

Као илустрацију наводимо податке из студијских мерења описаних у [5], а односе се на ТС 110/10 kV "Славија", у центру Београда. За $\rho = 20 \Omega\text{m}$, што је типично за градске услове због постојећих металних инсталација у тлу, **прорачуном је добијена импеданса система уземљења: $Z_u = 0,032 \Omega$** (у овом примеру, при сличним условима, добили смо $Z_u = 0,035 \Omega$, Табела 9), **што је за 60 % већа вредност од измерене, која је износила $Z_u = 0,020 \Omega$.**

Посебан значај ових мерења је у томе што су мерења свих параметара битних за систем уземљења, укључујући и мерења напона додира због изношења потенцијала, вршена како са сведеним, тако и са реалним струјама земљоспоја прављењем металног земљоспоја на 110 kV страни у ТС 110/10 kV, па су ова мерења била недвосмислени доказ претходних теоретских разматрања објављених у [3]. Међутим, због присуства многих фактора који се у прорачунима тешко могу вредновати, ипак је при пројектовању оправдан опрезнији приступ и поред осетне разлике између прорачунате и измерене вредности за Z_u .

Проблем изношења потенцијала би могао да се реши коришћењем диференцијалне високоимпедантне заштите сабирница 110 kV, чиме се трајање земљоспоја ограничава на 0,15 s, па дозвољени напон уземљења у првој ТС X/0,4 kV износи $U_{ut} = 1000 \text{ V}$, што значи да у том случају вредности за струје I_k из табеле 8 треба помножити са 3,3, па се за струје земљоспоја добијају вредности које су изнад вредности које су реално могуће у дистрибутивној мрежи 110 kV Србије. Тако се и у овом случају може извести општи закључак: нема опасности од изношења потенцијала из ТС 110/X kV која ради у надземној мрежи 110 kV и напаја разгранату СН мрежу изведену кабловима са проводним плаштом, под условом да се земљоспој на сабирницама 110 kV искључује за највише 0,15 s, што се и даје у тачки 7.1 ТП-7.

б) СН мрежа изведена кабловима са непроводним плаштом (ХНЕ 49-А)

У примеру 7.б објашњен је поступак прорачуна ефекта СН каблова са непроводним плаштом на систем уземљења ТС 110/X kV. Из табеле 7 се види да коефицијент k_i има веома велике вредности ако се из ТС 110/X kV напаја само једна ТС X/0,4 kV. Међутим, пошто је ово за дистрибутивну праксу изузетак, економски је неоправдано димензионисати систем уземљења ТС према том критеријуму. Зато се из табеле 7 коефицијент k_i бира под претпоставком да се преко сваког извода "X" kV напајају бар две ТС X/0,4 kV, док се изузеци са једном ТС појединачно анализирају и предузимају одговарајуће додатне заштитне мере, као: провера изједначености потенцијала у објектима који се напајају из те ТС, изоловање електричне заштите кабла у односу на систем уземљења ТС 110/X kV и сл. У примеру који се овде обрађује **прорачун се изводи са средњим вредностима: $k_i \approx 0,6$** што би одговарало просечним условима у урбанизованом делу насеља, односно **изузетно: $k_i \approx 0,85$** за случај напајања СКС-ом типа ХНЕ 48/О-А.

Граничне вредности струја земљоспоја до којих није потребно предузимање додатних мера од изношења потенцијала, за случај да се земљоспој на сабирницама 110 kV искључује у времену $t = 0,5 \text{ s}$ деловањем другог степена дистантне заштите, приказује се у Табели 10, при чему су вредности за R_z и Z_k добијене према поступку из примера 7.б.

Табела 10: Граничне вредности струја земљоспоја I_k у мрежи 110 kV

ρ [Ω m]	R_z [Ω]	Z_k [Ω]	Z_v [Ω]	Z_u [Ω]	I_k [A]	
					$k_i = 0,6$	$k_i = 0,85$
20	0,18	0,083	2	0,055	9812	6927
40	0,36	0,083	2	0,065	8303	5861
60	0,54	0,083	2	0,069	7800	5506
80	0,72	0,083	2	0,072	7548	5328
100	0,90	0,083	2	0,073	7397	5222

Пошто у пракси треба очекивати да струја земљоспоја у мрежи 110 kV често буде изнад вредности из табеле 10, проблем изношења потенцијала треба појединачно да се разматра за сваки конкретан случај и предузму одговарајуће додатне мере, тачка 7.6 у ТП-7. Од ових мера поједине дистрибуције често користе решење да се при полагању кабла, на неколико праваца који повезују ТС 110/X kV са првом ТС X/0,4 kV, у исти ров полаже и бакарно уже, које тако постаје елемент уземљивачких система обеју ТС које повезује.

У случају примене заштите сабирница 110 kV проблем се значајно поједностављује јер у том случају вредности за струје I_k из табеле 10 треба помножити са 3,3. Тако може да се изведе закључак: нема опасности од изношења потенцијала из ТС 110/X kV која ради у надземној мрежи 110 kV и напаја разгранату СН мрежу (градски конзум) изведену кабловима са непроводним плаштом, под условом да се земљоспој на сабирницама 110 kV искључује за највише 0,15 s и под условом да се преко сваког извода "X" kV напајају најмање две ТС X/0,4 kV.

Треба на крају рећи да је претходна анализа проблема изношења потенцијала изведена за услове рада мреже 110 kV који су сада присутни код нас. **Примена микропроцесорских уређаја релејне заштите скратиће време трајања земљоспоја у мрежи 110 kV и осетно смањити опасност од изношења потенцијала из ТС 110/X kV.**

На пример: смањење времена деловања другог степена дистантне заштите са $t = 0,5$ s (овом времену одговара $U_{doz} = 150$ V и $U_{u1} = 300$ V) на $t = 0,4$ s ($U_{doz} = 187,5$ V и $U_{u1} = 375$ V), према изразима (17) и (16) повећава за 25 % граничне вредности струја земљоспоја (табеле 8 и 9) до којих није потребно предузимање додатних мера заштите од изношења потенцијала.

Да би претходно изведена анализа била до краја коректна, мора да се укаже и на могућност "негативних изненађења", која су могућа ако се нека ТС 110/10(20) kV активира са веома малим бројем прикључених каблова 10 kV или 20 kV. Како импеданса система уземљења ТС према табелама 8 и 9 доминантно зависи од броја прикључених каблова, при активирању ТС у таквим условима мерењем може да се добије вредност већа од пројектоване. Како се у прорачунима за нове објекте узимају перспективне вредности струје земљоспоја од 10 година, може према изразима (16) и (17) да се покаже да нису задовољени услови безбедности због изношења потенцијала.

Зато се у тачки 7.7 ТП-7 утврђује да на систем уземљења ТС 110/10(20) kV треба већ на почетку експлоатационог века ТС да буде прикључено најмање пет каблова 10 kV или 20 kV са провоним плаштом, односно најмање осам каблова са непроводним плаштом, при чему није битно да ли су сви каблови под напоном. Као практична могућност да се у неким изузетним случајевима одступи од овог захтева може привремено, до момента прикључења више кабловских водова, да се провера услова безбедности врши према стварној, а не перспективној, струји земљоспоја у мрежи 110 kV, с тим што се после прикључења више каблова мора поновити мерење да би се потврдио прорачун о задовољењу услова безбедности и на перспективну струју земљоспоја.

Литература:

- [1] Правилник о техничким нормативима за уземљења електроенергетских постројења називног напона изнад 1000 V (Сл. лист СРЈ бр. 61/1995.).
- [2] Правилник о техничким нормативима за заштиту НН мрежа и припадајућих ТС (Сл. лист СФРЈ бр. 13/1978.), са изменама и допунама Правилника објављеним у Сл. листу СРЈ бр. 37/1995.
- [3] др Јован Нахман: Уземљење неутралне тачке дистрибутивне мреже (уџбеник, 1980.)
- [4] др Драган Тасић: "Основи електроенергетске кабловске технике" (уџбеник, 2001.)
- [5] др Јован Нахман: Експериментална анализа система уземљења ТС 110/10 kV "Филмски град" и "Славија" и смернице за пројектовање система уземљења градских ТС 110/10 kV (1981.).
- [6] В. Балковој: "О ефектима полагања линеичних уземљивача у истом рову са 20 kV полиетиленским кабловима" (Прво саветовање ЈУКО CIREД, 1998.)
- [7] Т. Бојковић, др М. Танасковић, мр Б. Рибар-Брајић: Избор електричне заштите једножилних каблова у 110 kV дистрибутивној мрежи (ЈУКО CIGRE, 2002).
- [8] В. Балковој, М. Танасковић: "Прорачун уземљивачких ефеката каблова са изолованим плаштевима применом елементарне теорије четворопола", "Електродистрибуција", бр.1-2, 1999. год.
- [9] HD 637 и DIN VDE 0101: "Starkstromanlagen mit Nennspannungen ueber 1 kV", 1999.
- [10] М. Танасковић, Т. Бојковић и Д. Перић: "Дистрибуција електричне енергије", Академска мисао, Београд, 2007. године.
- [11] Т. Бојковић, М. Танасковић и Д. Перић: "Дистрибуција електричне енергије - решени примери", Академска мисао, Београд, 2009.